



DOI:10.22144/ctujos.2026.077

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN LỰC CHO CÁNH TAY ROBOT 3 BẬC TỰ DO DỰA TRÊN MÔ HÌNH TRỞ KHÁNG

Nguyễn Minh Huy, Nguyễn Thanh Nhã, Trịnh Quốc Thanh và Trần Đức Thiện*

Bộ môn Điều khiển tự động, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): thientd@hcmute.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 15/12/2025

Sửa bài (Revised): 10/01/2026

Duyệt đăng (Accepted): 24/04/2026

Title: Impedance - based contact force control for a 3 - Dof manipulator

Author(s): Nguyen Minh Huy, Nguyen Thanh Nha, Trinh Quoc Thanh and Tran Duc Thien*

Affiliation(s): Department of Automatic Control, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam

TÓM TẮT

Phương pháp điều khiển lực tiếp xúc cho cánh tay robot ba bậc tự do dựa trên mô hình trở kháng đã được đề xuất trong nghiên cứu này. Cấu trúc điều khiển kết hợp bộ điều khiển vị trí vi tích phân tỉ lệ (PID) và bộ điều khiển lực sử dụng phản hồi từ cảm biến lực nhằm đảm bảo bám quỹ đạo và điều chỉnh lực tương tác ổn định, phù hợp cho các ứng dụng gia công bề mặt như mài và đánh bóng. Hiệu quả của phương pháp được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên MATLAB/Simulink và thí nghiệm thực tế trên cánh tay robot. Hiệu suất điều khiển lực được đánh giá bằng chỉ tiêu sai số bình phương trung bình (RMSE) giữa lực đặt và lực tiếp xúc thực tế. Kết quả mô phỏng cho thấy RMSE lực dưới 0,25 N, trong khi kết quả thực nghiệm đạt khoảng từ 1,0 N đến 1,25 N. Mặc dù sai số thực nghiệm lớn hơn so với mô phỏng, bộ điều khiển đề xuất vẫn đảm bảo tính ổn định và khả năng bám lực tốt trong điều kiện làm việc thực tế.

Từ khóa: Bộ điều khiển lực, cảm biến lực, cánh tay robot 3 bậc, mô hình trở kháng

ABSTRACT

This paper presents a contact force control approach for a three-degree-of-freedom robotic manipulator based on impedance control. The proposed method combines a PID-based position controller to achieve accurate end-effector motion with a force control strategy that uses force sensor feedback to regulate contact forces during interaction. The resulting control structure improves interaction stability and is well suited for surface processing applications such as grinding and polishing. The effectiveness of the proposed approach is evaluated through MATLAB/Simulink simulations using a three-dimensional model implemented in the Simscape environment, as well as experimental tests conducted on a physical robotic manipulator. The force control performance is assessed using the root mean square error (RMSE) between the desired and measured contact forces. Simulation results show that the RMSE is below 0.25 N, while the experimental results range from approximately 1.0 N to 1.25 N, indicating stable operation and reliable force tracking under real operating conditions.

Keywords: Force controller, Impedance, Force sensor, 3-Dof manipulator

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0, robot công nghiệp ngày càng đóng vai trò quan trọng trong tự động hóa sản xuất, với khả năng làm việc linh hoạt, chính xác và hiệu quả hơn con người đảm bảo năng suất và chất lượng sản phẩm đạt mức tối đa (Zhong et al., 2017). Cánh tay robot được ứng dụng rộng rãi trong hầu hết các ngành công nghiệp sản xuất như điện tử, ô tô và kim loại. Theo thống kê của Hiệp hội Robot quốc tế (IFR, 2024), có hơn 540.000 cánh tay robot công nghiệp được lắp đặt mới trên toàn cầu (Robotics, 2024), cho thấy sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghiệp robot. Xu hướng hiện nay là chuyển từ các robot thao tác cố định sang các hệ thống có khả năng tương tác vật lý an toàn và thích nghi với môi trường (Song et al., 2017). Các ứng dụng như gia công bề mặt như đánh bóng, mài (Liu et al., 2023; Mohsin et al., 2019), đến ứng dụng phục hồi chức năng (Fu et al., 2024) trong y tế, cũng như các tác vụ lắp ráp chính xác và tương tác người-robot (Mukherjee et al., 2022), đều đòi hỏi robot phải có khả năng điều khiển lực tiếp xúc chính xác và ổn định. Tuy nhiên, các bộ điều khiển truyền thống chủ yếu dựa trên điều khiển vị trí, dễ gây ra lực tiếp xúc lớn và mất ổn định khi xảy ra sai lệch nhỏ trong quá trình tương tác.

Để giải quyết vấn đề này, hai hướng tiếp cận điều khiển lực kinh điển đã được phát triển gồm: điều khiển lai vị trí/lực (Hybrid Position/Force Control) (Raibert & Craig, 1981) và điều khiển trở kháng (Impedance Control) (Hogan, 1984, 1985). Trong khi điều khiển lai đòi hỏi thông tin chính xác về môi trường, điều khiển trở kháng thiết lập mối quan hệ động học giữa lực và chuyển động thông qua mô hình khối lượng – lò xo – giảm chấn, cho phép robot hấp thụ va chạm và duy trì ổn định trong tương tác (Song et al., 2017). Nhờ tính linh hoạt và khả năng triển khai rộng rãi, điều khiển trở kháng đã trở thành phương pháp tiêu chuẩn trong nhiều lĩnh vực, từ robot công nghiệp đến robot dịch vụ và robot y sinh học (Lahr et al., 2016; Zhou et al., 2021). Kết quả các nghiên cứu sau này cũng chỉ ra rằng việc lựa chọn thích hợp các tham số trở kháng, robot có thể đảm bảo chuyển đổi mượt mà giữa chuyển động tự do và chuyển động có ràng buộc, đồng thời nâng cao tính ổn định và độ bền vững trước nhiễu và yếu tố bất định (Jung & Jeong, 2021). Phương pháp điều khiển trở kháng biến thiên phụ thuộc lực (Force-dependent Variable Impedance Controller - FVIC), hàm sigmoid được sử dụng để điều chỉnh độ cứng nhằm ưu tiên an toàn tương tác khi quỹ đạo tham chiếu có sai số (Widanage et al., 2025). Để xử lý tính

phi tuyến mà không phụ thuộc vào kinh nghiệm chuyên gia, hệ thống mạng thần kinh mờ thích nghi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ANFIS) đã được ứng dụng để tối ưu hóa trực tuyến tốc độ cập nhật tham số và triệt tiêu hiện tượng vọt lố lực (Wang et al., 2025). Bộ điều khiển tiên tiến như điều khiển trở kháng thích nghi kết hợp mô hình dự báo (model predictive dynamic adaptive impedance control algorithm MPRPO-DAIC) đã được đề xuất để nâng cao độ chính xác bám lực trên các bề mặt phức tạp (Mu et al., 2025). Song song đó, các bộ quan sát nâng cao như bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer - ESO) (Sebastian et al., 2019) hoặc điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động (Active Disturbance Rejection Control-ADRC) (Liu et al., 2022) cũng được tích hợp để ước lượng và bù nhiễu, tăng độ bền vững của hệ thống, thậm chí cho phép phát hiện lỗi cảm biến (Truong et al., 2021).

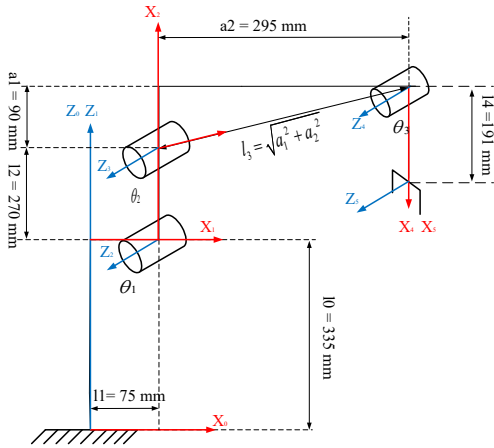
Tại Việt Nam, việc nghiên cứu điều khiển lực cho cánh tay robot đang nhận được nhiều sự quan tâm, tuy nhiên các công bố hiện nay chủ yếu dừng lại ở mức phát triển thuật toán và kiểm chứng thông qua mô phỏng. Phan Đình Hiếu et al. (2019) đã đề xuất bộ điều khiển trượt vị trí/lực nhằm đảm bảo tính bền vững trước bất định động lực học, trong khi Tuan and Hieu (2019) đã thiết kế bộ điều khiển vị trí/lực thích nghi sử dụng bộ quan sát lực và vận tốc để điều khiển lực tương tác. Mặc dù các kết quả mô phỏng cho thấy tính đúng đắn lý thuyết và khả năng hội tụ của sai số, tuy nhiên kết quả các nghiên cứu này vẫn thiếu kiểm chứng trên hệ thống thực nghiệm, hạn chế khả năng đánh giá hiệu quả trong điều kiện làm việc thực tế.

