

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG

A RESEARCH ON MOBILE ROBOT PATH TRACKING

Vũ Công Thành^{1*}, Nguyễn Anh Tú²

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Đến Tòa soạn ngày 02/03/2021, chấp nhận đăng ngày 26/03/2021

Tóm tắt: Trong những năm gần đây, sự phát triển nhanh chóng của robot di động nhận được nhiều sự chú ý của các nhà khoa học, trong đó việc xây dựng bộ điều khiển bám quỹ đạo cho robot có vai trò quan trọng, đóng vai trò quyết định trong việc di chuyển ổn định của robot. Bài báo trình bày phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động sử dụng thuật toán pure pursuit dựa trên hệ thống định vị đa cảm biến. Thuật toán sử dụng đơn giản và dễ thực hiện được thiết lập trên các thuộc tính cơ bản của mô hình động học so với đường dẫn, nhưng đem lại hiệu suất cao trong việc điều hướng. Kết quả thử nghiệm cho thấy độ chính xác và sự ổn định về vị trí và hướng của robot khi làm việc ở các đường dẫn khác nhau.

Từ khóa: Bám quỹ đạo, robot di động, bộ điều khiển.

Abstract: In recent year, a fast evolution of mobile robots has been received attention from researchers, in which building a controller follow a predefined path plays an important role in the accuracy moving of robot. This research paper presents an application of a pure pursuit algorithm for mobile robots using the multiple sensors localization method. The algorithm is a simple and easy method based on the basic properties of the kinematic model with path, but it offers high efficiency in motion. The experimental results show remarkable accuracy and stability of the proposed method concerning positions, directions in the different desired trajectories.

Keywords: Path-tracking, mobile robot, controller.

1. GIỚI THIỆU

Dưới sự phát triển của khoa học kỹ thuật, robot đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành nghề, lĩnh vực khác nhau như: vận chuyển hàng hóa, cứu hộ, thám hiểm đặc biệt trong các môi trường độc hại và nguy hiểm. Gần đây, robot di động đang nhận được nhiều sự chú ý và nghiên cứu của các nhà khoa học do có nhiều ưu điểm như khả năng chuyển động linh hoạt, cấu trúc đơn giản, chi phí sản xuất thấp. Hơn nữa, có thể hoạt động độc lập trong thời gian dài mà không cần sự điều khiển trực tiếp của con người. Các bài toán cần được nghiên cứu của robot di động có thể kể đến

như: định vị, thiết kế quỹ đạo, bám quỹ đạo, tránh vật cản. Bám quỹ đạo là xác định các đường dẫn được thiết kế trước đó sau đó thực hiện các lệnh điều khiển điều chỉnh vận tốc dài và vận tốc góc làm giảm sai lệch, đưa robot đến các mục tiêu dọc theo quỹ đạo thiết kế [1]. Do đó xây dựng một bộ điều khiển bám quỹ đạo là quan trọng, góp phần tăng chất lượng cho việc điều khiển và độ ổn định của robot [2].

Các hệ thống tự trị cho robot di động ngày càng phát triển, nhiều bộ điều khiển bám quỹ đạo được đề xuất như bộ điều khiển tỷ lệ [3] mạng nơron [4], bộ điều khiển mờ [5]. Nghiên

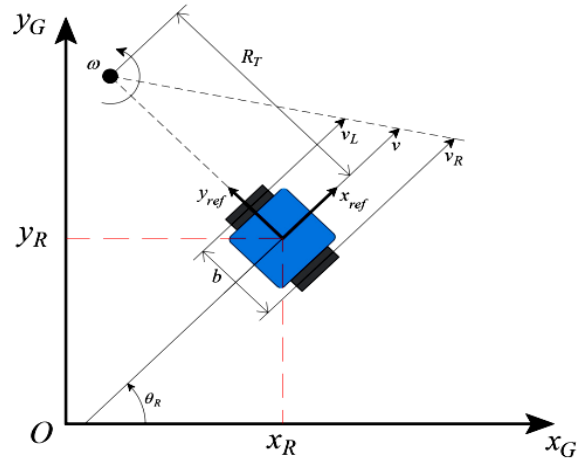
cứu của Z. Zhang [6] và cộng sự có trình bày sử dụng logic mờ tạo ra các đường dẫn và thời gian giả định để điều khiển bám cho robot di động khi quỹ đạo đặt trước không đáp ứng thời gian thực. Một nghiên cứu khác áp dụng bộ điều khiển dự đoán MPC bám quỹ đạo theo hệ trục tọa độ cục bộ đặt trên robot nhằm khắc phục khả năng điều hướng khi làm việc trong môi trường lòng đất [7]. Ứng dụng thuật toán DSC (Dynamic Surface Control) cho bánh xe đa hướng dạng holonomic bám quỹ đạo được trình bày trong [8]. Các thông số của bộ điều khiển PID được chỉnh định thông qua logic mờ tìm ra các tham số phù hợp cho bộ điều khiển, nâng cao chất lượng bám và sai số di chuyển được H.T. Abatari đề xuất trong [9].

