

HOẠCH ĐỊNH VÀ BẮM ĐƯỜNG ĐI CHO MOBILE ROBOT ỨNG DỤNG ĐIỀU KHIỂN HỒI TIẾP ẢNH

Le Duc Hanh¹, Nguyen Duy Anh¹

¹Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University Ho Chi Minh City

ldhanh@hcmut.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo này trình bày phương pháp tìm đường đi ngắn nhất cho mobile robot trong môi trường có vật cản, và điều khiển mobile robot bám theo đường đi (ảo) đã vạch ra bằng cách ứng dụng tiêu chuẩn ổn định Lyapunov kết hợp với camera hồi tiếp vị trí thực sự hiện tại của robot. Đầu tiên vị trí của robot và các điểm đầu, cuối và vật cản được xác định thông qua camera đặt trên cao. Sau đó giải thuật tìm đường đi ngắn nhất A* sẽ được ứng dụng để tính toán đường đi tối ưu cho robot để đến được điểm đích. Vị trí thực của đường ảo sẽ được chuyển sang tọa độ thực thông qua quá trình calib camera. Cuối cùng Robot sẽ bám theo đường đi đã hoạch định đó. Quá trình thực nghiệm được xem là đạt kết quả tốt khi sai số đường đi thực sự của robot và đường đi đã hoạch định là nhỏ và robot đến được đích

Từ khóa: Điều khiển hồi tiếp, hoạch định đường đi, ổn định lyapunov, xử lý ảnh, hồi tiếp ảnh.

Chỉ số phân loại: 1.4

Abstract: This paper presents a visual feedback control algorithm to find a shortest path for a task and control robot to follow that calculated direction by using Lyapunov algorithm combining with fixed camera. Firstly by using image processing algorithm, the starting, targets, obstacle positions are determined. Secondly the shortest path A* algorithm applied to find the shortest path for mobile robot to reach the target. The position of the virtual line according to the world coordinate will be planning based on calibration process. Finally, position based visual control algorithm is applied to control robot to follow that path. The succession is determined when robot approaches the target and have small error between the calculated path and the real working path of robot.

Keywords: Visual tracking, Shortest path, Camera calibration, classical control, Image processing

Classification number: 1.4

1. Giới Thiệu

Ngày nay robot được sử dụng trong rất nhiều lĩnh vực như an ninh quốc phòng, tìm kiếm cứu nạn, giúp con người làm việc ở những nơi nguy hiểm hay những nơi con người không thể tiếp cận được. Robot phục vụ trong nhà hiện nay cũng đang là một hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn. Tuy nhiên, hầu hết các robot phục vụ trong nhà hiện nay vẫn chưa thể tự động hoàn toàn, việc trang bị cho nó một cảm biến đủ mạnh để có thể né tránh vật cản hay nhận biết vị trí cần đến đang được rất nhiều nghiên cứu trên thế giới quan tâm. Các phương pháp dò line truyền thống sử dụng đường line cố định mang lại nhiều hạn chế trong việc ứng dụng, đường line sau một thời gian sử dụng sẽ bị mờ và không rõ, dễ bị tác động của môi trường xung quanh, và rất phức tạp khi muốn thay đổi hướng di chuyển. Việc ứng dụng camera vào trong việc điều khiển robot để bám theo đường đi đặt ra một nhu cầu thực tế và cấp

thiết, nó có thể giải quyết những hạn chế của việc dò theo line truyền thống và linh động trong việc điều khiển hướng đi, nếu có yêu cầu của người sử dụng. Đồng thời việc sử dụng camera để quy hoạch đường đi còn giúp cho việc di chuyển của robot được tối ưu. Hiện nay các nghiên cứu về tìm đường đi của robot cũng đang được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. U. Farooq et al. [1], sử dụng phương pháp điều khiển thông minh fuzzy kết hợp với các cảm biến hồng ngoại điều khiển robot bám theo đường line cho trước. J.H. Su [2] cũng sử dụng phương pháp dò line bằng các cảm biến quang và phương pháp điều khiển on-off để điều khiển robot dò theo line.

