

DESIGN AND MANUFACTURING OF 4-DOF RPRR SCARA ROBOT INTEGRATED IDENTIFICATION OF SINGULAR CONFIGURATION

Nguyen Von Dim*, Tran Xuan Trong, Bui Van Tung, Le Hung Linh, Trinh Thuy Ha

TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 01/12/2023 Revised: 29/01/2024 Published: 30/01/2024	Nowadays, SCARA robots (Selective Compliance Assembly Robot Arm) are widely used in the mechanical and electronic assembly field to enhance production efficiency and product quality. However, there are two significant issues when applying robotic arms in practice: high robot costs and the possibility of the robot falling into singular configurations during operation, significantly affecting its performance. This article presents the design and fabrication process of a four-degree-of-freedom SCARA robot arm with a Revolute-Prismatic-Revolute-Revolute (RPRR) configuration using modeling and simulation methods in SolidWorks and Matlab/Simulink software. SolidWorks software supports the design process by enabling 3D modeling, creating assembly constraints, and testing the design. Matlab/Simulink software aids in simulation, workspace analysis, and identifying singular points to eliminate unusual robot configurations. In terms of fabrication, the SCARA robot is manufactured using 3D printing to optimize costs. As a result, the fabricated robot is cost-effective, operates according to design specifications, and eliminates singular configurations.
KEYWORDS	
Singularity	
SCARA robot	
Design	
Manufacturing	
Control	

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO TAY MÁY ROBOT SCARA 4 BẬC TỰ DO LOẠI RPRR TÍCH HỢP NHẬN DẠNG CẤU HÌNH KỶ DỊ

Nguyễn Văn Dim*, Trần Xuân Trọng, Bùi Văn Tùng, Lê Hùng Linh, Trịnh Thúy Hà

Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 01/12/2023 Ngày hoàn thiện: 29/01/2024 Ngày đăng: 30/01/2024	Ngày nay, robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực lắp ráp cơ khí và điện tử để nâng cao hiệu quả sản xuất và chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, có hai vấn đề quan trọng khi áp dụng cánh tay robot vào thực tế là giá thành robot cao và trong quá trình làm việc, robot có thể rơi vào các cấu hình kỳ dị, gây ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của robot. Bài báo này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo cánh tay robot SCARA bốn bậc tự do cấu hình Revolute-Prismatic-Revolute-Revolute (RPRR) sử dụng phương pháp mô hình hóa, mô phỏng trên phần mềm SolidWorks và phần mềm Matlab/Simulink. Phần mềm SolidWorks hỗ trợ thiết kế, xây dựng mô hình 3D, tạo các ràng buộc lắp ráp và kiểm nghiệm thiết kế. Phần mềm Matlab/Simulink giúp mô phỏng, phân tích không gian làm việc, tìm ra các điểm kỳ dị để loại trừ các cấu hình kỳ dị của robot. Về phần chế tạo, robot SCARA được chế tạo bằng phương pháp in 3D nhằm tối ưu hóa chi phí. Kết quả, robot được chế tạo ra có chi phí thấp, hoạt động theo yêu cầu thiết kế và loại bỏ được các điểm kỳ dị.
TỪ KHÓA	
Cấu hình kỳ dị	
Robot SCARA	
Thiết kế	
Chế tạo	
Điều khiển	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9324>

* Corresponding author. Email: nvdim@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Hiện nay, Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp lắp ráp và chế tạo. Các robot SCARA được trang bị cấu hình khớp RRP (Revolute-Revolute-Prismatic) hoặc PRR (Prismatic-Revolute-Revolute) có thể tạo chuyển động tuyến tính một cách dễ dàng trong các hướng dọc [1]. Các cánh tay robot SCARA cấu hình RRP được ứng dụng chủ yếu trong các nhiệm vụ với yêu cầu hoạt động thấp cần độ chính xác và tốc độ cao [2]. Trong khi động cơ khớp tịnh tiến của cấu hình RRP chỉ để nâng các vật, thì động cơ khớp tịnh tiến trong loại PRR thì nâng cả cấu trúc robot cùng với tải trọng. Do đó, động cơ khớp tịnh tiến của loại PRR có mô-men xoắn cao hơn so với loại RRP. Vì vậy, cấu hình robot SCARA kiểu PRR thường được ưa chuộng trong ứng dụng nâng các trọng lượng nặng [3]. Có thể thấy rằng phần lớn các robot SCARA trong các nghiên cứu trước sử dụng cấu hình với ba bậc tự do [4], [5]. Để có thể kết hợp được ưu điểm của hai loại cấu hình robot SCARA, RRP và PRR, trong nghiên cứu này, các tác giả lựa chọn xây dựng cánh tay robot SCARA 4 bậc tự do cấu hình Revolute-Prismatic-Revolute-Revolute (RPRR).

