

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN BẨM VỊ TRÍ CHO ROBOT DI ĐỘNG TRONG BÀI TOÁN TỰ ĐỘNG TIẾP CẬN TRẠM DỪNG

ThS Trần Quốc Huy*, KS Lê Tiến Dũng

Khoa Tăng thiết giáp/Trường Sĩ quan KTQS

Khoa Kỹ thuật Cơ sở/Trường Sĩ quan KTQS

Tóm tắt: Bài báo trình bày giải pháp xây dựng hệ thống điều khiển cho robot di động trong tác vụ tự động di chuyển tiếp cận trạm dừng. Trong đó, một stereo camera kết hợp với thẻ định vị Apriltag và thuật toán điều khiển được đề xuất, xây dựng dựa trên mô hình động học của robot với các tham số hệ thống biểu diễn thông qua các tọa độ cực. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển đáp ứng được yêu cầu về độ chính xác về tư thế và vị trí trong tự động tiếp cận trạm dừng của robot.

Từ khóa: robot di động, định vị, tự động tiếp cận trạm dừng.

1. Giới thiệu

Trong vài thập kỷ trở lại đây, robot di động đã được sử dụng ngày càng rộng rãi trong các ứng dụng thực tế tại các nhà máy sản xuất, nhà kho, bệnh viện, trường học. Chúng được phân công thực hiện nhiệm vụ vận chuyển hàng hóa giúp nâng cao hiệu quả sản xuất, dịch vụ và giảm chi phí nhân công. Tại Việt Nam trong lĩnh vực y tế, giai đoạn đại dịch Covid-19, hệ thống robot tự hành Vibot-2 được sử dụng để vận chuyển đồ ăn, thuốc men, nhu yếu phẩm đến cho các phòng bệnh nhân trong khu vực cách ly tại các bệnh viện, giúp giảm nguy cơ lây nhiễm chéo cho nhân viên y tế [1].

Thông thường một hệ robot di động tự hành sẽ được trang bị chức năng tự động tiếp cận các trạm dừng trong trường hợp robot cần trở về trạm sạc pin khi năng lượng yếu hoặc khi robot cần tự động đi lấy các xe hàng tại những trạm dừng cố định trong khu làm việc.

Khác với bài toán tự động di chuyển theo bản đồ, bài toán tự động tiếp cận trạm dừng trong nhiều trường hợp đòi hỏi độ chính xác và độ ổn định rất cao đảm bảo thỏa mãn những yêu cầu nhất định về giải pháp định vị và điều khiển đối với từng trường hợp cấu hình áp dụng cụ thể trong thực tế.

Trong bài báo này trình bày một phương án thiết kế hệ thống điều khiển với luật điều khiển được xây dựng thông qua hệ tọa độ cực với điểm tham chiếu không đặt tại tâm quay của thân robot mà được đặt trùng với tâm của camera gắn ở phía đuôi của phần thân để

robot.

2. Cơ sở lý thuyết

Đối tượng robot di động được nghiên cứu trong bài báo là hệ thống Vibot-2 [2] được thể hiện trên Hình 1. Bài toán tiếp cận trạm dừng của robot Vibot-2 được mô tả trong Hình 1a và 1b. Trong cả hai trường hợp, hệ thống định vị đều sử dụng một tấm chắn cố định có dán cụm thẻ định vị AprilTag [3] làm mốc tham chiếu kết hợp với một camera quan sát được gắn chính giữa trên phần đuôi của thân để di động của robot. Robot sẽ chuyển động lùi liên tục và tự động dừng khi cảm biến tiệm cận lắp dưới gầm đuôi của robot chạm vào một miếng chắn kim loại được lắp ngay trên tấm chắn định vị đặt tại trạm sạc (hoặc tại trạm để xe hàng).



a) Robot lùi về trạm sạc

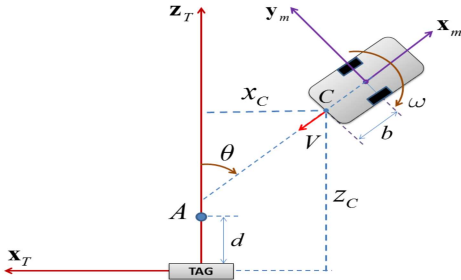


b) Tiếp cận lấy xe chở đồ

Hình 1. Robot tự động tiếp cận trạm

Robot Vibot-2 có cấu trúc (2,0) với hai bánh truyền động chính là loại bánh cố định được gá ở hai bên chính giữa thân để robot. Robot chuyển động theo hai thành phần vận tốc dài và vận tốc góc (V , ω). Trong bài toán tự động tiếp cận trạm dừng, tư thế của robot

