

ĐIỀU KHIỂN HỒI TIẾP ẢNH CHO ROBOT BẮM QUỸ ĐẠO VÀ TRÁNH VẬT CẢN

VISUAL SERVOING FOR ROBOT ARM TO FOLLOW PLANNING TRAJECTORY AND AVOID THE OBSTACLE

Lê Đức Hạnh*, Lê Đức Đạo

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một hệ thống điều khiển hồi tiếp ảnh để cánh tay robot tiếp cận mục tiêu bằng cách đi theo quỹ đạo đã hoạch định và tránh chướng ngại vật trên đường đến đích. Đầu tiên bằng cách sử dụng camera cố định được đặt phía trên không gian làm việc và sử dụng xử lý hình ảnh để xác định vị trí của cánh tay, chướng ngại vật, đối tượng và điểm đến. Sau đó, quỹ đạo tiếp cận mục tiêu được tính toán và mô phỏng bằng công cụ matlab. Để đảm bảo rô-bốt tiếp tục bám theo quỹ đạo đã hoạch định, thuật toán điều khiển hồi tiếp ảnh vị trí PD được áp dụng. Trong quá trình cánh tay robot thực hiện nhiệm vụ, vị trí của nó liên tục phản hồi về bộ điều khiển để sửa lỗi giữa quỹ đạo dự kiến và quỹ đạo thực tế. Sơ đồ điều khiển áp dụng đã được thử nghiệm và chứng minh hiệu quả trên cánh tay robot 4D.O.F.

Từ khóa: Hoạch định quỹ đạo; Xử lý ảnh; Điều khiển hồi tiếp ảnh; Tay máy; Điều khiển mờ.

ABSTRACT

This paper presents a visual feedback control system for robot arm to approach the target by following the planned trajectory and avoid the obstacle on the way to the destination by using image based visual servoing. Firstly by using the fixing installed camera above the working space and using image processing the position of the arm, obstacle, object and destination are located. After that, the trajectory planning to approach the target are calculated and simulated by using matlab toolbox. To assure the robot to keep tracking the trajectory, the PD position based visual servoing algorithm is applied. During robot arm doing task its position is feedback to controller to correct the error between the planned and real trajectory. The applied control scheme was tested and proven effective on a 4D.O.F robot arm.

Keywords: Trajectory planning; Image processing; Visual servoing; Manipulator; fuzzy control. 

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, với sự bùng nổ của các công nghệ mới, ngành công nghiệp đã đạt được trình độ tự động hóa rất cao. Giờ đây, mục tiêu của ngành là năng suất cao hơn, chính xác hơn, an toàn hơn và ít nhân công hơn. Với những mục tiêu này, sự kết hợp của cánh tay robot đã chứng tỏ là một ứng cử viên nổi bật để đáp ứng các yêu cầu của ngành. Cánh tay robot có thể giảm thiểu đáng kể số lượng công nhân trong doanh nghiệp cũng như rủi ro cho người lao động khi phải hoạt động trong môi trường độc hại. Hơn nữa, khi được điều khiển hiệu quả, cánh tay robot có thể đạt độ chính xác rất cao với dung sai thấp. Một trong những nhiệm vụ phổ biến nhất đối với cánh tay robot trong khu công nghiệp là lập kế hoạch quỹ đạo, tức là cánh tay robot thường được yêu cầu đi theo một con đường xác định trước để hoàn thành một số công việc. Trong quá trình bám theo quỹ đạo, cánh tay thường gặp một hoặc một số vật thể, đồng thời, nó cũng cần phải tránh các chướng ngại vật trong quá trình hoạt động của mình. Theo cách tiếp cận truyền thống, các cảm biến không chạm, chẳng hạn như cảm biến siêu âm hoặc quang thường được sử dụng để gửi tín hiệu phản hồi đến cánh tay robot. Tuy nhiên, các cảm biến này có một nhược điểm nổi bật là độ phân giải thấp và rất nhạy cảm với nhiễu của môi trường. Những loại cảm biến này thường được yêu cầu gắn chặt vào cơ cấu chấp hành của cánh tay robot. Do đó, tính linh hoạt của cánh tay robot sẽ giảm do kích thước của bộ truyền động tăng lên. Để khắc phục những nhược điểm này, điều khiển hồi tiếp ảnh đã xuất hiện như một ứng cử viên nổi bật để thay thế các cảm biến cổ điển.

