

ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL OF A 5-DOF MANIPULATOR ON A FIREFIGHTING ROBOT FOR DOOR-OPENING TASKS

Tran Quynh Trang^{1,2*}, Nguyen Pham Thuc Anh¹

¹Ha Noi University of Science and Technology

²Vietnam National University of Forestry

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 05/10/2025 Revised: 26/11/2025 Published: 26/11/2025	This study focuses on the development of a control system for a 5-DOF manipulator mounted on a firefighting robot to perform stair-door opening tasks in emergency situations. Based on kinematic and dynamic analysis, an adaptive sliding mode controller is designed using Lyapunov stability theory, enabling the estimation and compensation of model uncertainties as well as external disturbances. Simulation results show that the proposed controller achieves accurate trajectory tracking with small errors and asymptotic stability, even under parameter variations and external perturbations. Experimental tests with two types of doors (a household door and a fire-resistant door) demonstrate that the positioning error of the robotic hand remains within 5% of the workspace, ensuring successful grasping and turning of the door handle. The findings confirm the effectiveness and practical applicability of the developed adaptive sliding mode controller for the 5-DOF manipulator mounted on the firefighting robot.
KEYWORDS	
Adaptive sliding mode control	
Firefighting robot	
Door-opening task	
5-DOF manipulator	
Lyapunov stability	

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI TAY MÁY 5 BẬC TỰ DO LẮP TRÊN ROBOT CHỮA CHÁY TRONG NHIỆM VỤ MỞ CỬA

Trần Quỳnh Trang^{1,2*}, Nguyễn Phạm Thục Anh¹

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Lâm nghiệp Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 05/10/2025 Ngày hoàn thiện: 26/11/2025 Ngày đăng: 26/11/2025	Nghiên cứu này tập trung phát triển bộ điều khiển cho tay máy 5 bậc tự do (5-DOF) gắn trên robot chữa cháy nhằm thực hiện nhiệm vụ mở cửa cầu thang trong các tình huống khẩn cấp. Trên cơ sở phân tích động học và động lực học, bài báo đã thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov, cho phép ước lượng và bù trừ các bất định trong mô hình cũng như nhiễu từ môi trường. Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển trượt thích nghi đạt độ bám quỹ đạo chính xác, sai số nhỏ và ổn định tiệm cận ngay cả khi có sai lệch tham số và tác động ngoại lực. Thử nghiệm thực tế với hai loại cửa (cửa gia đình và cửa chống cháy) chứng minh sai lệch định vị bàn tay robot luôn dưới 5% phạm vi làm việc, đảm bảo khả năng nắm và xoay tay nắm cửa thành công. Kết quả nghiên cứu khẳng định tính hiệu quả và khả năng ứng dụng triển khai trong thực tế của bộ điều khiển trượt thích nghi được phát triển cho tay máy 5-DOF gắn trên robot chữa cháy.
TỪ KHÓA	
Điều khiển trượt thích nghi	
Robot chữa cháy	
Nhiệm vụ mở cửa	
Tay máy 5 bậc tự do	
Ổn định Lyapunov	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13750>

* Corresponding author. Email: phamnguyentramanh308@gmail.com

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh ứng dụng robot cứu hỏa, việc mở cửa cầu thang để tiếp cận đám cháy là một nhiệm vụ quan trọng nhưng đầy thách thức. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu đề xuất một mô hình tay máy 5 bậc tự do (R–R–P–R–R) gắn trên robot chữa cháy, cho phép xoay, vươn, nâng hạ và xoay cổ tay để thực hiện thao tác mở nhiều loại cửa khác nhau trong không gian hẹp. Cấu trúc tay máy đã được mô hình hóa chi tiết về động học và động lực học, làm cơ sở cho thiết kế bộ điều khiển.

Trong các nghiên cứu trước đây, nhiều phương pháp điều khiển đã được áp dụng cho robot và tay máy công nghiệp. Các phương pháp điều khiển tuyến tính như PID (Proportional–Integral–Derivative), PD, PI [1] - [4] có ưu điểm đơn giản, nhưng kém hiệu quả khi đối mặt với phi tuyến, nhiễu và sai lệch mô hình. Một số công trình đã mở rộng sang các kỹ thuật tối ưu như bộ điều khiển tuyến tính tối ưu (LQR - Linear Quadratic Regulator), điều khiển dự đoán mô hình (MPC - Model Predictive Control) [5] - [7], hoặc tích hợp điều khiển thông minh dựa trên AI/Neuro-fuzzy [4], [8] - [10], cho thấy hiệu quả nhất định trong điều kiện lý tưởng. Tuy nhiên, hầu hết vẫn phụ thuộc vào mô hình danh định và khó duy trì hiệu suất trong môi trường bất định.

