

TỐI ƯU THAM SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN NGẮM THEO ĐIỂM ĐÍCH ẢO DỰ BÁO CHO RÔ BỐT DI ĐỘNG TRONG MÔI TRƯỜNG KHO XƯỞNG

PARAMETERS OPTIMIZATION OF THE PREDICTIVE VIRTUAL TARGET GUIDANCE CONTROLLER FOR MOBILE ROBOT IN WAREHOUSE ENVIRONMENTS

Vũ Xuân Vương^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huieh5804.2025.380>

TÓM TẮT

Môi trường kho xưởng hiện nay sử dụng rất nhiều những robot vận chuyển. Trong đó phần lớn công việc của những robot vận chuyển này được lặp lại trong những tuyến đường cố định. Mặc dù vậy trong những đoạn đường khác nhau với những độ cong quỹ đạo khác nhau vẫn gây ra những khó khăn nhất định cho việc di chuyển đúng tuyến để tránh gây cản trở cũng như ảnh hưởng đến những hoạt động chung của kho, xưởng. Do vậy việc áp dụng thuật toán điều khiển bám quỹ đạo ngắm theo điểm đích ảo dự báo là một lựa chọn rất phù hợp, tuy nhiên việc lựa chọn các tham số bộ điều khiển đôi khi diễn ra quá phức tạp, không cần thiết hoặc đôi khi lại được tiến hành thủ công rất khó đảm bảo được chất lượng điều khiển tốt nhất. Trong bài báo này, tác giả đề xuất một phương pháp kết hợp thuật toán ngắm theo điểm đích ảo dự báo (PVT) với thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) để tối ưu các tham số offline. Đây là đóng góp chính của nghiên cứu, giúp giải quyết bài toán lựa chọn tham số phức tạp trước khi áp dụng vào bộ điều khiển cho robot di động.

Từ khóa: Bộ điều khiển ngắm theo điểm đích ảo, ngắm theo điểm đích ảo dự báo, car-like robot, PSO.

ABSTRACT

Modern warehouse environments extensively employ transport robots. A significant portion of these robots' tasks involves repetitive operations along fixed routes. However, different path segments with varying trajectory curvatures still pose certain challenges in ensuring accurate path-following to avoid obstructions and disruptions to overall warehouse operations. Therefore, applying the predictive virtual target guidance path tracking control algorithm is a highly suitable solution. Nevertheless, selecting controller parameters can sometimes be overly complex, unnecessary, or even performed manually, making it difficult to ensure optimal control performance. In this paper, the author proposes a method that combines the predictive virtual target guidance (PVT) algorithm with the particle swarm optimization (PSO) algorithm to optimize offline parameters. This is the main contribution of the research, which helps to solve the complex parameter selection problem before applying it to the controller for mobile robots.

Keywords: Virtual target path tracking control, predictive virtual target, car-like robot, PSO.

¹Viện Tự động hóa, Viện Khoa học - Công nghệ Quân sự

*Email: vuxuanvuong@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/8/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/10/2025

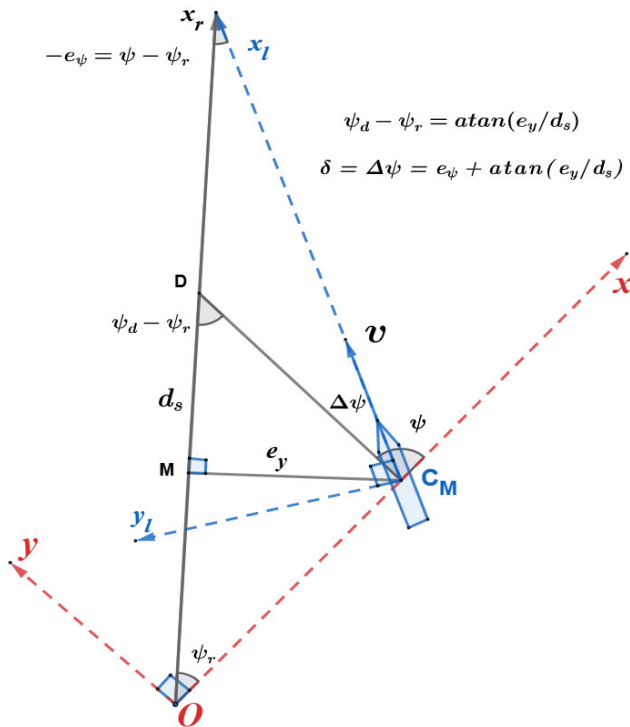
Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Thuật toán điều hướng ngắm theo điểm đích ảo (VT) đã được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, ứng dụng và phát triển với lĩnh vực hàng không vũ trụ nhờ vào khả