Hoạch định quỹ đạo cho cánh tay robot dựa trên hình ảnh là một chủ đề đã thu hút sự chú ý của một số học giả. Nhiều tác giả đã nỗ lực

giải quyết các vấn đề liên quan đến giảm sai số trong quá trình vận hành quỹ đạo. Trong nghiên cứu của Tarca et al [1], một chiếc camera được lắp ráp và áp dụng phương pháp điều khiển từ xa thông qua Internet và thực tế tăng cường. Tuy nhiên, cách tiếp cận thực tế tăng cường này bị hạn chế đáng kể do các tín hiệu phản hồi hoàn toàn dựa vào cảm giác của con người. Các thao tác như nắm, thả, di chuyển theo quỹ đạo đều được thao tác thủ công hoàn toàn. Cách thức điều khiển này sẽ tạo ra sai số lớn. Việc theo dõi, bám và tránh chướng ngại vật của cánh tay robot cũng được trình bày trong công trình của Bohg et al. [2], cách tiếp cận sử dụng phương pháp matching của Nasrabadi et al. [3] và kỹ thuật self organizing map của Kumar et al. [4] là ba phương pháp khác để tái tạo hình ảnh 3D cũng như giảm sai số của tay máy và đích đến trong theo dõi vị trí và hướng. Mặc dù stereo vision có những ưu điểm rõ ràng trong việc xử lý đối tượng trong không gian 3 chiều, nhưng nó cũng có những điểm yếu đáng kể đến từ việc hiệu chỉnh máy ảnh, xử lý hình ảnh và nhiễu trong môi trường. Một hạn chế khác của các phương pháp trong [2-4] là chúng dựa trên các giả định nghiêm ngặt về đặc tính tĩnh của không gian xung quanh, tức là, môi trường vẫn tĩnh sau một chuyển động thành công của robot. Giả định này thường dẫn đến độ chính xác định vị kém [5-6]. Hạn chế của stereo vision đã được xem xét trong các tác phẩm của Peter et al. [8] và Shirai et al [7]. Họ gợi ý rằng độ chính xác của nhiệm vụ có thể tăng lên rõ rệt bằng cách áp dụng vòng phản hồi trực quan. Các công trình của họ đã khuyến khích Kosmopoulos et al [9] và William et al [10]. Theo cách tiếp cận của [9], tác giả đã sử dụng ma trận Jacobean dựa trên camera gắn vào end-effector để tạo tín hiệu phản hồi. Thay vì ma trận Jacobean, William và cộng sự đã đề xuất việc sử dụng vị trí Descartes để điều khiển servo trực quan