Gần đây, các hướng nghiên cứu về điều khiển phi tuyến đã được quan tâm. Một số tác giả đề xuất Backstepping [2], [11], hoặc điều khiển chống nhiễu chủ động (ADRC - Active Disturbance Rejection Control) [12], [13], có khả năng bù nhiễu tốt nhưng yêu cầu tính toán phức tạp và nhiều giả định. Đặc biệt, điều khiển chế độ trượt (SMC - Sliding Mode Control) đã chứng minh hiệu quả trong xử lý hệ phi tuyến mạnh và chịu được nhiễu [14], [15]. Tuy nhiên, SMC truyền thống vẫn tồn tại nhược điểm: tín hiệu điều khiển phụ thuộc vào các tham số động lực học, dẫn đến suy giảm hiệu suất khi tải trọng hoặc mô hình thay đổi. Một số công trình đã bước đầu nghiên cứu SMC kết hợp với cơ chế thích nghi [10], cho phép ước lượng và cập nhật tham số bất định, từ đó nâng cao tính bền vững. Tuy vậy, phần lớn mới tập trung vào tay máy công nghiệp hoặc hệ robot song song, chưa có nhiều ứng dụng trực tiếp trong robot cứu hỏa với bài toán đặc thù là mở cửa cầu thang.

Dựa trên các khoảng trống nêu trên, nghiên cứu này đề xuất một cấu trúc điều khiển trượt thích nghi dành riêng cho tay máy mở cửa cầu thang 5 bậc tự do (5-DOF - Degree of Freedom) gắn trên robot chữa cháy. Đóng góp chính của công trình bao gồm:

- 1) Xây dựng phát triển mô hình toán học động học và động lực học của tay máy 5-DOF mở cửa cầu thang, xét đến đặc thù ứng dụng thực tế.
- 2) Thiết kế luật điều khiển trượt thích nghi dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov, cho phép ước lượng sai lệch mô hình và nhiễu ngoài, đồng thời đảm bảo tính ổn định tiệm cận.
- 3) Thực hiện mô phỏng để so sánh với điều khiển trượt truyền thống, chứng minh rằng cấu trúc đề xuất đạt độ chính xác bám quỹ đạo cao hơn, sai số nhỏ, và duy trì tính bền vững trong điều kiện tải thay đổi.

Nghiên cứu không chỉ nằm ở đề xuất cấu trúc bộ điều khiển trượt thích nghi (ASMC - Adaptive Sliding Mode Control), mà còn tiến tới triển khai thực nghiệm trực tiếp trên tay máy 5-DOF được gắn trên robot chữa cháy thật, với các bài kiểm tra mở cửa gỗ và cửa chống cháy trong điều kiện khẩn cấp. Quá trình thực nghiệm đã chứng minh tính hiệu quả của ASMC được thiết kế thông qua hoạt động ổn định và chính xác của hệ thống thực. Đây là bước tiến mới của nghiên cứu khi đã kết hợp giữa lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm.

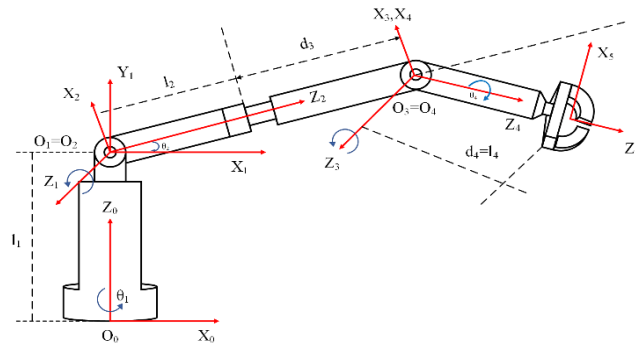
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình động học và động lực học

Động học thuận

Khi xem xét tới công năng của tay máy có chức năng mở cửa cầu thang, thiết kế cơ khí của tay máy cần phải được tính toán kỹ lưỡng để đảm bảo tính linh động thao tác mở được cánh cửa giúp robot tiến vào trong tiếp cận đám cháy. Từ kết cấu cơ khí được xác định, hệ trục tọa độ được

đặt tương xứng trên Hình 1, và bảng thông số D-H của tay máy mở cửa được nghiên cứu xác định trên Bảng 1.