năng vượt trội của nó khi điều khiển vật thể bay bám theo đường quỹ đạo dựa vào sai lệch ngang và sai lệch góc hướng [1, 8, 9]. Sau đó nhiều nghiên cứu đã được tiến hành và áp dụng vào nhiều lĩnh vực khác nhau như robot

di động [2-6], robot mặt nước (USV) [7, 10] đồng thời cải thiện chất lượng của thuật toán này.



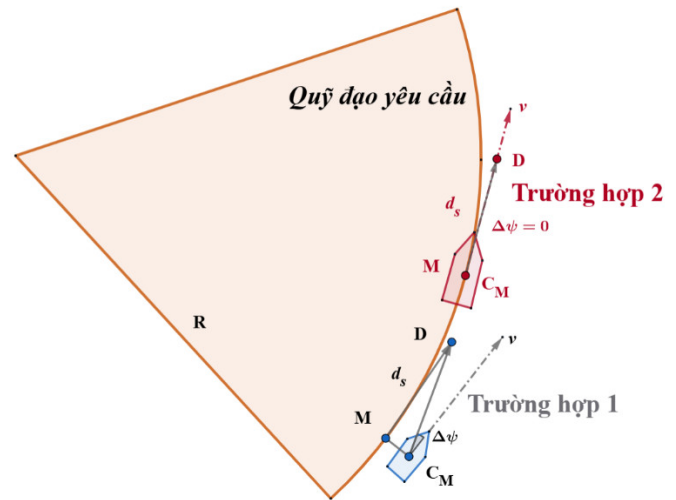
Hình 1. Thuật toán ngắm theo điểm đích ảo

Trong đó một số nghiên cứu thay đổi cách xác định điểm đích ảo [4, 8] hoặc thay đổi biểu thức tính toán góc lái để giảm thời gian hội tụ và sai lệch ngang [5]. Nguyên nhân chủ yếu là do khi bám các quỹ đạo cong (như trên hình 2), thuật toán VT sẽ có những sai lệch cố hữu (như ở trường hợp thứ 2), khi sai lệch ngang thân xe e_y tiến về không, hay khi xe gần như nằm trên quỹ đạo tham chiếu, khi đó vì cách xác định góc lái (sai lệch hướng và sai lệch ngang đều bằng 0), xe robot có xu hướng đi theo đường tiếp tuyến của quỹ đạo tham chiếu và có xu hướng rời xa quỹ đạo tham chiếu. Do vậy khi áp dụng thuật toán ngắm theo điểm đích ảo thì sai lệch ngang thường tăng lên cùng với độ cong quỹ đạo.

Trong những nghiên cứu thay đổi này thì nghiên cứu [8] bổ sung một góc nhìn ràng buộc mà UAV phải duy trì để đảm bảo việc bám quỹ đạo tham chiếu tốt và giống như [4] UAV cần bám cả góc nhìn ràng buộc và đảm bảo sai lệch ngang tối thiểu. Đặc biệt nghiên cứu [9] chuyển đổi bài toán bám theo một khoảng nhìn phía trước thành bài toán bám theo một khoảng thời gian phía trước, với việc xấp xỉ các điểm đích ảo tương lai thành những đường cong mềm mại, thuận lợi cho việc bám quỹ đạo của UAV.

Nghiên cứu [10] lại tập trung xây dựng bộ điều khiển ngắm theo điểm đích ảo thích nghi, trong đó khoảng

nhìn phía trước là một tham số thay đổi theo điều kiện môi trường và độ cong của quỹ đạo tham chiếu.