của cánh tay robot. Tuy nhiên, cách làm này tồn tại một nhược điểm khi xảy ra hiện tượng tắc camera. Trong trường hợp này, quá trình quan sát bị gián đoạn và điểm tham chiếu để điều khiển không thể tính được. Những hiện tượng này đã được thảo luận trong [11]. Các cách tiếp cận này cũng rất nhạy cảm với các lỗi hiệu chuẩn vì nó yêu cầu hiệu chuẩn lại. Thời gian tính toán lâu và yêu cầu hiệu chuẩn lại đã thu hẹp ứng dụng của phương pháp này chỉ trong một số trường hợp cụ thể [12]. Trong các ứng dụng công nghiệp, lập kế hoạch quỹ đạo 2D hiện đang đóng một vai trò quan trọng. Một trong những điểm khác biệt đáng chú ý nhất trong lập kế hoạch quỹ đạo 2D với tác vụ 3D là nó có thể được thực hiện chỉ với một camera. Điều khiển hồi tiếp ảnh là một ứng cử viên lý tưởng để áp dụng vào nhiệm vụ này. Điều khiển hồi tiếp ảnh kế thừa các ưu điểm của hệ thống stereo vision cũng như vượt trội hơn về tính đơn giản của hiệu chuẩn và tính toán. Nghiên cứu này sẽ trình bày một giải thuật điều khiển hồi tiếp ảnh dựa trên hình ảnh sử dụng thuật toán thuật toán điều khiển mờ (IBVSFC) để lập kế hoạch quỹ đạo cánh tay robot và tránh chướng ngại vật. Sự kết hợp này sẽ có những lợi thế của cả sự đơn giản và mạnh mẽ.

2. TÍNH TOÁN TỌA ĐỘ

2.1. Không gian màu HSV

Để xác định vị trí của tay máy, đích đến và vật cản sử dụng camera, kỹ thuật lọc ngưỡng được áp dụng. Sử dụng công cụ Color Thresholder App trong matlab để lọc ngưỡng màu, ứng với mỗi màu đơn sắc sẽ có một ngưỡng nhất định. Xử lý ảnh tìm ra vật thể có màu sắc biết trước sử dụng phương pháp này rất đơn giản nhưng vẫn cho kết quả chính xác cao. Từ đây ta biết được tọa độ pixel của các vật cần tìm trong camera.

2.2. 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 “Mô hình Pinhole”. Để việc tính toán chính xác, camera 2D được gá sao song song với mặt bàn nhất có thể. Sử dụng bàn cờ để tìm ma trận thông số nội ta chụp bàn cờ ở nhiều vị trí khác nhau, trong đó có một bức ảnh bàn cờ được đặt cho các trục tọa độ tay máy với các trục tọa độ bàn cờ cùng phương với nhau. Dùng điều khiển tay máy tới vị trí tọa độ gốc bàn cờ, ta có tọa độ điểm này so với tay máy từ đó suy ra ma trận xoay và tịnh tiến từ bàn cờ về tay máy.

Để thực hiện calibrate camera tìm ra ma trận thông số nội K, ta lần lượt thực hiện các bước như sau:

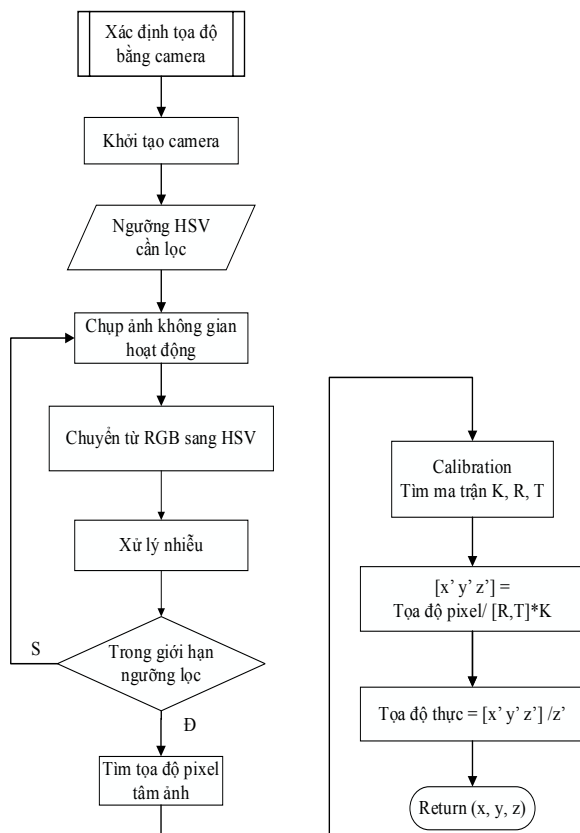
- Bước 1: Chuẩn bị một bàn cờ (loại bàn cờ vua). Kích thước của bàn cờ là tùy ý, tuy nhiên không nên quá nhỏ so với tầm nhìn của camera. Diện tích các ô vuông phải bằng nhau. Bàn cờ được lựa chọn ở đây có kích thước ô là 26 mm, số lượng ô là 7x10. Nếu in bàn cờ trên giấy, nên để chúng trên một mặt phẳng (tám kính, gỗ ...) để chúng luôn được phẳng, không bị biến dạng.