Hình 1. Mô hình tay máy mở cửa cầu thang gắn trên robot

Bảng 1. Bảng thông số D-H tay máy mở cửa gắn trên robot chữa cháy

Khâu	a_i	α_i	θ_i	d_i	Khớp
1	0	90°	θ_1	l_1	Quay
2	0	90°	$\theta_2 + 90^\circ$	0	Quay
3	0	-90°	0	$l_2 + d_3$	Tịnh tiến
4	0	90°	θ_4	0	Quay
5	0	0	θ_5	d_4	Quay

Từ bảng thông số D-H của tay máy, nghiên cứu xác định phương trình động học thuận tay máy như sau:

$${}^0_5A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A {}^4_5A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Với: $n_x = s_1s_5 - c_1c_5s_{24}$; $n_y = -c_1s_5 - s_1c_5s_{24}$; $n_z = c_5c_{24}$; $o_x = s_1c_5 + c_1s_5s_{24}$; $o_y = -c_1c_5 + s_1s_5s_{24}$; $o_z = -s_5c_{24}$; $a_x = c_1c_{24}$; $a_y = s_1c_{24}$; $a_z = s_{24}$; $p_x = [d_4c_{24} + (l_2 + d_3)c_2]c_1$; $p_y = [d_4c_{24} + (l_2 + d_3)c_2]s_1$; $p_z = l_1 + (l_2 + d_4)s_2 + d_4s_{24}$. Ký hiệu: $s_i = \sin \theta_i$; $c_i = \cos \theta_i$; $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$; $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$

Động học ngược

Việc giải bài toán động học ngược có ý nghĩa quan trọng, khi camera của robot chữa cháy xác định được vị trí tay khóa của cánh cửa, hệ thống điều khiển sẽ sử dụng bài toán động học ngược để nội suy ra các biến khớp, xác định giá trị để điều khiển chuyển động cho các khớp. Từ đó điều khiển bàn tay máy robot từ vị trí ban đầu di chuyển tới vị trí tay nắm cửa để nắm và mở cửa để robot tiến vào tiếp cận đám cháy. Dựa vào phương trình động học thuận được trình bày tại công thức (1), nghiên cứu xác định được động học ngược của tay máy với kết quả như sau:

$$\theta_1 = a \tan 2(p_y, p_x) \quad (2) \quad \theta_2 = a \tan 2(v, u) \quad (3)$$

$$d_3 = \sqrt{R_r^2 + Z_z^2} - l_2 \quad (4) \quad \theta_4 = a \tan 2(s_{24}, c_{24}) - \theta_2 \quad (5)$$

$$\theta_5 = a \tan 2(-o_z, n_z) \quad (6) \quad \text{với } R_r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - d_4c_{24}; Z_z = p_z - l_1 - d_4s_{24}; c_{24} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}; s_{24} = a_z$$

Động lực học

Do tay máy mở cửa cầu thang gắn trên robot được thiết kế và chế tạo trong thực tế có kết cấu phức tạp. Để thuận tiện cho việc xây dựng phương trình động lực học tay máy, nghiên cứu giả thiết hình dáng thanh là đồng nhất, khối lượng được phân bố dọc theo chiều dài các thanh, do vậy trọng tâm nằm ở giữa thanh.

Để xây dựng phương trình động lực học cho tay máy, nghiên cứu sử dụng phương pháp Euler-Lagrange [1] với phương trình động lực học tổng quát như sau:

$$M_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (7) \quad \text{với } L = \sum_{i=1}^5 K_i - \sum_{i=1}^5 P_i \quad (8)$$