Từ thực tế đó, phương pháp điều khiển lực tiếp xúc cho cánh tay robot 3 bậc tự do dựa trên mô hình trở kháng đã được đề xuất, kết hợp bộ điều khiển vị trí PID với phản hồi từ cảm biến lực để điều chỉnh linh hoạt lực tương tác. So với các phương pháp điều khiển hiện đại, điều khiển trở kháng có độ chính xác và khả năng thích nghi kém hơn trong các môi trường phức tạp hoặc thay đổi nhanh; tuy nhiên, nhờ cấu trúc đơn giản và tính ổn định, phương pháp này dễ triển khai và tích hợp trên các hệ robot công nghiệp hiện có, phù hợp với điều kiện ứng dụng thực tế tại Việt Nam. Điểm nổi bật của nghiên cứu là quy trình kiểm chứng khép kín từ mô hình Simscape đến thực nghiệm, qua đó đánh giá hiệu quả điều khiển trong điều kiện thực tế. Mặc dù còn hạn chế do sử dụng tham số trở kháng cố định, kết quả thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển đề xuất hiệu quả hơn so với điều khiển PID thông thường và tạo nền tảng cho các nghiên cứu trở kháng thích nghi trong tương lai.

2. ĐẶT VẤN ĐỀ

2.1. Động học thuận

Mô hình động học thuận của cánh tay robot ba bậc được xây dựng theo phương pháp Denavit Hartenberg. Hệ trục tọa độ được đặt như Hình 1.



Hình 1. Đặt trục cho hệ robot

Từ các hệ trục được đặt như Hình 1 có được thông số DH được trình bày tại Bảng 1:

Bảng 1. Bảng thông số DH

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	l_0	0
2	90	l_1	0	$\theta_1^* + 90$
3	0	l_2	0	$\theta_2^* + \theta_{offset} - 90$
4	0	l_3	0	$\theta_3^* - \theta_{offset} - 90$
5	0	l_4	0	0

Với $l_0 = 335$ mm, $l_1 = 75$ mm, $l_2 = 270$ mm,
 $l_3 = \sqrt{90^2 + 295^2}$ mm, $l_4 = 191$ mm,
 $\theta_{offset} = a \tan 2(90, 295)$.

Đặt $\theta_1 = \theta_1^* + 90$; $\theta_2 = \theta_2^* + \theta_{offset} - 90$;
 $\theta_3 = \theta_3^* - \theta_{offset} - 90$

Các quy ước viết tắt:

$c_i = \cos(\theta_i), s_i = \sin(\theta_i), c\alpha_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1}), s\alpha_{i-1} = \sin(\alpha_{i-1}),$
 $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j), s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j),$
 $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k), c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k).$

Ma trận chuyển đổi tổng quát từ hệ trục tọa độ (i) về hệ trục (i-1):

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Từ (1) ma trận chuyển đổi của robot được thực hiện như sau:

$${}^0\mathbf{T}_5 = {}^0\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2\mathbf{T}_3\mathbf{T}_4\mathbf{T}_5\mathbf{T} \quad (2)$$

$${}^0\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 + l_3c_{12} + l_2c_1 + l_4c_{123} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_0 + l_3s_{12} + l_2s_1 + l_4s_{123} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Từ ma trận chuyển đổi (3) vị trí cuối của cánh tay robot là:

$$\mathbf{P}_{EE} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_3c_{12} + l_2c_1 + l_4c_{123} \\ 0 \\ l_0 + l_3s_{12} + l_2s_1 + l_4s_{123} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. Động học nghịch

Động học nghịch của cánh tay robot được tính bằng phương pháp đại số dựa trên tọa độ điểm đầu cuối của cơ cấu chấp hành (4) từ đó tính được các bộ nghiệm sau:

- Bộ nghiệm thứ nhất:

$$\begin{cases} \theta_1 = a \tan 2 \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{\sqrt{1-d^2}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \\ \theta_{12} = a \tan 2(s_{12}, c_{12}) \\ \theta_2 = \theta_{12} - \theta \\ \theta_3 = \phi - \theta_{12} \end{cases} \quad (5)$$

- Bộ nghiệm thứ hai:

$$\begin{cases} \theta_1 = a \tan 2 \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{-\sqrt{1-d^2}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \\ \theta_{12} = a \tan 2(s_{12}, c_{12}) \\ \theta_2 = \theta_{12} - \theta_1 \\ \theta_3 = \phi - \theta_{12} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:

$$a = 2l_2(P_x - l_1 - l_4c_\phi)$$

$$b = 2l_2(P_z - l_0 - l_4s_\phi)$$

$$d = (P_x - l_1 - l_4c_\phi)^2 + (P_z - l_0 - l_4s_\phi)^2 - l_3^2$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

2.3. Động lực học

Phương trình động lực học được trình bày như sau

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) + \boldsymbol{\tau}_{\text{frict}} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} = \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

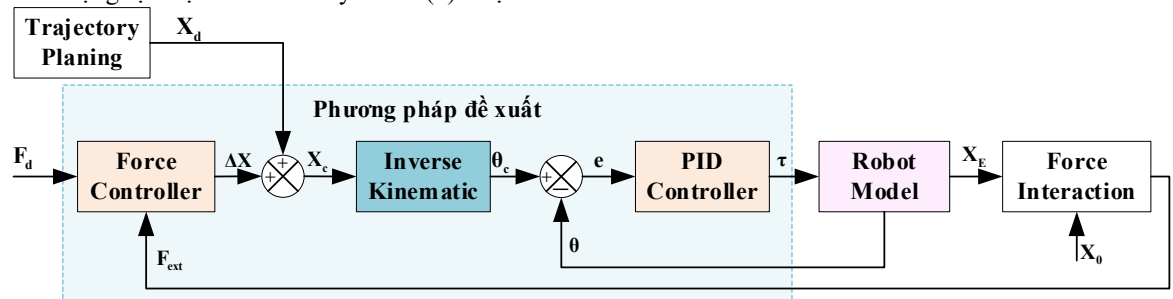
Ở đó $\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \ddot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ được mô tả lần lượt vị trí, vận tốc và gia tốc khớp cánh tay máy, $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính và xác định dương, $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ là ma trận mô tả thành phần ly tâm và Coriolis, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ là véc-tơ trọng trường, $\boldsymbol{\tau}_{\text{frict}}$ mô tả lực ma sát của hệ thống, $\mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ là ngoại lực tác động lên các khớp, $\boldsymbol{\tau} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ là véc-tơ mô-men trên từng khớp.

3. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

Phương pháp điều khiển đề xuất được thể hiện ở Hình 2, trong đó khối *Trajectory Planning* tạo quỹ đạo chuyển động cho robot và truyền tín hiệu đến khối *Inverse Kinematics* để giải các góc khớp, làm tín hiệu đặt cho bộ điều khiển vị trí *PID Controller*. Khối *PID Controller* điều khiển vị trí các khớp dựa trên sai lệch giữa tín hiệu đặt và tín hiệu phản hồi từ khối *Robot Model*, tính toán mô-men điều khiển cung cấp cho các khớp. Khối *Robot Model* mô phỏng động học robot và phản hồi lại vị trí góc khớp. Khối *Force Interaction* mô phỏng lực tiếp xúc giữa robot và môi trường theo phương Z, với đầu vào là vị trí đầu cuối của robot và vị trí bề mặt, đầu ra là lực tương tác. Cuối cùng, khối *Force Controller* điều khiển lực tiếp xúc bằng cách sử dụng sai lệch giữa lực đặt và lực đo được để hiệu chỉnh quỹ đạo theo phương Z, đảm bảo lực tiếp xúc đạt giá trị mong muốn.

3.1. Bộ điều khiển PID

Đặt $\mathbf{x}_1 = \boldsymbol{\theta} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$, $\mathbf{x}_2 = \dot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ và $\mathbf{u} = \boldsymbol{\tau}$. Phương trình động lực học của cánh tay robot (7) được thể



Hình 2. Sơ đồ tổng quan phương pháp đề xuất

hiện theo phương trình không gian trạng thái như sau.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}_1)(\mathbf{u} - \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 - \mathbf{g}(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau}_{\text{frict}}) \end{cases} \quad (8)$$

Giả thiết 1: Giả sử rằng các thông số vật lý và ma sát của hệ thống đã được nhận dạng và biết trước.