Ngày nay camera đóng một vai trò rất quan trọng trong sự phát triển của nền công nghiệp, dựa vào sức mạnh và tốc độ ngày càng tăng của máy tính, camera đóng vai trò như một cảm biến hiệu quả giúp cho robot nhận diện, phát hiện vật dụng xung quanh

nó và thực hiện một tác vụ theo yêu cầu. Để nhận dạng được vật, thông tin thu thập từ camera sẽ được xử lý để nhận dạng những đặc điểm cốt lõi của vật và truyền tọa độ của vật về cho camera. P.T.L. Hải et al. [3] sử dụng phương pháp phân đoạn ảnh cùng với phép toán hình thái học (morphology) để phân biệt, xác định vị trí và tính vận tốc của từng robot. Phương pháp này sử dụng phần mềm Matlab nên không đảm bảo được tính thời gian thực cũng như sẽ khó khăn trong việc giao tiếp với các robot tay máy có trên thị trường không dùng Matlab. Hay H.Đ. Chiến et al. [4] sử dụng phương pháp nhận dạng vật theo màu sắc sử dụng phần mềm Halcon. Phương pháp này sử dụng một phần mềm thương mại sẵn có để thực hiện sẽ gây khó khăn trong việc phát triển các chức năng và kết nối với các thiết bị ngoại vi khác như cánh tay robot. N.V. Khanh et al [5] sử dụng một camera gắn trực tiếp trên robot để điều khiển robot bám theo đường hàn cho trước bằng cách sử dụng phương pháp điều khiển sử dụng tọa độ điểm ảnh của camera hay A. Cherubini et al [6] sử dụng phương pháp điều khiển hồi tiếp ảnh để điều khiển một mobile robot bám theo đường line màu trắng.

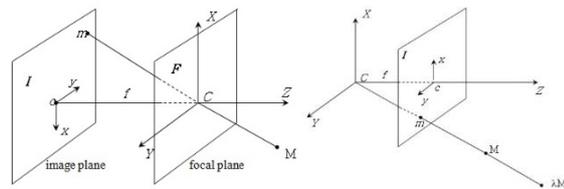
Các phương pháp dò theo line cho trước sử dụng camera và các cảm biến có hạn chế đó là chỉ có thể chạy theo một đường line cho trước và cố định vì thế nó không được linh hoạt trong sử dụng. Việc ứng dụng một phương pháp điều khiển ở đó các đường line bám theo có thể thay đổi được là một hướng ứng dụng thực tiễn trong cuộc sống đặc biệt là những nơi những vật cản có thể thay đổi, vì thế đường đi cũng phải linh hoạt thay đổi theo. Để có thể tạo ra các đường đi ảo đó nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung nghiên cứu vào việc quy hoạch đường đi. Z. Miljkovic et al. [7] ứng dụng giải thuật Triz và Maz để quy hoạch đường đi cho robot qua các trạm dừng và đi đến điểm đích cần đến. S. Kloder et al. [8] sử dụng giải thuật tìm đường đi cho nhiều robot để cùng thực hiện một tác vụ yêu cầu, bằng cách sử dụng định nghĩa về hoán vị bất biến nghiên cứu đã giải bài toán về va chạm đường đi của nhiều robot từ đó hoạch định ra đường đi cho robot. Tuy nhiên các nghiên cứu có giới hạn là tập

trung vào việc nghiên cứu tìm đường đi và mô phỏng trên máy tính, việc ứng dụng để robot bám theo đường đi đã hoạch định ra vẫn chưa được nghiên cứu sâu.

Từ những vấn đề thảo luận ở trên, sử dụng camera và xử lý ảnh là một phương pháp rất hữu dụng cho robot có thể quy hoạch đường đi và giúp robot bám theo đường đi đã vạch ra trong nhà hay kho xưởng. Ý tưởng của đề tài là từ một điểm đầu, điểm đích đến và chướng ngại vật, bằng cách sử dụng giải thuật thông minh để tìm đường đi ngắn nhất, sau đó sử dụng chương trình lập trình thông dụng kết hợp với camera và mã nguồn mở xử lý ảnh để thực hiện tác vụ điều khiển cho robot bám theo đường đi đã vạch ra đó.