So với các bộ điều khiển bám quỹ đạo truyền thống, thuật toán pure pursuit cho chất lượng điều khiển bám đạt hiệu suất cao, đáp ứng thời gian tính toán nhanh và dễ thực hiện [10]. Pure pursuit là thuật toán điều khiển dựa trên hình học, xác định điểm nhìn trước nằm trên quỹ đạo cần di chuyển và vị trí hiện tại [11]. Trong nghiên cứu của Elbanhawi [12] có trình bày mô hình dự đoán cho robot, kết hợp pure pursuit nâng cao chất lượng điều khiển đạt hiệu suất cao. Một nghiên cứu khác của Shan và cộng sự lại đề xuất một phương pháp CF-pursuit sử dụng đường cong thay thế vòng tròn trong pure pursuit giảm thiểu lỗi điều khiển. Trong [13] R. Wang kết hợp pure pursuit cùng thuật toán Salp Swarm và bộ điều khiển vận tốc cải thiện sự phụ thuộc vào khoảng nhìn trước.

Trong nghiên cứu này, bài báo trình bày phương pháp bám quỹ đạo cho robot di động sử dụng thuật toán pure pursuit dựa trên hệ thống định vị đa cảm biến. Các kết quả thử nghiệm trên mô hình thực tế, cho thấy robot đạt được độ ổn định về vị trí và hướng với các quỹ đạo làm việc khác nhau.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN

2.1. Mô hình động học của robot



Hình 1. Mô tả vị trí robot trong các hệ trục tọa độ

Vận tốc bánh trái v_L , bánh phải v_R được tính toán qua bán kính bánh xe R và vận tốc góc bánh từng bánh ω_L , ω_R (hình 1):

$$v_R = \omega_R R \quad (1)$$

$$v_L = \omega_L R \quad (2)$$

Vận tốc dài của robot được thiết lập bằng trung bình vận tốc dài của từng bánh xe:

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (3)$$

$$v = \frac{(\omega_R + \omega_L) R}{2} \quad (4)$$

Vận tốc góc của robot tính toán dựa trên độ chênh lệch của vận tốc hai bánh và khoảng cách hai bánh b :

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{b} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{(\omega_R - \omega_L) R}{b} \quad (6)$$

Từ (4) và (6) tìm ra được vận tốc từng bánh dựa trên vận tốc dài v và vận tốc góc ω .

$$\omega_R = \frac{v + b\omega}{R} \quad (7)$$

$$\omega_L = \frac{v - b\omega}{R} \quad (8)$$

2.2. Thuật toán pure pursuit

Thuật toán pure pursuit được thiết lập dựa trên các thông tin hình học tìm ra bán kính R_T của đường tròn nối giữa vị trí robot hiện tại tại (x_R, y_R) và điểm nhìn trước A nằm trên quỹ đạo được thiết lập trước. Với mỗi khoảng cách đặt L tính từ tâm robot đến điểm nhìn trước A sẽ tạo ra một R_T tương ứng. Các công thức thiết lập để tìm ra được bán kính R_T :

