

Nghiên cứu và thử nghiệm robot di động bám quỹ đạo dùng giải thuật Pure Pursuit thích nghi

Nguyễn Ngọc Tuấn^{a*}, Châu Trung Tín^b, Lê Minh Phụng^c, Trần Hoàng Xuân Thắng^d,
Nguyễn Văn Toàn^e, Nguyễn Xuân Vinh^f

Tóm tắt:

Một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất của robot di động là bám quỹ đạo. Nhiệm vụ này nhằm duy trì sự ổn định của hướng di chuyển để đảm bảo đạt được một quỹ đạo chính xác. Bộ điều khiển dựa trên hình học tương đối phổ biến và được triển khai trên robot di động và xe tự hành, tiêu biểu có giải thuật Pure Pursuit. Trong bài báo này nhóm tác giả tập trung vào nghiên cứu mô hình động học và triển khai giải thuật Pure Pursuit thích nghi lên mô hình robot di động hai bánh độc lập. Giải thuật được mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/Simulink để đánh giá hiệu suất bám quỹ đạo thông qua các trường hợp khi thay đổi giá trị độ dài tiêu điểm và vận tốc. Kết quả mô phỏng được tổng hợp và đánh giá để làm cơ sở để đề xuất bộ điều khiển Pure Pursuit thích nghi vận tốc nhằm nâng cao hiệu suất của bộ điều khiển. Sau đó nhóm tác giả triển khai thiết kế và chế tạo một robot di động để đánh giá hiệu suất bám quỹ đạo của robot ở môi trường thực tế.

Từ khóa: robot di động, Pure Pursuit thích nghi, động học, bộ điều khiển dựa trên hình học, bám quỹ đạo

^a Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: tuannng1997@gmail.com

^b Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: tinct@vlute.edu.vn

^c Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: phunglm@vlute.edu.vn

^d Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: thangthx@vlute.edu.vn

^e Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: toannv@vlute.edu.vn

^f Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long; 73 Nguyễn Huệ, phường 2, thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long. e-mail: vinhnx@vlute.edu.vn

* Tác giả chịu trách nhiệm chính.

Research and Implement of Mobile Robot Using the Adaptive Pure Pursuit Algorithm

Nguyen Ngoc Tuan^{a*}, Chau Trung Tin^b, Le Minh Phung^c, Tran Hoang Xuan Thang^d,
Nguyen Van Toan^e, Nguyễn Xuân Vinh^f

Abstract:

One of the most important tasks of a mobile robot is trajectory tracking. This task is to maintain the stability of the movement direction to ensure a precise trajectory is achieved. Geometric-based controllers are relatively common and are deployed on mobile robots and autonomous vehicles, typically with the Pure Pursuit algorithm. In this paper, we focus on studying kinematics and deploying the adaptive Pure Pursuit algorithm on an independent two-wheeled mobile robot model. The algorithm is simulated using MATLAB/Simulink software to evaluate the trajectory tracking performance through the cases when changing the focal distance and velocity values. Simulation results are synthesized and evaluated to serve as a basis to propose a velocity-adaptive Pure Pursuit controller to improve the controller's performance. Then, design and build a mobile robot to evaluate the robot's trajectory tracking performance in the real environment.

Key words: *mobile robot; adaptive Pure Pursuit; kinematics; geometric-based controllers; trajectory tracking*

Received: 2.4.2023; Accepted: 15.9.2023; Published: 31.12.2023

DOI: 10.59907/daujs.2.4.2023.159

^a Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: tuannng1997@gmail.com

^b Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: tinct@vlute.edu.vn

^c Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: phunglm@vlute.edu.vn

^d Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: thangthx@vlute.edu.vn

^e Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: toannv@vlute.edu.vn

^f Vinh Long University of Technology and Education; 73 Nguyen Hue, Ward 2, Vinh Long City, Vinh Long Province. e-mail: vinhnx@vlute.edu.vn

* Corresponding Author.

Tổng quan

Robot di động được đã được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng kỹ thuật, công nghiệp và giáo dục (O. Yaseen Ismael, and J. Hedley, 2016). Một trong những yêu cầu chính của robot di động là khả năng tự di chuyển trong không gian hoạt động, tránh chướng ngại vật và tìm đường đến vị trí tiếp theo để thực hiện nhiệm vụ (T. T. Pham et al., 2021). Để di chuyển linh hoạt và ổn định robot cần có khả năng cơ động tốt, những khả năng này phụ thuộc chủ yếu vào thiết kế bộ điều khiển (Y. Liu et al., 2008). Trong những năm gần đây, do tầm quan trọng trong thực tế của robot di động, vấn đề điều khiển bám quỹ đạo đã thu hút rất nhiều nghiên cứu, tiêu biểu trong tài liệu (J. E. Normey-Rico et al., 2001) đã sử dụng bộ điều khiển PID bền vững để điều khiển robot bám quỹ đạo dựa trên mô hình robot di động cho phép điều chỉnh bộ điều khiển PID đơn giản. Ở tài liệu (A. E. S. B. Ibrahim, 2016) đã sử dụng bộ điều khiển trượt dựa trên việc chọn độ lợi hồi tiếp SMC cho từng điều kiện đầu vào khác nhau. Ở nghiên cứu (M. R. H. Al-Dahhan & M. M. Ali, 2016) đã sử dụng bộ điều khiển Fuzzy logic để điều khiển robot bám quỹ đạo. Các nghiên cứu chủ yếu điều khiển tín hiệu đầu vào dựa trên tín hiệu sai số ở đầu ra và xem robot như “*một hộp đen*” mà bỏ qua các quy luật chuyển động của robot. Các bộ điều khiển này thì ít bị ảnh hưởng bởi mô hình và có thể đáp ứng nhanh với sai lệch tuy nhiên việc điều khiển sẽ trở nên phức tạp và dễ mất ổn định (Y. Chen et al., 2018). Nghiên cứu này đề xuất một bộ điều khiển Pure Pursuit (PP) thích nghi, phương pháp này sử dụng mô hình chuyển động đơn giản của robot để tạo ra mối quan hệ hình học giữa robot và quỹ đạo. Phương pháp hình học có ưu điểm dễ dàng kết hợp và đáng tin cậy hơn (J. Morales et al., 2009).