- Bước 2: Sau khi có bàn cờ, ta đặt bàn cờ ở một vị trí cố định, di chuyển camera quanh bàn cờ với những góc nhìn khác nhau, ở từng vị trí đó ta chụp lại hình ảnh chứa bàn cờ. Số lượng hình ảnh có thể là từ 15-20 tấm cho từng thông số, ở đây số lượng ảnh sử dụng là 25. Ta lưu số ảnh này vào một thư mục làm cơ sở dữ liệu

liệu cho các tính toán sau này. Trong quá trình chụp lưu ý không được đặt bàn cờ nghiêng quá 45°, không chỉnh sửa ảnh, không đặt camera ở chế độ autofocus hay chỉnh chế độ zoom trong quá trình chụp.

- Bước 3: Nhập ảnh đã chụp vào app, chọn kích thước cạnh hình vuông 26 mm, chọn skew để khi thực hiện tinh chỉnh camera thì ma trận K sẽ có thông số góc nghiêng, sau đó bấm calibrate để tiến hành calibrate camera. Sau khi thực hiện tinh chỉnh xong, ta sẽ được một file chứa tất cả các thông số của camera (thông số ngoại và thông số nội). Ở đây, ta chỉ lấy các thông số nội K.

Quá trình tính toán vị trí của vật cần, đích đến và robot được tóm tắt như hình 1.



Hình 1. Lưu đồ giải thuật tìm tọa độ đối tượng

2.3. Quỹ đạo di chuyển

Quỹ đạo di chuyển là đường nối từ điểm bắt đầu đến điểm kết thúc trong một chu trình của tay máy. Gấp và thả vật là công việc chính của tay máy, ta phải thiết lập một đường dẫn mong muốn cho end-effector và xác định thời gian cho mỗi tọa độ. Có hàm thời gian tọa độ của end-effector, ta có thể biết được góc của mỗi khớp. Ta xác định được tọa độ vật, tọa độ thả vật, tọa độ vật cần bằng camera. Trong không gian 3 chiều ta có vô số các đường thẳng nối từ điểm bắt đầu đến điểm kết thúc. Nhưng vấn đề đặt ra là phải làm sao cho quỹ đạo di chuyển không được cắt ngang tọa độ vật cần (có thể hiểu là vùng cấm không cho tay máy đi ngang qua). Ta cần xác định được một tập các điểm mà tay máy sẽ di chuyển. Quỹ đạo tay máy theo kiểu Descarts (Cartesian path) là một phương pháp được áp dụng trong việc lập ra đường dẫn cho robot. Sử dụng động học ngược để xác định được giá trị các biến khớp.

Giả sử di chuyển tay máy từ điểm S(200 100 130) đến đến điểm O(310 0 100) trong thời gian 3s, ta có phương trình đường thẳng SO như sau:

$$\frac{x - x_s}{x_o - x_s} = \frac{y - y_s}{y_o - y_s} = \frac{z - z_s}{z_o - z_s} \quad (1)$$

Ta viết phương trình đường thẳng đi qua 2 điểm S và O, có dạng:

Phương trình y theo x:

$$y = 281,81 - 0,91x \quad (2)$$

Phương trình z theo x:

$$z = 184,55 - 0,273x \quad (3)$$

Gọi t₀ là thời điểm bắt đầu, t_f là thời

điểm kết thúc, chọn thời điểm bắt đầu $t_0 = 0$, $t_f = 3s$. Thêm các ràng buộc về vận tốc ban đầu $v(t_0) = 0$ và vận tốc kết thúc $v(t_f) = 0$ ta thiết lập quan hệ $x = x(t)$ là đa thức bậc 3 theo thời gian có dạng:

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (4)$$

$$a_0 = x_s$$

$$a_1 = 0$$

$$\text{với } a_2 = \frac{3(x_o - x_s)}{t^2}$$

$$a_3 = \frac{-2(x_o - x_s)}{t^3}$$

3. GIẢI THUẬT BÁM QUỠ ĐẠO

Cánh tay robot được điều khiển từ vị trí Home đi theo quỹ đạo, nắm và thả vật thể tại vị trí mong muốn rồi quay về vị trí Home.

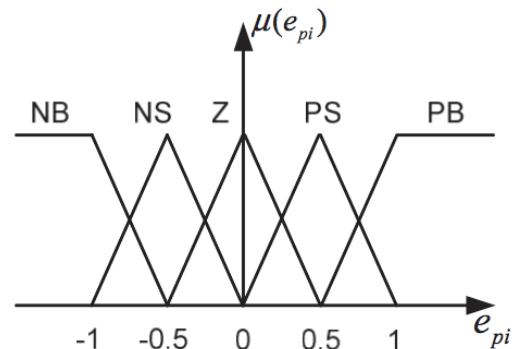
Bước 1: Xác định đối tượng thông qua bộ lọc màu. Biến đổi tọa độ trong không gian camera thành không gian $O_0x_0y_0z_0$.

Bước 2: Tính toán động học ngược của cánh tay robot.

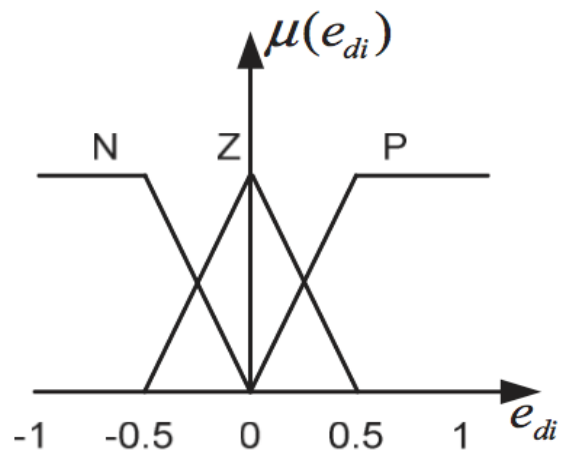
Bước 3: Tính sai số và áp dụng luật điều khiển mờ.

Để giảm bớt gánh nặng của việc điều chỉnh bộ điều khiển, nghiên cứu này đã áp dụng các phương pháp điều khiển mờ để giảm lỗi theo dõi. Ưu điểm nổi bật của điều khiển mờ là nó dựa vào tập các luật điều khiển có thể nghiên cứu từ các kinh nghiệm trong quá khứ. Hơn nữa, tập hợp các quy tắc điều khiển có thể dễ dàng diễn giải thành ngôn ngữ mà con người có thể hiểu được. Nói chung, ba phần sau đây sẽ bao gồm khối điều khiển, cụ thể là mờ hóa,

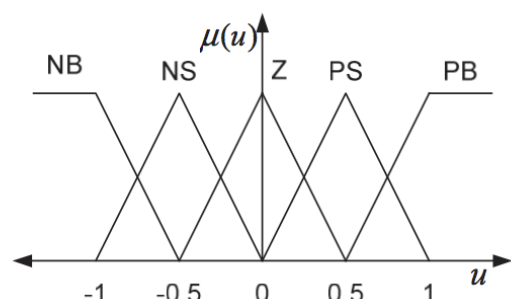
suy diễn mờ và giải mờ. Hàm liên thuộc được sử dụng trong nghiên cứu này là hàm liên thuộc tam giác trong đó sai số vị trí, tốc độ tín hiệu đầu ra được phân chia thành năm, ba và năm tập mờ tương ứng. Mô tả của các hàm thành viên này được minh họa trong Hình 2,3 và 4. Luật điều khiển được minh họa trong bảng 1.