Trong đó L là hàm năng lượng Lagrange, $\sum_{i=1}^5 K_i$ là động năng hệ thống, $\sum_{i=1}^5 P_i$ là tổng thế năng hệ thống với $K_i = 0,5m_i v_i^2 + 0,5I_i \omega_i^2$, $P_i = -m_i g^T h_{ci}$. Trong đó, m_i là khối lượng của khớp nối i , v_i là vận tốc dài thanh nối i , ω_i là vận tốc góc của thanh nối i , g^T là gia tốc trọng trường, h_{ci} là tọa độ vị trí tâm của thanh nối i , l_i là chiều dài các thanh nối (Hình 2). Triển khai tới từng thanh nối tay máy để tính tổng động năng, tổng thế năng và thay vào hàm Lagrange trong công thức (8), sau đó thay (8) và (7) để tính toán. Nghiên cứu xây dựng được mô hình động lực học của tay máy như sau:

$$M = H_0(q)\ddot{q} + V_0(q, \dot{q}) + G_0(q) \quad (9)$$

Với $M = [M_1 \ M_2 \ F_3 \ M_4 \ M_5]^T$ là mô men đặt lên khớp; $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ d_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$ là ma trận biến khớp; $\dot{q} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{d}_3 \ \dot{\theta}_4 \ \dot{\theta}_5]^T$ là ma trận vận tốc; $\ddot{q} = [\ddot{\theta}_1 \ \ddot{\theta}_2 \ \ddot{d}_3 \ \ddot{\theta}_4 \ \ddot{\theta}_5]^T$ là ma trận gia tốc của biến khớp. $H_0(q) = [H_{11} \dots H_{15} \ ; \dots; \ H_{51} \dots H_{55}]$ là ma trận vuông 5×5 đặc trưng cho mô men quán tính; $V_0(q, \dot{q}) = [V_{11} \ V_{12} \ V_{13} \ V_{14} \ V_{15}]^T$ là thành phần tương hỗ và ly tâm; $G_0(q) = [G_1 \ G_2 \ G_3 \ G_4 \ G_5]^T$ là thành phần đặc trưng cho tác động của trọng trường.

Phương trình động lực học (9) chỉ là phương trình danh định của tay máy mở cửa cầu thang dựa trên các giả định lý tưởng. Do vậy, mô hình thực tế của robot được thể hiện trong (10) là:

$$M = H(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + \tau(t) \quad (10)$$

Với $\Delta H = H - H_0$; $\Delta V = V - V_0$; $\Delta G = G - G_0$ là sai lệch giữa mô hình thực tế và mô hình danh định (lý tưởng) và $\tau(t) = [\tau_1(t) \ \tau_2(t) \ \tau_3(t) \ \tau_4(t) \ \tau_5(t)]^T$ là thành phần nhiễu do tải tác động lên các khớp khi lắp các loại bàn tay khác nhau để mở được nhiều loại cửa.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

Thiết kế bộ điều khiển trượt

Luật điều khiển trượt được thiết kế dựa vào thông tin đã biết từ mô hình danh định (9) như sau:

Định nghĩa mặt trượt:

$$S = \dot{e} + ce; \ c = \text{diag}(c_1, \dots, c_5), \ c_i > 0 \quad (11)$$

Sử dụng hàm Lyapunov có dạng:

Đạo hàm theo thời gian:

$$V = 0,5S^T HS \quad (12) \quad \dot{V} = 0,5S^T \dot{H}S + S^T \dot{H}\dot{S} \quad (13)$$

Do $M(q); \dot{M}(q) - 2H(q, \dot{q})$ là các ma trận đối xứng dương, thay (10) vào ta được:

$$\dot{V} = S^T [V(\dot{q}_d + ce) + H(\ddot{q}_d + c\dot{e}) + Kq + \tau - M] \quad (14)$$

Với $G(q) = Kq$, luật điều khiển trượt được chọn:

$$M = H_0(\ddot{q}_d + c\dot{e}) + V_0(\dot{q}_d + ce) + K_0 q + \Gamma \text{sgn}(S) \quad (15)$$

Với $G_0(q) = K_0 q$, và sai số giữa mô hình danh định và mô hình thực tế là $\Delta H = H - H_0$, $\Delta V = V - V_0$, $\Delta K = K - K_0$ và $\Gamma \text{sgn}(s)$ là thành phần điều khiển trượt có tác dụng bù sai lệch mô hình và nhiễu.

$$\text{Thay (15) vào (14) ta được: } \dot{V} = S^T [\Delta V(\dot{q}_d + ce) + \Delta H(\ddot{q}_d + c\dot{e}) + \Delta Kq] - \Gamma |S| \quad (16)$$

Trong đó, $\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1, \dots, \Gamma_5)$, $\Gamma_i > 0$. Từ (17) ta thấy nếu chọn được:

$$\Gamma_i > |\Delta V|_{\max} |\dot{q}_d + ce| + |\Delta H|_{\max} |\ddot{q}_d + c\dot{e}| - |\tau|_{\max} + |\Delta K|_{\max} |q| \quad (17)$$

Với $|\cdot|$ là chuẩn vector, thì: $\dot{V} \leq 0$ (18)

$\dot{V} = 0$ khi $S = 0$, hệ thống ổn định tiệm cận.