được xác định trong hệ tọa độ cố định gắn với tấm chắn định vị và được định nghĩa bởi vectơ $\vec{X} = (x, z, \theta)$ trong đó góc hướng của robot được xác định bởi góc hợp giữa hai trục tọa độ z_T, x_m . Camera được bố trí tại điểm C là điểm giữa phía sau của thân đế robot (xem Hình 2):



Hình 2. Động học robot trong bài toán tiếp cận trạm dừng

Mô hình động học của robot di động trong hệ tọa độ cố định gắn với tấm chắn định vị được mô tả bởi các phương trình vi phân chuyển động sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \sin(\theta) \\ \dot{z} = V \cos(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

Tọa độ tâm C của camera được biểu diễn thông qua tọa độ vị trí của robot trong hệ tọa độ cố định gắn với thẻ định vị:

$$\begin{cases} x_c = x - b \sin(\theta) \\ z_c = z - b \cos(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

Như vậy, ta có thể viết lại các phương trình vi phân mô tả chuyển động của robot thông qua tọa độ của điểm cố định C trên thân robot như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = V \sin(\theta) - b\omega \cos(\theta) \\ \dot{z}_c = V \cos(\theta) + b\omega \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

Trong bài toán tự động lùi về trạm dừng, vận tốc dài của robot được quy định có giá trị âm ($V \leq 0$) tức là robot sẽ chuyển động lùi về trạm dừng. Trong trường hợp lý tưởng, quá

trình lùi của robot sẽ kết thúc khi thân đế robot di chuyển đến vị trí tại đó robot có tư thế thỏa mãn:

$$\begin{cases} x_c = 0 \\ z_c = d \\ \theta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Trong thực tế, các điều kiện hạn chế đối với tư thế của robot ở vị trí dừng cần thỏa mãn ràng buộc sau:

$$\begin{cases} |x_c| = \Delta_{x_{\max}} \\ z_c = d \\ |\theta| = \Delta_{\theta_{\max}} \end{cases} \quad (5)$$

Trong trường hợp của robot Vibot-2, các thông số ràng buộc được lựa chọn như sau: $\Delta_{x_{\max}} = 5\text{cm}, d = 20\text{cm}, \Delta_{\theta_{\max}} = 5^\circ$. Đây chính là độ chính xác mà bài toán điều khiển tự động tiếp cận trạm dừng cần đảm bảo thỏa mãn.

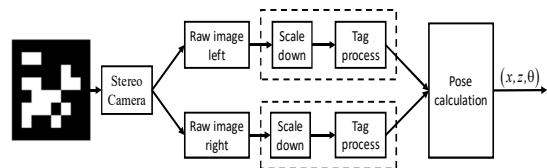
3. Hệ thống điều khiển robot trong bài toán tự động tiếp cận trạm dừng

3.1. Mô đun định vị

Giải pháp định vị cho robot sử dụng một stereo camera Zed2i có hai mắt quan sát trái và phải (được gá chính giữa phía sau thân đế di động của robot) kết hợp với thẻ định vị AprilTag (kích thước $15 \times 15\text{cm}$) được dán trên tấm chắn định vị như trong Hình 3.



Hình 3. Bố trí thiết bị với robot Vibot-2

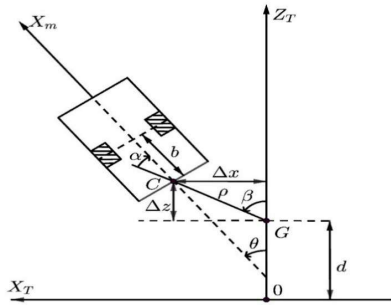


Hình 4. Quy trình tính toán tư thế của robot

Tư thế của robot được tính toán thông qua quy trình được thể hiện trên Hình 4. Dữ liệu được tính toán dựa trên thông tin thu thập từ hai nguồn camera trái và phải, nhờ vậy giúp tăng độ tin cậy trong phép đo [4].