Mặt khác, trong quá trình làm việc, robot có thể mất ổn định khi gặp các điểm kỳ dị. Điểm kỳ dị là các điểm trong không gian cấu hình mà một số bậc tự do của robot bị mất. Điểm kỳ dị có thể giải quyết bằng cách tạo ra các cánh tay robot có không gian làm việc rộng, được hiệu chỉnh cẩn thận hoặc sử dụng các khớp bổ sung [6] - [8]. Bài báo này trình bày việc ngăn ngừa sự xuất hiện của các điểm kỳ dị (singularities) khi vận hành robot SCARA 4 bậc tự do RPRR bằng cách mô phỏng tìm ra các điểm kỳ dị sau đó đặt các giới hạn chuyển động bằng kết cấu cơ khí hoặc phần mềm điều khiển để robot không đi qua các điểm này.

2. Phương pháp đề xuất

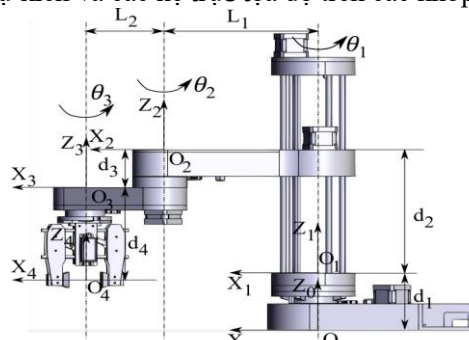
Để thiết kế robot cần xây dựng mô hình động học nghịch và động học thuận của cánh tay robot SCARA. Các mô hình này thể hiện mối quan hệ giữa khớp động và vị trí trên hệ tọa độ Descartes, cũng như góc quay của cơ cấu chấp hành cuối [9]. Sau đó, các ma trận Jacobian suy ra từ động học được ứng dụng để tìm các điểm mà cánh tay robot có cấu hình kỳ dị. Quá trình tìm kiếm điểm kỳ dị được hỗ trợ bởi phần mềm Matlab/Simulink.

2.1. Mô hình động học thuận

Bài toán động học thuận robot thể hiện mối quan hệ giữa vị trí, vận tốc và gia tốc của các khớp của robot. Hệ tọa độ được đặt tại từng khớp để tìm ma trận biến đổi xác định mối quan hệ giữa hai khớp liên kế. Ma trận biến đổi giữa hai khớp được biểu diễn bằng ký hiệu ${}^{i-1}_iT$. Mối quan hệ giữa khâu đế và khâu chấp hành cuối được xác định bằng ma trận biến đổi các khớp liên tiếp. Mối quan hệ này được gọi là động học thuận (forward kinematics) và được hiển thị trong công thức (1):

$${}^0_nT = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T \dots {}^{n-1}_nT \quad (1)$$

Cánh tay robot SCARA dự kiến và các hệ trục tọa độ trên các khớp được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Robot SCARA cấu hình RPRR 4 bậc tự do

Từ hệ trục tọa độ gắn lên robot như trên Hình 1, các tham số mô tả khâu và khớp được thể hiện trên bảng tham số Denavit – Hartenberg (Bảng 1).

Bảng 1. Bảng tham số D-H

Khâu	α_i	a_i	θ_i	d_i
1 – 0	0	0	θ_1	d_1
2 – 1	0	L_1	0	d_2
3 – 2	0	L_2	θ_2	d_3
4 – 3	0	0	θ_3	d_4

Các ma trận biến đổi được xác định như trong công thức (2) bằng phương pháp Denavit – Hartenberg (D – H) [8]:

$$\begin{aligned}
 {}^0_1T &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1_2T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3T &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_2c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & L_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3_4T &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, các viết tắt "c" và "s" viết tắt cho các thuật ngữ "cosin" và "sin". Các thông số D-H được cung cấp trong Bảng 1.

