

PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA CÁNH TAY ROBOT NHẪM CẢI THIỆN ĐỘ CỨNG VỮNG ĐỘNG HỌC

ANALYSIS OF ROBOT ARM'S SEPARATE VIBRATIONS TO IMPROVE DYNAMIC
STIFFNESS

ThS. Nguyễn Thùy Dung

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: ntdung.kck@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích đặc trưng động lực học của cánh tay robot trong dải tần 1–200 Hz. Kết quả xác định ba tần số cộng hưởng chính tại khoảng 115 Hz, 158 Hz và 180 Hz, trong đó 158 Hz là tần số chủ đạo. Biến dạng và gia tốc tập trung chủ yếu tại các khớp nối và đầu cuối cánh tay, cho thấy nguy cơ rung động khi bị kích thích gần các tần số này. Các kết quả là cơ sở cho việc tối ưu hóa kết cấu và chiến lược điều khiển nhằm nâng cao độ ổn định và độ tin cậy của cánh tay robot.

Từ khóa: Cánh tay robot; Cộng hưởng; Tần số riêng; Phần tử hữu hạn; Động lực học.

ABSTRACT

This study uses the finite element method to analyze the dynamic characteristics of a robotic arm in the 1–200 Hz frequency range. The results identify three main resonant frequencies at approximately 115 Hz, 158 Hz, and 180 Hz, with 158 Hz being the dominant frequency. Strain and acceleration are concentrated mainly at the arm's joints and ends, indicating a risk of vibration when excited near these frequencies. These results provide a basis for optimizing the structure and control strategies to improve the stability and reliability of the robotic arm.

Keywords: Robot arm; Resonance; Natural frequency; Finite element method; Dynamics.

1. GIỚI THIỆU

Phân tích động lực học và rung động đóng vai trò quan trọng trong thiết kế và vận hành cánh tay robot công nghiệp, do rung động có thể làm giảm độ chính xác, tăng mài mòn và gây hỏng hóc khi hệ thống làm việc gần tần số cộng hưởng. Vì vậy, việc xác định các tần số riêng và dạng dao động là yêu cầu thiết yếu để

đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy của robot [1].

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng phân tích tần số và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để mô hình hóa đáp ứng rung động và tối ưu hóa kết cấu robot. Pritz (2018) nhấn mạnh vai trò của phân tích cộng hưởng trong thiết kế robot, trong khi Ma và Chen (2019) kết hợp FEM với thực nghiệm để xác nhận đáp ứng động lực học. Gupta và cộng sự

(2020) tập trung tối ưu hóa cấu trúc dựa trên dạng dao động nhằm giảm khối lượng mà vẫn duy trì độ cứng [1-3].

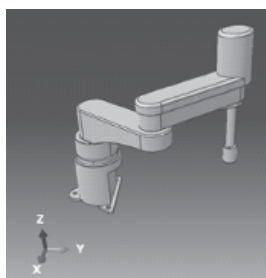
Tại Việt Nam, các nghiên cứu gần đây chủ yếu tập trung vào phân tích modal, ảnh hưởng của vật liệu và độ cứng khớp nối đến tần số riêng, cũng như đề xuất giải pháp tăng cường độ cứng cho cánh tay robot [4-6]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về phân bố đáp ứng chuyển vị và gia tốc trong miền tần số vẫn còn hạn chế.

Do đó, nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định các tần số cộng hưởng quan trọng và đánh giá phân bố chuyển vị, gia tốc của cánh tay robot thông qua phân tích đáp ứng tần số. Kết quả thu được là cơ sở cho việc tối ưu hóa kết cấu và chiến lược điều khiển nhằm nâng cao độ ổn định và độ bền làm việc của cánh tay robot.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình cánh tay robot

Mô hình nghiên cứu được xây dựng cho cánh tay robot công nghiệp 3 bậc tự do dạng khớp quay, gồm đế cố định, khâu trung gian và tay gắp. Hình học được thiết kế bằng phần mềm CAD và nhập vào Abaqus dưới dạng tệp .step để phục vụ chia lưới và gán vật liệu. Hình 1 minh họa mô hình cánh tay robot được xây dựng trên NX và chuyển sang Abaqus.



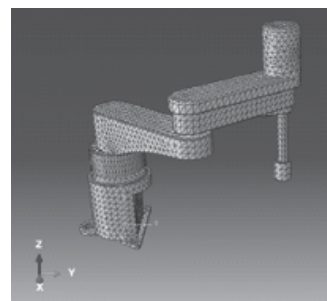
Hình 1. Mô hình hóa cánh tay robot được đưa vào phần mềm Abaqus

Vật liệu chế tạo được giả định là hợp kim nhôm 6061-T6, có tính chất cơ học thể hiện trong Bảng 1. Vật liệu được coi là đồng nhất, đẳng hướng và đàn hồi tuyến tính, nhằm đảm bảo mô hình phản ánh đúng đặc trưng đàn hồi trong phân tích dao động riêng.