2. Tinh chỉnh Camera

Camera calibration (hiệu chỉnh camera) là một phương pháp tính toán và thực nghiệm nhằm tìm ra các thông số của camera cho việc tái tạo không gian 3D của một cảnh nào đó trong thực tế bằng những ảnh mà camera đó chụp lại được. Để có những thông số đó, các tính toán sau chủ yếu dựa vào mô hình camera thông dụng nhất hiện nay là mô hình Pinhold [9] như hình 1.



Hình 1. Mô hình Pinhold.

Trong mô hình Pinhold thì một điểm $M = [X \ Y \ Z]^T$ trong không gian 3D sẽ được chuyển đổi về không gian điểm ảnh 2D, $m = [x \ y]^T$. Ta có:

$$Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & -f_x \cot \theta & c_x \\ 0 & \frac{f_x}{\sin \theta} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Hay công thức (2) có thể viết lại:

$$Zm = KM \quad (2)$$

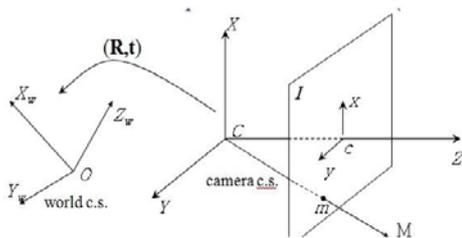
Với ma trận K được gọi là ma trận thông số nội của camera. Để đơn giản ta có thể viết lại ma trận thông số nội dưới dạng:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

với s là tham số nghiêng. Trong thực tế thì đối tượng thật có thể biểu diễn bởi hệ tọa độ 3D bất kì mà không phải là tọa độ camera như ta giả sử. Để tính toán được trên các hệ tọa độ này, cách đơn giản nhất là ta chuyển nó về hệ tọa độ camera như H.2. Giả sử rằng M_w là một điểm bất kì trong hệ tọa độ w bất kì, M_c là một điểm trong hệ tọa độ camera. Khi đó, M_w có thể chuyển về M_c bằng một phép quay R và một phép tịnh tiến t. Ta có:

$$M_c = RM_w + t \tag{3}$$

với ma trận R và vector t mô tả hướng, vị trí tương đối giữa hệ tọa độ camera và hệ tọa độ thực tế. Ma trận R chứa 3 phép quay (theo x, y, z) và vector t chứa 3 phép tịnh tiến. Những thông số chứa trong R và t được gọi là những thông số ngoại của camera.



Hình 2 Chuyển đổi tọa độ pixel về tọa độ thực

Như vậy từ công thức (2) và (3), ta có thể viết lại:

$$Zm_p = KM_c = K(RM_w + t) \tag{4}$$

Từ công thức (4), ta có công thức tổng quát cuối cùng là:

$$Zm_p = K(RM_w + t) \Rightarrow R^{-1}(K^{-1}Zm_p - t) = M_w \tag{5}$$

Với:

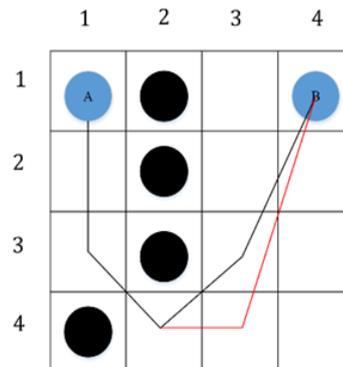
- $m_p = [x \ y \ 1]^T$: tọa độ pixel
- $M_w = [X \ Y \ Z]^T$: tọa độ thực