Hệ thống sẽ ổn định tiệm cận với luật điều khiển trượt (16) với điều kiện phải xác định được thỏa mãn (17). Tuy nhiên trong thực tế việc này là khó thực hiện, đối với tay máy mở cửa cầu thang lại càng khó thực hiện hơn do tính chất phức tạp của hệ thống cơ khí, khó khả thi để xác định được mô hình động lực học thực tế (10). Do vậy cần phải có phương pháp để ước lượng mà không cần phải xác định chính xác mô hình thực tế (10).

Thiết kế luật điều khiển trượt thích nghi

Từ những lập luận ở trên, nghiên cứu đề xuất luật điều khiển trượt - thích nghi như sau:

$$M = H_0(\ddot{q}_d + c\dot{e}) + V_0(\dot{q}_d + ce) + K_0q + \hat{\Gamma} \text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (19)$$

Với $\phi = \text{diag}(\phi_i) > 0$ và

Luật thích nghi được thể hiện trong (21):

$$\text{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) = \begin{cases} \frac{S}{\phi} & ; |S| \leq \phi \\ \text{sgn}(S) & ; |S| > \phi \end{cases} \quad (20) \quad \dot{\hat{\Gamma}}_i = \begin{cases} -\delta_i \hat{\Gamma}_i & ; \xi_i \leq \rho_i \\ k_{\Gamma_i}(\xi_i - \rho_i) - \delta_i \hat{\Gamma}_i & ; \xi_i > \rho_i \end{cases} \quad (21)$$

Với $\xi_i = |\dot{e}_i - c_i e_i|$ và $\delta_i > 0$. Trong trường hợp tay máy robot mở cửa cầu thang khó xác định được biên của Γ_i trong công thức (16) thì tại thời điểm ban đầu ta chọn $\hat{\Gamma}_i(0) = 0$.

Chúng minh tính ổn định của luật điều khiển dựa trên định lý Lyapunov với việc chọn hàm Lyapunov dương V như sau:

$$V = \frac{1}{2} S^T H S + \sum_{i=1}^5 \frac{(\tilde{\Gamma}_i)^2}{2k_{\Gamma_i}} \quad (22)$$

Với $\tilde{\Gamma}_i = \hat{\Gamma}_i - \Gamma_i$ là sai lệch giữa giá trị ước lượng $\hat{\Gamma}_i$ và giá trị thực Γ_i .

Đạo hàm hai vế của (21) và thay luật điều khiển (19) vào ta biến đổi được:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^5 \frac{1}{\Phi_i} |S_i| (\hat{\Gamma}_i - \Gamma_i) - \sum_{i=1}^5 \delta_i \frac{(\tilde{\Gamma}_i)^2}{2k_{\Gamma_i}} \leq 0 \quad (23)$$

Hệ thống ổn định tiệm cận $\dot{V} = 0$ khi $S = 0$ và $\tilde{\Gamma} = 0$.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô phỏng

Để tiến hành mô phỏng thông qua phần mềm Matlab, thông số của tay máy mở cửa cầu thang gắn trên robot chữa cháy được chế tạo thể hiện trên Bảng 2.

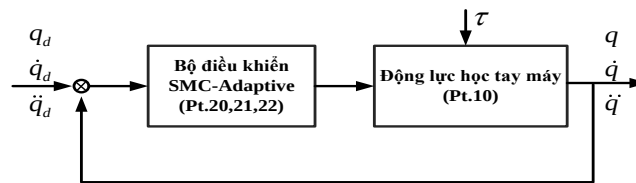
Bảng 2. Bảng thông số tay máy mở cửa được chế tạo

$m_1 = 5(kg)$	$m_2 = 2,4(kg)$	$m_3 = 1,8(kg)$	$m_4 = 1,2(kg)$	$m_5 = 0,7(kg)$
$l_1 = 0,5(m)$	$l_2 = 1(m)$	$d_{3\max} = 0,8(m)$	$l_4 = d_4 = 0,5(m)$	$l_5 = 0,2(m)$