Bảng 1. Thông số vật liệu của hợp kim nhôm 6061-T6

Mô đun đàn hồi (E)	70 Gpa
Khối lượng riêng (ρ)	2700 kg/m ³
Hệ số Poisson (ν)	0.29

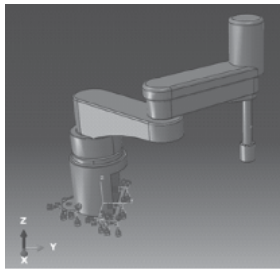
Mô hình phần tử hữu hạn được chia bằng phần tử solid với mật độ lưới tăng cục bộ tại các vùng khớp nối và đầu cánh tay, nơi dự kiến có biến dạng lớn. Tổng số phần tử là 36321, đảm bảo cân bằng giữa độ chính xác và thời gian tính toán. Hình 2 dưới đây thể hiện quá trình chia lưới cánh tay robot trong phần mềm Abaqus.



Hình 2. Chia lưới cánh tay robot trong phần mềm Abaqus

Để cánh tay robot được cố định hoàn toàn, trong khi tay gắp dao động tự do; phân tích chỉ xét dao động riêng để xác định tần số tự nhiên và dạng dao động. Các kết quả gồm tần số riêng trong dải 1-200 Hz và phân bố chuyển vị, biến dạng, gia tốc, làm cơ sở xác định vùng cộng hưởng nguy hiểm và đề xuất giải pháp tăng cường độ cứng. Hình 3 minh họa điều kiện ràng buộc trong Abaqus.





Hình 3. Gán điều kiện ràng buộc cho cánh tay robot trong phần mềm Abaqus

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng để mô phỏng và phân tích ứng xử cơ học của cánh tay robot bằng cách rời rạc hóa miền vật lý thành các phần tử hữu hạn và thiết lập mối quan hệ giữa lực và chuyển vị. Trong nghiên cứu này, mô hình được chia lưới bằng các phần tử khối 3D C3D10 với hàm dạng phi tuyến nhằm mô tả chính xác phân bố ứng suất và biến dạng.

Ma trận độ cứng phần tử được xác định theo:

$$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$$

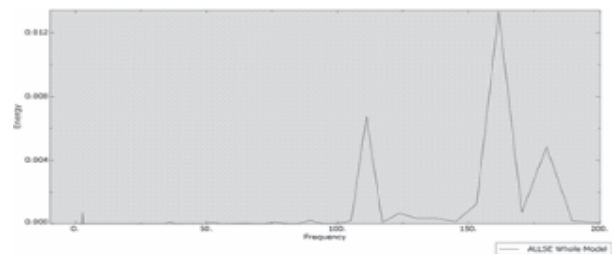
Trong đó, $[B]$ là ma trận biến dạng – chuyển vị, $[D]$ là ma trận vật liệu và V là thể tích phần tử. Bài toán trị riêng được giải bằng phần mềm Abaqus để xác định các tần số dao động tự nhiên và dạng dao động tương ứng. Các kết quả này là cơ sở để đánh giá độ cứng vững và đề xuất hiệu chỉnh thiết kế nhằm hạn chế hiện tượng cộng hưởng trong quá trình làm việc.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích phổ năng lượng

Kết quả phân tích phổ năng lượng của cánh tay robot được trình bày trong Hình 4, thể hiện mối quan hệ giữa biên độ dao động và tần

số, qua đó xác định các đỉnh năng lượng tương ứng với các mode dao động riêng của hệ.

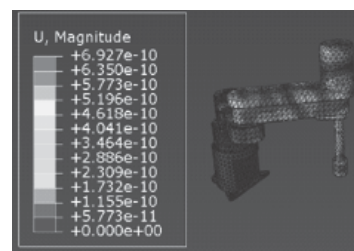


Hình 4. Phân tích phổ năng lượng của cánh tay robot

Phân tích trong dải 1–200 Hz xác định ba tần số cộng hưởng tại khoảng 115 Hz, 158 Hz và 180 Hz, trong đó 158 Hz là tần số chủ đạo với năng lượng dao động lớn nhất. Các mode bậc cao xuất hiện trên 180 Hz nhưng có đóng góp không đáng kể. Do đó, cần tránh vùng tần số cộng hưởng hoặc điều chỉnh khối lượng và độ cứng kết cấu để nâng cao độ ổn định và tuổi thọ cánh tay robot.