3. Giải Thuật A*

Trong khoa học máy tính, A* là một thuật toán tìm kiếm trong đồ thị. Thuật toán này tìm một đường đi từ một nút khởi đầu đến một nút đích cho trước [10]. Thuật toán này sử dụng một đánh giá “heuristic” để xếp loại từng nút theo ước lượng về quãng đường tốt nhất đi qua nút đó. Thuật toán sẽ duyệt các nút theo thứ tự của đánh giá heuristic này. Heuristic có thể hiểu đơn giản là một giải thuật để giải các thuật toán, nó là một phương pháp được tạo ra dựa trên những kinh nghiệm, trực giác của con người. Mục đích của thuật giải Heuristic là giải các thuật toán phức tạp nhanh chóng, đưa ra được kết quả so với giải thuật thông thường, vì vậy chi phí thấp hơn. Thuật toán A* ứng dụng hàm heuristic để tìm kiếm đường đi. Từ trạng thái hiện tại, A* xây dựng tất cả các đường đi có thể đi dùng hàm ước lượng khoảng cách (hàm Heuristic) để đánh giá đường đi tốt nhất có thể đi. Thứ tự ưu tiên gán cho một đường đi x được quyết định bởi hàm $f(x) = g(x) + h(x)$. Trong đó $g(x)$: là chi phí đường đi tính từ điểm xuất phát tới điểm x hiện tại, $h(x)$ là khoảng cách từ điểm x tới điểm đích.

Hàm $f(x)$ có giá trị càng thấp thì độ ưu tiên của x càng cao. Để hiểu rõ hơn về các giá trị trong thuật toán, ta cần làm rõ hai định nghĩa sau: Khoảng cách giữa 2 điểm A, B là độ dài đoạn thẳng ngắn nhất nối 2 điểm đó lại với nhau (có thể cắt ngang qua vật cản). Chi phí giữa 2 điểm A, B là độ dài đường đi cần thực hiện để đi từ điểm A đến điểm B (không được cắt ngang qua vật cản).

Giả thiết môi trường hoạt động robot được chia thành mạng lưới các ô vuông với ma trận 4x4 như hình 3.



Hình 3. Áp dụng thuật toán A* trên ma trận 4x4.

Vị trí xuất phát có tọa độ là A(1,1), vị trí đích là B(1,4), các chấm tròn đen là vật cản. Trong trường hợp này bước tiếp theo phải đi từ A chỉ có thể là node (2,1). Khi đi tới node (4,2) sẽ có 2 node liền kề có thể được lựa chọn làm node kế tiếp. Quá trình lựa chọn dựa vào hàm f(x) được tính toán như phương trình (1) trong đó:

$g(4,3)$ là chi phí từ node A(1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (3,1) \rightarrow (4,2) \rightarrow (4,3), $h(4,3)$ là khoảng cách giữa node (4,3) và node B

$g(3,3)$ là chi phí từ node A(1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (3,1) \rightarrow (4,2) \rightarrow (3,3), $h(3,3)$ là khoảng cách giữa node (3,3) và node B

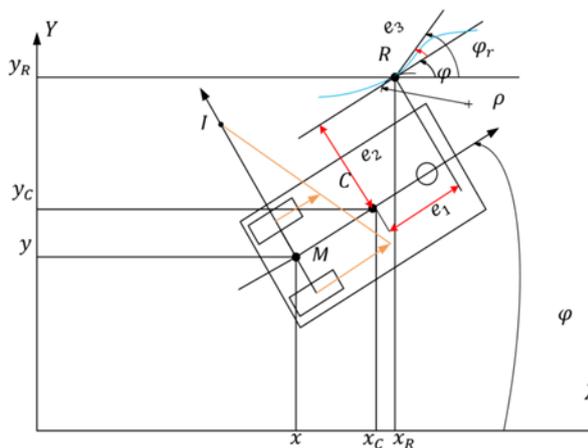
$$f(4,3) = g(4,3) + h(4,3) = 4.414 + 3.162 = 7.576$$

$$f(3,3) = g(3,3) + h(3,3) = 4.828 + 2.236 = 7.064$$

Theo kết quả tính toán được node (3,3) có chi phí f(x) nhỏ hơn, vì vậy sẽ chọn node (3,3) là node đi tiếp theo. Thuật toán sẽ tiếp tục xét các node liền kề với node (3,3) cho đến khi đạt được node mong muốn

4. Thiết kế bộ điều khiển

Mô hình động học của robot đã được giới thiệu nhiều trong các nghiên cứu. Mô hình này bao gồm các điểm quan trọng. Điểm R: điểm tham chiếu cho robot; Điểm M: trung điểm của hai bánh chủ động; Điểm C: Điểm tracking của robot. Mô hình này được thể hiện trên H.4



Hình 4. Mô hình hóa Robot.