Hình 2. Hàm liên thuộc sai số vị trí



Hình 3. Hàm liên thuộc sai số vận tốc



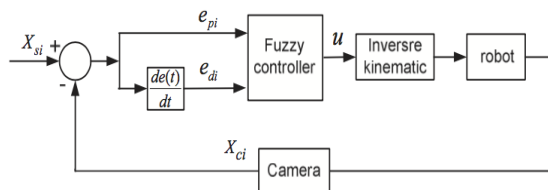
Hình 4. Hàm liên thuộc giá trị điều khiển



Bảng 1. Luật điều khiển của Fuzzy:

		e_{pi}				
		NB	NS	PS	NS	NB
	N	PB	PS	PS	NS	NB
e_{di}	Z	PB	PS	Z	NS	NB
	P	PB	PS	NS	NS	NB

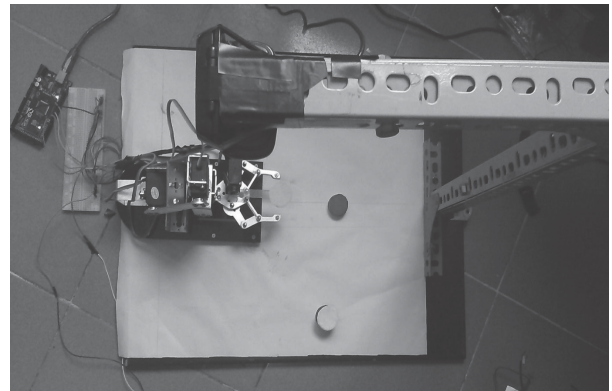
Hình 5 là khối điều khiển cho hệ thống trong đó X_{si} và X_{ci} lần lượt biểu thị giá trị tham chiếu và giá trị hiện tại của tay máy trong khung của máy ảnh. Dựa trên X_{si} và X_{ci} , vị trí mới u được cập nhật và đưa vào các phương trình động học ngược để suy ra các góc của sáu khớp. Quá trình lặp sẽ dừng lại khi sai số của tâm camera và đối tượng trùng nhau.



Hình 5. Khối điều khiển của hệ thống

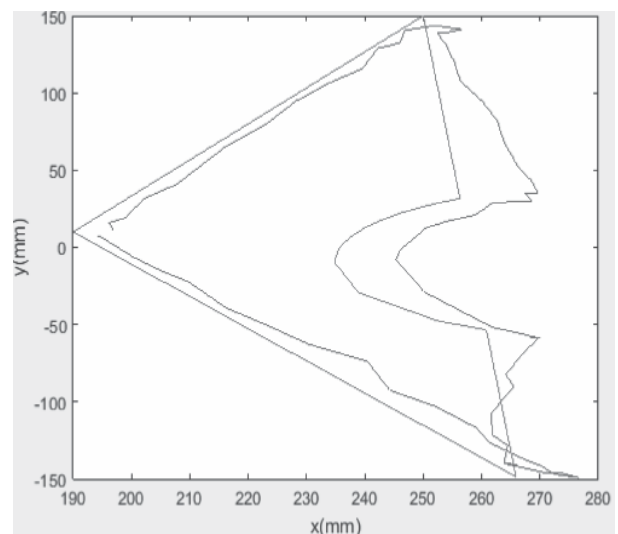
4. THỰC NGHIỆM

Môi trường làm việc thử nghiệm được thể hiện như hình 6. Trong thiết lập này, màu sắc của đối tượng nắm cần thiết và chương ngại vật lần lượt là cam và xanh lam. Tọa độ (0,0) của $O_0x_0y_0z_0$ được xác định thông qua hiệu chuẩn. Tọa độ của đối tượng trong khung hình của camera sẽ được chuyển đổi về tọa độ $O_0x_0y_0z_0$ thông qua ma trận nội K, ma trận quay R và ma trận tịnh tiến T.