3.2. Phân tích trường độ lớn chuyển vị

Kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị tập trung chủ yếu tại vùng khớp nối và đầu cánh tay, trong khi phần đế gần như không biến dạng. Tại 115 Hz xuất hiện dao động uốn, ở 158 Hz xảy ra dao động uốn-xoắn kết hợp với biên độ lớn nhất, và tại 180 Hz dao động chủ yếu dạng xoắn. Hình 5 minh họa phân bố chuyển vị của cánh tay robot ứng với các tần số dao động khác nhau.

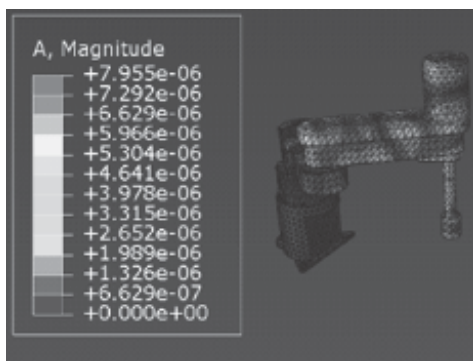


Hình 5. Chuyển vị cánh tay robot dưới tác dụng của tần số dao động.

Giá trị chuyển vị cực đại ở cấp 10^{-10} m, chứng tỏ cánh tay có độ cứng cao, song vẫn tồn tại vùng tập trung biến dạng cục bộ tại khớp. Các kết quả này là cơ sở để tối ưu hóa hình học và tăng cường độ cứng tại các vị trí yếu nhằm giảm dao động cộng hưởng.

3.3. Phân tích trường độ lớn gia tốc

Trường gia tốc cho thấy giá trị lớn nhất tập trung tại các khớp nối và đầu cánh tay robot, trùng với vùng có chuyển vị lớn. Tại tần số 158 Hz, gia tốc đạt cực đại, phản ánh trạng thái cộng hưởng mạnh nhất của hệ. Hình 6 minh họa phân bố gia tốc của cánh tay robot theo tần số dao động.



Hình 6. Gia tốc của cánh tay robot dưới tác dụng của tần số dao động.

Gia tốc cực đại đạt khoảng 10^{-6} m/s², cho thấy dao động tuy nhỏ nhưng có thể ảnh hưởng đến độ chính xác điều khiển nếu không được kiểm soát. Kết quả này là cơ sở để điều chỉnh tần số điều khiển và tăng cường độ cứng động học tại các vùng chịu dao động lớn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện phân tích dao động riêng của cánh tay robot bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong dải tần từ 1–200 Hz. Kết quả chỉ ra ba tần số cộng hưởng chính

tại khoảng 115 Hz, 158 Hz và 180 Hz, trong đó 158 Hz là tần số chủ đạo. Các vùng đầu cánh tay và khớp nối có chuyển vị và gia tốc lớn nhất, phản ánh khả năng tập trung ứng suất và biến dạng cục bộ tại các vị trí này.

Mặc dù giá trị chuyển vị và gia tốc nhỏ, song dao động cộng hưởng vẫn có thể ảnh hưởng đến độ chính xác và độ bền của robot. Do đó, kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa hình học, tăng cường độ cứng tại các vùng yếu và cải thiện thuật toán điều khiển nhằm nâng cao độ cứng vững động học và hiệu suất làm việc của cánh tay robot. ❖

Ngày nhận bài: 03/3/2026

Ngày phản biện: 19/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pritz, R. A. (2018), “*The necessity of frequency analysis in robot design and control*”. Journal of Mechanical Systems, 12(4), 101-115.
- [2]. Ma, H. B., & Chen, S. B. (2019), “*Finite Element Analysis and Experimental Validation of Parallel Robot Vibration Response*”. International Journal of Robotics and Automation, 34(3), 205-218.
- [3]. Gupta, S. K., et al. (2020), “*Structural optimization of robotic manipulators based on mode shape analysis*”. Engineering Optimization, 52(7), 1189-1205.
- [4]. Nguyễn Văn Tú, Lê Anh Dũng, Hoàng Thị Lan (2021), “*Phân tích modal và ảnh hưởng của vật liệu đến tần số riêng của robot SCARA*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, 15(2), 45-56.
- [5]. Trần Minh Hoàng (2022), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng khớp nối đến đáp ứng dao động của cánh tay robot công nghiệp*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 12(1), 1-10.
- [6]. Lê Hồng Sơn (2023), “*Tối ưu hóa cấu trúc cánh tay robot sử dụng vật liệu composite nhằm tăng cường độ cứng*”. Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ Quốc gia, 62-71.