Hình 2. Thuật toán ngắm theo điểm đích ảo khi áp dụng với quỹ đạo cong

Như vậy với những nghiên cứu này thuật toán ngắm theo điểm đích ảo đã được cải thiện đáng kể hiệu quả bám quỹ đạo tham chiếu. Đặc biệt với những quỹ đạo có độ cong thay đổi phức tạp thì việc nhìn trước tương lai hay việc điều chỉnh được khoảng nhìn phía trước cho thuật toán là những cải tiến hiệu quả, tuy nhiên những cải tiến này hoàn toàn có thể được cải thiện được tốt hơn cho khả năng bám quỹ đạo phức tạp đặc biệt là thay vì nhìn vào đích ảo tương lai có thể dự báo sai lệch bám quỹ đạo trong tương lai sau đó điều chỉnh góc lái ở thời điểm hiện tại, đảm bảo cho robot sẵn sàng với những thay đổi đột ngột của quỹ đạo. Do vậy, thuật toán ngắm theo điểm đích ảo dự báo được đề xuất, đặc biệt với những trường hợp sử dụng trong nhà xưởng thì quỹ đạo di chuyển của robot di động được lặp lại và tham số được tối ưu nhờ thuật toán PSO.

2. MÔ HÌNH TOÁN CỦA ROBOT DI ĐỘNG DẠNG Ô TÔ (CAR-LIKE ROBOT)

Mô hình toán của xe car-like robot được xét trong giả định xe đi trong mặt phẳng ngang, không có sự trượt bánh với vận tốc không đổi. Đây là những giả định lý tưởng hóa nhằm đơn giản hóa bài toán mô phỏng. Các yếu tố thực tế như độ trượt của bánh và các loại nhiễu tác động sẽ được xem xét trong các nghiên cứu thực nghiệm sau này. Khi đó phương trình (1) thể hiện mô hình toán học của robot:

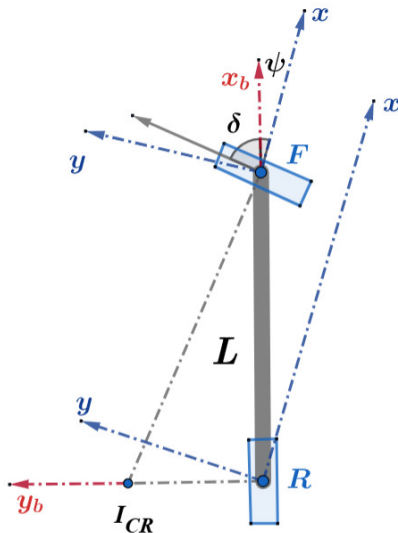
$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos(\psi) \\ \dot{y} &= v \sin(\psi) \\ \dot{\psi} &= \frac{v}{L} \tan(\delta)\end{aligned}\quad (1)$$

Trong đó: x, y là vị trí của xe robot trong hệ tọa độ cố định; ψ là góc hướng của thân xe robot; v là vận tốc dài của thân xe; L là chiều dài cơ sở tính từ trục của 2 bánh trước đến trục của 2 bánh sau; δ là góc lái của bánh trước (trong mô hình xe đạp 2 bánh như trên hình 1, giả định có một góc lái chung cho 2 bánh trước).

Để thực hiện việc dự báo về trạng thái của xe robot trong các thời điểm tương lai mô hình toán (1) cần được chuyển sang dạng rời rạc, giả định tại thời điểm k :

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + v \cos(\psi_{k-1})T \\ y_k &= y_{k-1} + v \sin(\psi_{k-1})T \\ \psi_k &= \psi_{k-1} + \frac{v}{L} \tan(\delta_k)T \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó: T là chu kỳ trích mẫu của hệ thống. Theo đó để xác định được trạng thái ở thời điểm tiếp theo cần xác định được góc lái của thời điểm tiếp theo trước. Và điều này được thực hiện bởi thuật toán ngắ theo điểm đích ảo.