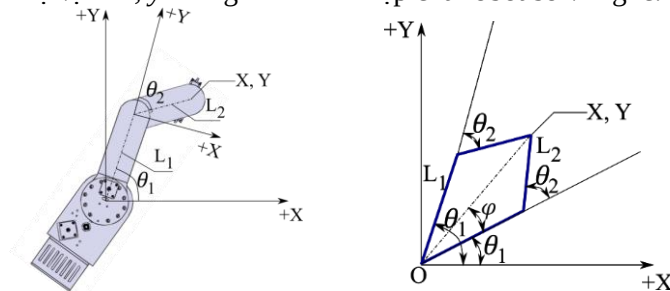
Ma trận động học thuận của robot SCARA mô tả vị trí và hướng của điểm tác động cuối trên bàn kẹp so với hệ tọa gốc được thể hiện bằng công thức (3) dưới đây:

$${}^0_1T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_1c_1 + L_2c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_1s_1 + L_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó, $c_1 = \cos\theta_1$; $c_2 = \cos\theta_2$; $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$; $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$; $s_1 = \sin\theta_1$; $s_2 = \sin\theta_2$; $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$; $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$.

2.2. Mô hình động học ngược

Động học ngược là quá trình tìm ra giá trị của biến khớp theo dữ liệu về vị trí và hướng đã cho của cơ cấu chấp hành cuối. Trong nghiên cứu này, phương trình động học nghịch được giải bằng phương pháp phân tích. Cột thứ tư của ma trận động học thuận được hiển thị trong Phương trình (3), và nó cung cấp tọa độ vị trí x, y và z gắn lên bàn kẹp của robot so với gốc.



Hình 2. Sơ đồ tính toán động học nghịch robot

Từ phương trình động học thuận trong công thức (3) ta có vị trí của cánh tay robot xác định theo phương trình sau:

$$X = L_1c_1 + L_2c_{12} \quad (4)$$

$$Y = L_1 s_1 + L_2 s_{12} \quad (5)$$

Từ phương trình (4) và (5) bình phương và lấy tổng 2 vế:

$$X^2 + Y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1 L_2 c_2 \quad (6)$$

Ta tính được θ_2

$$\rightarrow \theta_2 = \pm \arccos \left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right) \quad (7)$$

Từ Hình 2 ta nhận thấy:

$$\theta_1 + \varphi = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (8)$$

$$\sin \varphi = \frac{L_2 s_2}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (9)$$

Từ (8) và (9):

$$\rightarrow \varphi = \pm \arccos \left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (10)$$

$$\rightarrow \theta_1 = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right) \pm \arccos \left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (11)$$

2.3. Ma trận Jacobian

Ma trận Jacobian được sử dụng cho tính toán như lập đường đi và thiết kế quỹ đạo di chuyển, xác định điểm kỳ dị, tính phương trình động học của chuyển động, và tính toán mô-men xoắn. Các vận tốc thẳng và góc đối với robot SCARA có thể được tìm thấy dưới dạng các vận tốc của các khớp. Vận tốc thẳng có thể được xác định dựa trên vị trí của cơ cấu chấp hành cuối.

Vận tốc của cơ cấu chấp hành cuối được xác định như sau:

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = [J_v(\theta_1, \theta_2)] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sau khi thực hiện các phép toán trung gian, các ma trận Jacobian thu được thông qua các phương trình dưới đây:

$$J_v(\theta) = \begin{bmatrix} -L_1 s_1 - L_2 s_{12} & -L_2 s_{12} & 0 \\ L_1 c_1 + L_2 c_{12} & L_2 c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_w(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Định thức của ma trận Jacobian được xác định là:

$$\det J_v(\theta) = L_1 L_2 s_2 \quad (15)$$

2.4. Cấu hình kỳ dị và không gian làm việc tối ưu

Để loại bỏ cấu hình kỳ dị, có thể dựa vào kích thước hình học để xác định một kích thước phù hợp. Một phương pháp khác là tìm kiếm không gian làm việc không có cấu hình kỳ dị, nghĩa là vùng loại trừ các điểm kỳ dị, sau đó thiết kế quỹ đạo làm việc trong không gian đó để đảm bảo không xuất hiện cấu hình kỳ dị. Cánh tay robot SCARA đạt đến các cấu hình kỳ dị khi

$$\det J_v(\theta) = 0 \leftrightarrow \theta_2 = 0^\circ \text{ hoặc } \theta_2 = 180^\circ \quad (16)$$

