

TỐI ƯU HÓA CẤU TRÚC CỦA CÁN H TAY ROBOT NĂM BẬC TỰ DO BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHÒNG PHÂN TÍCH

OPTIMIZING THE STRUCTURE OF A FIVE-DEGREE-OF-FREE ROBOT ARM BY ANALYTICAL SIMULATION METHOD

KS. Đỗ Văn Tĩnh*, ThS. Nguyễn Tuấn Hưng

Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: dvtinh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Robot công nghiệp, đặc biệt trong ngành hàn tự động chiếm đến 70%, đang được ứng dụng rộng rãi trong các dây chuyền sản xuất tại Việt Nam. Để nâng cao năng suất và hiệu quả gia công, các thông số như phạm vi thao tác, độ cứng, trọng lượng cần được tối ưu hóa. Bài báo sử dụng robot hàn làm đối tượng nghiên cứu, áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích kết cấu, cho thấy việc tích hợp CAE giúp giảm đáng kể khối lượng cánh tay robot.

Từ khóa: CAE; Robot; Độ cứng; Cường độ làm việc; Tối ưu hóa kết cấu.

ABSTRACT

Industrial robots, particularly in automated welding where they account for up to 70%, are widely applied in production lines in Vietnam. To improve productivity and machining efficiency, parameters such as working range, stiffness, and weight need to be optimized. This paper focuses on a welding robot as the research subject, applying the finite element method to analyze its structure, and demonstrates that integrating CAE significantly reduces the weight of the robot arm.

Keywords: Computer-Aided Engineering; Robotics; Stiffness; Work intensity; Structural optimization.

1. GIỚI THIỆU

Robot công nghiệp là loại robot phổ biến trong các ngành công nghiệp và có tiềm năng phát triển mạnh mẽ nếu quy trình thiết kế được cải tiến. Cải tiến này không chỉ tăng hiệu quả và độ tin cậy mà còn giảm chi phí và thời gian sản xuất [1]. Nghiên cứu trong nước tập trung vào tối ưu hóa thiết kế robot, sử dụng phần mềm Abaqus để mô phỏng tĩnh học, động học và tối ưu hóa kết cấu, giúp phát hiện các

vấn đề từ sớm và giảm thiểu sai sót trong quá trình thiết kế [2].

Các nghiên cứu quốc tế đã phát triển các phương pháp tiên tiến hơn, ứng dụng phần mềm NX 3D trong mô hình hóa và phân tích động học, từ đó tối ưu hóa quá trình thiết kế và sản xuất [4]. Sự tích hợp các công cụ thiết kế, mô phỏng và gia công cơ khí giúp giảm thiểu thời gian và chi phí trong toàn bộ quy trình. Các nghiên cứu này cũng đặc biệt chú trọng

đến việc xác định các thông số như mô-men, khối lượng và điều kiện biên, từ đó tối ưu hóa chuyển động của robot [3].

Nghiên cứu này tập trung vào tính ổn định tĩnh của cánh tay robot, đặc biệt là các khớp nối và bộ phận chuyển động. Bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA), nghiên cứu giúp tối ưu hóa thiết kế trong điều kiện tải trọng thực tế, đánh giá độ bền và độ cứng của robot. Phần mềm Abaqus được sử dụng để phân tích tĩnh học và động học, giúp cải thiện tính ổn định và hiệu quả thiết kế [2]. Quá trình thiết kế robot được thể hiện như hình 1 dưới đây.



Hình 1. Các bước thiết kế cánh tay robot hoàn chỉnh.

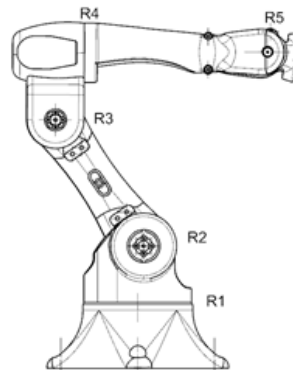
2. TỐI ƯU HÓA CÁNH TAY ROBOT

Thiết kế kết cấu phải đáp ứng một số tiêu chí được thiết lập liên quan đến thiết kế kích thước, hình dạng, mức độ sử dụng vật liệu phải thích ứng với các yêu cầu, chức năng [1]. Việc tối ưu hóa này dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn để cải thiện hiệu suất tĩnh và động của cấu trúc robot công nghiệp [2].

2.1. Tối ưu hóa cấu trúc

Tối ưu hóa cấu trúc bằng phương pháp FEM cho robot được sử dụng cùng với các kỹ thuật tối ưu hóa hình dạng [2]. Bằng cách sử dụng phương pháp này, có thể xác định được thiết kế cấu trúc liên kết tốt nhất của cánh tay robot [1]. Nghiên cứu được thực hiện trên cấu

hình robot năm bậc tự do bao gồm các chuyển động quay của các khâu như thể hiện trong hình 2 [3].