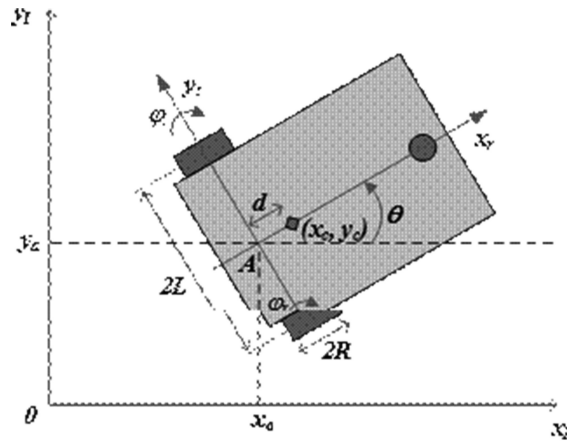
Để đánh giá hiệu quả của giải thuật PP thích nghi, trong nghiên cứu này tác giả khai thác mô hình động học của robot di động hai bánh chủ động. Trên cơ sở đó triển khai giải thuật PP thích nghi lên mô hình thực tế để đánh giá hiệu suất của bộ điều khiển thông qua tiêu chí độ vọt lố và độ ổn định của quỹ đạo robot. Nghiên cứu được trình bày lần lượt thông qua các phần:

- Cấu hình và động học của robot di động hai bánh
- Triển khai giải thuật Pure Pursuit
- Đánh giá hiệu suất của thuật toán thông qua mô hình thực nghiệm

Mô hình hóa robot

Cấu hình robot

Trong bài báo này sử dụng cấu trúc robot di động hai bánh chủ động được mô tả như Hình 1. Robot được trang bị hai bánh với hai động cơ độc lập, cấu trúc robot gồm khung xe với hai bánh xe dẫn động được lắp vào khung và một bánh xe đa hướng tự do được lắp vào để làm điểm tựa.



Hình 1. Cấu hình robot với hai bánh chủ động

Mô hình động học

Mô hình hóa động học là nghiên cứu về chuyển động của các hệ thống cơ học mà không tính đến các lực ảnh hưởng đến chuyển động (B. Sandeep Kumar Malu, et al., 2014). Đối với robot di động hai bánh, mục đích chính của mô hình động học là biểu diễn vận tốc của robot dưới dạng hàm vận tốc của bánh xe dẫn động cùng với các thông số hình học của robot. Vận tốc bánh xe là tuyến tính, do đó vận tốc tuyến tính của robot chính là trung bình vận tốc tuyến tính của hai bánh xe.

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = R \frac{\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L}{2} \quad (1)$$

và vận tốc góc của robot là:

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2L} = R \frac{\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L}{2L} \quad (2)$$

Vận tốc có thể được biểu diễn theo vận tốc của điểm A trong khung robot như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_a^r = R \frac{\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L}{2} \\ \dot{y}_a^r = 0 \\ \dot{\theta} = R \frac{\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L}{2L} \end{cases} \quad (3)$$

Như vậy:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

Vận tốc robot cũng thu được trong khung quán tính như sau:

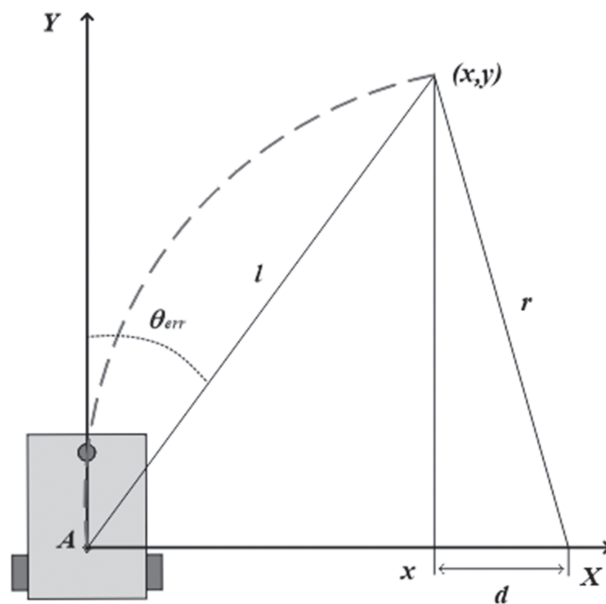
$$\dot{q}^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \theta & \frac{R}{2} \cos \theta \\ \frac{R}{2} \sin \theta & \frac{R}{2} \sin \theta \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

Phương trình (5) trình bày mô hình động học thuận của robot. Mô hình động học cũng có thể viết dưới dạng biểu diễn vận tốc theo vận tốc dài và vận tốc góc của robot.

$$\dot{q}^I = \begin{bmatrix} \dot{x}_a^r \\ \dot{y}_a^r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