Trong đó, khâu 2 có thể được duỗi thẳng ra hoàn toàn hoặc gấp lại trùng khâu 1. Do đó, để giữ cho robot SCARA tránh khỏi các cấu hình kỳ dị này thì: $\det J_v(\theta) \rightarrow \max$ hoặc $\cos^2 \theta_2 \rightarrow \min$

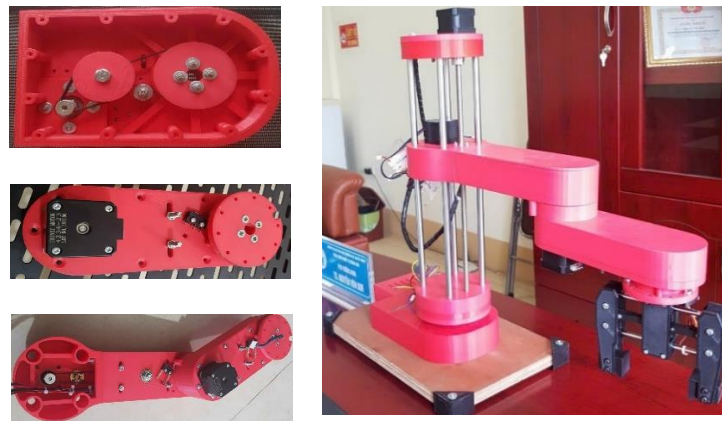
3. Thiết kế và chế tạo robot

Trong bài báo này, để phù hợp với nhu cầu nghiên cứu, giảng dạy, nhóm tác giả lựa chọn xây dựng mô hình cánh tay robot SCARA cấu hình RPRR theo Hình 1.

3.1. Kết cấu cơ khí của robot

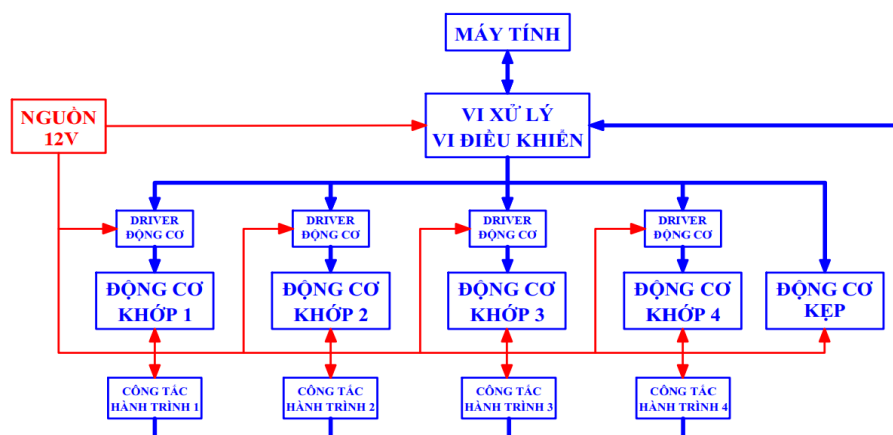
Bước đầu, mô hình tay máy cùng các chi tiết cơ khí được thiết kế, hiệu chỉnh trên phần mềm SolidWorks. Trong đó, cánh tay robot SCARA có chiều dài khâu $L_1 = 250mm$, $L_2 = 200mm$. Về truyền động, các khâu của robot được dẫn động bằng 4 động cơ bước đặt tại 4 khớp động. Đối với khớp đầu tiên, có tỷ lệ giảm tốc 20:1, đạt được thông qua hai bộ truyền đai. Hai dây đai GT2 được sử dụng là dây đai đóng vòng với độ dài 200 mm và 300 mm. Các khớp quay của robot được cấu thành với hai ổ bi đẩy và một ổ bi trục. Đối với khớp thứ hai, có tỷ lệ giảm tốc 16:1, cũng thông qua hai bộ truyền đai, và khớp thứ ba có tỷ lệ giảm tốc 4:1 chỉ qua một bộ truyền đai. Đối với mỗi dây đai, các pulley phụ để căng dây đai. Bàn kẹp được điều khiển bằng một động cơ servo MG996R. Trục Z của robot được điều khiển bằng một trục vít me dẫn hướng đường kính 8 mm, toàn bộ bộ phận cánh tay trượt trên bốn trục trơn đường kính 10 mm và ổ bi tuyến tính. Chiều dài hành trình của khớp tịnh tiến là 350 mm.