Sai số vị trí.

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_{1c} - \mathbf{x}_1 \quad (9)$$

Dựa vào sai số vị trí (9), luật điều khiển của bộ điều khiển PID được xây dựng như sau

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (10)$$

Trong đó: $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_i, \mathbf{K}_d \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ lần lượt là các ma trận đường chéo xác định dương của các hệ số tỉ lệ, tích phân và vi phân.

3.2. Bộ điều khiển lực dựa trên mô hình trở kháng

Từ sơ đồ điều khiển Hình 2, luật điều khiển cho khối điều khiển lực tiếp xúc *Force Controller* đã được tiến hành thiết kế. Lực tiếp xúc giữa robot và môi trường \mathbf{F}_{ext} thông thường được đo bằng cảm biến lực. Tuy nhiên để mô hình hóa và mô phỏng lực tiếp xúc \mathbf{F}_{ext} có thể được tính như sau:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{K}_c (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_E) \quad (11)$$

Trong đó: $\mathbf{X}_0 \in \mathcal{R}^3$ và $\mathbf{X}_E \in \mathcal{R}^3$ lần lượt là vị trí bề mặt môi trường và vị trí điểm đầu cuối của cánh tay robot, \mathbf{K}_c là hệ số độ cứng của môi trường.

F_d được đặt là lực tương tác mong muốn do đó ta có sai số giữa lực tương tác mong muốn và lực phản hồi F_{ext} :

$$\Delta F = F_d - F_{ext} \quad (12)$$

Sai số giữa vị trí điểm đầu cuối X_E với vị trí theo quỹ đạo điều khiển X_c :

$$\Delta X = X_E - X_c \quad (13)$$

Mô hình trở kháng được chọn là hệ tuyến tính bậc hai với hàm truyền $K(s) = 1 / (M_m s^2 + B_m s + K_m)$, do đó mối quan hệ động học giữa sai số ΔF và sai số vị trí ΔX có thể được thể hiện như sau:

$$M_m \Delta \ddot{X} + B_m \Delta \dot{X} + K_m \Delta X = u_{AF} \quad (14)$$

Với u_{AF} là tín hiệu từ bộ điều chỉnh lực được xác định như sau:

$$u_{AF} = K_{PAF} \Delta F + K_{IAF} \int \Delta F \quad (15)$$

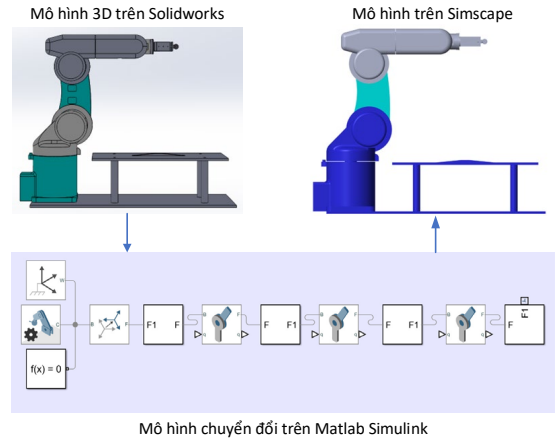
Trong đó: $M_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $B_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $K_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là các ma trận đường chéo xác định dương lần lượt là ma trận hệ số khối lượng quán tính ảo, độ giảm chấn ảo và độ cứng ảo. $K_{PAF} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận đường chéo xác định dương là hệ số khâu tỉ lệ, $K_{IAF} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận đường chéo xác định dương là hệ số khâu tích phân.

4. KIỂM CHỨNG TRÊN MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

4.1. Mô tả môi trường mô phỏng

Mô hình cánh tay robot 3 bậc được thiết kế trên phần mềm Solidwork sau đó mô hình 3D đã thiết kế được chuyển vào môi trường mô phỏng Matlab Simulink theo sơ đồ Hình 3. Các thông số thiết lập cho môi trường mô phỏng Matlab Simulink: bộ giải loại: Fixed-step, phương pháp xấp xỉ: ode1be(Backward Euler), thời gian lấy mẫu 0,001 giây, thời gian mô phỏng 130 giây. Ngoài ra để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất, việc mô phỏng hoạt động của robot di chuyển với hàm quy hoạch quỹ đạo bậc 3 với các điểm di chuyển đã được tiến hành và được mô tả theo hàm số sau:

$$X_d(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix}, \quad t \in [0, 130] \quad (16)$$



Hình 3. Chuyển mô hình robot sang Matlab Simulink

Trường hợp 1: Điều khiển robot tiếp xúc với môi trường tại một điểm, quỹ đạo điểm đầu cuối của robot được mô tả như sau:

$$X_d(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 0 \leq t < 5 \\ \begin{bmatrix} -\frac{23}{50}(t-5)^3 + \frac{69}{10}(t-5)^2 + 370 \\ \frac{76}{125}(t-5)^3 + \frac{228}{25}(t-5)^2 + 504 \end{bmatrix} & 5 \leq t < 15 \\ \begin{bmatrix} 600 \\ 200 \end{bmatrix} & 15 \leq t < 110 \\ \begin{bmatrix} \frac{23}{50}(t-110)^3 - \frac{69}{10}(t-110)^2 + 600 \\ -\frac{76}{125}(t-110)^3 + \frac{228}{25}(t-110)^2 + 200 \end{bmatrix} & 110 \leq t < 120 \\ \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 120 \leq t < 130 \end{cases} \quad (17)$$

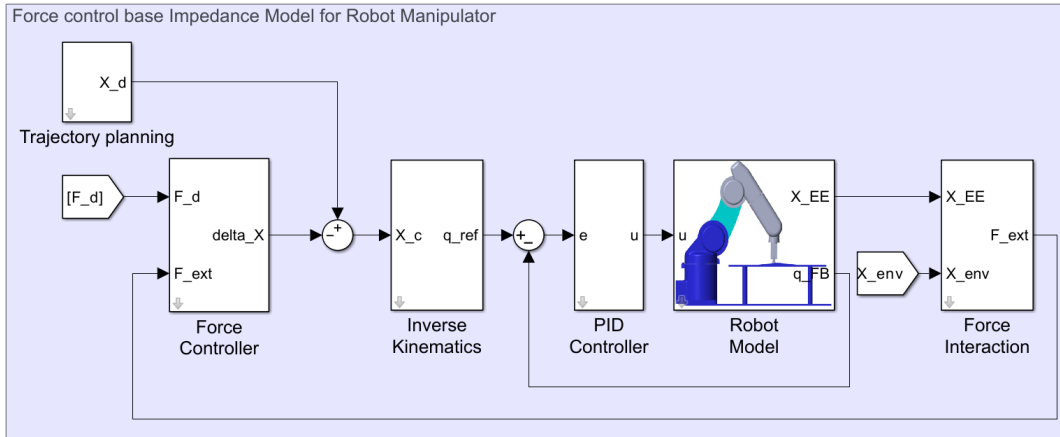
Trường hợp 2: Điều khiển robot di chuyển theo đường thẳng trên bề mặt môi trường, quỹ đạo điểm đầu cuối của robot được mô tả như sau:

$$\mathbf{X}_d(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 0 \leq t < 5 \\ \begin{bmatrix} -\frac{92}{25}(t-5)^3 + \frac{138}{5}(t-5)^2 + 370 \\ \frac{598}{125}(t-5)^3 - \frac{897}{25}(t-5)^2 + 504 \end{bmatrix} & 5 \leq t < 10 \\ \begin{bmatrix} 600 \\ \frac{1}{100}(t-10)^3 - \frac{3}{20}(t-10)^2 + 205 \end{bmatrix} & 10 \leq t < 20 \\ \begin{bmatrix} \frac{17}{24300}(t-20)^3 - \frac{17}{180}(t-20)^2 + 600 \\ 200 \end{bmatrix} & 20 \leq t < 110 \\ \begin{bmatrix} -\frac{1}{20}(t-110)^3 + \frac{3}{4}(t-110)^2 + 345 \\ -\frac{76}{125}(t-110)^3 + \frac{228}{25}(t-110)^2 + 200 \end{bmatrix} & 110 \leq t < 120 \\ \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 120 \leq t \leq 130 \end{cases}$$