Triển khai giải thuật Pure Pursuit thích nghi

Bộ điều khiển Pure Pursuit là phương pháp bám quỹ đạo phổ biến của robot tự hành, thuật toán này triển khai phương pháp tính toán vòng cung cần thiết để đưa robot trở lại quỹ đạo đúng. Bộ điều khiển Pure Pursuit tính toán độ cong sẽ di chuyển của phương tiện từ vị trí của robot đến vị trí mục tiêu (A. Abdelmoniem, et al., 2022). Trọng tâm của thuật toán là chọn các điểm mục tiêu trên quỹ đạo đường đi của robot và thuật toán sẽ lặp lại liên tục với các điểm mục tiêu kế tiếp nhau trên quỹ đạo. Bộ điều khiển Pure Pursuit được trình bày ở Hình 2 với quỹ đạo cần bám (bên phải) và tính toán độ cong (bên trái).



Hình 2. Mô hình hình học của giải thuật Pure Pursuit

Gọi điểm (x, y) là tiêu điểm cách điểm góc một khoảng l và nằm trên quỹ đạo định trước. Mục tiêu của thuật toán Pure Pursuit là tìm độ cong cung nối từ điểm gốc đến tiêu điểm. Từ Hình 2 suy ra:

$$x^2 + y^2 = l^2 \quad (7)$$

Tổng hai đoạn thẳng trên trục x , ta có:

$$x + d = r \quad (8)$$

Phương trình (7) mô tả đường tròn bán kính l từ gốc tọa độ. Đây là quỹ tích của các điểm mục tiêu phù hợp cho robot.

Phương trình (8) mô tả mối quan hệ tương đối giữa các điểm của cung nối điểm gốc tới điểm mục tiêu và độ lệch x của điểm mục tiêu so với robot. Bán kính cung tròn và độ lệch x là độc lập và cách nhau một khoảng d .

Mặt khác, từ Hình 2 suy ra được mối quan hệ giữa độ cong cung và tiêu điểm:

$$d^2 + y^2 = r^2 \quad (9)$$

Biến đổi từ phương trình (8)

$$d = r - x \quad (10)$$

Thay phương trình (8) vào phương trình (9)

$$(r - x)^2 + y^2 = r^2 \quad (11)$$

$$x^2 + y^2 = 2rx \quad (12)$$

Độ cong của cung " γ ":

$$\gamma = \frac{1}{r} \quad (13)$$

Kết hợp phương trình (7) và (12)

$$2rx = l^2 \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{l^2}{2x} \quad (15)$$

Hệ thức tính độ cong của cung

$$\gamma = \frac{2x}{l^2} \quad (16)$$

Công thức có liên quan đến độ lệch x từ điểm gốc đến điểm mục tiêu bằng bình phương nghịch đảo của độ dài tiêu điểm. Và giải thuật Pure Pursuit là một bộ điều khiển tỷ lệ hoạt động dựa trên sai lệch (θ_{err}) giữa hướng của robot hiện tại đến điểm mục tiêu trên quỹ đạo.

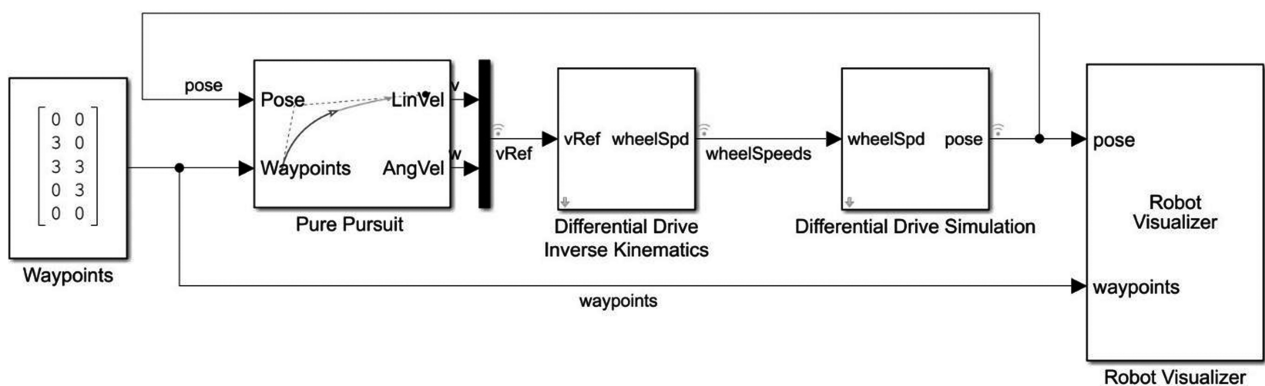
Từ Hình 2, có thể suy ra sai lệch được tính bằng phương trình:

$$\sin(\theta_{err}) = \frac{x}{l} \quad (17)$$

Vì vậy, đối với các sai lệch hướng nhỏ, $\theta_{err} \cong \frac{x}{l}$, và độ cong của cung được tính:

$$\gamma = \frac{2 \theta_{err}}{l} \quad (18)$$

Theo phương trình (18) phương sai duy nhất của độ cong là độ dài tiêu điểm. Việc chỉ có một phương sai giúp thuật toán triển khai thuận tiện và điều chỉnh hơn. Hiệu suất bám của giải thuật được đánh giá thông qua mô phỏng bằng phần mềm MATLAB Simulink được trình bày ở Hình 3.