Các chi tiết, bộ phận cơ khí chính của robot được nhóm tác giả chế tạo trực tiếp bằng công nghệ in 3D FDM. Kết thúc quá trình chế tạo, robot được lắp ráp hoàn chỉnh như Hình 3.



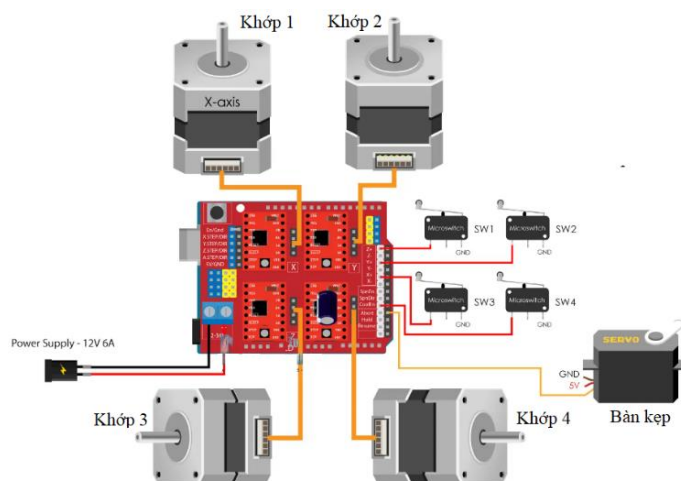
Hình 3. Robot được chế tạo bằng công nghệ in 3D

3.2. Hệ thống điều khiển điện, điện tử



Hình 4. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển Robot SCARA

Trong thiết kế, nhóm tác giả đề xuất xây dựng hệ thống điều khiển robot SCARA gồm các khối chức năng như: Khối nguồn, khối xử lý, các driver điều khiển động cơ, máy tính, các động cơ servo, công tắc hành trình. Các khối chức năng được bố trí và liên kết theo sơ đồ như trên Hình 4. Trong đó, các thiết bị, linh kiện chính chế tạo hệ thống điều khiển robot gồm một bo mạch Arduino UNO kết hợp với board mạch CNC shield và bốn driver A4988 để điều khiển các động cơ khớp. Động cơ bàn kẹp được điều khiển trực tiếp bằng chân vi điều khiển. Sơ đồ mạch các thiết bị điều khiển robot SCARA được thể hiện như trên Hình 5.

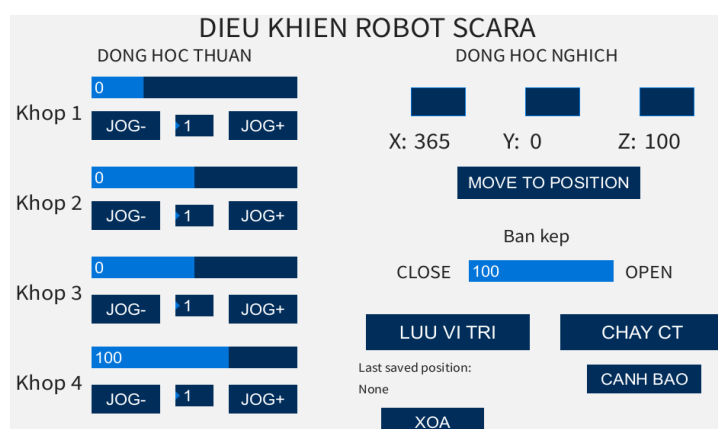


Hình 5. Sơ đồ mạch hệ thống điều khiển Robot SCARA

Để tăng hiệu quả và tính trực quan trong điều khiển robot, nhóm tác giả xây dựng hệ giao diện điều khiển trên máy tính thông qua phần mềm Processing như Hình 6.