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = L^2 \quad (9)$$

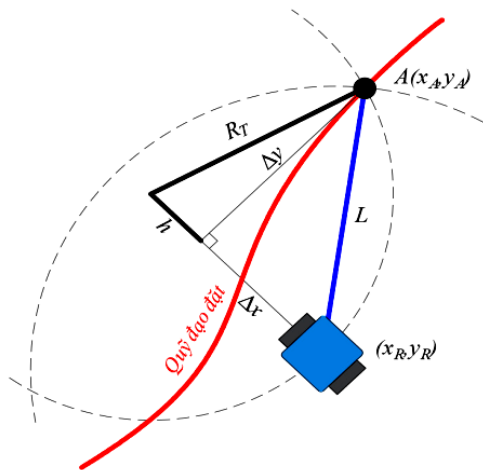
$$h^2 + \Delta y^2 = R_T^2 \quad (10)$$

$$h + \Delta x = R_T \quad (11)$$

Thay (11) vào (10):

$$(R_T - \Delta x)^2 + \Delta y^2 = R_T^2 \quad (12)$$

$$R_T^2 - 2R_T\Delta x + \Delta x^2 + \Delta y^2 = R_T^2 \quad (13)$$



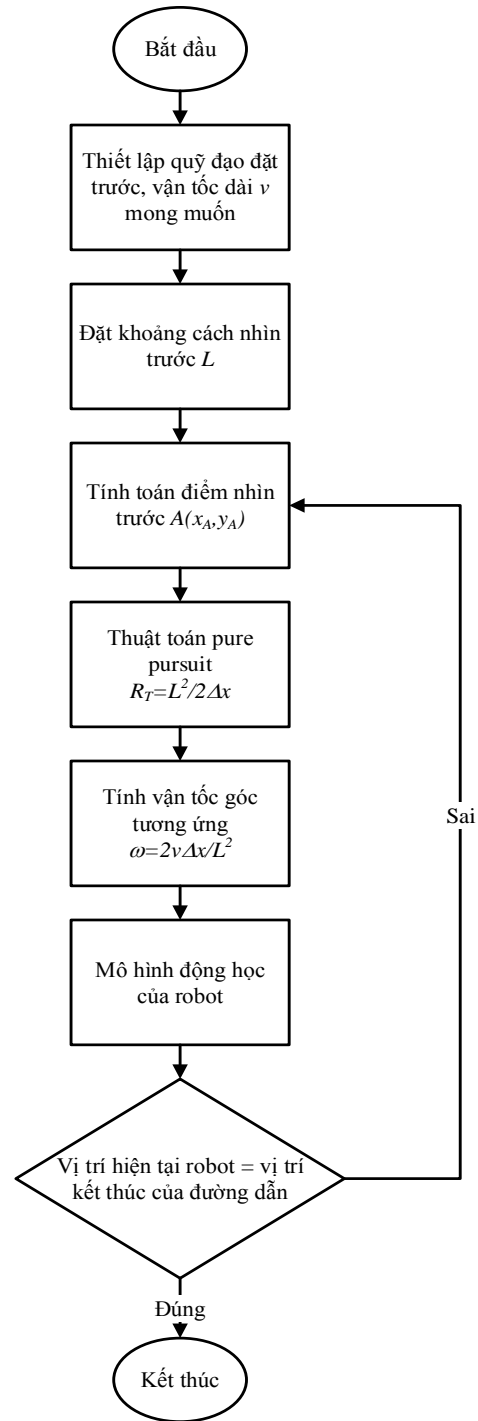
Hình 2. Mô tả thuật toán pure pursuit

Thay (9) vào (13):

$$R_T^2 - 2R_T\Delta x + L^2 = R_T^2 \quad (14)$$

$$R_T = \frac{L^2}{2\Delta x} \quad (15)$$

Hai khoảng cách Δx , Δy là tọa độ tương đối của điểm $A(x_A, y_A)$ so với hệ tọa độ đặt trên robot. Sau mỗi chu kỳ Δt thuật toán được lặp lại, khi vị trí robot thay đổi thì đường tròn mới sẽ được thiết lập và tìm ra bán kính R_T mới.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán bám quỹ đạo sử dụng pure pursuit

Thay R_T vào $v = \omega R_T$ tìm ra vận tốc góc tương ứng:

$$\omega = \frac{2v\Delta x}{L^2} \quad (16)$$

Với vận tốc góc ω và vận tốc dài v thiết lập trước thay vào phương trình động học ngược

(7), (8) để tìm ra vận tốc góc cần di chuyển cho từng bánh.