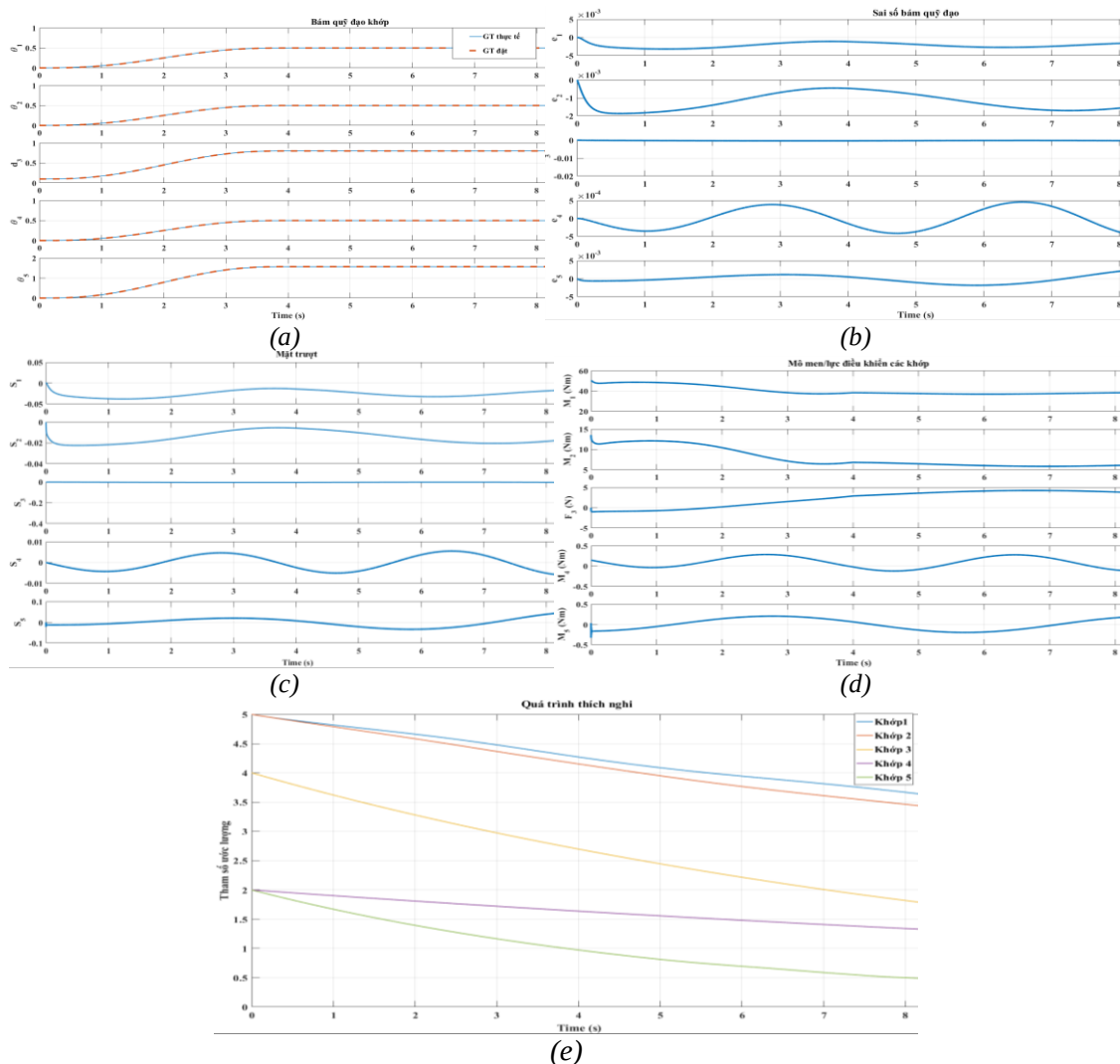
Với mô hình danh định, giả sử trọng tâm thanh nằm tại giữa thanh, ta tính được giá trị momen quán tính các khớp là $I_1 = 0,418(kg/m^2)$, $I_2 = 0,8(kg/m^2)$, $I_4 = 0,1(kg/m^2)$, $I_5 = 0,009(kg/m^2)$. Dựa vào các thông số trên Bảng 2, xác định được các giá trị của mô hình danh định là H_0 , V_0 , và G_0 theo (9).