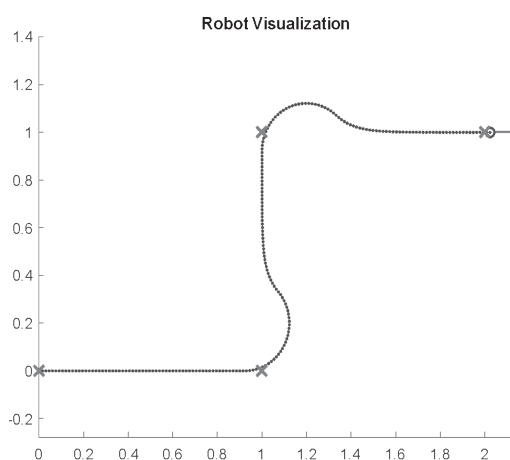
Hình 3. Mô phỏng thuật toán Pure Pursuit

Mô phỏng được triển khai với thông số độ dài tiêu điểm và thay đổi, kết quả được trình bày ở Hình 4. Mô phỏng được đánh giá dựa trên các thông số như sau:

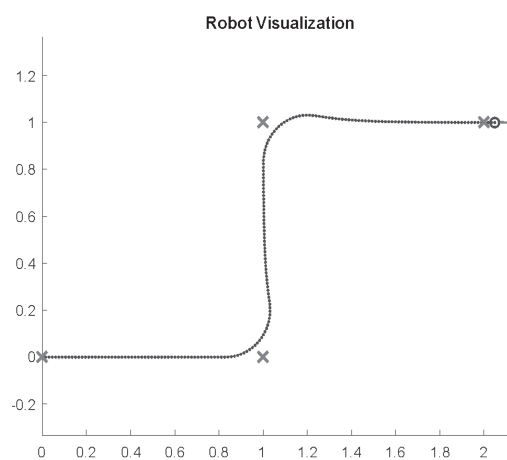
- + Độ vọt lố: khoảng cách quỹ đạo robot thực tế vượt khỏi quỹ đạo tham chiếu
- + Độ cắt góc: khoảng cách lớn nhất giữa quỹ đạo thực tế đến góc vuông của quỹ đạo tham chiếu.

Thông qua việc đánh kết quả ở Hình 4a, Hình 4b, Hình 4c nhận thấy rằng: với độ dài tiêu điểm nhỏ (Hình 4a) giúp robot đạt đến điểm mục tiêu đã định trước nhưng lại gây mất ổn định khi gặp quỹ đạo cong với biên độ sai lệch cực đại lớn (vượt quá quỹ đạo 0,12 m). Ngược lại đối với độ dài tiêu điểm lớn (Hình 4c) giúp robot vượt qua các quỹ đạo cong ổn định hơn. Tuy nhiên lại gây ra hiện tượng “cắt góc”, biên độ sai lệch cực đại là 0,108 m. Do đó, yếu tố chọn được khoảng tiêu điểm thích hợp (Hình 4b) nhằm cân bằng giữa độ ổn định và độ bám quỹ đạo (biên độ sai lệch cực đại 0,04 m) sẽ giúp robot có hiệu suất bám quỹ đạo tốt nhất. Song, độ dài tiêu điểm không ảnh hưởng quá nhiều đến thời gian hoàn thành quỹ đạo (chênh lệch xấp xỉ 1 giây giữa các trường hợp). Bên cạnh yếu tố độ dài tiêu điểm,

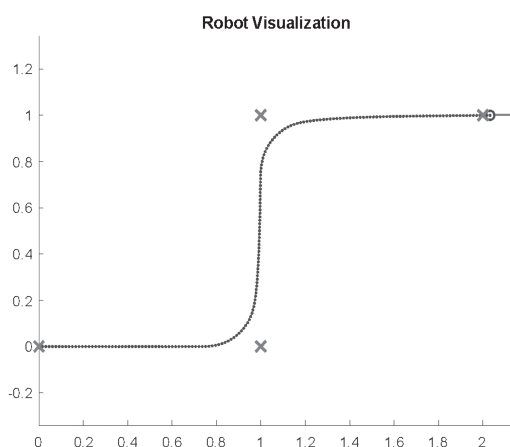
nếu xét yếu tố động lực học robot còn bị ảnh hưởng bởi yếu tố vận tốc. Do đó, cần có một vận tốc thích hợp khi robot di chuyển ở những quỹ đạo, xét kết quả mô phỏng ở Hình 4d, Hình 4e, Hình 4f nhận thấy rằng khi robot di chuyển ở vận tốc càng nhỏ sẽ càng ổn định (Hình 4d), biên độ sai lệch cực đại nhỏ 0,04 m tuy nhiên robot lại mất đến 29 giây để hoàn thành quỹ đạo. Ngược lại, nếu robot di chuyển ở vận tốc lớn (Hình 4f) sẽ gây ra biên độ sai lệch lớn 0,21 m và mất ổn định khi qua các quỹ đạo cong tuy nhiên thời gian hoàn thành quỹ đạo nhanh chóng (8,5 giây). Tương tự như yếu tố độ dài tiêu điểm, việc lựa chọn một tốc độ thích hợp (Hình 4e) sẽ giúp robot có hiệu suất bám quỹ đạo tốt hơn với biên độ sai lệch cực đại nhỏ (0,045 m). Yếu tố vận tốc có ảnh hưởng trực tiếp đến khoảng thời gian hoàn thành quỹ đạo.