Hình 3. Mô hình xe đạp hai bánh của car-like robot

3. THUẬT TOÁN NGẮ THEO ĐIỂM ĐÍCH ẢO DỰ BÁO

Xét thuật toán ngắ theo điểm đích ảo thông thường (như trên hình 1):

$$\begin{aligned} \delta &= e_\psi + a \tan \frac{e_y}{d_s}, & \text{nếu } \left| e_\psi + a \tan \frac{e_y}{d_s} \right| \leq \delta_{\max} \\ \delta &= \delta_{\max}, & \text{nếu } e_\psi + a \tan \frac{e_y}{d_s} > \delta_{\max} \\ \delta &= \delta_{\min}, & \text{nếu } e_\psi + a \tan \frac{e_y}{d_s} < \delta_{\min} \end{aligned} \quad (3)$$

trong đó, e_ψ là sai lệch góc hướng thân xe robot so với quỹ đạo tham chiếu, e_y là sai lệch ngang thân xe, và d_s là

khoảng nhìn phía trước, $\delta_{\min} = -\delta_{\max}$ là các góc lái giới hạn của robot.

Khi đó chuyển sang dạng sai phân ta có phương trình (4):

$$\delta_k = e_{\psi(k-1)} + a \tan \left(\frac{e_{y(k-1)}}{d_s} \right) \quad (4)$$

Như vậy với phương trình (2) và (4) có thể tính toán được một loạt các giá trị của các trạng thái cũng như các góc lái mong muốn theo thuật toán ngắ theo điểm đích ảo trong một khung của sổ dự báo N chu kỳ bất kỳ. Mặc dù có thể mở rộng N để tăng khả năng dự báo, tuy nhiên để đảm bảo tính thời gian thực thì có thể chọn giá trị của N không quá lớn, giá trị này phụ thuộc vào tài nguyên của hệ thống. Trong khuôn khổ mô phỏng của nghiên cứu này, giá trị $N = 10$ (sử dụng ở mục 4) được lựa chọn dựa trên sự cân bằng giữa việc cải thiện hiệu suất bám và chi phí tính toán, đảm bảo thuật toán có thể thực thi trong thời gian thực. Khi đó giá trị của góc lái tại một thời điểm t bất kỳ được tính toán cuối cùng là một tổng như sau:

$$\delta(t) = \sum_{i=0}^N K_i \delta_i \quad (5)$$

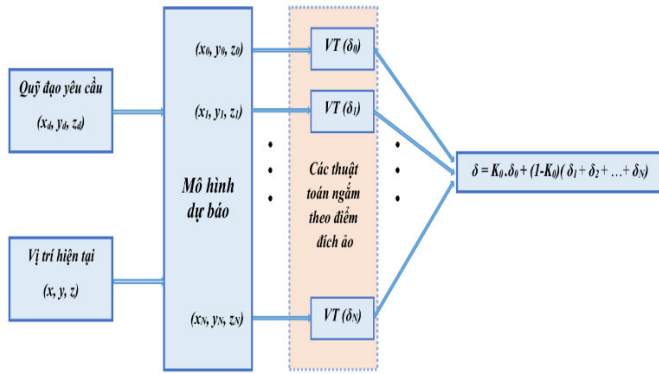
Trong đó, các giá trị hệ số K_i là dương và có tổng bằng 1:

$$\sum_{i=0}^N K_i = 1 \quad (6)$$

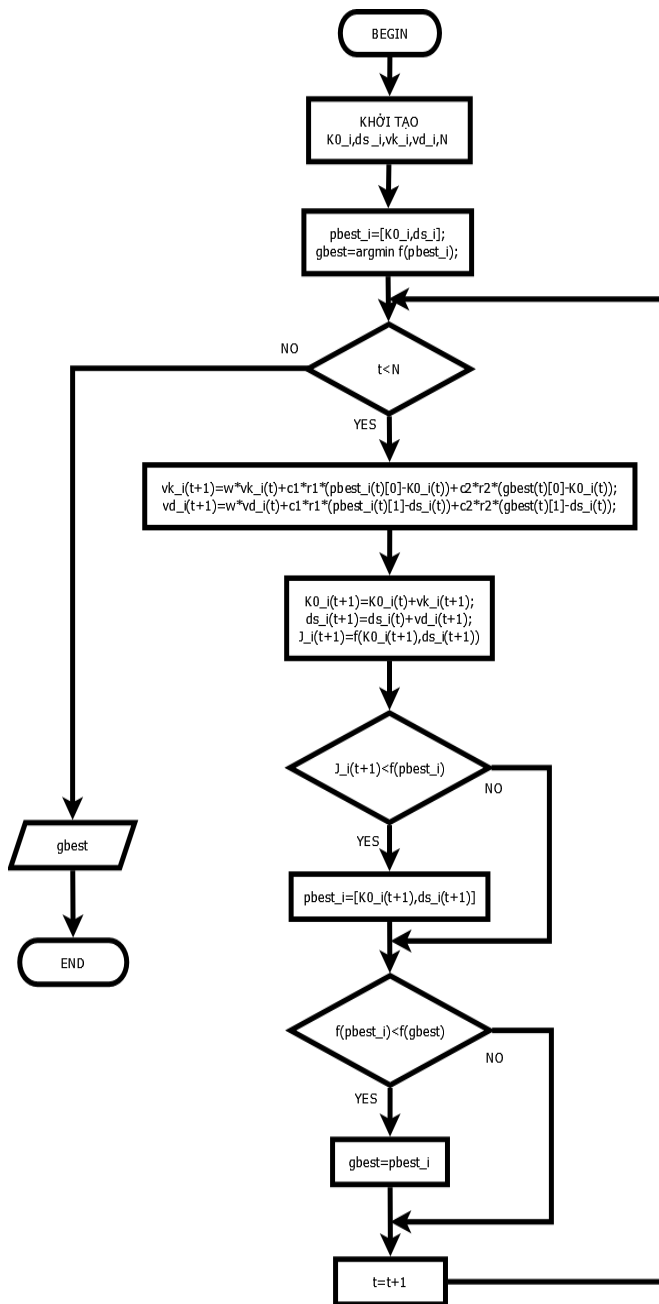
Tuy nhiên để đơn giản hóa, các giá trị K_i với $i > 0$ được đơn giản hóa thành một giá trị bởi vì thực tế trọng số của thời điểm hiện tại ($i = 0$, thời điểm t) là quan trọng nhất. Khi đó (5) kết hợp với (6), trở thành:

$$\delta(t) = K_0 \delta_0 + (1 - K_0) \sum_{i=1}^N \delta_i \quad (7)$$

Như vậy, trong thực tế thuật toán ngắ theo điểm đích ảo dự báo chỉ có thêm một tham số K_0 . Việc xác định tham số này có thể được tiến hành thủ công, tuy nhiên với môi trường kho xưởng khi quỹ đạo di chuyển của robot được cố định theo các tuyến, có thể tiến hành tối ưu theo thuật toán PSO. Khi đó không chỉ có thể xác định được K_0 tối ưu, còn có thể xác định được khoảng nhìn phía trước d_s tối ưu. Quá trình tính toán xác định góc lái theo thuật toán ngắ theo điểm đích ảo dự báo được thể hiện trên hình 4, trong đó VTG là thuật toán ngắ theo điểm đích ảo thông thường, được tính cho mỗi thời điểm từ các trạng thái dự báo và xác định các góc lái tương ứng với các thời điểm dự báo đó.



Hình 4. Sơ đồ xác định góc lái theo thuật toán ngấm theo điểm đích ảo dự báo



Hình 5. Sơ đồ thuật toán PSO cho một hạt i bất kỳ trong đàn

Với hàm chi phí (hay hàm mục tiêu) là sai lệch ngang thân xe, công thức tính được cho bởi phương trình:

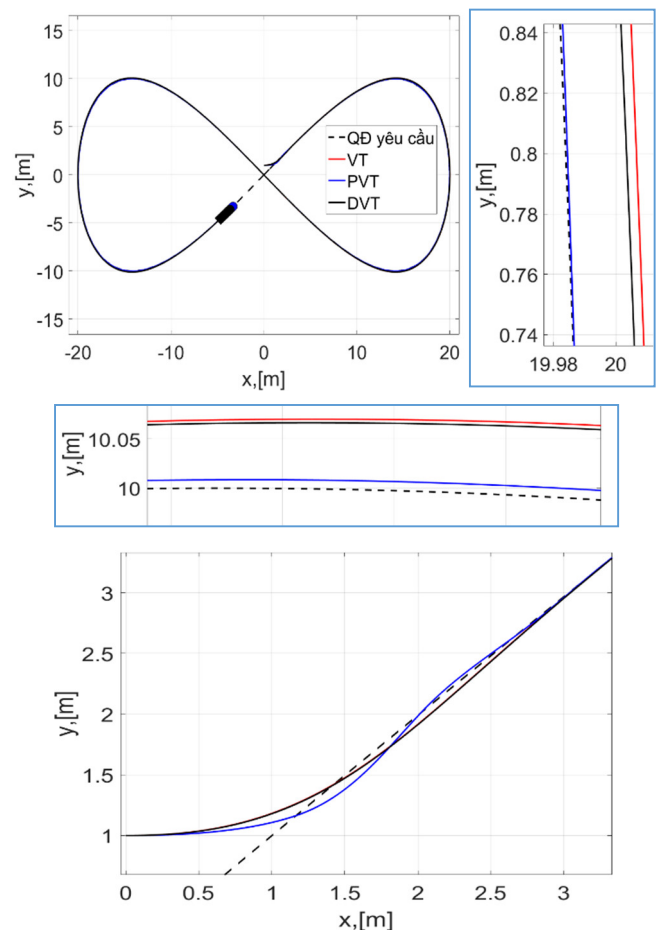
$$J = \int_0^t e_y^2 d\tau \quad (8)$$

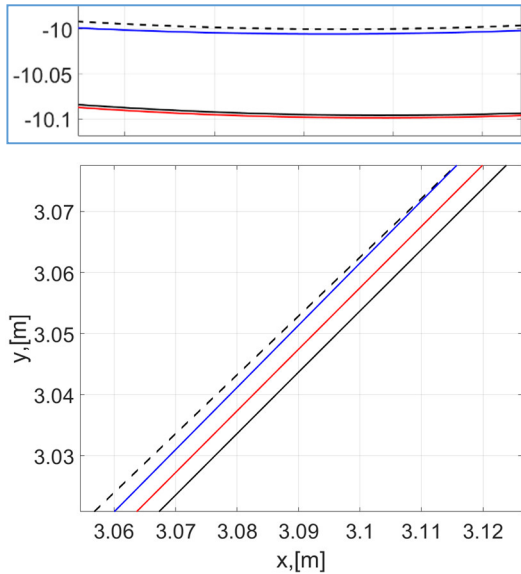
Khi đó việc tối ưu được chuyển cho thuật toán PSO với chu trình tính toán với một hạt (cá thể) i bất kỳ trong đàn được cho bởi hình 5. Trong đó, các tham số $c1$, $c2$, w (các hệ số gia tốc và hệ số quán tính) và N_r (số lần lặp) cần được chọn trước. Còn hàm mục tiêu J được tính bởi (8), trong đó việc xác định giá trị sai lệch ngang được thực hiện trên mô hình không trực tiếp bằng một hàm "f" cụ thể.

4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Các tham số của mô hình xe robot dạng car-like được cho như sau: $L = 0,5m$, $v = 4m/s$; $\delta_{\max} = 30^\circ$, $\delta_{\min} = -30^\circ$ và của số dự đoán $N = 10$. Các tham số cho thuật toán PSO bao gồm số lượng 50 cá thể, và số lần lặp $N_r = 20$.