Bảng 2. Bảng các thông số mô phỏng

Thông số	Giá trị
Bộ điều khiển vị trí	$\mathbf{K}_p = \text{diag}([8000 \ 7000 \ 500])$ $\mathbf{K}_d = \text{diag}([200 \ 30 \ 5])$
Độ cứng môi trường	$K_e = 5000 N / m$
Vị trí bề mặt môi trường theo phương Z	$X_0 = 202 \text{ mm}$
Bộ điều khiển lực	$\mathbf{K}_{PAF} = \text{diag}([0 \ 0 \ 3])$ $\mathbf{K}_{IAF} = 0$ $\mathbf{M}_m = \text{diag}([0 \ 0 \ 1.1])$ $\mathbf{B}_d = \text{diag}([0 \ 0 \ 1325.5])$ $\mathbf{K}_d = \text{diag}([0 \ 0 \ 132])$

Việc mô phỏng bộ điều khiển lực tiếp xúc giữa robot và bề mặt môi trường được thực hiện theo phương Z trong hai trường hợp trên với các thông số:



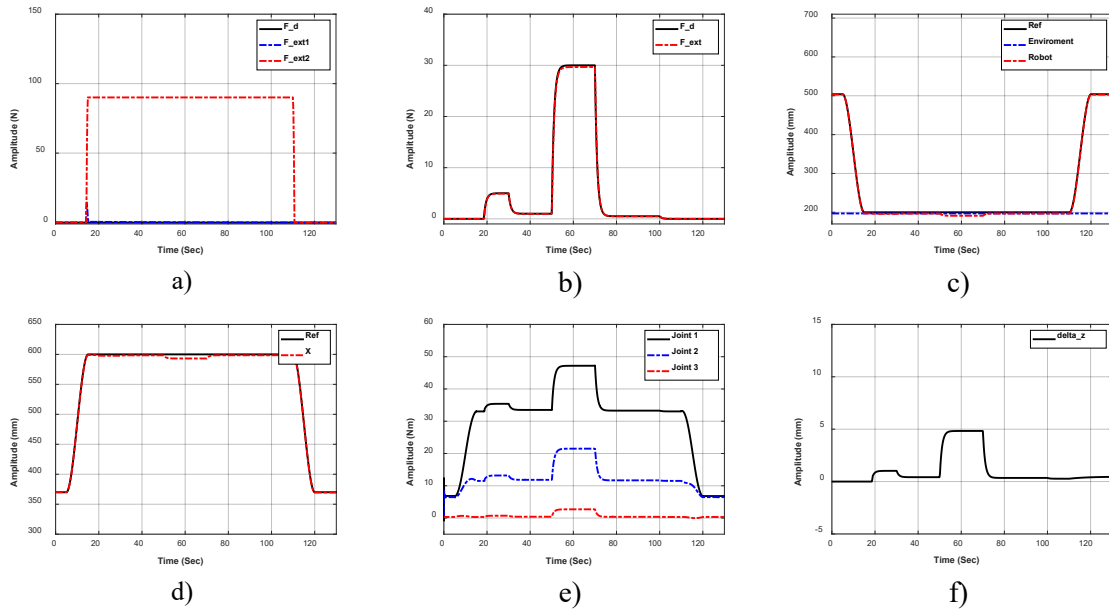
Hình 4. Sơ đồ khối mô hình mô phỏng điều khiển lực trong Matlab Simulink

Việc lựa chọn các thông số bộ điều khiển lực được thực hiện bằng phương pháp thử sai dựa vào sự ảnh hưởng của các thông số mô hình trở kháng với hệ số quán tính M ảnh hưởng đến ổn định gia tốc, hệ số độ cứng K ảnh hưởng đến sai số bám lực, và hệ số giảm chấn B cân bằng giữa tốc độ đáp ứng và triệt tiêu dao động (Liu et al., 2023).

4.2. Kết quả mô phỏng

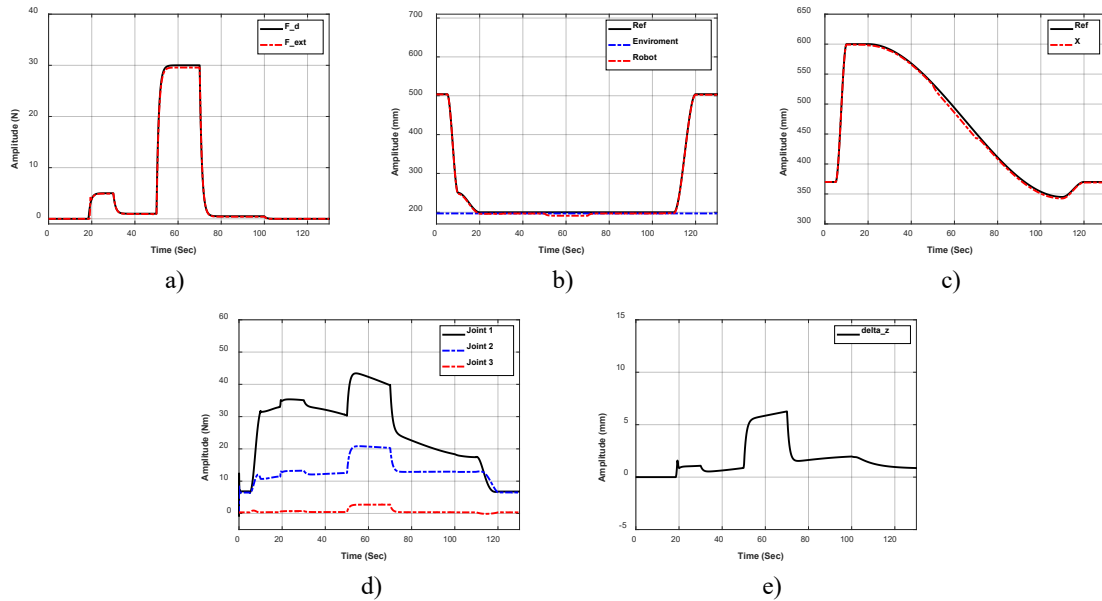
Quá trình mô phỏng được thực hiện nhằm đánh giá khả năng điều khiển lực của cánh tay robot khi tiếp xúc với bề mặt môi trường tại một điểm khi không sử dụng bộ điều khiển lực và có sử dụng bộ điều khiển lực. Hình 5a thể hiện lực tiếp xúc giữa

robot và bề mặt môi trường theo phương Z, trong đó đường màu đen thể hiện lực tiếp xúc mong muốn, đường màu xanh là lực tiếp xúc khi có bộ điều khiển lực kết hợp bộ điều khiển vị trí PID và đường màu đỏ là lực tiếp xúc khi chỉ có bộ điều khiển vị trí PID. Có thể thấy rằng, khi không sử dụng bộ điều khiển lực thì lực tiếp xúc tăng đột ngột và vượt quá giá trị mong muốn. Khi có bộ điều khiển lực thì lực tiếp xúc của robot và bề mặt môi trường được điều chỉnh sao cho bằng với tín hiệu đặt, thể hiện bộ điều khiển có khả năng bù sai lệch và duy trì lực mong muốn trong quá trình tương tác điều này cũng được thể hiện ở Hình 5b.



Hình 5. Kết quả mô phỏng trường hợp 1

Ghi chú: a) lực tiếp xúc khi có bộ điều khiển lực và không có bộ điều khiển lực, b) tín hiệu đặt và đáp ứng lực tiếp xúc, c) vị trí điểm đầu cuối theo phương Z, d) vị trí điểm đầu cuối theo phương X, e) tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển PID và f) tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển lực.



Hình 6. Kết quả mô phỏng trường hợp 2

Ghi chú: a) tín hiệu đặt và đáp ứng lực tiếp xúc, b) vị trí điểm đầu cuối theo phương Z, c) vị trí điểm đầu cuối theo phương X, d) tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển PID, e) tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển lực.

Các kết quả trong Hình 5c, Hình 5d, Hình 6b và Hình 6c thể hiện đáp ứng vị trí và lực của cánh tay robot trong quá trình tương tác với môi trường, với đường tín hiệu màu đen là tín hiệu vị trí đặt cho cánh tay robot di chuyển theo quỹ đạo, đường màu xanh

thể hiện vị trí của bề mặt môi trường, đường màu đỏ là vị trí điểm đầu cuối của robot. Đồ thị Hình 5c và Hình 6b có thể cho thấy rằng từ giây thứ 0 đến khoảng giây 20 vị trí điểm đầu cuối của robot theo phương z di chuyển theo tín hiệu đặt. Từ giây 20

robot bắt đầu tiếp xúc với bề mặt môi trường, lực tiếp xúc thể hiện trong Hình 5b và Hình 6a với đường màu đen là lực tiếp xúc mong muốn và đường màu đỏ là lực tiếp xúc giữa điểm đầu cuối của cánh tay robot và môi trường. Khi bắt đầu tiếp xúc với bề mặt môi trường lực tiếp xúc xuất hiện, nhờ bộ điều khiển lực điều chỉnh vị trí đặt của robot theo phương z Hình 5f và Hình 6e để duy trì lực tiếp xúc bám sát giá trị đặt. Kết quả cho thấy lực tiếp xúc hội tụ tốt về lực mong muốn với sai số nhỏ được đánh giá bằng phương pháp bình phương trung bình RMSE, giá trị trong hai trường hợp thí nghiệm lần lượt là 0,174N và 0,238N thể hiện khả năng bám lực chính xác và ổn định của phương pháp đề xuất.