3.2. Nguyên lý điều khiển

Để xây dựng bộ điều khiển chuyển động cho robot, mô hình động học của robot được biểu diễn lại thông qua một phép chuyển đổi sang các tham số tọa độ cực như trên Hình 5. Tư thế của robot được biểu diễn thông qua ba tham số (ρ, α, β) với: ρ là khoảng cách từ vị trí tâm camera C tới vị trí đích G (điểm tại đó robot kết thúc chuyển động lùi về trạm dừng), α là góc giữa $(\overrightarrow{CG}, x_m)$ và β là góc giữa $(z_T, \overrightarrow{CG})$.



Hình 5. Biểu diễn động học của robot với tham số tọa độ cực.

Các tham số tọa độ cực được định nghĩa như sau:

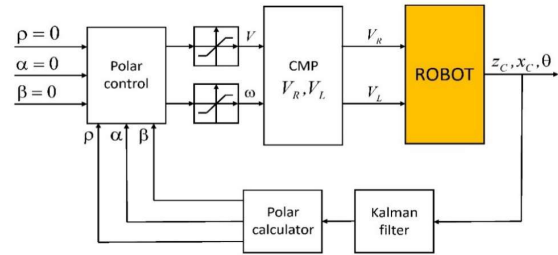
$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2} \\ \beta = \text{atan2}(\Delta_x, \Delta_z) \\ \alpha = \theta - \beta \end{cases} \quad (6)$$

Trong trường hợp lý tưởng, robot Vibot-2 sẽ hoàn thành chuyển động lùi về trạm dừng khi $\rho = 0, \alpha = 0, \beta = 0$ tức điểm C trùng với điểm G và trục tọa độ x_m trùng với trục z_T . Luật điều khiển chuyển động được đề xuất xây dựng dựa trên bộ điều khiển tỉ lệ [5] như sau:

$$\begin{cases} V = \frac{-K_\rho \rho}{\max\{|\beta|, T_\beta\}} \\ \omega = -K_\alpha \alpha + K_\beta \beta \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó $K_\rho, K_\alpha, K_\beta$ và T_β là các hằng số dương. Thành phần $K_\rho \rho$ trong luật điều khiển sẽ lái robot sao cho thu hẹp độ lớn về mặt khoảng cách và thành phần $K_\alpha \alpha, K_\beta \beta$ sẽ kiểm soát về mặt hướng của thân robot.

Khác với giải pháp truyền thống trong [5], bài báo đưa ra thành phần $\max\{|\beta|, T_\beta\}$ với hằng số T_β được lựa chọn sao cho phù hợp với độ thay đổi vận tốc V của robot. Khi góc β lớn thì robot sẽ chuyển động với vận tốc dài nhỏ, cho thấy sẽ ưu tiên việc quay góc trước để giảm biên độ của β . Khi β đã giảm, vận tốc của robot sẽ tăng trở lại và tiếp cận quỹ đạo di chuyển về trạm dừng. Nếu không có thành phần chỉnh định $\max\{|\beta|, T_\beta\}$ việc tăng V ngay từ ban đầu sẽ dễ tạo ra độ quá chỉnh, làm ảnh hưởng xấu đến khả năng tiếp cận một quỹ đạo tốt về trạm dừng.



Hình 6. Sơ đồ hệ thống điều khiển robot

Hệ thống điều khiển robot được thể hiện trên Hình 6. Công thức (7) được thực hiện trong khối "Polar control". Giá trị vận tốc đầu ra (V, ω) của khối này được chuẩn hóa với khoảng hạn chế:

$$\begin{cases} -V_{\max} \leq V \leq 0 & (m/s) \\ -\omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max} & (rad/s) \end{cases} \quad (8)$$

Các giá trị chặn trên và dưới đối với hai thành phần vận tốc dài và vận tốc góc của robot được lựa chọn qua thực nghiệm sao cho việc chuyển động của robot cần đảm bảo không gây ảnh hưởng (nhiều) quá lớn đến mô

đun định vị sử dụng camera. Bởi nếu có sự chuyển hướng quá nhanh về mặt chuyển động của thân đế, camera sẽ thu nhận hình ảnh với thông tin bị nhiễu lớn và vì vậy rất khó để đưa ra được một phép đo tin cậy.