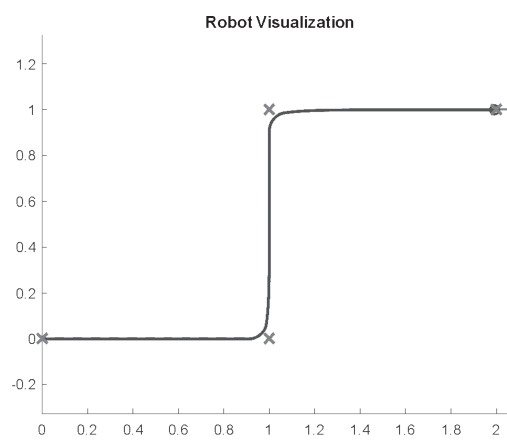
Hình 4a. Độ dài tiêu điểm $l = 0,1$ (m); Vận tốc $v = 0,3$ (m/s)
Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 10,5 (giây)
Biên độ sai lệch cực đại: 0,12 (m)



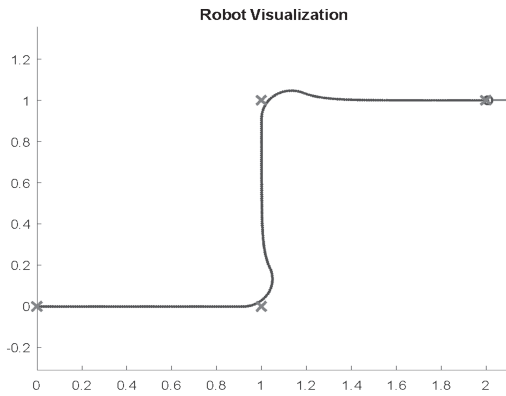
Hình 4b. Độ dài tiêu điểm $l = 0,2$ (m); Vận tốc $v = 0,3$ (m/s)
Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 9,8 (giây)
Biên độ sai lệch cực đại: 0,04 (m)



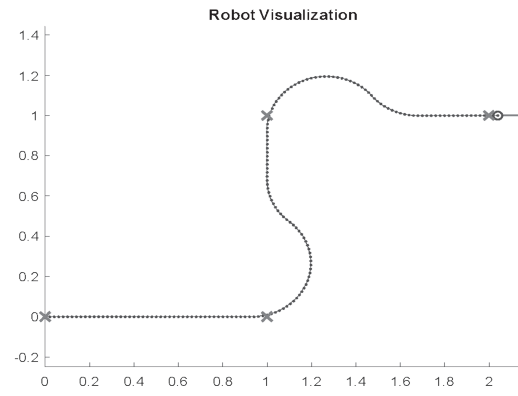
Hình 4c. Độ dài tiêu điểm $l = 0,3$ (m); Vận tốc $v = 0,3$ (m/s)
Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 9,3 (giây)
Biên độ sai lệch cực đại: 0,018 (m)



Hình 4d. Độ dài tiêu điểm $l = 0,1$ (m); Vận tốc $v = 0,1$ (m/s)
Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 29 (giây)
Biên độ sai lệch cực đại: 0,04 (m)



Hình 4e. Độ dài tiêu điểm $l = 0,1$ (m); Vận tốc $v = 0,2$ (m/s)
 Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 15 (giây)
 Biên độ sai lệch cực đại: 0,045 (m)



Hình 4f. Độ dài tiêu điểm $l = 0,1$ (m); Vận tốc $v = 0,4$ (m/s)
 Thời gian hoàn thành quỹ đạo: 8.5 (giây)
 Biên độ sai lệch cực đại: 0,21 (m)

Hình 4. Kết quả mô phỏng các trường hợp của thuật toán Pure Pursuit

Độ dài tiêu điểm và vận tốc chính là hai yếu tố chính tác động đến hiệu suất bám quỹ đạo của robot. Trong quá trình di chuyển, độ dài tiêu điểm là không đổi tuy nhiên yếu tố vận tốc có thể thay đổi để thích nghi theo từng đoạn quỹ đạo (quỹ đạo càng cong thì vận tốc càng giảm). Do đó để tăng hiệu suất bám quỹ đạo cũng như đảm bảo về mặt thời gian hoàn thành quỹ đạo, robot cần có vận tốc thích nghi với từng đoạn quỹ đạo.

Gọi vận tốc ở mỗi đoạn quỹ đạo là vận tốc mục tiêu mà robot phải đạt được. Vận tốc tối đa tại các điểm sẽ phụ thuộc vào độ cong của đoạn các điểm mục tiêu, độ cong càng nhiều thì vận tốc càng giảm nhằm đảm bảo tính ổn định của robot khi di chuyển.

Vận tốc của robot phụ thuộc vào vận tốc của hai bánh xe, do đó độ cong di chuyển của robot được điều chỉnh thông qua việc điều chỉnh tốc độ bánh xe trái và phải của robot. Để tính toán tốc độ mục tiêu của bánh xe trái và bánh xe phải để robot bám được độ cong chính xác. Vận tốc mục tiêu của bánh xe được xác định thông qua các hệ thức với V là vận tốc mục tiêu của robot, V_L là vận tốc bánh xe trái, V_R là vận tốc bánh xe phải, $\tilde{\alpha}$ là độ cong cung, $\tilde{\gamma}$ là góc quay của robot, T là độ rộng khung robot.