Hình 2. Các khâu chuyển động của robot.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

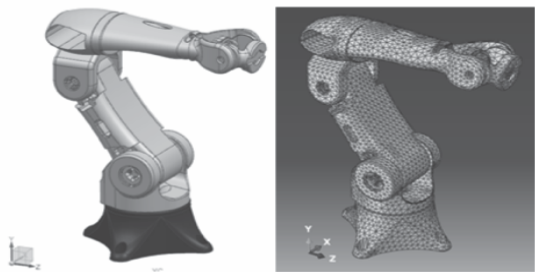
Việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong thiết kế robot công nghiệp đang là xu hướng trong tương lai vì nó giúp giảm chi phí sản xuất, chi phí thiết kế, tiết kiệm thời gian, cải thiện độ bền của cấu trúc bằng cách nhận ra điểm yếu, từ đó cải thiện chất lượng thiết kế robot [2]. Việc chế tạo robot tập trung vào hai hướng nghiên cứu trong phần cơ khí. Đó là quá trình thay thế những vật liệu, chi tiết đã lỗi thời, có tính chất cơ lý kém thông qua việc nghiên cứu và phát triển những vật liệu mới [1].

Động lực học robot bị chi phối bởi tỉ lệ độ cứng/trọng lượng chi tiết. Điều này được chứng minh bằng cách sử dụng các vật liệu như hợp kim nhôm hoặc vật liệu tổng hợp có trọng lượng nhẹ [3]. Vật liệu composite ngày càng phát triển để thay thế các chi tiết máy ở một mức độ nào đó đảm bảo được tính chất và yêu cầu kỹ thuật về cơ tính [4]. Trong quá trình tối ưu hóa, không có phương pháp tối ưu hóa nào cụ thể có thể đáp ứng được tất cả các yêu cầu, chức năng. Để cải thiện trạng thái tĩnh và động của cấu trúc robot công nghiệp, phải thực hiện các phương pháp tối ưu cụ thể như [2]:

- Tối ưu hóa khối lượng cấu trúc.
- Tối ưu hóa độ cứng tĩnh của cấu trúc.
- Chuyển vị tối thiểu để đảm bảo độ chính xác tối đa cho khâu cuối.
- Tần số cộng hưởng cao nhất nằm ngoài dải tần số môi trường.

3. MÔ HÌNH HÓA VÀ PHÂN TÍCH TĨNH ROBOT

Bước đầu tiên của FEA là xây dựng mô hình hóa cho cấu trúc robot năm bậc tự do. Để thực hiện phân tích tĩnh, phần mềm Abaqus được sử dụng để phân tích FEM. Cấu hình cơ học được mô hình hóa và chia lưới được thể hiện trong hình 3 dưới đây.



Hình 3. Mô hình hóa và mô hình chia lưới của robot năm bậc tự do.

Để thu được kết quả phân tích phần tử hữu hạn của phân tích tĩnh cánh tay robot, các tham số sau được coi là điều kiện biên để đưa vào phần mềm tính toán như tải trọng phân bố theo cả ba hướng (O_x , O_y , O_z) là 490N tại vị trí khâu cuối. Nhiệt độ mô phỏng coi như nhiệt độ phòng 25°C. Cấu trúc được kiểm tra bằng phần mềm Abaqus để phân tích tĩnh nhằm thu được chuyển vị tổng cộng và hướng của ứng suất chính và ứng suất tương đương gây ra do việc áp dụng các điều kiện tải trọng.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

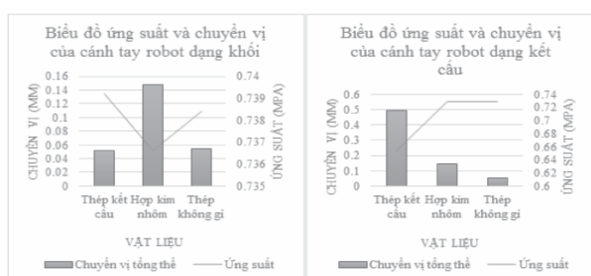
Bộ điều khiển robot với năm bậc tự do đã được phân tích tĩnh bằng phần mềm FEA để thu được tổng lượng chuyển vị và ứng suất chính, ứng suất tương đương ở điều kiện tải trọng không đổi với ba loại vật liệu khác nhau được sử dụng để mô phỏng bao gồm thép kết cấu, hợp kim nhôm và thép không gỉ. Các tính chất của ba loại vật liệu khác nhau của cánh tay robot được thể hiện trong bảng 1 dưới đây.