Từ các giá trị vận tốc dài và vận tốc góc, ta có thể tính toán ra vận tốc góc của hai bánh chủ động trái và phải (V_L, V_R) :

$$\begin{cases} V_R = \frac{V + \omega L / 2}{R} \\ V_L = \frac{V - \omega L / 2}{R} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó, L là khoảng cách giữa hai bánh chủ động, R là bán kính bánh xe chủ động.

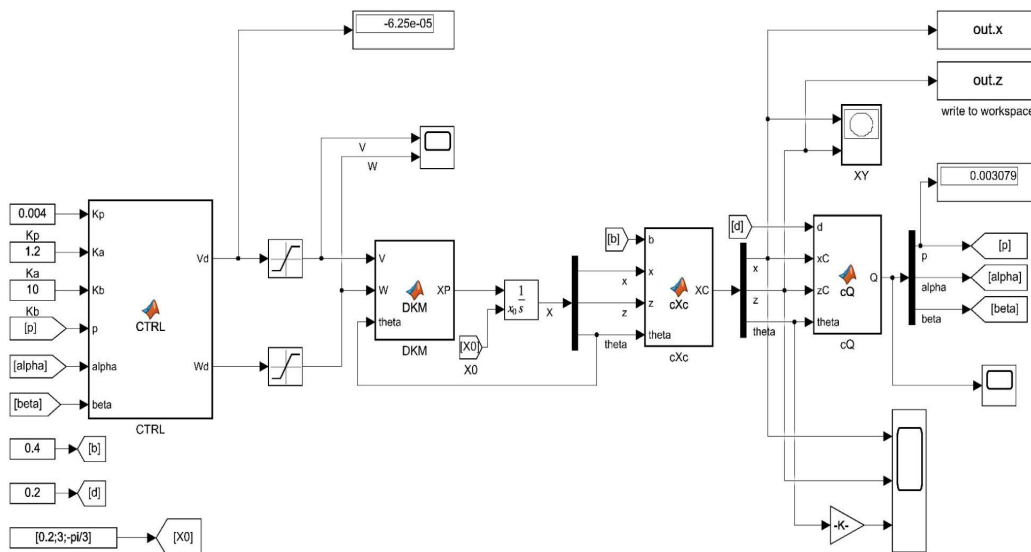
Để giảm nhiễu đo, bài báo bổ sung thêm một bộ lọc Kalman để xử lý tín hiệu đo vị trí và góc hướng của mô đun định vị trước khi đưa vào tính toán các giá trị phản hồi của các tọa độ cực, nhằm tăng độ tin cậy của tín hiệu điều khiển đầu ra (Hình 6).

4. Mô phỏng thực nghiệm

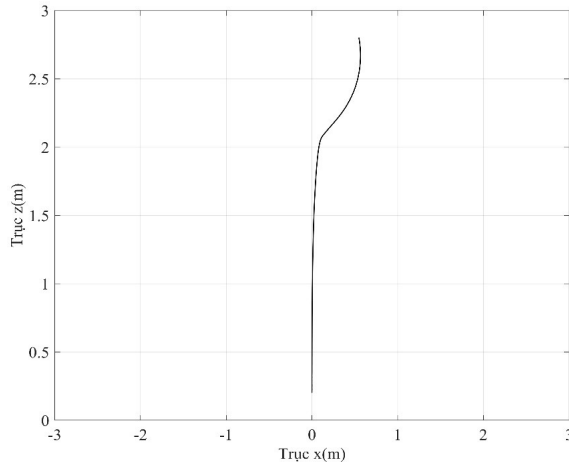
4.1. Kết quả mô phỏng

Hệ thống điều khiển của robot được xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink thể hiện trên Hình 7. Tọa độ xuất phát tâm robot:

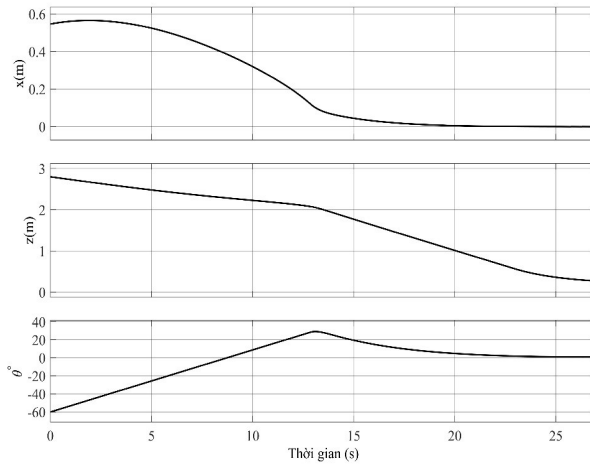
$(x; z; \theta) = (0, 2m; 3, 0m; -60^\circ)$, từ đây có thể tính ra tọa độ tâm C của camera là $(x_c; z_c; \theta) = (0, 55m; 2, 8m; -60^\circ)$. Các tham số của bộ điều khiển (7) được chọn như sau: $K_p = 0,004$, $K_\alpha = 1,2$, $K_\beta = 10$, $T_\beta = 0,01$, giới hạn $V_{max} = 0,15m/s$, $\omega_{max} = 0,12rad/s$. Chức năng của một số khối chính như sau: khối DKM biểu diễn mô hình động học của Vibot-2. Khối cXc tính tọa độ của điểm C từ tọa độ tâm của robot, khối cQ tính các tham số tọa độ cực theo các giá trị tọa độ Descartes của điểm C và góc θ . Khối CTRL mô tả luật điều khiển theo ba hệ số K_p , K_α , K_β . Đáp ứng về quỹ đạo chuyển động, tư thế của robot (tọa độ vị trí của robot tại tâm C và góc hướng của thân robot trong hệ tọa độ cố định gắn với tám chân định vị) và vận tốc chuyển động (vận tốc dài và vận tốc góc) được thể hiện trên Hình 8, Hình 9, Hình 10 tương ứng. Các kết quả cho thấy chất lượng khá tốt của bộ điều khiển. Các tham số của bộ điều khiển có thể áp dụng cho hầu hết các đối tượng với điều kiện vận hành tương tự, đặc biệt là với dải giới hạn về vận tốc dài và vận tốc góc. Khi thay đổi giá trị vận tốc dài và vận tốc góc tối đa, có thể phải chỉnh định lại bộ tham số điều khiển để có đáp ứng tốt.



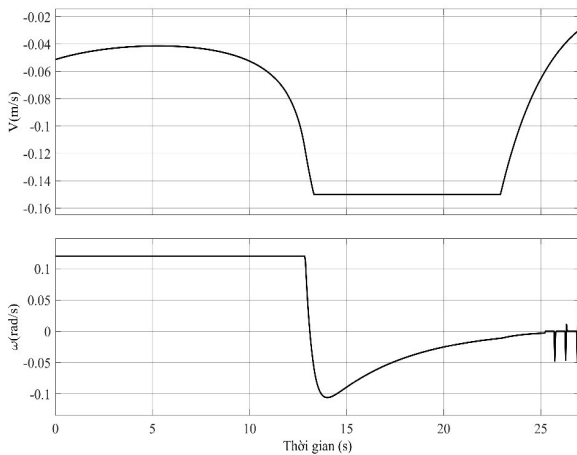
Hình 7. Sơ đồ hệ thống điều khiển robot trên MATLAB/Simulink



Hình 8. Quỹ đạo điểm C



Hình 9. Tọa độ điểm C và góc hướng



Hình 10. Đáp ứng về vận tốc dài, vận tốc góc của robot

4.2. Kết quả thực nghiệm

Bảng 1. Kết quả giải pháp điều khiển mới

STT	Vị trí bắt đầu (x_c, z_c, θ) (m, m, deg)	Thời gian hoàn thành tiếp cận (s)	Sai lệch tính cuối cùng theo trục x (cm)
1	(0, 3, 0)	26	0,19
2	(0,5, 3, -30)	32	0,27
3	(-0,2, 3, 30)	30	0,083
4	(0,5, 3, 0)	32	0,25
5	(0,6, 3, -30)	36	0,17
6	(0,25, 3, 30)	31	0,42
7	(-0,5, 3, 0)	35	0,08
8	(-0,6, 3, 20)	30	0,38
9	(-0,5, 3, -40)	32	0,41
10	(-0,4, 3,8, -20)	36	0,15

Bảng 2. Kết quả giải pháp điều khiển cũ

STT	Vị trí bắt đầu (x_c, z_c, θ) (m, m, deg)	Thời gian hoàn thành tiếp cận (s)	Sai lệch tính cuối cùng theo trục x (cm)
1	(0,33, 2,45, -10)	50	1,24
2	(-0,27, 2,97, 30)	42	1,14
3	(-0,22, 3,90, 40)	50	1,02