Phương trình động học của robot 2 bánh chủ động:

$$V = \frac{V_L + V_R}{2} \quad (19)$$

$$\omega = \frac{V_L - V_R}{T} \quad (20)$$

$$V = \frac{\omega}{\tilde{\gamma}} \quad (21)$$

Kết hợp phương trình (19), (20) và (21), thu được phương trình tính vận tốc mục tiêu mỗi bánh xe:

$$V_L = \frac{V^* (2 + \gamma T)}{2} \quad (22)$$

$$V_R = \frac{V^* (2 + \gamma T)}{2} \quad (23)$$

Để đảm bảo robot hoạt động đúng với vận tốc mục tiêu đặt ra, quãng đường di chuyển và xác định hướng. Tọa độ tương đối của robot được nội suy từ tín hiệu encoder tại mỗi động cơ của bánh xe và được tính như sau:

$$D = \frac{(E_r + E_l)}{2} \quad (24)$$

$$X + = D * \cos(\omega) \quad (25)$$

$$Y + = D * \sin(\omega) \quad (26)$$

Trong đó:

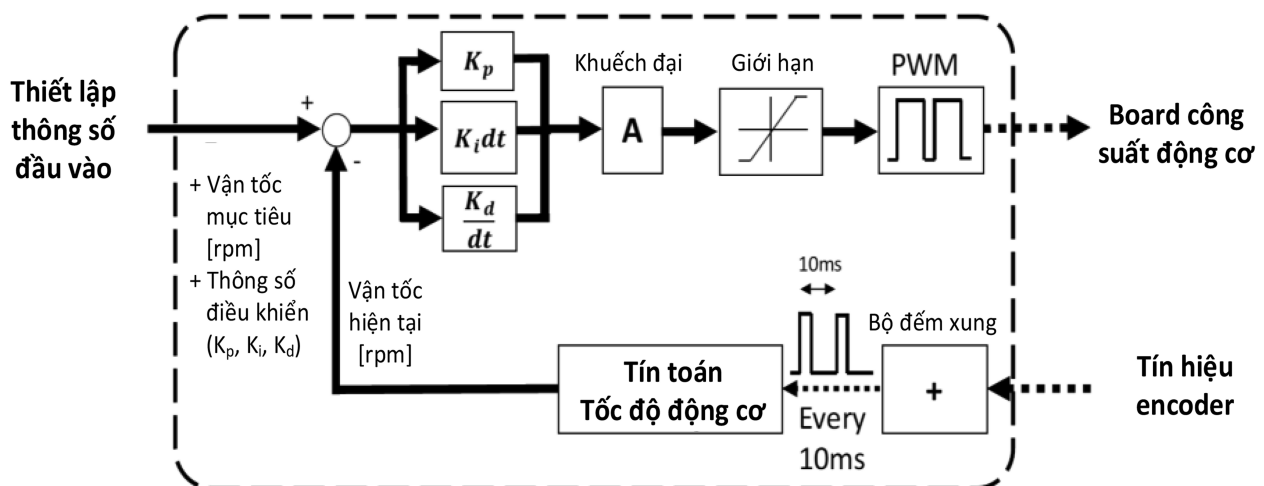
D là khoảng cách robot di chuyển

E_r, E_l lần lượt là giá trị encoder phải và trái

ω là vận tốc xoay của robot

(X, Y) là tọa độ tương đối của robot so với tọa độ ban đầu Oxy

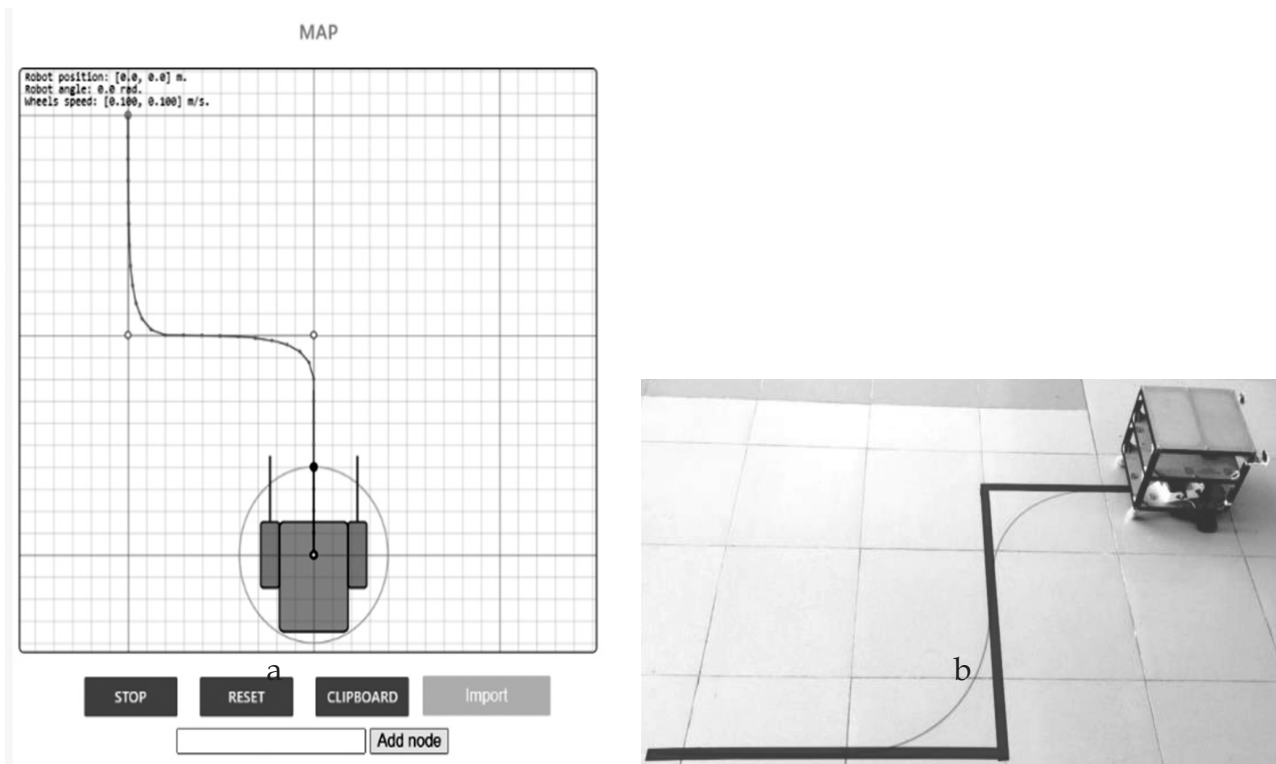
Vị trí, góc quay và cung di chuyển của robot được nội suy thông qua tín hiệu hồi tiếp encoder tại mỗi bánh xe thông qua phương trình (24), (25). Bộ điều khiển PID được sử dụng để điều khiển tốc độ 2 bánh robot theo tốc độ tính toán (V_L, V_R) công thức 22, 23. Với tín hiệu hồi tiếp từ encoder và tín hiệu ngõ ra là tín hiệu PWM điều khiển công suất động cơ được mô tả cụ thể ở Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ điều khiển tốc độ động cơ dùng PID

