

THIẾT KẾ VÀ THỰC NGHIỆM ROBOT SCARA 4 BẬC TỰ DO DỰA TRÊN MATLAB SIMSCAPE

A MATLAB SIMSCAPE-BASED DESIGN AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF A 4-DOF SCARA ROBOT

**Đặng Phương Đông, Đinh Hoàng Anh Dũng, Nguyễn Văn Tiến, Đinh Xuân Thu,
Nguyễn Công Hồng Phong, Nguyễn Đức Nam***

Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

*Email: nam.nguyenduc@phenikaa-uni.edu.vn

TÓM TẮT

Báo cáo trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và điều khiển cánh tay robot SCARA 4 bậc tự do phục vụ các bài toán gấp – đặt trong không gian làm việc xác định. Hệ thống được xây dựng dựa trên mô hình động học theo phương pháp Denavit–Hartenberg, kết hợp mô phỏng trên MATLAB/Simscap Multibody để đánh giá đặc tính chuyển động trước khi triển khai thực nghiệm. Robot sử dụng động cơ servo và bộ điều khiển PLC Mitsubishi Q-series nhằm đảm bảo khả năng điều khiển chính xác, ổn định và linh hoạt. Kết quả thực nghiệm cho thấy robot hoạt động ổn định, thực hiện đúng chu trình làm việc với độ lặp lại vị trí khoảng ± 1.0 mm trong mặt phẳng và sai số trục Z đạt mức micromet ($10\ \mu\text{m}$). Mô hình có sự tương đồng cao giữa mô phỏng và thực tế, chứng minh tính đúng đắn của phương pháp thiết kế. Đề tài có ý nghĩa ứng dụng trong đào tạo và là nền tảng phát triển các hệ thống robot thông minh trong công nghiệp.

Từ khóa: Robot; SCARA; Robot công nghiệp; Matlab simscape.

ABSTRACT

This paper presents the research, design, fabrication, and control of a 4-degree-of-freedom SCARA robot for pick-and-place tasks within a predefined workspace. The system is developed based on kinematic modeling using the Denavit–Hartenberg method and is validated through simulation in MATLAB/Simscap Multibody to evaluate motion characteristics prior to experimental implementation. The robot is driven by servo motors and controlled using a Mitsubishi Q-series PLC, ensuring precise, stable, and flexible operation. Experimental results demonstrate that the robot operates reliably, accurately executing the intended task sequence with a repeatability of approximately ± 1.0 mm in xy-plane and a Z-axis positioning error in the micrometer range ($10\ \mu\text{m}$). A strong correlation between simulation and experimental results confirms the validity of the proposed design approach. The developed system is suitable for educational purposes and serves as a foundation for future development of intelligent robotic systems in industrial applications.

Keywords: Robotics; SCARA; Industrial robot; MATLAB simscape.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đang diễn ra mạnh mẽ, tự động hóa và robot công nghiệp ngày càng đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm và giảm thiểu sự phụ thuộc vào lao động thủ công. Trong số các cấu trúc robot công nghiệp, robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) nổi bật nhờ khả năng làm việc hiệu quả trong mặt phẳng ngang với độ cứng vững cao theo phương thẳng đứng, rất phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu tốc độ cao và độ lặp lại tốt. Mặc dù robot SCARA đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp, các nghiên cứu hiện nay vẫn tồn tại một số hạn chế đáng chú ý. Trước hết, phần lớn các hệ thống robot SCARA thương mại có cấu trúc đóng, hạn chế khả năng can thiệp và phát triển các thuật toán điều khiển tùy biến, gây khó khăn cho mục tiêu nghiên cứu và đào tạo. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu tập trung riêng lẻ vào từng khía cạnh như thiết kế cơ khí, mô hình động học hoặc thuật toán điều khiển mà chưa có sự tích hợp đồng bộ giữa mô hình lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm trên cùng một nền tảng hệ thống. Ngoài ra, các mô hình chi phí thấp phục vụ đào tạo thường chưa đảm bảo được sự cân bằng giữa độ chính xác, độ lặp lại và tính ổn định vận hành. Đặc biệt, việc ứng dụng các công cụ mô phỏng hiện đại như MATLAB/Simulink kết hợp với hệ điều khiển công nghiệp (PLC) trong một hệ thống hoàn chỉnh vẫn còn hạn chế. Do đó, cần thiết phải phát triển một mô hình robot SCARA tích hợp đầy đủ từ thiết kế, mô hình hóa đến thực nghiệm, có chi phí hợp lý và khả năng mở rộng, nhằm phục vụ hiệu quả cho cả nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn.