Phương trình động học của robot tại M

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

Phương trình động học của robot tại điểm tracking C

$$\begin{cases} x_c = x + d \cos \varphi \\ y_c = y + d \sin \varphi \\ \varphi_c = \varphi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_c = \dot{x} - d \sin \varphi \dot{\varphi} \\ \dot{y}_c = \dot{y} + d \cos \varphi \dot{\varphi} \\ \dot{\varphi}_c = \dot{\varphi} \end{cases} \quad (6)$$

Với d là khoảng cách từ tâm xe đến điểm bám line C.

Phương trình động học tại điểm tham chiếu R

$$\begin{cases} \dot{x}_R = v_R \cdot \cos \varphi_R \\ \dot{y}_R = v_R \cdot \sin \varphi_R \\ \dot{\varphi}_R = \omega_R \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó v_R là vận tốc mong muốn của robot tại điểm tham chiếu.

Bộ điều khiển được thiết kế cho điểm tracking C đến vị trí điểm tham chiếu R với vận tốc mong muốn v_R . Để làm được điều đó, cần phải xác định được các sai số bám đường sau:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R - x_c \\ y_R - y_c \\ \varphi_R - \varphi_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sau khi có được các sai số e_1, e_2, e_3 , bộ điều khiển tracking trong [11] cho phép xác định giá trị vận tốc v và ω cần thiết để điểm tracking có thể bám theo điểm tham chiếu:

$$\begin{cases} v = v_R \cos e_3 + k_1 e_1 \\ \omega = k_2 v_2 e_2 + \omega_R + k_3 \sin e_3 \end{cases} \quad (9)$$

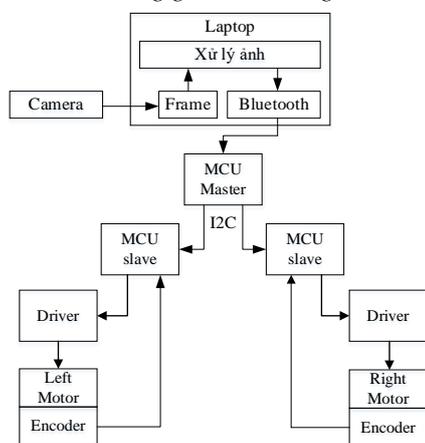
5. Thực Nghiệm

Tiến hành thực nghiệm trong nhiều trường hợp khác nhau để đưa ra những đánh giá về quá trình tìm đường đi, và khả năng bám theo đường đi tìm được của robot. Việc đánh giá về khả năng bám đường của robot sẽ được đánh giá theo các sai số e_1, e_2, e_3 và sai lệch tọa độ tracking của robot so với tọa độ đường đi tìm được. Không gian dùng để thực nghiệm được bố trí như hình 5. Camera được gá đặt cố định phía trên mặt phẳng làm việc của robot với phạm vi hoạt động là 1200 x 900 mm. vị trí của điểm đích đến và điểm bắt đầu được xác định trước, vị trí vật cản là bất kỳ. Cấu trúc điều khiển của robot được tóm tắt như H.6 gồm có 1 vi điều khiển trung

tâm nhận lệnh từ máy tính và điều khiển 2 vi điều khiển khác điều khiển động cơ. Đầu tiên đường đi ngắn nhất từ điểm đầu đến điểm đích được tính toán dựa trên giải thuật A*. Kết quả của đường đi ngắn nhất được thể hiện trong hình 9.



Hình 5. Không gian hoạt động của robot.

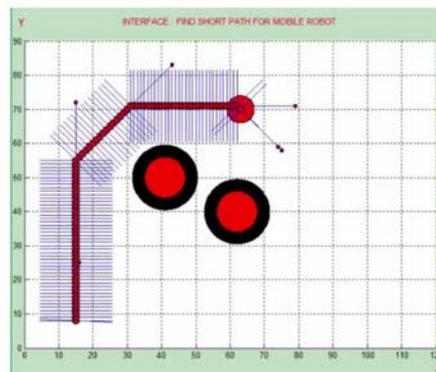


Hình 6. Cấu trúc điều khiển của robot.