Phương pháp sai số trung bình bình phương (RMSE) (Chai & Draxler, 2014) được tính bởi công thức:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (18)$$

Trong đó: n số mẫu dữ liệu, S_i là giá trị đặt, O_i là giá trị đáp ứng từ hệ thống

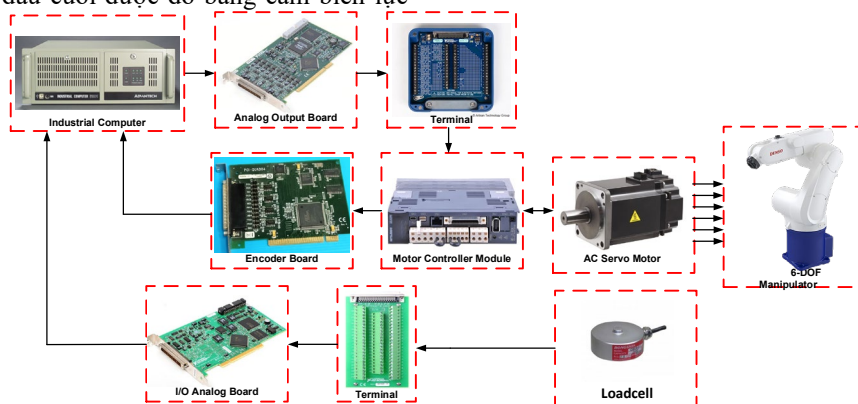
4.3. Mô tả môi trường thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm là hệ cánh tay robot 6 bậc tự do, tuy nhiên chỉ thực hiện điều khiển các khớp 2, 3 và 5, các khớp còn lại sẽ khóa cứng. Tổng quan về phần cứng mô hình thí nghiệm được thể hiện trong Hình 7. Hệ thống mô hình thí nghiệm bao gồm một cánh tay robot với các khớp xoay sử dụng hệ động cơ AC servo cùng với bộ điều khiển AC servo driver được điều khiển ở chế độ mô-men. Hệ thống điều khiển là máy tính công nghiệp ADVANTECH 610H tích hợp các card mở rộng chuyên dụng. Card PCI-6713 xuất tín hiệu analog ± 10 V để điều khiển mô-men động cơ, trong khi card PCI-QUAD04 thu tín hiệu encoder để xác định vị trí góc khớp. Lực tiếp xúc tại điểm đầu cuối được đo bằng cảm biến lực

một trục CBFS-50, việc kết hợp với bộ chuyển đổi tín hiệu lực thành tín hiệu điện áp analog 0–10 V được đọc qua card PCI-6023E. Tín hiệu lực được hiệu chuẩn theo phương pháp hai điểm gồm hiệu chuẩn không tải (Zero Calibration) và hiệu chuẩn dải (Span Calibration) bằng quả cân chuẩn. Để giảm nhiễu, cấp tín hiệu được cách ly, bọc chống nhiễu, tiếp địa một điểm và đấu dây 6 lõi; đồng thời tín hiệu được lọc thông thấp trước khi đưa vào bộ điều khiển lực.

Quá trình thực nghiệm bao gồm việc thực nghiệm bộ điều khiển vị trí PID để kiểm tra hoạt động của cánh tay robot trong không gian làm việc. Phần mềm Matlab Simulink 2018b được sử dụng chạy ở chế độ thời gian thực (External), thời gian lấy mẫu 0,01 giây, thời gian thực nghiệm hệ thống là 120 giây. Môi trường tiếp xúc được tạo bởi bề mặt PVC foam, được lựa chọn nhờ đặc tính cơ học ổn định và độ cứng hữu hạn (Yao et al., 2022); trong phạm vi khảo sát, vật liệu này thể hiện tính đàn hồi xấp xỉ tuyến tính, cho phép mô hình hóa tương tác như một phần tử lò xo, phù hợp để đánh giá hiệu quả bám lực của bộ điều khiển trở kháng (Herbster et al., 2023)

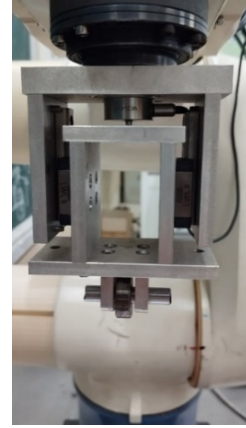
Sau đó, việc điều khiển lực với tín hiệu lực đặt đã được thực hiện và được mô tả như sau: từ giây thứ 0 đến giây thứ 25 lực đặt bằng 0N, từ giây thứ 25 đến giây thứ 40 lực đặt bằng 5N, từ giây thứ 40 đến giây thứ 60 lực đặt bằng 10N, từ giây thứ 60 đến giây thứ 80 lực đặt bằng 20N, từ giây thứ 80 đến giây thứ 100 lực đặt bằng 5N, từ giây thứ 100 đến giây thứ 120 lực đặt bằng 0N. Tín hiệu lực đặt đi qua bộ lọc bậc nhất có hàm $G_{LF}(s) = \frac{1}{s+1}$. Thực nghiệm điều khiển cánh tay robot trong hai trường hợp với thông số trong Bảng 3 di chuyển theo quỹ đạo được mô tả theo hàm sau:



Hình 7. Sơ đồ khối hệ điều khiển cánh tay robot



a)



b)

Hình 8. Mô hình thực nghiệm

Ghi chú: a) hệ cánh tay robot và môi trường thực nghiệm và b) cơ cấu chấp hành có gắn cảm biến lực.

$$\mathbf{X}_d(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix}, \quad t \in [0, 120] \quad (19)$$

Trường hợp 1: Điều khiển robot di chuyển đến một điểm trên bề mặt môi trường:

$$\mathbf{X}_d(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 0 \leq t < 5 \\ \begin{bmatrix} -\frac{13}{50}(t-5)^3 + \frac{39}{10}(t-5)^2 + 370 \\ \frac{269}{500}(t-5)^3 - \frac{807}{100}(t-5)^2 + 504 \end{bmatrix} & 5 \leq t < 15 \\ \begin{bmatrix} 500 \\ \frac{3}{250}(t-15)^3 - \frac{9}{50}(t-15)^2 + 235 \end{bmatrix} & 15 \leq t < 25 \\ \begin{bmatrix} 500 \\ 229 \end{bmatrix} & 25 \leq t < 105 \\ \begin{bmatrix} \frac{13}{50}(t-105)^3 - \frac{39}{10}(t-105)^2 + 500 \\ -\frac{11}{20}(t-105)^3 + \frac{33}{4}(t-105)^2 + 229 \end{bmatrix} & 105 \leq t < 115 \\ \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 115 \leq t < 120 \end{cases} \quad (20)$$

$$\mathbf{X}_d(t) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 0 \leq t < 5 \\ \begin{bmatrix} -\frac{13}{50}(t-5)^3 + \frac{39}{10}(t-5)^2 + 370 \\ \frac{66}{125}(t-5)^3 - \frac{198}{25}(t-5)^2 + 504 \end{bmatrix} & 5 \leq t < 15 \\ \begin{bmatrix} 500 \\ \frac{11}{500}(t-15)^3 - \frac{33}{100}(t-15)^2 + 240 \end{bmatrix} & 15 \leq t < 25 \\ \begin{bmatrix} 500 \\ 229 \end{bmatrix} & 25 \leq t < 45 \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{2160}(t-45)^3 - \frac{1}{24}(t-45)^2 + 500 \\ 229 \end{bmatrix} & 45 \leq t < 105 \\ \begin{bmatrix} \frac{4}{25}(t-105)^3 - \frac{12}{5}(t-105)^2 + 450 \\ -\frac{11}{20}(t-105)^3 - \frac{33}{4}(t-105)^2 + 229 \end{bmatrix} & 105 \leq t < 115 \\ \begin{bmatrix} 370 \\ 504 \end{bmatrix} & 115 \leq t < 120 \end{cases} \quad (21)$$

Trường hợp 2: Điều khiển robot di chuyển theo đường thẳng trên bề mặt môi trường:

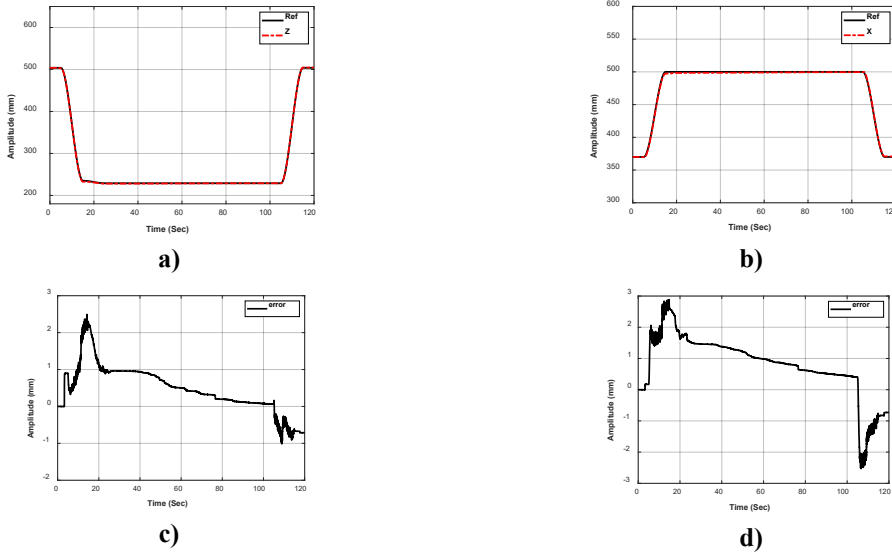
Bảng 3. Các thông số thực nghiệm

Thông số	Giá trị
Bộ điều khiển vị trí	$K_p = \text{diag}([50 \ 70 \ 50])$ $K_D = \text{diag}([0.5 \ 0.4 \ 0.4])$
Vị trí bề mặt môi trường theo phương Z	$X_0 = 230 \text{ mm}$
	$K_{PAF} = \text{diag}([0 \ 0 \ 0.003])$ $K_{IAF} = 0$
Bộ điều khiển lực	$M_m = \text{diag}([0 \ 0 \ 0.9])$ $B_d = \text{diag}([0 \ 0 \ 21])$ $K_d = \text{diag}([0 \ 0 \ 0.15])$

4.4. Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển vị trí

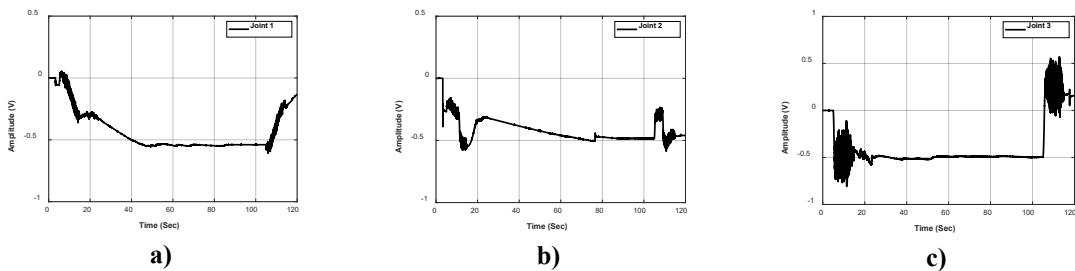
Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển vị trí trên mô hình thí nghiệm được thể hiện trong Hình 9, Hình

10, Hình 11 và Hình 12. Hình 9a, Hình 9b, Hình 11a và Hình 11b là tín hiệu đặt và đáp ứng vị trí của cơ cấu chấp hành theo phương Z và X, với đường màu đen là tín hiệu đặt và màu đỏ là tín hiệu đáp ứng, cùng với đồ thị thể hiện sai số điều khiển về vị trí Hình 9c, Hình 9d, Hình 11c và Hình 11d. Bên cạnh đó, Hình 10 và Hình 12 thể hiện tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển vị trí PID. Các kết quả cho thấy cánh tay robot trên mô hình thực nghiệm hoạt động đúng với các tín hiệu đặt về vị trí và góc khớp với sai số nhỏ.



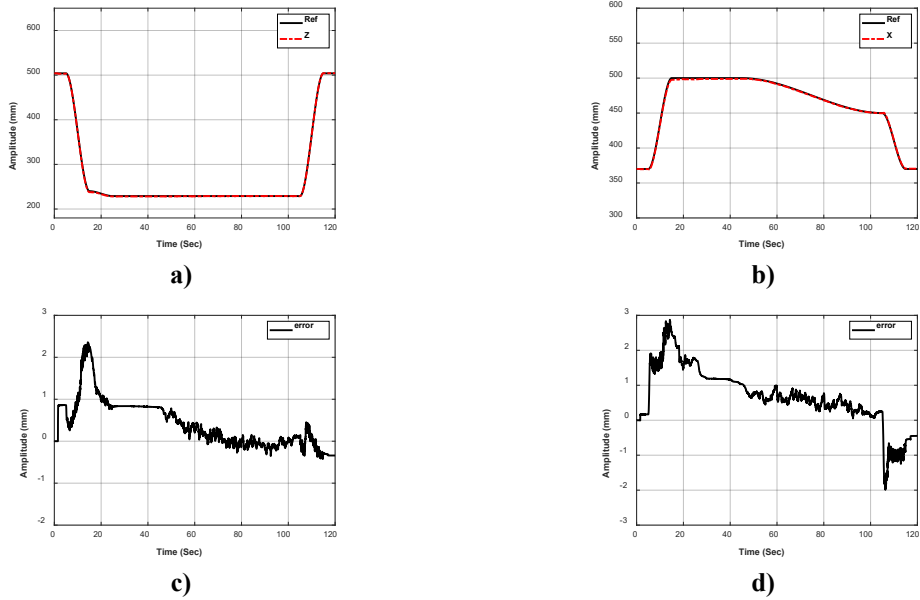
Hình 9. Đồ thị đáp ứng vị trí trường hợp 1

Ghi chú: a) Tín hiệu đặt và đáp ứng vị trí điểm đầu cuối của cánh tay robot theo phương Z. b) Tín hiệu đặt và đáp ứng điểm đầu cuối của cánh tay robot theo phương X. c) Sai số vị trí điểm đầu cuối theo phương z. d) Sai số vị trí điểm đầu cuối theo phương X



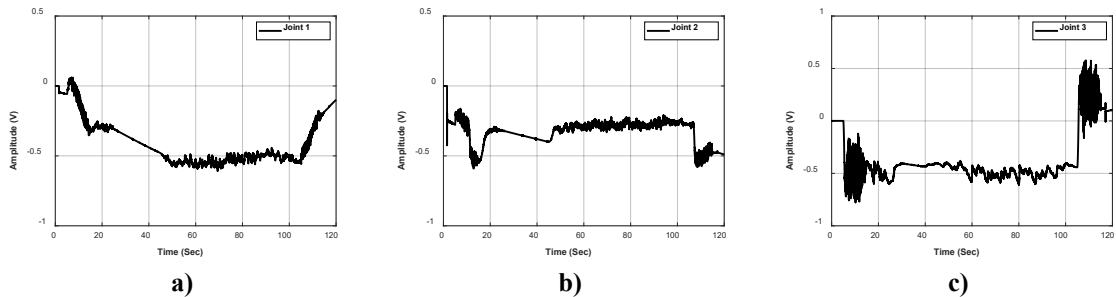
Hình 10. Tín hiệu ngõ ra. bộ điều khiển PID trường hợp 1

Ghi chú: a) khớp 1, b) khớp 2 và c) khớp 3.



Hình 11. Đồ thị đáp ứng vị trí trường hợp 2

Ghi chú: a) Tín hiệu đặt và đáp ứng vị trí điểm đầu cuối của cánh tay robot theo phương Z. b) Tín hiệu đặt và đáp ứng điểm đầu cuối của cánh tay robot theo phương X. c) Sai số vị trí điểm đầu cuối theo phương z. d) Sai số vị trí điểm đầu cuối theo phương X



Hình 12. Tín hiệu ngõ ra bộ điều khiển PID trường hợp 2

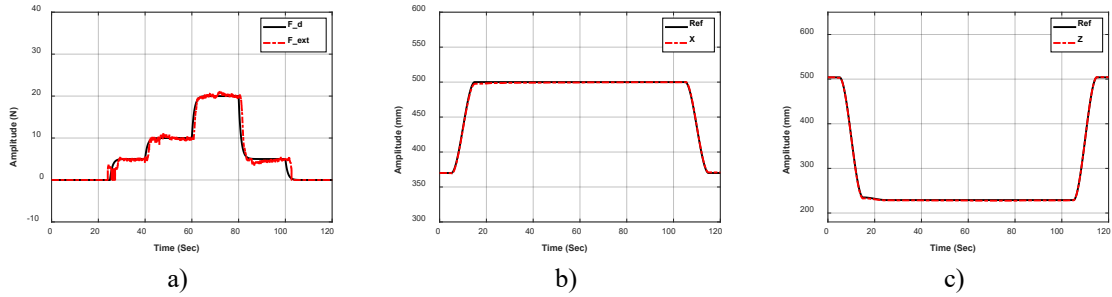
Ghi chú: a) khớp 1, b) khớp 2 và c) khớp 3.