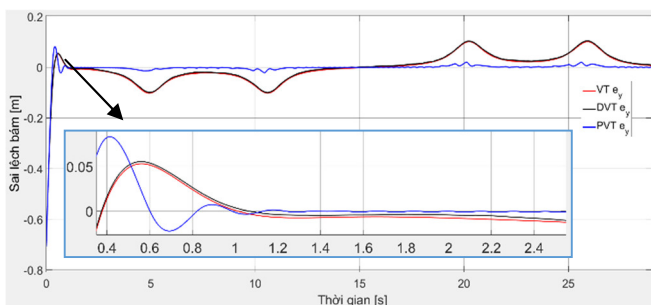
Kết quả tám quỹ đạo hình số 8 được cho bởi các hình 6 đến hình 9. Với các thuật toán so sánh là thuật toán ngấm theo điểm đích ảo (VT), thuật toán ngấm theo điểm đích ảo động (DVT) và thuật toán ngấm theo điểm đích ảo dự báo (PVT) được đề xuất.



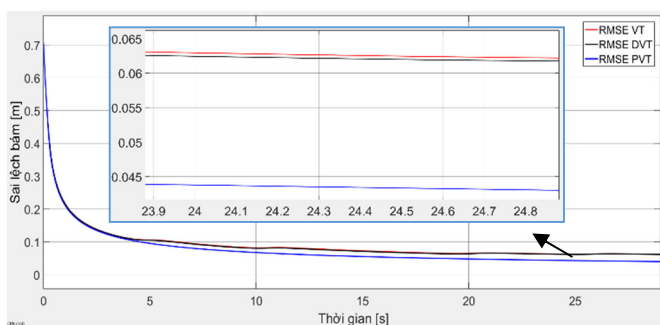


Hình 6. Quỹ đạo tham chiếu và các quỹ đạo thực của các thuật toán

Hình 6 thể hiện quỹ đạo tham chiếu và các quỹ đạo thực tế khi sử dụng các thuật toán điều hướng VT, DVT và PVT áp dụng cho robot. Hình 7 thể hiện sai lệch bám quỹ đạo (sai lệch tính theo chiều ngang thân xe) của các thuật toán điều hướng này và hình 8 thể hiện RMSE của các thuật toán. Trong khi đó, hình 9 thể hiện góc lái của các thuật toán điều hướng.



Hình 7. Sai lệch bám quỹ đạo của các thuật toán



Hình 8. RMSE của các thuật toán

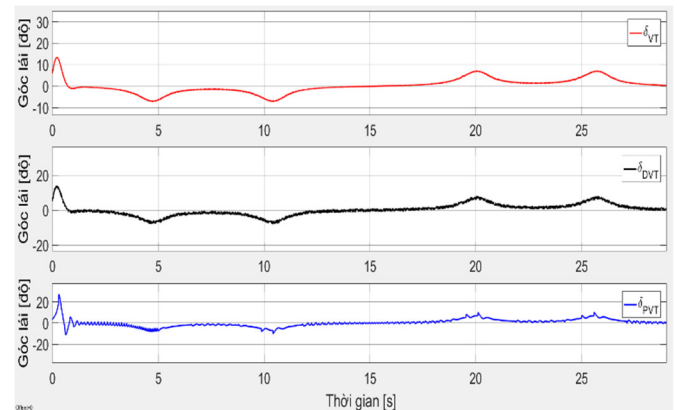
Qua các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink, có thể thấy rằng:

- Sai lệch bám quỹ đạo của thuật toán điều hướng DVT và VT không có sự khác biệt đáng kể, mặc dù DVT có cải thiện chất lượng bám quỹ đạo so với VT (RMSE của DVT

nhỏ hơn RMSE của VT (hình 8)) nhưng có những thời điểm nhất định VT có sai lệch bám nhỏ hơn (hình 6, 7).

- Sai lệch bám quỹ đạo của thuật toán điều hướng PVT đã cải thiện đáng kể so với VT và DVT (hình 6, 7 và 8). RMSE của PVT khoảng 0,043m trong khi VT và DVT có RMSE xấp xỉ 0,063m, đạt hiệu suất 30%.

- Đặc biệt, trên hình 7 thể hiện rất rõ chất lượng bám quỹ đạo được cải thiện ở những thời điểm có độ cong lớn như 5s, 11s, 20s và 26s. Điều này thể hiện rõ khả năng cải thiện của chức năng dự báo.