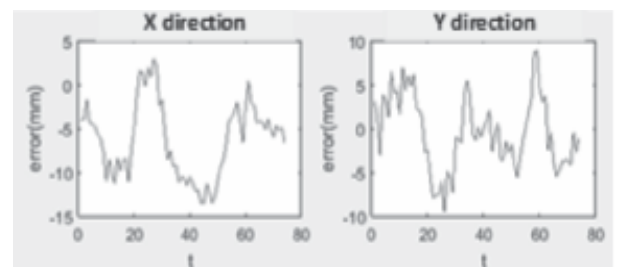


Hình 6. Môi trường thực nghiệm

Hình 7 và Hình 8, biểu thị sai số giữa đường hoạch định tham chiếu và đường chạy thực trong trường hợp điều khiển vòng hở.

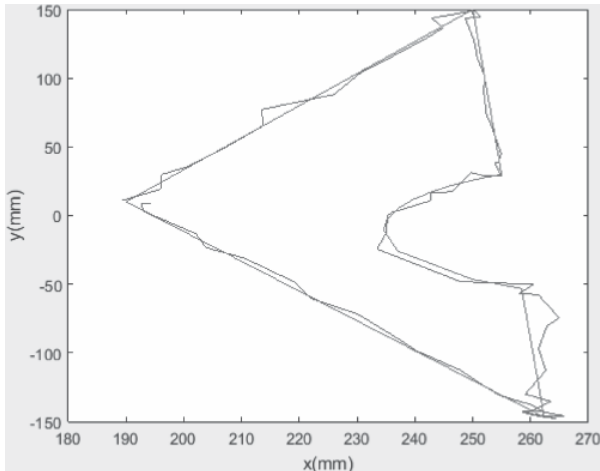


Hình 7. Đường chạy của robot trong trường hợp điều khiển vòng hở

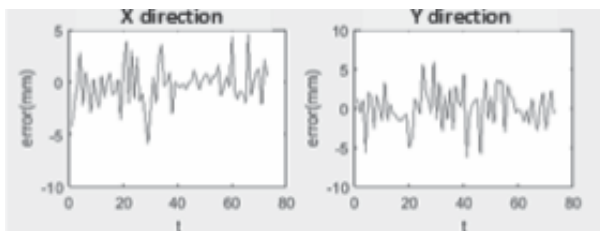


Hình 8. Sai số đường chạy thực robot và quỹ đạo hoạch định của điều khiển vòng hở

Từ hình này có thể thấy rằng, sai số của điều khiển vòng hở là cực lớn và có giá trị sai lệch lớn, tức là luôn lớn hơn 0 hoặc luôn nhỏ hơn 0 ở một số đoạn của đường dẫn. Lỗi này được cải thiện đáng kể như thể hiện trong Hình 9 và Hình 10 khi áp dụng thuật toán hồi tiếp ảnh và khối điều khiển mờ.



Hình 9. Đường chạy của robot trong trường hợp điều khiển vòng kín



Hình 10. Sai số đường chạy thực robot và quỹ đạo hoạch định của điều khiển vòng kín