Để áp dụng thuật toán A* tìm đường đi cho robot thì vị trí của robot, vật cản và vị trí điểm đích cần phải xác định. Vị trí các điểm này được xác định theo tâm của các đối tượng bằng xử lý ảnh. Để đưa kích thước vật cản vào trong bài toán thì vật cản sẽ được mở rộng từ tọa độ tâm theo mọi hướng với bán kính 6cm.

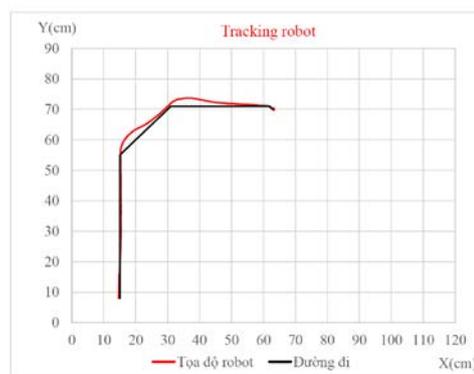
Trên thực tế, robot cũng có kích thước nhất định, để đưa kích thước robot vào bài toán nhưng không làm bài toán trở nên phức tạp, robot sẽ được đơn giản hóa kích thước bằng cách lập một đường biên bao xung quanh robot. Đường biên là đường tròn, có tâm là trung điểm hai bánh chủ động, bán kính là khoảng cách từ tâm đến biên ngoài cùng của một bánh. Bán kính này có thể

được coi như là khoảng cách an toàn của robot đối với vật cản. Vì vậy, mỗi vật cản sẽ được mở rộng thêm từ biên của chúng với bán kính bằng bán kính này. Vật cản được sử dụng trong đề tài là khối tròn, bán kính 6cm, có màu đỏ đồng nhất và mô hình robot kiểm nghiệm có bán kính từ trung điểm hai bánh dẫn động đến biên ngoài cùng của bánh xe là 10.5 cm

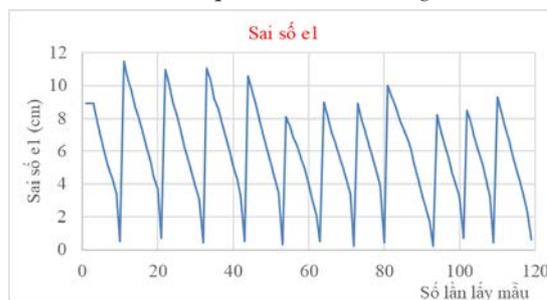


Hình 7. Kết quả tìm đường đi ngắn nhất.

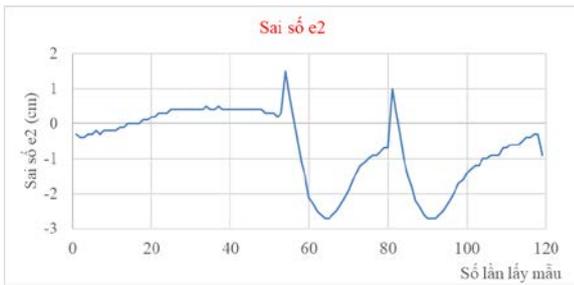
Sau khi đã có đường đi ngắn nhất, robot sẽ dựa trên đường đi đó mà tiến đến điểm đích, kết quả của quá trình điều khiển này được thể hiện trong H.8 với đường màu đỏ là đường hoạch định, và đường màu xanh chính là tọa độ của robot.



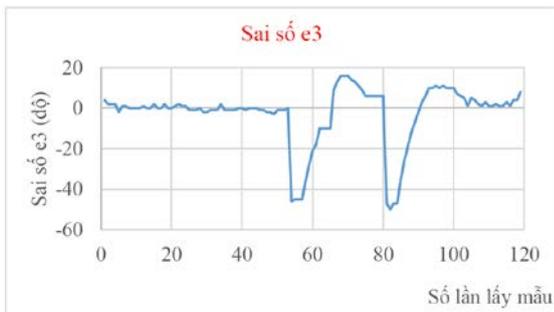
Hình 8. Kết quả bám theo đường line.