4.5. Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển lực

Sau khi thực nghiệm kiểm chứng bộ điều khiển vị trí PID, việc triển khai bộ điều lực đã được tiến hành dựa trên mô hình trở kháng.

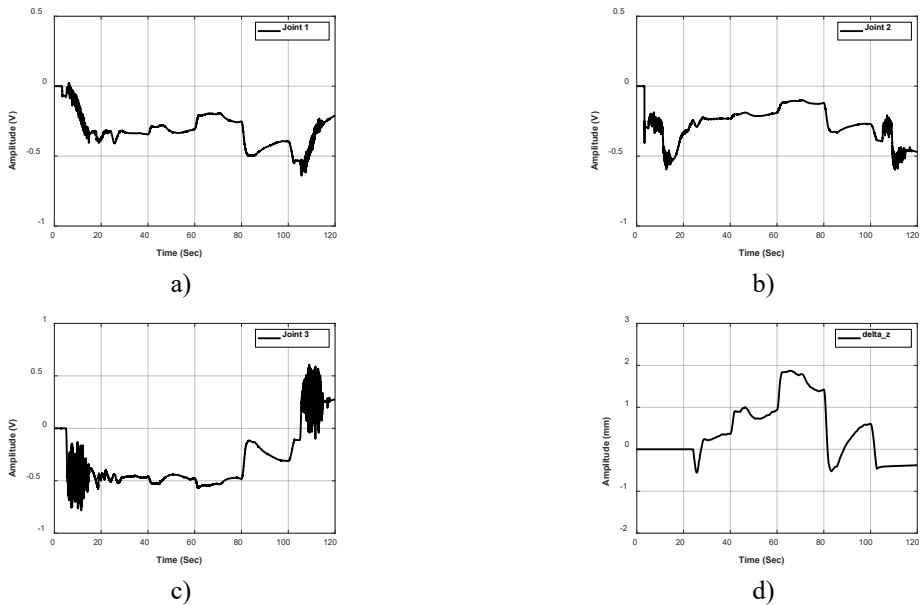
Hình 13a và Hình 15a thể hiện tín hiệu đặt và đáp ứng lực tiếp xúc giữa điểm đầu cuối robot và bề mặt môi trường với đường màu đen là tín hiệu lực đặt và đường màu đỏ là tín hiệu lực tiếp xúc theo phương Z. Hình 13b, Hình 13c, Hình 15b và Hình 15c thể hiện vị trí điểm đầu cuối của robot với đường màu đen là tín hiệu đặt, đường màu đỏ là vị trí đáp ứng của robot. Các Hình 14a, Hình 14b, Hình 14c, Hình 16a, Hình 16b và Hình 16c thể hiện tín hiệu

điều khiển các góc khớp, Hình 14d và Hình 16d là ngõ ra bộ điều khiển lực. Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi bộ điều khiển lực được kích hoạt, lực tiếp xúc của robot bám sát tín hiệu đặt thông qua việc điều chỉnh vị trí điểm đầu cuối và các tín hiệu điều khiển góc khớp so với trường hợp chỉ điều khiển vị trí. Hiệu suất bám lực được đánh giá định lượng bằng phương pháp RMSE giữa lực đặt và lực tiếp xúc thực tế tính bằng công thức (19), giá trị được trình bày trong Bảng 4 cho thấy khả năng duy trì lực tiếp xúc ổn định của hệ thống trong điều kiện tương tác với môi trường.



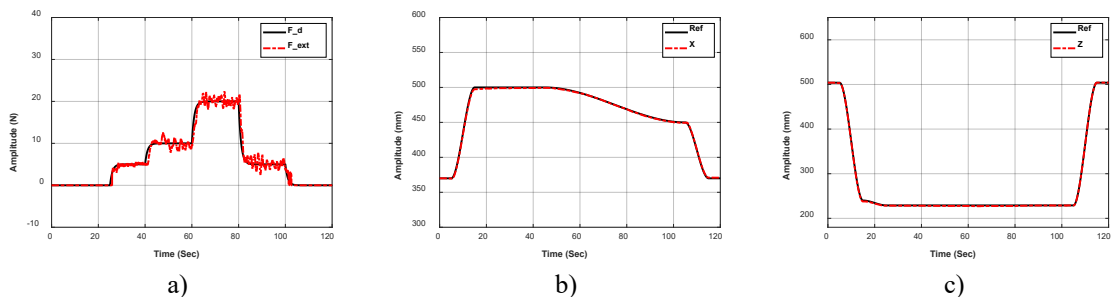
Hình 13. Kết quả thực nghiệm điều khiển lực trường hợp 1

Ghi chú: a) Tín hiệu đặt và đáp ứng lực điều khiển. b) Vị trí điểm đầu cuối cơ cấu chấp hành theo phương X. c) Vị trí cơ cấu chấp hành theo phương Z



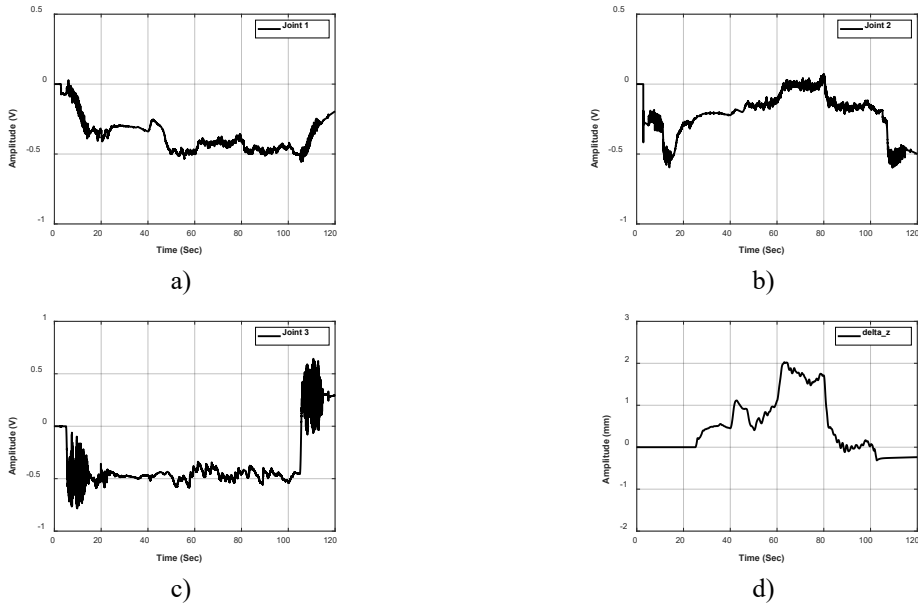
Hình 14. Ngõ ra bộ điều khiển PID và điều khiển lực trường hợp 1.

Ghi chú: a) Ngõ ra điều khiển góc khớp 1. b) Ngõ ra điều khiển góc khớp 2. c) Ngõ ra điều khiển góc khớp 3. d) Ngõ ra bộ điều khiển lực



Hình 15. Kết quả thực nghiệm điều khiển lực trường hợp 2

Ghi chú: a) Tín hiệu đặt và đáp ứng lực điều khiển. b) Vị trí điểm đầu cuối cơ cấu chấp hành theo phương X. c) Vị trí cơ cấu chấp hành theo phương Z



Hình 16. Ngõ ra bộ điều khiển PID và điều khiển lực trường hợp 2

Ghi chú: a) Ngõ ra điều khiển góc khớp 1. b) Ngõ ra điều khiển góc khớp 2. c) Ngõ ra điều khiển góc khớp 3. d) Ngõ ra bộ điều khiển lực

Bảng 4. So sánh RMSE của lực tiếp xúc trong mô phỏng và thực nghiệm

Trường hợp	Mô phỏng	Thực nghiệm
TH1	0,174	1.237N
TH2	0,238	1.052N

4.6. Thảo luận

Trong nghiên cứu này, một quy trình kiểm chứng thực nghiệm cho bài toán điều khiển lực tiếp xúc trên cánh tay robot đã được xây dựng, qua đó mở rộng các phương pháp điều khiển tương tác từ mô phỏng sang hệ thống phần cứng thực. Các công trình trong nước (Phan et al., 2019; Tuan & Hieu, 2019) khi được thực hiện đã tập trung vào các thuật toán phi tuyến phức tạp nhưng chưa được triển khai thực nghiệm, việc lựa chọn cấu trúc điều khiển trở kháng kinh điển đơn giản hơn so với các phương pháp hiện đại, với mục đích xây dựng nền tảng thực nghiệm và triển khai trên các hệ thống robot hiện có tại Việt Nam. Cấu trúc điều khiển kết hợp PID và mô hình trở kháng cho phép tách biệt bài toán bám quỹ đạo và điều chỉnh lực tương tác, giúp robot duy trì chuyển động ổn định trong không gian tự do và thích nghi linh hoạt khi tiếp xúc với môi trường, từ đó hạn chế va chạm cứng và dao động lực.