Trên giao diện điều khiển này, căn cứ vào động học thuận, robot có thể được điều khiển, thiết kế dựa vào cài đặt góc quay của từng khớp thông qua các thanh trượt Khop 1, Khop 2, Khop 3, Khop 4. Ngoài ra, căn cứ vào động học ngược, người dùng chỉ cần nhập giá trị tọa độ X, Y, Z tương ứng vào ô điều khiển. Robot tự động tính toán góc quay các khớp để tay gắp vào tọa độ mong muốn.

3.3. Cấu hình kỳ dị và giải pháp loại bỏ.

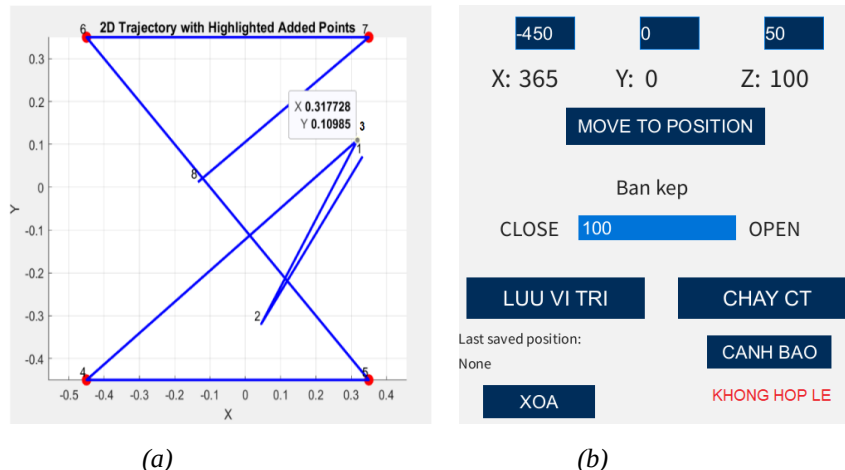


Hình 6. Giao diện điều khiển robot trên máy tính

Theo công thức (16), cánh tay robot SCARA đạt đến các cấu hình kỳ dị khi $\theta_2 = 0^\circ$ hoặc $\theta_2 = 180^\circ$. Giải pháp loại bỏ các điểm kỳ dị này theo cách đơn giản là tạo giới hạn chuyển động

quay của khớp bằng phần cứng (sử dụng công tắc hành trình) hoặc phần mềm (giới hạn khoảng cài đặt góc quay của khớp trên giao diện điều khiển). Phương pháp này phù hợp với chế độ điều khiển động học thuận, thiết lập tọa độ của robot dựa vào chuyển động quay của từng khớp

Bên cạnh đó, đối với điều khiển robot theo động học ngược thông qua việc nhập tọa độ trên giao diện điều khiển, nhóm tác giả đã tiến hành mô hình hóa robot bằng Matlab và chạy mô phỏng để tìm ra tập hợp các điểm kỳ dị trong không gian làm việc của robot như Hình 7a. Từ các tọa độ thu được, chương trình điều khiển được hiệu chỉnh để báo lỗi khi người điều khiển nhập tọa độ là điểm kỳ dị như Hình 7b.



Hình 7. Chặn điểm kỳ dị theo tọa độ. (a) Mô phỏng tìm một số điểm kỳ dị của robot trên Matlab. (b) Giao diện điều khiển chặn nhập tọa độ là điểm kỳ dị

3.4. Kết quả và bàn luận

Để đánh giá và kiểm chứng độ chính xác của cánh tay robot SCARA, nhóm tác giả đã tiến hành chạy thực nghiệm robot trong hệ tọa độ OXYZ giả định với gốc tọa độ và các trục theo Hình 1 và Hình 2. Giá trị tọa độ là khoảng cách tính theo mm so với gốc tọa độ khi chiều vị trí tay kẹp lên các cạnh tương ứng. Trong thực nghiệm này có kết hợp so sánh kết quả hoạt động giữa robot khi đã tích hợp cấu hình tránh điểm kỳ dị và khi chưa tích hợp. Kết quả thực nghiệm thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm hoạt động robot SCARA tích hợp cấu hình tránh điểm kỳ dị