Bên cạnh đó, các hệ thống robot thương mại hiện nay thường có chi phí đầu tư cao và được thiết kế theo kiến trúc đóng, dẫn đến hạn

chế trong việc can thiệp và phát triển sâu các thuật toán điều khiển. Điều này gây khó khăn đáng kể cho các hoạt động nghiên cứu và đào tạo. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển một mô hình robot SCARA 4 bậc tự do với chi phí hợp lý, dễ triển khai và có khả năng mở rộng là hết sức cần thiết, nhằm phục vụ hiệu quả cho mục tiêu đào tạo, nghiên cứu và từng bước hướng tới các ứng dụng thực tiễn trong công nghiệp.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Tại Việt Nam, mô hình Robot SCARA đã được nghiên cứu và phát triển từ lâu và bởi nhiều nhà khoa học, kỹ sư [1-7]. Xu hướng nghiên cứu tại Việt Nam có thể được tóm tắt thành 3 hướng chính: (1) Mô hình hóa và thiết kế cơ khí Robot [1-3], (2) Phát triển thuật toán điều khiển Robot [4-6], và (3) Tích hợp hệ thống thông minh và ứng dụng thực tế [5-7]. Với sự phát triển ngày càng nhanh của khoa học và công nghệ, nghiên cứu về lĩnh vực Robot công nghiệp đang ngày càng phát triển [8] (hình 1). Trong khi đó, số lượng Robot dạng SCARA, robot cộng tác đang chiếm tới 64.5% tổng dung lượng thị trường (hình 1b). Do đó, thực tế các xu hướng nghiên cứu và sản phẩm trên thế giới đang tập trung vào loại SCARA và Robot cộng tác.



Hình 1. Số liệu thống kê các công bố và số robot được thực sự triển khai trong sản xuất tăng dần theo từng năm [8]

Mặc dù robot SCARA đã được ứng dụng rộng rãi, vẫn tồn tại một số hạn chế cần

ngiên cứu. Các hệ robot thương mại thường có cấu trúc đóng, khó phát triển thuật toán điều khiển và phục vụ đào tạo. Nhiều nghiên cứu hiện nay chưa tích hợp đồng bộ giữa mô hình lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm, đặc biệt với các hệ chi phí thấp.

3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống robot SCARA 4 bậc tự do, bao gồm toàn bộ các thành phần cấu thành như kết cấu cơ khí, mô hình động học – động lực học, hệ truyền động servo và hệ thống điều khiển sử dụng PLC công nghiệp. Trong đó, trọng tâm nghiên cứu tập trung vào khả năng chuyển động của robot trong không gian làm việc, độ chính xác định vị, độ lặp lại và sự phối hợp giữa các khớp trong quá trình thực hiện các thao tác gấp – đặt vật thể. Bên cạnh đó, đề tài cũng xem xét mối quan hệ giữa mô hình lý thuyết và hệ thống thực nghiệm, nhằm đánh giá hiệu năng vận hành và làm cơ sở cho việc phát triển các ứng dụng robot trong lĩnh vực tự động hóa công nghiệp và đào tạo.

Mục tiêu của nghiên cứu là thiết kế, chế tạo và xây dựng hệ thống điều khiển cho robot SCARA 4 bậc tự do nhằm phục vụ các bài toán thao tác cơ bản trong không gian làm việc xác định. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào việc xây dựng mô hình động học và động lực học của robot, phát triển mô hình mô phỏng trên nền tảng MATLAB/SimScape để đánh giá đặc tính chuyển động, đồng thời thiết kế và tích hợp hệ thống cơ khí, truyền động và điều khiển sử dụng PLC công nghiệp. Bên cạnh đó, đề tài hướng tới việc đánh giá hiệu năng của hệ thống thông qua các tiêu chí như độ chính xác, độ lặp lại và độ ổn định, từ đó làm cơ sở cho việc phát triển các ứng dụng robot trong đào tạo và tự động hóa công nghiệp.