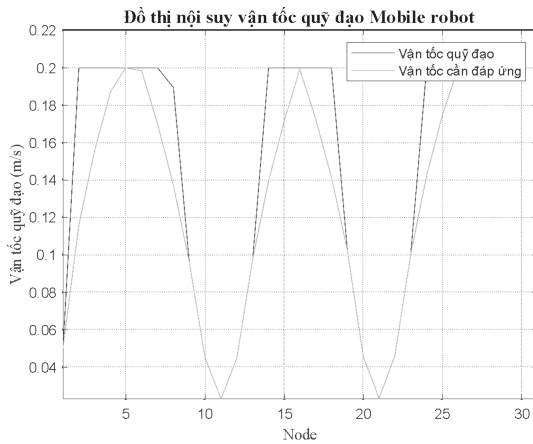
Kết quả thực nghiệm và kết luận

Để đánh giá tính hiệu quả và chất lượng của thuật toán, tác giả triển khai thực nghiệm trên mô hình robot di động có kích thước 40 x 30 x 30 cm. Điều kiện về mặt sàn là giả sử mặt sàn phẳng và có độ bám lý tưởng. Thực nghiệm được bố trí để thu thập quỹ đạo thông qua việc lắp một bút lông màu đỏ bên dưới tâm robot, khi robot di chuyển sẽ vạch nên quỹ đạo di chuyển. Quỹ đạo đặt được triển khai bằng băng keo màu xanh dán ở sàn, với độ rộng 0.03 m. Chất lượng của thuật toán được đánh giá thông qua thực nghiệm có thông số mô phỏng với độ dài quỹ đạo là 3 (m), vận tốc tối đa: 0,2 (m/s), độ dài tiêu điểm là 0,2 (m).

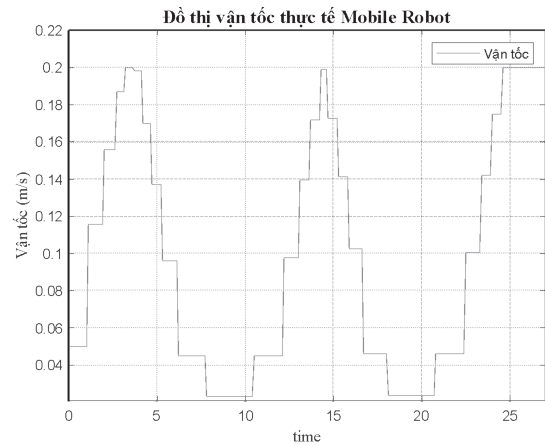


Hình 6. Quỹ đạo dừng thực nghiệm: (a) Quỹ đạo tính toán; (b) Quỹ đạo thực tế

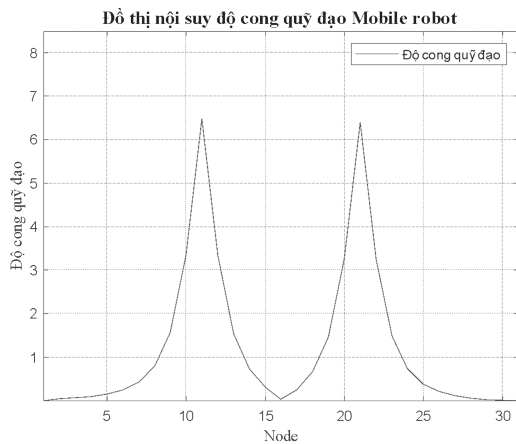
Thông qua thực nghiệm cho thấy robot bám quỹ đạo tốt và vượt qua quỹ đạo vuông góc ổn định. Quỹ đạo tại thực địa (Hình 6b) bám sát với quỹ đạo đã được lập ở bản đồ số (Hình 6a) và hoàn thành quỹ đạo trong 27 giây. Bên cạnh đó, các thông số về vận tốc nội suy (Hình 7a) và vận tốc thực tế (Hình 7b) được tính toán và đối sánh với nhau, kết quả thực tế đáp ứng với kết quả nội suy. Robot di chuyển ở các độ cong khác nhau sẽ thích nghi với vận tốc khác nhau tại mỗi điểm.