Đối tượng thực nghiệm	Tọa độ cài đặt robot trong mặt phẳng (x, y, z)				
	Điểm làm việc			Điểm kỳ dị	
	(0, 11, 36)	(11, 0, 36)	(20, 11, 36)	(35, 0, 20)	(0, 35, 25)
Robot chưa tích hợp tránh điểm kỳ dị	(1, 10, 34)	(11, 1, 35)	(20, 12, 36)	(31, 5, 20)	(4, 29, 25)
Robot đã tích hợp tránh điểm kỳ dị	(1, 10, 34)	(9, 1, 36)	(20, 12, 36)	Báo lỗi	Báo lỗi

Kết quả thực nghiệm cho thấy robot trước và sau tích hợp cấu hình tránh điểm kỳ dị đều hoạt động ổn định, chính xác trong không gian làm việc, với sai số theo mỗi trục không quá 2 mm. Sai số này có thể giảm xuống bằng cách tinh chỉnh kết cấu cơ khí của robot.

Tuy nhiên, thực nghiệm tại điểm kỳ dị với robot chưa tích hợp cấu hình chặn điểm kỳ dị thì sai số tăng vọt lên 5 mm hoặc 6 mm. Trong một số lần thực nghiệm robot thậm chí không thể tự trở về cấu hình gốc ban đầu do bị lỗi. Đối với robot sau khi tích hợp khả năng chặn điểm kỳ dị, robot không cho phép thiết lập chạy đến điểm kỳ dị, giúp tiết kiệm thời gian cài đặt và an toàn cho robot.

Mặc dù phương pháp chặn điểm kỳ dị áp dụng cho robot sẽ giới hạn không gian và quỹ đạo chuyển động của robot vì nó không cho phép robot đi qua một số điểm. Tuy nhiên giải pháp này đơn giản có tác dụng tránh cho robot bị lỗi hoặc kẹt tại điểm kỳ dị và có thể áp dụng cho nhiều loại robot.

4. Kết luận

Bài báo đã đưa ra phương án thiết kế, chế tạo robot SCARA Revolute-Prismatic-Revolute-Revolute (RPRR) dựa trên các công nghệ hiện đại bao gồm mô phỏng, thiết kế trên máy tính và in 3D. Sản phẩm thu được đảm bảo tính động học, độ chính xác và chi phí thấp, phù hợp dùng trong giảng dạy hoặc nghiên cứu.

Bài báo cũng đưa ra phương pháp phần cứng, phần mềm để giải quyết vấn đề cấu hình kỳ dị liên quan đến cánh tay robot SCARA do nhóm tác giả chế tạo ra. Định hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là cải tiến kết cấu của cánh tay robot, thử nghiệm loại động cơ khác tại các khớp động, ứng dụng các phương pháp điều khiển thông minh cho robot.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Makino, "Development of the SCARA," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 1, pp. 5-8, 2014.
- [2] U. Claudio, J. Cortés, and J. Pascal, "Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 396-404, 2016.
- [3] M.E. Uk, F.B. S. A. Shah, M. Soyaslan, and O. Eldogan, "Modeling, control, and simulation of a SCARA PRR-type robot manipulator," *Scientia Iranica*, vol. 27, no.1, pp. 330-340, 2020.
- [4] D. Maneetham, "Kinematics Modeling and Simulation of SCARA Robot Arm," *International Journal of Modern Research in Engineering and Technology*, vol.3, no. 8, pp. 1-6, 2019.
- [5] F. Oliveira, V. Tinoco, S. Magalhães, F. N. Santos, and M. F. Silva, "End-Effectors for Harvesting Manipulators-State Of The Art Review," in *2022 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, 2022, pp. 98-103.
- [6] J. Ashkan and M. Farrokhi, "Path tracking and obstacle avoidance for redundant robotic arms using fuzzy NMPC," in *2009 American Control Conference*, June 2009, pp. 1353-1358.
- [7] T. Seiichi and H. H. Asada, "A mobile extendable robot arm: singularity analysis and design," in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, November 2019, pp. 5131-5138.
- [8] L. Petrović, F. Marić, I. Marković, J. Kelly, and I. Petrović, "Trajectory optimization with geometry-aware singularity avoidance for robot motion planning," in *21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 12-15 October 2021, pp. 1760-1765.
- [9] W.B. Li, G.Z. Cao, X.Q. Guo, and S.D. Huang, "Development of a 4-DOF SCARA robot with 3R1P for pick-and-place tasks," *2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESA.2015.7398909.