Bảng 1. Tính chất vật liệu sử dụng mô phỏng.

Tính chất	Khối lượng riêng (Kg/m ³)	Mức độ dẫn nở nhiệt (μm/m-K)	Nhiệt dung riêng (kJ/kg-K)	Độ dẫn nhiệt (W/m-K)	Modul đàn hồi (Gpa)	Hằng số Poisson's	Module cắt (Gpa)	Độ bền kéo (Mpa)
Thép kết cấu	7800	11	0.48	50	200	0.26	79.3	510
Hợp kim nhôm	2700	31	0.896	167	68.9	0.33	26	310
Thép không gỉ	8000	9.6	0.5	16.2	193	0.29	72	505



Các quy trình và bước tối ưu hóa phụ thuộc vào các tham số cần cải thiện, thiết lập các tham số cho phân tích FEA. Việc phân tích các thông số quan trọng như chuyển vị và ứng suất phải được xem xét để tối ưu hóa mô hình cánh tay robot có thể bằng kinh nghiệm hoặc kỹ thuật phần mềm. Hình 4 dưới đây thể hiện ứng suất và chuyển vị của cánh tay robot trước quá trình tối ưu hóa và sau quá trình đã tối ưu hóa cấu trúc.



Hình 4. Biểu đồ ứng suất và chuyển vị của cánh tay robot trước và sau quá trình tối ưu hóa.

Có thể thấy rằng, trước quá trình tối ưu hóa, cánh tay robot ở dạng khối, vật liệu thép kết cấu và thép không gỉ có cơ tính cao và ứng suất lớn, nhưng chuyển vị nhỏ, ngược lại vật liệu hợp kim nhôm có cơ tính thấp hơn thép nên cho lượng chuyển vị lớn hơn, đồng thời ứng suất nhỏ hơn. Điều này chưa thực sự tối ưu hóa về mặt khối lượng, vật liệu của cánh tay robot năm bậc tự do khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh. Qua quá trình tối ưu hóa cấu trúc cánh tay robot, có thể thấy rằng khi vật liệu chịu ứng suất tương đối thì cho dạng chuyển vị nhỏ hơn, phù hợp hơn. Qua đó có thể thấy rằng khả năng tối ưu hóa cấu trúc giúp giảm mức độ sử dụng vật liệu, tối ưu hóa quá trình gia công, vận chuyển, đồng thời tối ưu hóa khả năng chịu tải của robot. Các kết luận quan trọng được chỉ ra là:

1) Việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn hiện nay là cần thiết và phổ biến với mục đích giảm trọng lượng kết cấu của robot,

giảm thiểu biến dạng kết cấu, nâng cao độ ổn định cơ học, giảm tự trọng trên cơ sở áp dụng điều kiện thí nghiệm tải tĩnh.

2) Dạng cấu trúc đã được tối ưu hóa được lựa chọn từ hình dạng, trọng lượng, trạng thái chịu tải trọng tĩnh tốt hơn. Chứng tỏ đây là phương pháp phân tích dựa trên tiêu chí về độ cứng và khối lượng. Các giá trị biến dạng và ứng suất thu được thấp hơn khi so sánh với thiết kế dạng khối ban đầu của cánh tay robot mà không tối ưu hóa hình dạng.

3) Tối ưu hóa cấu trúc có sự hỗ trợ của phần mềm FEM có thể tối ưu hóa nhiều loại vật liệu khác nhau cho cùng một dạng chi tiết, cơ cấu mà tối ưu hóa về mặt thời gian, từ đó lựa chọn chính xác và tối ưu vật liệu sử dụng trong thực tiễn.

4) Đây là phương pháp không còn mới nhưng có ý nghĩa khoa học lớn giúp các nhà nghiên cứu mở rộng hơn về phạm vi, quy mô nghiên cứu, tiết kiệm chi phí xã hội.

Ngày nhận bài: 22/4/2025

Ngày phản biện: 12/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Choong W. H., Yeo K. B., "Structural Design for a 3DOF Robot Lower-Arm via Computer Aided Engineering". The Journal of Science and Technology, 20 (2007).
- [2]. Garcia, E., Jimenez, M.A., De Santos, P.G., Armada, M., "The Evolution of Robotics Research". IEEE Robot. Autom. Mag. 14(1), (2007), 90-103.
- [3]. Park, K., Kim, Y.S., Kim, C.S. & Park, H.J., "Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot". Journal of Materials Processing Technology, 609-613 (2007), 187-188.
- [4]. Zhang D, Zhen G, "Performance Analysis and Optimization of a Five-Degrees-of-Freedom Compliant Hybrid Parallel Micromanipulator". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, 34: (2015), 20-29.