Hình 9. Các góc lái của các thuật toán

- Các góc lái của cả ba thuật toán điều hướng đều được giữ trong khoảng an toàn, nằm trong giới hạn $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$. Góc lái của PVT có nhiều biến động hơn DVT và VT tuy nhiên biên độ dao động nhỏ và không vượt ra ngoài giới hạn của góc lái.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất thuật toán điều hướng ngắmm theo điểm đích ảo dự báo áp dụng cho robot di động dạng ô tô hoạt động trong kho xưởng. Theo đó, việc tính toán góc lái cho robot của một thời điểm được mở rộng theo cửa sổ dự báo giúp cho robot hoạt động tốt hơn ở những nơi có độ cong quỹ đạo lớn, gây khó khăn cho các thuật toán điều hướng có sẵn như VT, DVT. Thuật toán PVT đề xuất cũng được so sánh với các thuật toán VT và DVT trên môi trường Matlab-Simulink và chứng minh được hiệu quả bám quỹ đạo tốt hơn.

Hướng phát triển tiếp theo của bài báo là mở rộng theo hướng điều khiển thích nghi, sao cho có thể tối ưu các tham số trực tuyến để có thể áp dụng cho những quỹ đạo phức tạp, không được quy hoạch trước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Lê Ngọc Lân, *Xây dựng bộ ổn định và thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho UAV cánh bằng*. Luận án tiến sĩ, Viện KH&CN Quân sự, Hà Nội, 2020.

[2]. Lê Bá Yến, Chu Văn Hoạt, Lê Văn Tuấn, Vũ Xuân Vương, "Phương pháp điều hướng xe tự hành AGV dùng cảm biến quán tính và đường dẫn đảo, phục vụ vận chuyển hàng trong các môi trường đặc thù," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, số Đặc san Hội thảo quốc gia FEE, 57- 65, 2020.

[3]. Đặng Nam Kiên, Nguyễn Vũ, Nguyễn Thành Trung, "Điều chỉnh bám quỹ đạo cho rô bốt tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS bằng vật chuẩn," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, 85, 2023.

[4]. Dang Nam Kien, Nguyen Vu, "Dynamic virtual target guidance algorithm for path following control of a 4WD4WS mobile robot," *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 4, 4, 896-902, 2023.

[5]. Kien Nam Dang, Vu Nguyen, Huy Quoc Vu, "Improve path following efficiency for 4WD4WS robot by using exponential functions in virtual target guidance algorithm," *Journal of Science & Technology, Hanoi University of Industry*, 60, 5, 2024.

[6]. H. Afrisal, A. Syakur, M. A. Riyadi, G. K. Nugraha, A. A. Nanda, I. Setiawan, "Experimental Analysis on Path Planning Strategy using Dijkstra Algorithm and Follow the Carrot Method for Indoor Mobile Robot Navigation," in *2021 5th International Conference on Informatics and Computational Sciences (ICICoS)*, Semarang, Indonesia, 193-198, 2021. doi: 10.1109/ICICoS53627.2021.9651862.

[7]. Y. Zhao, X. Qi, Y. Ma, Z. Li, R. Malekian, M. A. Sotelo, "Path Following Optimization for an Underactuated USV Using Smoothly-Convergent Deep Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, 10, 6208-6220, Oct. 2021. doi: 10.1109/TITS.2020.2989352

[8]. Qi Chen, Xugang Wang, Jing Yang, Zhongyuan Wang, "Trajectory-following guidance based on a virtual target and an angle constraint," *Aerospace Science and Technology*, 87, 448-458, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.02.034>.

[9]. Lee S.H., Hur S.W., Kwak Y.Y., et al., "Ahead-time Approach to Carrot-chasing Guidance Law for an Accurate Trajectory-tracking Control," *Int. J. Control Autom. Syst.*, 19, 2634-2651, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0413-x>

[10]. Ünal O, Akkaş N, Atalı G, Özkan SS., "Smart carrot chasing guidance law for path following of unmanned surface vehicles," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 238(3): 567-576, 2023. doi:10.1177/14750902231200684

AUTHOR INFORMATION

Vu Xuan Vuong

Control, Automation in Production and Improvement of Technology
Institute (CAPITI), Academy of Military Science and Technology (AMST),
Vietnam