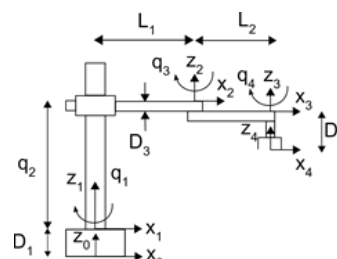
Phạm vi nghiên cứu của đề tài tập trung

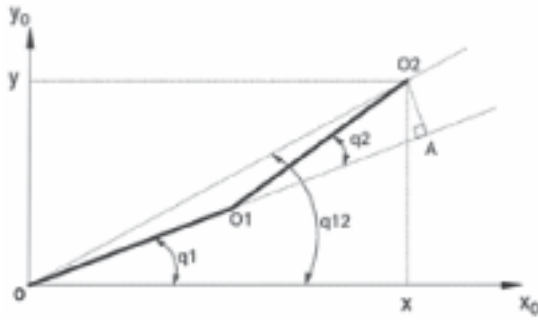
vào việc thiết kế, chế tạo và điều khiển robot SCARA 4 bậc tự do phục vụ các bài toán gấp – đặt trong không gian làm việc xác định. Nghiên cứu bao gồm xây dựng mô hình động học và mô phỏng chuyển động trên nền tảng MATLAB/SimScape, thiết kế cơ khí và lựa chọn hệ truyền động servo phù hợp, cũng như phát triển hệ thống điều khiển sử dụng PLC công nghiệp để thực hiện các chu trình làm việc cơ bản. Việc đánh giá hệ thống được thực hiện thông qua các thí nghiệm đo lường độ chính xác, độ lặp lại và độ ổn định. Tuy nhiên, đề tài không đi sâu vào các thuật toán điều khiển nâng cao như điều khiển thích nghi, điều khiển thông minh hoặc tối ưu quỹ đạo, cũng như chưa tích hợp các công nghệ như thị giác máy và trí tuệ nhân tạo.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Mô hình động học

Phương pháp Denavit–Hartenberg (D–H) được áp dụng để xây dựng và phân tích mô hình động học thuận và động học ngược của robot. Cấu trúc robot 4 bậc tự do được mô tả chi tiết trong Hình 2, trong khi các tham số D–H tương ứng được trình bày trong Bảng 1. Trên cơ sở các tham số này, ma trận biến đổi và ma trận cosin chỉ hướng của hệ được xác định, từ đó suy ra phương trình xác định vị trí điểm cuối của robot như thể hiện ở công thức (1), (2). Đồng thời, nghiệm của bài toán động học ngược được thiết lập thông qua phương pháp giải tích và được trình bày tại công thức (3).





Hình 2. (a) Mô hình robot theo quy tắc D-H, (b) Mô hình bài toán động lực học

Bảng 1. Bảng D-H với q_i là biến khớp, D_i là tham số hình học

Khâu	a	α	d	θ
1	L_1	0	D_1	q_1
2	L_2	0	q_2	0
3	0	0	D_2	q_3
4	0	0	D_3	q_4

Kết quả tính toán bằng phương pháp D-H:

- Ma trận cosin chỉ hướng:

$$R = \begin{pmatrix} \cos(q_1 + q_3 + q_4) & -\sin(q_1 + q_3 + q_4) & 0 \\ \sin(q_1 + q_3 + q_4) & \cos(q_1 + q_3 + q_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

- Tọa độ điểm cuối:

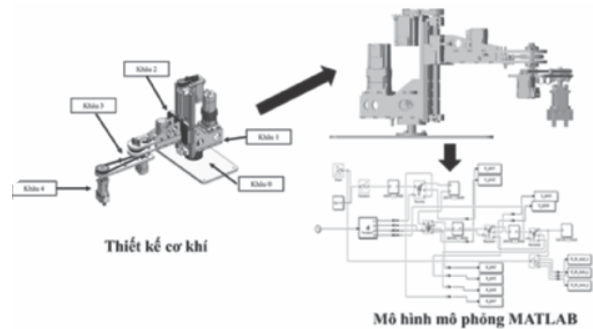
$$\begin{aligned} xE &= L_2 \cos(q_1 + q_3) + L_1 \cos(q_1) \\ yE &= L_2 \sin(q_1 + q_3) + L_1 \sin(q_1) \\ zE &= d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \end{aligned} \quad (2)$$

- Hệ phương trình động học ngược bằng phương pháp hình học – giải tích:

$$\begin{cases} q_1 = \text{Arctan}\left(\frac{y}{x}\right) - \text{Arctan}\left(\frac{L_2 \sin q_2}{L_1 + L_2 \cos q_2}\right) \\ q_2 = \text{Arccos}\left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}\right) \\ d_2 = z - d_1 - d_3 - d_4 \end{cases} \quad (3)$$

4.2. Mô hình thiết kế cơ khí và mô phỏng bằng công cụ MATLAB Simscape

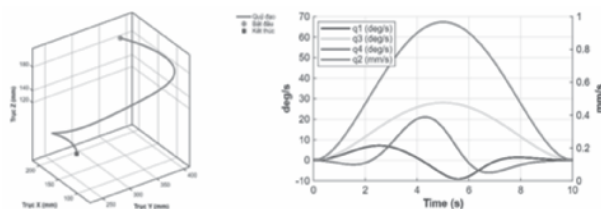
Mô hình robot được thiết kế và đánh giá thông qua các công cụ phần mềm SolidWorks và MATLAB (Hình 3). Các chi tiết cơ khí được gia công bằng công nghệ CNC nhằm đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy, đồng thời sử dụng các linh kiện công nghiệp tiêu chuẩn trong quá trình lắp ráp. Sau khi hoàn thiện, mô hình CAD được tích hợp vào môi trường MATLAB Simscape Multibody để tiến hành mô phỏng và phân tích chuyển động của hệ thống.