Các bước thực hiện của thuật toán pure pursuit được mô tả dưới đây:

Bước 1: Xác định vị trí hiện tại của robot (x_R, y_R) .

Bước 2: Tìm điểm nhìn trước A thuộc đường dẫn với khoảng cách L đặt trước.

Bước 3: Biến đổi tọa độ điểm A trong hệ tọa độ tuyệt đối về hệ tọa độ tương đối so với robot để tìm Δx , Δy .

Bước 4: Tìm ω như công thức (16).

Bước 5: Thay ω tìm ra vận tốc từng bánh theo công thức (7) và (8).

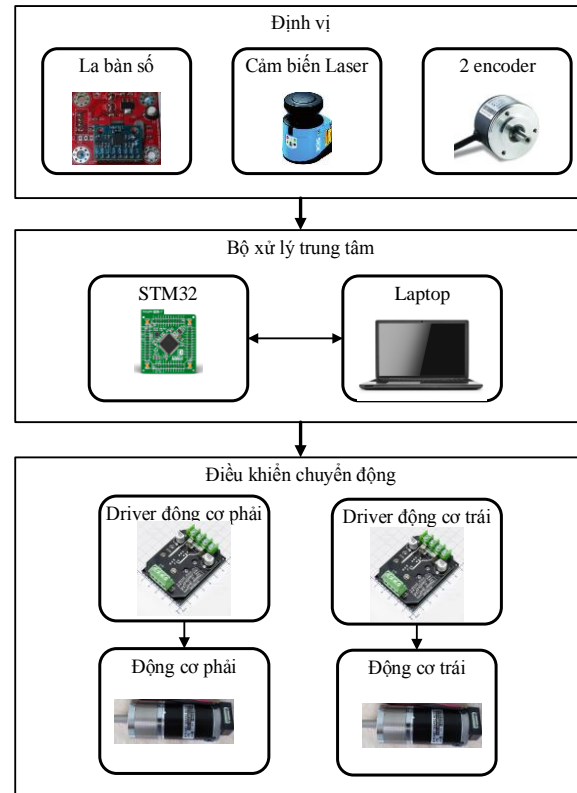
3. CẤU TRÚC ROBOT THÍ NGHIỆM



Hình 4. Mô hình robot thí nghiệm

Mô hình robot được thiết kế dưới dạng hai bánh vi sai bao gồm hai bánh chủ động và hai bánh từ động (hình 4). Cảm biến quét laser đặt trước robot nhận các tín hiệu từ môi trường để định vị. La bàn số lắp đặt tại tâm, đo vận tốc góc và góc di chuyển của robot, hai encoder gắn vào hai bánh chủ động đo vận tốc dài và vận tốc góc di chuyển. Các tín hiệu định vị từ cảm biến là riêng biệt, do đó trong nghiên cứu này có sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng để xây dựng giải pháp định vị đa cảm biến cho robot nhằm tăng độ chính xác và ổn định. Bộ xử lý trung tâm là một laptop đặt trên robot, có nhiệm vụ xử lý các tác vụ, các thuật toán được lập trình và thử nghiệm trên hệ điều hành robot (ROS). Vi điều khiển STM32F407VE có nhiệm vụ truyền và nhận các tín hiệu điều khiển từ máy tính trung tâm sau đó chuyển tín

hiệu xuống hai driver điều khiển động cơ. Vận tốc của hai động cơ được ổn định với bộ điều khiển PID tích hợp sẵn trong driver.