Từ hình 9 và hình 10 cho thấy sự cải thiện lớn về chất lượng của đường đi robot so với trường hợp trước. Hơn nữa, đường đi thực của robot hiển thị mức giảm độ lệch của điều khiển, trong đó sai số hiện chỉ dao động quanh 0, giá trị tuyệt đối tối đa là 5. Từ Hình 9-10, có thể kết luận rằng điều khiển hồi tiếp ảnh kết hợp với điều khiển mờ có thể theo dõi một đối tượng trong thời gian thực với độ chính xác cao. Mặc dù hình dạng đường dẫn phức tạp nhưng

cánh tay robot vẫn có thể đạt được hiệu suất cao có thể áp dụng vào lĩnh vực công nghiệp.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này áp dụng điều khiển hồi tiếp ảnh kết hợp với điều khiển mờ cho hoạt động của cánh tay robot trong việc bám theo quỹ đạo đã hoạch định. Thí nghiệm cho thấy có sự khác biệt rất lớn về chất lượng thực hiện của hai phương pháp, tức là điều khiển vòng hở và vòng kín. Trong khi phương pháp vòng hở thể hiện sai số cao và độ lệch cao, thì phương pháp vòng kín cho thấy sự cải thiện nhiều hơn trong cả hai thuộc tính này. Cách tiếp cận này cũng có ưu điểm là đơn giản khi hiệu chuẩn có thể được thực hiện trong thời gian ngắn. Hơn nữa, cấu trúc của hệ thống không phức tạp; nó rất dễ thiết lập trong các môi trường phức tạp và có chi phí thấp hơn so với các hệ thống khác trên thị trường.

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

Lê Đức Hạnh đưa ra ý tưởng, phương pháp thực hiện. Đóng góp các phân tích và thảo luận, viết báo cáo và bài báo.

Lê Đức Đạo đóng góp việc thực hiện thí nghiệm thu thập dữ liệu, phân tích và thảo luận. ❖

Ngày nhận bài: **15/5/2023**

Ngày phản biện: **05/6/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. Tarca, I. Pasc, N. Tarca, and F. P. Vladicescu, "Remote robot control Via Internet Using Augmented Reality," 18th D.A.A.A.M Int. Symp. Intell. Manuf. Autom., pp. 739-740, 2007. 

- [2]. J. Bohg and D. Kragic, “*Grasping familiar objects using shape context*,” Int. Conf. Adv. Robot., pp. 1-6, 2009.
- [3]. N. M. Nasrabadi, “*A stereo vision technique using curve-segments and relaxation matching*,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 14, pp. 566-572, 1992.
- [4]. K. P. Prem and L. Behera, “*Visual servoing of redundant manipulator with Jacobian matrix estimation using self-organizing map*,” Robot. Auton. Syst., Vol. 58, pp. 978-990, 2010.
- [5]. D. Kragic and H. I. Christensen, “*Survey on visual servoing for manipulation*,” Comput. Visi. Act. Percept. Lab. (CVAP), ISRN KTH/NA/P—02/01—SE CVAP259, Tech. Rep., 2002
- [6]. S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, “*A tutorial on visual servo control*,” IEEE Trans. Robot. Autom., Vol. 12, pp. 651-670, 1996.
- [7]. I. C. Peter and C. G. Malcolm, “*Dynamic effects in visual closed-loop systems*,” IEEE Trans. Robot. Autom., Vol. 12, pp. 671-683, 1996.
- [8]. Y. Shirai and H. Inoue, “*Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks*,” Pattern Recogn., Vol. 5, pp. 99-108, 1973.
- [9]. D. I. Kosmopoulos, “*Robust Jacobian matrix estimation for image-based visual servoing*,” Robot Cim-Int. Manuf., Vol. 27, pp. 82-87, 2011.
- [10]. J. Willian, C. C. W. Hulls and G. S. Bell, “*Relative end-effector control using Cartesian position based visual servoing*,” IEEE Trans. Robot. Autom., Vol. 12, pp. 684-696, 1996.
- [11]. F. Chaumette and S. Hutchinson, “*Visual servo control Part 1: Basic approaches*,” IEEE Robot. Automat. Mag., Vol. 13, pp. 82-90, 2006.
- [12]. J. M. Sebastian, L. Pari, L. Angle and A. Traslosheiros, “*Uncalibrated visual servoing using the fundamental matrix*,” Robot. Auton. Syst., Vol. 57, pp. 1-10, 2009.