Hình 3. Mô hình thiết kế cơ khí trên Solidworks và mô phỏng trên MATLAB

Mô phỏng điều khiển động học được thực hiện với quỹ đạo mục tiêu dạng xoắn ốc. Kết quả mô phỏng trên môi trường MATLAB Simscape cho thấy trong khoảng thời gian 10 giây, robot có khả năng bám theo quỹ đạo xoắn ốc một cách liên tục và ổn định. Các phương trình vận tốc của các khớp tương ứng với quá

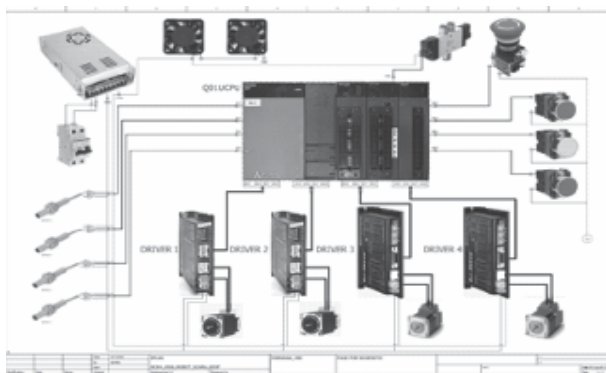
trình chuyển động được xác định và thể hiện trong Hình 4.



Hình 4. Mô phỏng quỹ đạo di chuyển hình xoắn ốc và dữ liệu vận tốc biến khớp tương ứng

4.3. Hệ thống điều khiển

Hệ thống tủ điện được thiết kế và lắp đặt hoàn chỉnh, đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế (Hình 5) và tuân thủ các tiêu chuẩn công nghiệp như IEC 60204-1, IEC 61439 và ISO 12100. Dây dẫn được bố trí theo quy ước màu, thiết bị được đánh số rõ ràng theo sơ đồ đấu nối. Tủ điện được tích hợp các giải pháp bảo vệ và phân vùng chức năng hợp lý, đảm bảo an toàn, độ tin cậy và thuận tiện trong vận hành. PLC Mitsubishi Q-Series đóng vai trò điều khiển trung tâm của hệ thống.



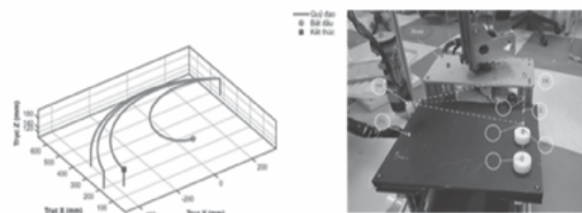
Hình 5. Sơ đồ hệ thống điện

4.4. Chế tạo và đánh giá sai lệch điều khiển và mô hình mô phỏng

Kết cấu cơ khí của robot được chế tạo bằng phương pháp gia công CNC với vật liệu

nhôm A6061 nhằm đảm bảo độ cứng vững và độ chính xác gia công. Sản phẩm sau khi hoàn thiện và lắp ráp được trình bày trong Hình 6. Hệ thống được tiến hành thử nghiệm điều khiển thực tế thông qua các thao tác gấp – đặt vật từ vị trí ban đầu đến các vị trí mục tiêu khác nhau. Đồng thời, kết quả thực nghiệm được so sánh với mô hình mô phỏng trên MATLAB nhằm đánh giá độ tương đồng giữa hai môi trường.

Kết quả cho thấy quỹ đạo chuyển động và hành vi của hệ thống trong thực nghiệm có sự phù hợp cao với mô hình mô phỏng, chứng minh tính đúng đắn của phương pháp mô hình hóa và thiết kế. Sai số định vị của robot được xác định trong khoảng ± 1.0 mm trong mặt phẳng, cho thấy hệ thống đạt được độ chính xác cao và đáp ứng tốt yêu cầu của các bài toán gấp – đặt cơ bản.