Hình 5. Sơ đồ mô tả cấu trúc robot

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

Kết quả thử nghiệm được kiểm tra trên hai quỹ đạo là hình chữ nhật và hình tròn tại một tầng của tòa nhà tại Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội. Vận tốc dài di chuyển là 0.6 m/s, chu kỳ điều khiển 60 ms ngay sau khi có dữ liệu vị trí mới được cập nhật. Sai số trung bình về độ lệch theo các phương và góc của từng quỹ đạo được mô tả tại bảng 1 và 2, tính toán theo công thức 17 và 18. Hình 6 và 10 mô tả đáp ứng vị trí theo quỹ đạo hình chữ nhật và hình tròn. Sai số vị trí theo hai phương với quỹ đạo hình chữ nhật được biểu diễn tại hình 7 và 8. Với sai số vị trí lớn nhất theo phương x là 0,03 m, phương y là 0,029 m. Sai số vị trí lớn nhất với quỹ đạo hình tròn là 0,02 theo phương x và 0,19 theo phương y được biểu diễn tại hình 11 và 12. Sai số góc lớn nhất với quỹ đạo hình chữ nhật là 0,09° và 0,195°

đối với quỹ đạo hình tròn được biểu diễn trên hình 9 và 13. Bên cạnh đó, có thể thấy khi robot di chuyển vẫn tồn tại các sai lệch về vị trí và hướng, các sai lệch này có thể giải thích do các yếu tố quán tính của xe, hiện tượng trượt của mặt sàn và sai số vị trí của hệ thống định vị.

Bảng 1. Sai số vị trí và hướng trung bình với quỹ đạo hình chữ nhật

Quỹ đạo hình chữ nhật (v=0.6 m/s)	
Sai số theo phương x	0,015313
Sai số theo phương y	0,015446
Sai số góc	0,049188

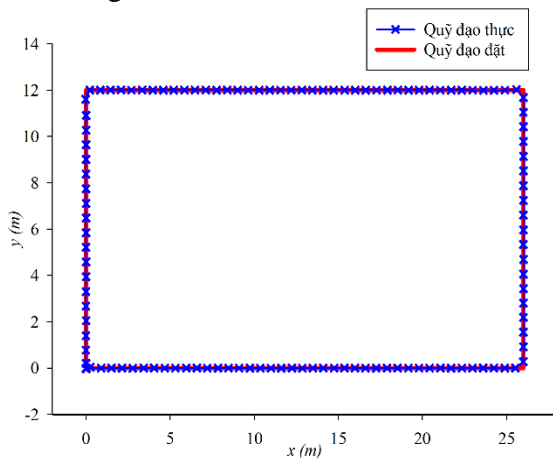
Bảng 2. Sai số vị trí và hướng trung bình với quỹ đạo hình tròn

Quỹ đạo hình tròn (v=0.6 m/s)	
Sai số theo phương x	0,009488
Sai số theo phương y	0,010707
Sai số góc	0,091098

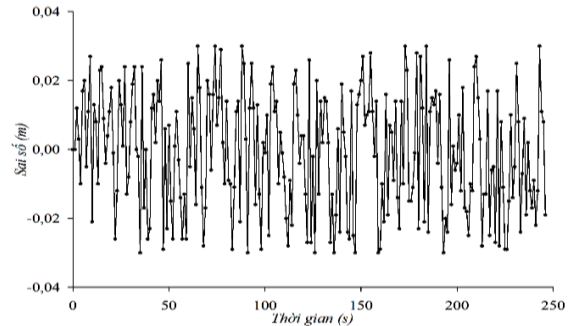
$$e_{dist} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_{ref} - x_{sensor})^2 + (y_{ref} - y_{sensor})^2} \quad (17)$$

$$e_{angle} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{(\theta_{ref} - \theta_{sensor})^2} \quad (18)$$

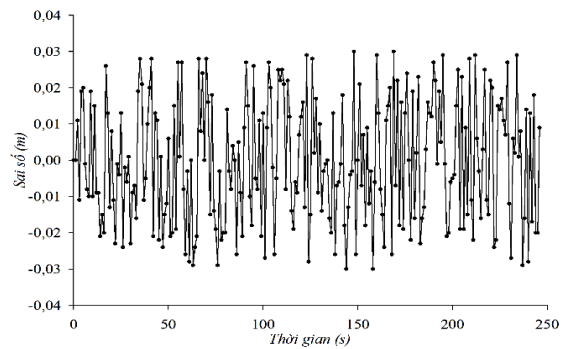
Trong đó e_{dist} , e_{angle} là sai số vị trí và sai số góc trung bình tính bằng n số lần lấy mẫu tính toán. x_{ref} , y_{ref} , θ_{ref} là giá trị tham chiếu về vị trí và góc của robot. x_{sensor} , y_{sensor} , θ_{sensor} là các giá trị về vị trí và góc của cảm biến.