Để có thể đánh giá chất lượng hệ thống điều khiển robot Vibot-2 trong bài toán tự động tiếp cận trạm dừng, bài báo đã thực hiện một số phép đo và đưa ra đánh giá trên hai tiêu chí: thời gian hoàn thành tác vụ và sai lệch tính trung bình theo trục x trên 100 mẫu số liệu đo cuối cùng (về mặt góc hướng nhìn chung đều hoàn thành ở tư thế trong yêu cầu nên không đánh giá). Các kết quả được thể hiện trên Bảng 1 và Bảng 2. Trong quá trình cài đặt bộ điều khiển mới, tham số bộ điều khiển K_p, K_α, K_β được lựa chọn thực nghiệm dựa theo các giá trị mô phỏng trên MATLAB/Simulink. Từ bảng kết quả cho thấy kết quả bộ điều khiển mới mang lại tốt

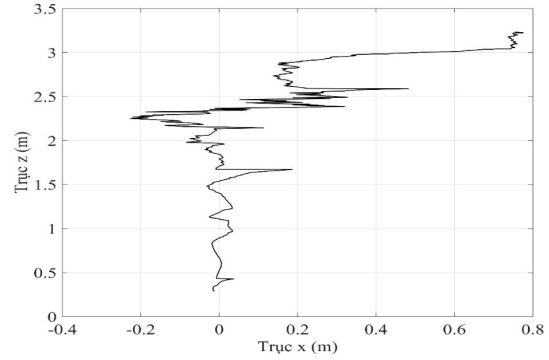
hơn so với bộ điều khiển cũ đã thực hiện trước đây trong [2]. Bảng 1 cho thấy sai số trung bình đạt được tốt hơn rất nhiều so với giải pháp điều khiển cũ trong Bảng 2 (bộ điều khiển đã được cài đặt trong [2]), với độ chính xác khá cao (sai lệch tĩnh trung bình cuối cùng theo trục x đều nhỏ hơn $0,5\text{cm}$). Bên cạnh đó thời gian hoàn thành tác vụ cũng được cải thiện đáng kể (giảm $\sim 40\%$ tổng thời gian hoàn thành tác vụ khi so sánh trên cùng một khoảng cách ban đầu tương tự). Hình 11, Hình 12 thể hiện tư thế trong một trường hợp thực nghiệm và Hình 13-18 là đồ thị đáp ứng của robot trong bài toán tự động tiếp cận về trạm dừng để xe hàng. Có thể vẫn tồn tại độ biến động khá lớn về mặt dữ liệu đo phản hồi cũng như tín hiệu điều khiển tính toán. Điều này cho thấy vấn đề nhiễu vẫn tồn tại trong hệ thống điều khiển.