Hình 6. Mô hình chế tạo và thử nghiệm điều khiển vị trí thực hiện nhiệm vụ gấp vật [10]

4.5. Chế tạo và đánh giá sai lệch theo phương z

Độ chính xác điều khiển của robot được đánh giá thông qua phương pháp thực nghiệm. Một đồng hồ so Mitutoyo với độ phân giải 10 μ m được sử dụng để đo sai lệch vị trí của điểm cuối. Robot được lập trình thực hiện lặp lại 10 lần cùng một quỹ đạo nhằm đánh giá độ lặp lại của hệ thống. Sai lệch vị trí trong mỗi lần thực hiện được ghi nhận và phân tích để xác định mức độ chính xác. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số lặp lại đạt 10 μ m (Hình 7), cho thấy hệ thống có độ ổn định cao và khả năng định vị chính xác trong quá trình vận hành.

Lần đo	Giá trị đo (μm)
1	80
2	90
3	90
4	90
5	80
6	90
7	80
8	90
9	90
10	90



Hình 7. Kết quả của 10 lần đo sử dụng đồng hồ so và hình mô tả phép đo

5. KẾT LUẬN

Tổng kết, nghiên cứu đã hoàn thành mục tiêu xây dựng một hệ thống robot SCARA phục vụ bài toán gấp – đặt với hiệu năng ổn định. Kết quả thực nghiệm cho thấy robot đạt độ lặp lại vị trí khoảng ± 1.0 mm, trong khi độ chính xác theo trục Z đạt mức cao khoảng ± 10 μm , đáp ứng tốt yêu cầu của các ứng dụng cơ bản trong tự động hóa. Hệ thống vận hành ổn định, các khớp chuyển động đồng bộ, quỹ đạo bám sát kết quả mô phỏng và không phát sinh lỗi trong quá trình làm việc. Sự tương đồng giữa mô phỏng và thực nghiệm đã khẳng định tính đúng đắn của mô hình động học cũng như phương pháp thiết kế được đề xuất.

Tuy nhiên, độ chính xác tổng thể của hệ thống vẫn bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như độ rơ cơ khí, ma sát và sai số lắp ráp. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần tập trung vào việc tối ưu kết cấu cơ khí nhằm giảm sai số tích lũy, tích hợp mô hình động học vào hệ điều khiển thời gian thực, đồng thời phát triển các thuật toán điều khiển nâng cao. Bên cạnh đó, việc tích hợp các công nghệ như thị giác máy, trí tuệ nhân tạo và

bản sao số (digital twin) được kỳ vọng sẽ nâng cao hiệu suất và mở rộng khả năng ứng dụng của robot trong môi trường công nghiệp. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2026

Ngày phản biện: 23/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyen Von dim et al, “Design and Manufacturing of 4-DOF RPRR SCARA robot integrated identification of singular configuration”. TNU Journal of Science and Technology, 229(02): 45-52.
- [2]. Vương Gia Hải, Lê Thị Lan, “Nghiên cứu thiết kế và chế tạo mô hình Robot 6 bậc tự do ứng dụng trong giảng dạy”. Tạp chí Trường Đại học Hải Phòng, 2025.
- [3]. Đoàn Yên Thế, Nguyễn Xuân Biên, “Nghiên cứu ứng dụng thuật toán điều khiển trượt cho điều khiển quỹ đạo chuyển động của Robot SCARA”. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, số 88 (3/2024).
- [4]. Nguyễn Trọng Quỳnh, “Nghiên cứu, ứng dụng công nghệ Hybrid để điều khiển và giám sát robot công nghiệp”. Luận văn thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điện tử, Trường Đại học Sao Đỏ (2018).
- [5]. Huỳnh Minh Vũ, Phó Hoàng Linh, Phan Phi Long, Huỳnh Thế Hiền, “SCARA Robot using pick and Place”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Bình Dương, quyển 6, số 3/2023.
- [6]. Ho Vinh Nguyen, “Design and Development a SCARA robot for Classify Products Using Image Processing”. Engineering and Technology Journal, Vol. 8 (08), 2023.
- [7]. Nguyễn Hoàng Dũng et al, “Điều khiển cánh tay Robot SCARA 2 bậc tự do dựa trên giải thuật PID mờ”. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, tập 58, số 2.A (2022).
- [8]. Andrious D et al, “Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities”. Applied Sciences, 12, 135, 2022.
- [9]. Claudio Urrea, John Kern, “Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications”. Processes, 13, 832, 2025.
- [10]. Video thực nghiệm: <https://youtu.be/fuGd-OVmsHo?si=d9SW31GUu7o5VEmv>.