Hình 9. Sai số e1.



Hình 10. Sai số e_2



Hình 11. Sai số e_3

Dựa vào H.8-H.11, có thể nhận ra rằng sự kết hợp giữa camera và giải thuật điều khiển đã phát huy tác dụng, giúp cho robot bám theo đường line như mục tiêu đã đề ra với sai số nhỏ.

6. Kết Luận

Nghiên cứu đã trình bày một phương án hiệu quả giúp cho robot có thể hoạt động trong một vùng không gian hẹp như xưởng hay trong nhà. Bằng cách kết hợp giữa xử lý ảnh và điều khiển, đường đi của robot trở nên linh hoạt hơn không còn bị cứng nhắc như dò line truyền thống. Trong quá trình robot bám đường đi, nhờ camera robot có thể nhận biết được vật thể xung quanh và tránh được các vật cản. Ngoài ra người dùng có thể tự định nghĩa đường line cho robot thông qua giao diện camera giúp cho việc thay đổi đường đi không còn khó khăn nữa □

Tài liệu tham khảo

- [1] U. Farooq, M. Amar, M. U. Asad, G. Abbas, và A. Hanif, "Fuzzy logic Reasoning System for Line Following Robot," *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 6 (2014), pp. 244-248.
- [2] J. H. Su, C. S. Lee, H. H. Huang, S. H. Chuang và C. Y. Lin, "An intelligent line following robot project for introductory robot courses," *World Transactions on Engineering and Technology* Education, 8 (2010), pp. 455-461.
- [3] P.T.L. Hải, T.T. Hùng, N.V. Khanh và L.T. Hiếu, "Ứng Dụng Xử Lý Ảnh Kỹ Thuật Số Trong Việc Theo Dõi Sự Chuyển Động Của Các Robot Di Động", *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 2015, pp. 39-47.
- [4] H.Đ. Chiến, N.P. Cường, Đ.Đ. Duy, "Ứng Dụng Xử Lý Ảnh Nhận Dạng Vật Thể Theo Màu Sắc Cho Robot Tay Máy", *Khoa Điện –Điện tử Đại học Bà Rịa Vũng Tàu*, 2015
- [5] N. V. Khanh, N. T. Tien, B. T. Hieu, H. V. Hung, "Study on Tracking Control of Welding Mobile Robot Using Camera - Straight Welding Path Application," *Proceeding of The International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE 2005)*, HCMUT, 2005, pp. 102-107.
- [6] A. Cherubini, F. Chaumetter, G. Oriolo, "An image-based visual servoing scheme for following paths with nonholonomic mobile robots", *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2008, pp. 220-225
- [7] Z. Miljkovic, P. Milica, B. Babic, *Integration of Proces Planning, Scheduling, and Mobile Robot Navigation Based on TRIZ and Multi-Agent Methodology,* *FME Transactions* 41, 2 (2013), pp. 97-106.
- [8] S. Kloder and S. Hutchinson, "Path Planning for Permutation-Invariant MultiRobot Formations," *IEEE Trans. on Robotics*, 22 (2006), pp. 650-665.
- [9] A. Cherbuini, F. chaumette and G.Oriolo, "A position-based visual servoing scheme for following paths with nonholonomic mobile robots", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp.101-105.
- [10] C.Zeng (2012). GA-based Global Path Planning for Mobile Robot Employing A* Algorithm. *Journal of Computer*, Vol.7, No.2, 470-474.
- [11] L.H.Danh, L.T.D.Hieu, N.T.Tien.et al..Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển bám line cho AGV qua giao lộ. Hội nghị toàn quốc lần thứ 7 về Cơ điện tử - VCM – 2014 , pp 597-601

Ngày nhận bài: 6/3/2018

Ngày chuyển phản biện: 9/3/2018

Ngày hoàn thành sửa bài: 29/3/2018

Ngày chấp nhận đăng: 5/4/2018