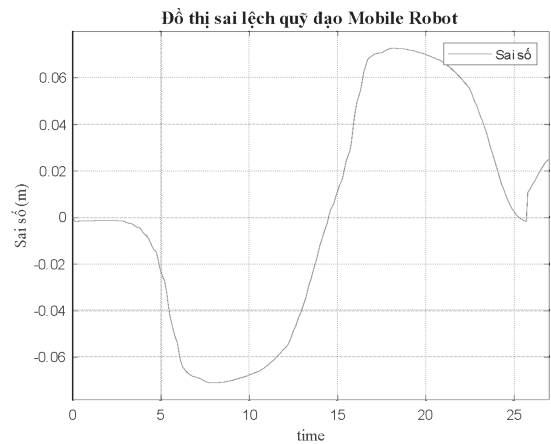
a) Vận tốc robot nội suy dựa trên quỹ đạo



b) Vận tốc thực tế của robot



c) Nội suy độ cong của quỹ đạo



d) Sai lệch quỹ đạo robot

Hình 7. Trình bày kết quả mô phỏng

Khi di chuyển quỹ đạo thẳng robot ổn định và không bị trượt ra khỏi bề rộng của quỹ đạo đặt (bề rộng băng keo xanh 0,03 m), biên độ sai lệch tối đa là 0,072 (m) (Hình 7d) khi đi vào quỹ đạo vuông góc. Ở quỹ đạo các góc vuông, robot nội suy sang quỹ đạo cong để di chuyển (Hình 7c). Robot đạt quỹ đạo bám ổn định và hiệu suất tốt là do có vận tốc thích nghi với từng đoạn quỹ đạo (Hình 7). Trọng tâm của thuật toán là di chuyển theo các đường quỹ đạo cung tròn, do đó robot di chuyển qua các quỹ đạo vuông góc bằng hình vòng cung. Thông qua thực nghiệm thực tế đánh giá được thuật toán có hiệu suất bám quỹ đạo tốt và có độ ổn định cao.

Trong bài báo này phân tích độ ổn định của bộ điều khiển Pure Pursuit thích nghi. Dựa trên các tiêu chí đánh giá về độ vọt lố, độ cắt góc và thời gian hoàn thành quỹ đạo; thông qua đánh giá này nhằm đề xuất một bộ điều khiển Pure Pursuit có tốc độ thích nghi.

Từ kết quả mô phỏng, so với bộ điều khiển Pure Pursuit ban đầu, mô hình thích nghi có thể giữ được sự ổn định của quỹ đạo, giảm sai số và đảm bảo thời gian hoàn thành quỹ đạo. Giải thuật Pure Pursuit thích nghi giúp cân bằng giữa các tiêu chí về biên độ sai lệch, thời gian hoàn thành quỹ đạo và độ ổn định để tạo nên một hiệu suất bám quỹ đạo tốt nhất cho robot.

Tuy có cải thiện về tốc độ nhưng tốc độ vận hành của robot vẫn còn hạn chế. Do đó cần nghiên cứu cải thiện hơn nữa hiệu suất về tốc độ của robot thông qua việc đề xuất một giải thuật thích nghi nâng cao hơn nữa. Trong tương lai, giải thuật có thể được kết hợp với các bộ điều khiển thông minh hơn để cải thiện và nâng cao hiệu suất về độ bám quỹ đạo và tốc độ của robot.

Tài liệu tham khảo

- A. E. S. B. Ibrahim (2016). "Wheeled mobile robot trajectory tracking using sliding mode control," *Journal of Computer Science*, vol. 12, no. 1, 48-55. DOI: 10.3844/JCSSP.2016.48.55.
- Abdelmoniem, A., Afif, Y. T., Maged, S. A., Abdelaziz, M., & Hammad, S. (2021). Adaptive pure-pursuit controller based on particle swarm optimization (pso-pure-pursuit). In *2021 16th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, 1-6. IEEE, December.
- B. Sandeep Kumar Malu, J. Majumdar, S. Kumar Malu α , and J. Majumdar σ (2014). "Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot", *Global Journal of Researches in Engineering*, vol. 14.
- J. E. Normey-Rico, I. Alcalá, J. Gómez-Ortega, and E. F. Camacho (2001). "Mobile robot path tracking using a robust PID controller," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 11, 1209-1214, Nov. DOI: 10.1016/S0967-0661(01)00066-1.
- J. Morales, J. L. Martínez, M. A. Martínez, and A. Mandow (2009). "Pure-pursuit reactive path tracking for nonholonomic mobile robots with a 2D laser scanner," *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009. DOI: 10.1155/2009/935237.
- M. R. H. Al-Dahhan and M. M. Ali (2016). "Path tracking control of a mobile robot using fuzzy logic," *13th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2016*, 82-88, May. DOI: 10.1109/SSD.2016.7473656.
- O. Yaseen Ismael, and J. Hedley (2016). "Analysis, Design, and Implementation of an Omnidirectional Mobile Robot Platform," *American Scientific Research Journal for Engineering*, vol. 22, no. 1, 195-209, July.
- T. T. Pham, M. T. Le, and C. N. Nguyen (2021). "Omnidirectional Mobile Robot Trajectory Tracking Control with Diversity of Inputs," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 10, no. 11, 639-644, Nov. DOI: 10.18178/ijmerr.10.11.639-644.

- Y. Chen, Y. Shan, L. Chen, K. Huang, and D. Cao (2018). "Optimization of Pure Pursuit Controller based on PID Controller and Low-pass Filter," *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, vol. 2018-November, 3294-3299, Dec. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569416.
- Y. Liu, J. J. Zhu, R. L. Williams, and J. Wu (2008). "Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 5, 461-479, May. DOI: 10.1016/j.robot.2007.08.007.