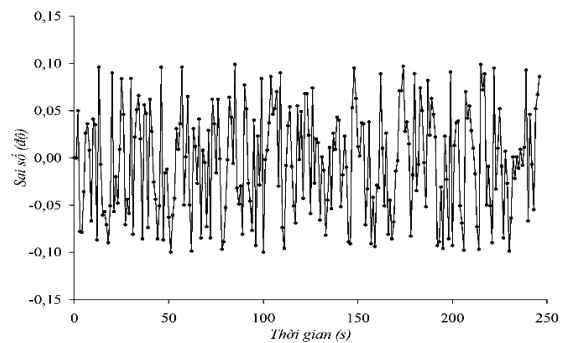
Hình 6. Đáp ứng vị trí của robot với quỹ đạo hình chữ nhật



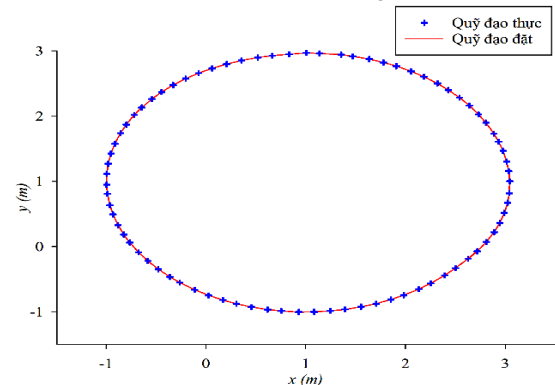
Hình 7. Sai số vị trí robot theo phương x với quỹ đạo hình chữ nhật



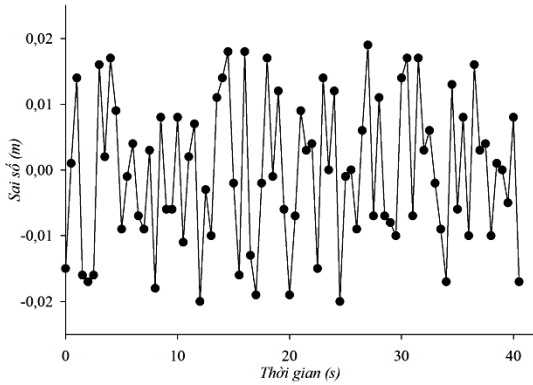
Hình 8. Sai số vị trí của robot theo phương y với quỹ đạo hình chữ nhật



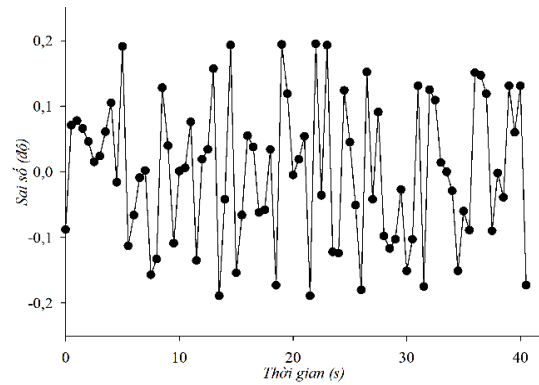
Hình 9. Sai số góc của robot quỹ đạo với hình chữ nhật



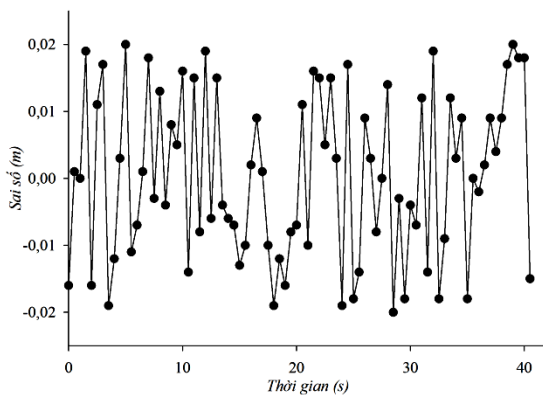
Hình 10. Đáp ứng vị trí robot với quỹ đạo hình tròn