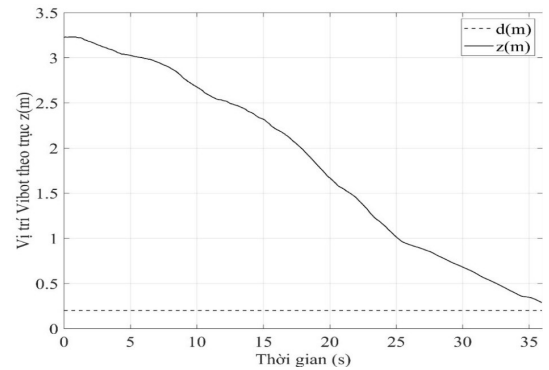
Hình 11. Tư thế ban đầu của robot



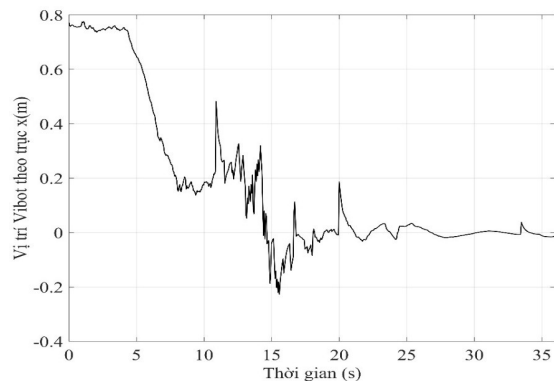
Hình 12. Tầm quan sát của camera



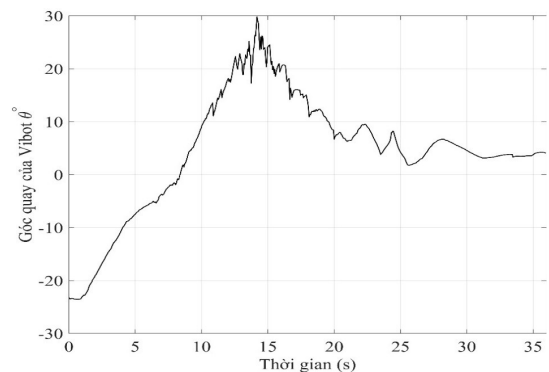
Hình 13. Quỹ đạo Vibot-2



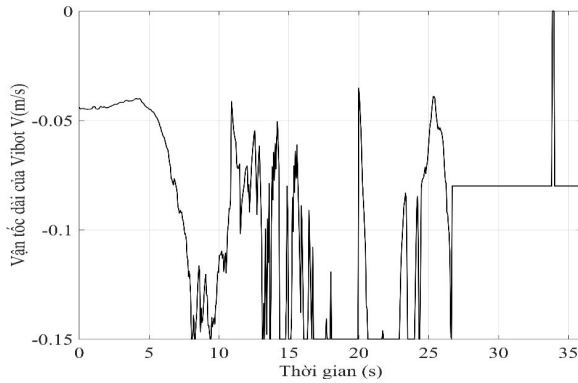
Hình 14. Vị trí theo trục z (m)



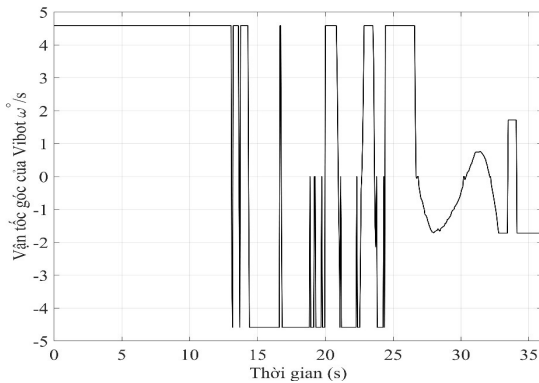
Hình 15. Vị trí theo trục x (m)



Hình 16. Góc quay θ (deg)



Hình 17. Vận tốc dài V (m/s)



Hình 18. Vận tốc góc ω (deg/s)

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày một phương án

Tài liệu tham khảo

- [1]. V. T. Hoang, Q. N. Tang, X. T. Truong, D. Q. Nguyen, "An indoor localization method for mobile robot using ceiling mounted Apriltags," Journal of Science and Technique, Vol. 17, No. 5, pp. 70-91, doi:10.56651/lqdtu.jst.v17.n05.531.
- [2]. Q. N. Tang et. Al, "Nghiên cứu thiết kế và chế tạo robot y tế vận chuyển trong khu vực cách ly bệnh truyền nhiễm có nguy cơ cao," Đề tài độc lập cấp quốc gia, mã số ĐTĐLCN.45/20, 2021.
- [3]. J. Wang and E. Olson, "AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection," in 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2016), pp. 4193–4198, doi:10.1109/IROS.2016.7759617.
- [4]. D. Q. Nguyen, Q. H. Tran, "Nâng cao chất lượng định vị trong bài toán tự động tiếp cận trạm dừng của robot di động," Hội nghị các nhà nghiên cứu trẻ lần thứ 18, HVKTQS, 2023.
- [5]. P.I. Corke and O. Khatib, "Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB," Springer, 2011.

DESIGN CONTROL SYSTEM FOR THE POSITION TRACKING PROBLEM OF A MOBILE ROBOT IN AUTONOMOUS DOCKING

Abstract: This paper presents a solution to design a control system for the mobile robot in the task autonomous docking. Localization solution uses a stereo camera combined with fiducial Apriltag. The control algorithm is developed based on the robot's kinematic model with the system parameters represented in term of pole coordinates. Simulation and experimental results show that the control system solution meets the requirements for the accuracy of posture and position in the docking process at charging station or cart stations.

Keywords: mobile robot, localization, autonomous docking.

* Tác giả liên hệ: Trần Quốc Huy, email: huycdt48@gmail.com, 0988.935.045.