Kết quả mô phỏng cho thấy sai số bám lực nhỏ, với giá trị RMSE xấp xỉ 0,24 N, phản ánh khả năng bám lực chính xác trong điều kiện mô hình lý tưởng. Trong khi đó, kết quả thực nghiệm ghi nhận giá trị

RMSE tăng lên trên 1,0 N như kết quả được thể hiện trong Bảng 4. Sự chênh lệch này chủ yếu xuất phát từ các yếu tố thực tế chưa được mô hình hóa đầy đủ trong môi trường mô phỏng, bao gồm nhiễu và sai số hiệu chuẩn của cảm biến lực, sai lệch giữa mô hình động lực học và robot thực, các hiện tượng phi tuyến như ma sát khớp, độ rơ cơ khí và độ trễ của bộ điều khiển. Mặt khác, môi trường tương tác trong thực nghiệm, cụ thể là bề mặt PVC foam, có đặc tính phi tuyến và không đồng nhất, trong khi mô hình mô phỏng giả thiết môi trường đàn hồi tuyến tính với các tham số không đổi. Mặc dù sai số thực nghiệm lớn hơn so với mô phỏng, bộ điều khiển đề xuất vẫn đảm bảo tính ổn định và duy trì lực tiếp xúc trong giới hạn cho phép, cho thấy tính khả thi và tiềm năng ứng dụng trong các bài toán gia công bề mặt thực tế.

Ngoài ra, hiệu suất hệ thống cũng phụ thuộc đáng kể vào việc lựa chọn tham số điều khiển. Các tham số khối lượng ảo và giảm chấn trong mô hình trở kháng quyết định khả năng hấp thụ năng lượng va chạm, trong khi hệ số độ cứng được chọn thấp để tăng tính mềm dẻo. Bộ điều chỉnh lực sử dụng các thành phần tỷ lệ và tích phân nhằm đảm bảo tốc độ hội tụ và loại bỏ sai số xác lập, đồng thời loại bỏ thành phần vi phân để tránh khuếch đại nhiễu cảm biến. Do đặc tính môi trường khó mô hình hóa chính xác, các tham số được tinh chỉnh bằng phương pháp thử-sai có hệ thống, tuy nhiên việc sử dụng tham số

trở kháng cố định vẫn là một hạn chế cần được cải thiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, việc đề xuất và kiểm chứng mô phỏng và thực nghiệm phương pháp điều khiển lực tiếp xúc dựa trên mô hình trở kháng cho cánh tay robot ba bậc tự do đã được thực hiện. Cấu trúc điều khiển kết hợp giữa điều khiển vị trí PID và điều khiển lực trở kháng nhằm đảm bảo ổn định chuyển động và độ chính xác khi tương tác với môi trường. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng

điều khiển lực tiếp xúc với sai số lực tiếp xúc nhỏ, việc đánh giá định lượng được tiến hành bằng chỉ tiêu RMSE cho thấy sai số lực đạt khoảng dưới 1,25 N. Trong tương lai, nghiên cứu tiếp theo khi được thực hiện tập trung vào việc phát triển các chiến lược điều khiển trở kháng thích nghi, cho phép tự động điều chỉnh các tham số độ cứng và giảm chấn theo trạng thái tương tác, cũng như tích hợp các phương pháp điều khiển dự báo nhằm nâng cao hiệu suất trên các bề mặt có biên dạng và đặc tính cơ học phức tạp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chai, T., & Draxler, R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geoscientific Model Development Discussions*, 7, 1525. <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>
- Fu, J., Burzo, I., Iovene, E., Zhao, J., Ferrigno, G., & De Momi, E. (2024). Optimization-based variable impedance control of robotic manipulator for medical contact tasks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1-8. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3372209>
- Herbster, S., Behrens, R., & Elkmann, N. (2023). Modeling the Contact Force in Constrained Human-Robot Collisions. *Machines*, 11(10), 955. <https://doi.org/10.3390/machines11100955>
- Hogan, N. (1984). Impedance control: An approach to manipulation. 1984 American control conference. <https://doi.org/10.23919/ACC.1984.4788393>
- Hogan, N. (1985). Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 107(1), 8-16. <https://doi.org/10.1115/1.3140713>
- Jung, S., & Jeong, D.-J. (2021). Admittance force tracking control schemes for robot manipulators under uncertain environment and dynamics. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(11), 3753-3763. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0959-7>
- Lahr, G. J., Soares, J. V., Garcia, H. B., Siqueira, A. A., & Caurin, G. A. (2016). Understanding the implementation of impedance control in industrial robots. 2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR). <https://doi.org/10.1109/LARS-SBR.2016.52>
- Liu, C., He, Y., Chen, X., & Cao, H. (2022). Adaptive enhanced admittance force-tracking controller design for highly dynamic interactive tasks. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 49(5), 903-912. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2021-0222>
- Liu, J., Zhang, J., Li, J., Yang, S., Qiao, Z., Ju, C., & Zhao, X. (2023). Research on fuzzy impedance force control technology of robot-assisted abrasive cloth wheel polishing blade. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(5), 2537-2551. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11648-y>
- Mohsin, I., He, K., Li, Z., & Du, R. (2019). Path planning under force control in robotic polishing of the complex curved surfaces. *Applied Sciences*, 9(24), 5489. <https://doi.org/10.3390/app9245489>
- Mu, Y., Zou, L., Wang, Z., Li, J., Jiang, L., & Wang, W. (2025). A novel model predictive dynamic adaptive impedance control for robotic force tracking on complex surfaces. *Control Engineering Practice*, 163, 106398. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106398>
- Mukherjee, D., Gupta, K., Chang, L. H., & Najjaran, H. (2022). A survey of robot learning strategies for human-robot collaboration in industrial settings. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102231>
- Raibert, M. H., & Craig, J. J. (1981). Hybrid position/force control of manipulators. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 103(2), 126-133. <https://doi.org/10.1115/1.3139652>
- Robotics, I. F. o. (2024). *Record of 4 Million Robots in Factories Worldwide*. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>
- Sebastian, G., Li, Z., Crocher, V., Kremers, D., Tan, Y., & Oetomo, D. (2019). Interaction force estimation using extended state observers: An application to impedance-based assistive and rehabilitation robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 1156-1161. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2894908>

- Song, P., Yu, Y., & Zhang, X. (2017). Impedance control of robots: an overview. 2017 2nd international conference on cybernetics, robotics and control (CRC). <https://doi.org/10.1109/CRC.2017.20>
- Truong, H. V. A., Trinh, H. A., Tran, D. T., & Ahn, K. K. (2021). A robust observer for sensor faults estimation on n-DOF manipulator in constrained framework environment. *IEEE Access*, 9, 88439-88451. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087505>
- Wang, X., Li, C., Cai, D., & Cui, Y. (2025). Research on Adaptive Variable Impedance Control Method Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Sensors*, 25(10), 3055. <https://doi.org/10.3390/s25103055>
- Widanage, K. N., Parween, R., Godaba, H., Herzig, N., Glovnea, R., & Li, Y. (2025). *Force-Dependent Variable Impedance Controller for Contact-Rich Tasks Under Reference Trajectory Uncertainty*. *IEEE Control Systems Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2025.3597334>
- Yao, H., Pang, Y., Liu, X., & Qu, J. (2022). Experimental Study of the Dynamic and Static Compression Mechanical Properties of Closed-Cell PVC Foams. *Polymers*, 14(17), 3522. <https://doi.org/10.3390/polym14173522>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhou, Y., She, J., Liu, Z.-T., Xu, C., & Yang, Z. (2021). Implementation of impedance control for lower-limb rehabilitation robots. 2021 4th IEEE international Conference on industrial cyber-physical systems (ICPS). <https://doi.org/10.1109/ICPS49255.2021.9468210>