Hình 11. Sai số vị trí robot theo phương x với quỹ đạo hình tròn



Hình 13. Sai số góc của robot với quỹ đạo hình tròn



Hình 12. Sai số vị trí robot theo phương y với quỹ đạo hình tròn

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp bám quỹ đạo cho robot di động sử dụng thuật toán pure pursuit. Quỹ đạo thử nghiệm thực tế là hình chữ nhật và hình tròn. Các thử nghiệm cho thấy phương pháp điều khiển đạt được độ ổn định về vị trí và hướng khi làm việc với quỹ đạo khác nhau. Phương pháp đề xuất thực hiện đơn giản đem lại hiệu suất và thời gian xử lý nhanh cho việc điều khiển bám quỹ đạo của robot di động dạng hai bánh vi sai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T.Y. Wang, C.D. Chang, "Hybrid Fuzzy PID Controller Design for a Mobile Robot", Proceedings of IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018 IEEE ICASI 2018- Meen, Prior & Lam (Eds), 650-653, 2018.
- [2] J.L. Sanchez-Lopez, P. Campoy, M.A. Olivarez Mendez, I. Mellado-Bataller and D. Galindo-Gallego, "Adaptive Control System based on Linear Control Theory for the Following Problem of a Car-Like Mobile Robot", IFAC Conference on Advances in PID, Brescia (Italy), 2012.
- [3] Oubbati M, Schanz M, Levi P., "Kinematic and Dyanamic Adaptive Control of a Nonholonomic Mobile Robot using a RNN", Proceedings 2005 IEEE International Symposium on Computational intelligence in Robotics and Automation, 2005.
- [4] Das T, Kar I.N, Chaudhury S., "Simple neuron - based adaptive controller for a nonholonomic mobile robot including actuator dynamics", Neuracomputing, 2006.
- [5] Das T, Kar I.N., "Design and implementation of an adaptive fuzzy logic - based controller for wheeled mobile robots", IEEE Trans. Control Systems Technology, 2140-2151, 2006.
- [6] Z. Zhang, and Y. Xiong, "A Real-Time Path Tracking Approach for a Wheeled Mobile Robot", 2012 Sixth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering, 204-207 2012.

- [7] G. Bai, Y. Meng, Q. Gu, X. Gan, L. Liu, "MPC-Based Path Tracking of Mobile Robots in the Non-Global Coordinate System", The 31th Chinese Control and Decision Conference (2019 CCDC), 6071-6075, 2019.
- [8] T.Y. Wang, C.C. Tsai, D.A. Wang, "Dynamic Control of An Omnidirectional Mobile Platform", Journal of Nan Kai, Vol. 7, 9-18, 2010.
- [9] H.T. Abatari, A.D. Tafti, "Using a Fuzzy PID Controller for the Path Following of a Car-like Mobile Robot", International Conference on Robotics and Mechatronics, 2013.
- [10] H. Andersen, Z.J. Chong, Y.H. Eng, S. Pendleton, and M.H. Ang, "Geometric path tracking algorithm for autonomous driving in pedestrian environment", IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 1669-1674, 2016.
- [11] J. Bačík, F. Ďurovský, M. Biroš, K. Kyslan, D. Perduková, and S. Padmanaban, "Pathfinder-Development of Automated Guided Vehicle for Hospital Logistics", IEEE Access (Volume: 5), 26892-26900, 2017.
- [12] M. Elbanhawi, M. Simic, and R. Jazar, "Receding horizon lateral vehicle control for pure pursuit path tracking", Journal of Vibration and Control vol. 24, 2018.
- [13] R. Wang, Y. Li, J. Fan, T. Wang, and X. Chen, "A Novel Pure Pursuit Algorithm for Autonomous Vehicles Based on Salp Swarm Algorithm and Velocity Controller", IEEE Access (Volume: 8), 166525-166540, 2020.

Thông tin liên hệ: **Vũ Công Thành**

Điện thoại: 0912953861 - Email: vuthanh.cdt@gmail.com
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Nguyễn Anh Tú

Điện thoại: 0904378033 - Email: tuna@hau.edu.vn
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.