Để tiến hành quá trình mô phỏng, ta giả sử mô hình thực tế của tay máy mở cửa cầu thang tại phương trình (10) có giá trị là $H = 1,1H_0$; $V = 1,1V_0$; và $G = 1,1G_0$ tức sai lệch 10%, và đề đặc trưng cho tác động của bàn tay máy lên các khớp, nghiên cứu đưa vào mô hình mô phỏng một nhiễu ngoài có giá trị $\tau(t) = [5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5]^T$.

Giả sử để đưa bàn tay mở khóa cửa từ vị trí ban đầu tới vị trí tay nắm cửa, hay các giá trị biến khớp từ vị trí đầu $q(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ phải di chuyển tới vị trí $q = [0,5 \ 0,5 \ 0,8 \ 0,5 \ \pi/2]^T$. Tương ứng giá trị đặt đầu vào là $q_d = [0,5 \ 0,5 \ 0,8 \ 0,5 \ \pi/2]^T$. Các tham số của bộ điều khiển trượt thích nghi được lấy gồm: $c = \text{diag}[10, 10, 10, 10, 10]$, $\phi = [0,05; 0,05; 0,05; 0,05; 0,05]$, $k_{r_i} = [3; 3; 3; 3; 3]$, $\hat{\Gamma}_0 = [0; 0; 0; 0; 0]$, $\rho_i = [0,01; 0,01; 0,01; 0,01; 0,01]$, $\delta_i = [0,05; 0,05; 0,05; 0,05; 0,05]$.



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống mô phỏng



Hình 3. Kết quả mô phỏng: (a) kết quả quỹ đạo các khớp, (b) kết quả sai số quỹ đạo các khớp, (c) kết quả mặt trượt S , (d) mô men/lực điều khiển khớp, (e) tham số ước lượng của bộ điều khiển thích nghi

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 3. Từ kết quả mô phỏng nghiên cứu có thể thấy rằng bộ điều khiển trượt thích nghi đề xuất đã đảm bảo khả năng bám quỹ đạo chính xác cho tay máy 5-DOF mở cửa cầu thang gắn trên robot chữa cháy trong điều kiện có sai lệch mô hình và

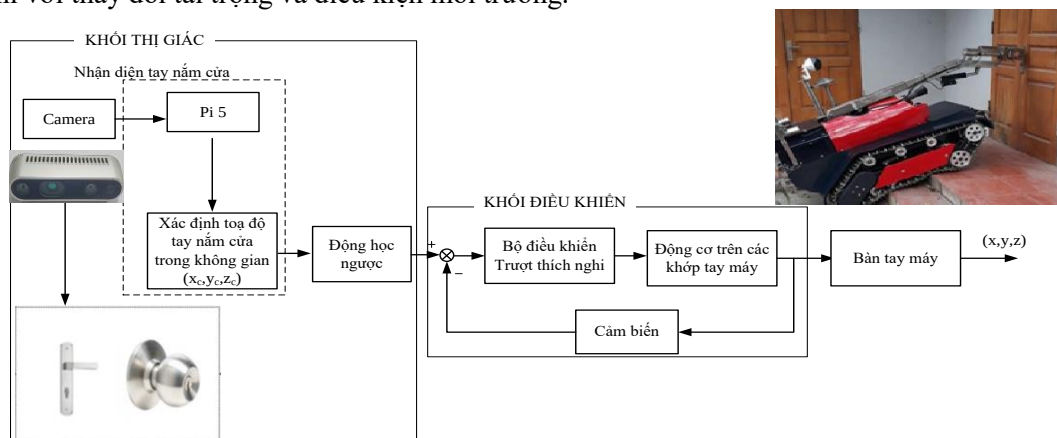
nhiều ngoài do lắp bàn tay máy gây ra. Các quỹ đạo thực tế gần như trùng khớp với quỹ đạo đặt, sai số bám nhỏ (cỡ 10^{-3}) và nhanh chóng hội tụ về gần 0. Điều này khẳng định tính ổn định tiệm cận và phù hợp với phân tích Lyapunov. Các mặt trượt của từng khớp tiến nhanh về gốc tọa độ và dao động nhỏ quanh 0, cho thấy hệ thống đã đạt chế độ trượt ổn định. Các tham số ước lượng thay đổi trong phạm vi cho phép và nhanh chóng hội tụ về giá trị ổn định, chứng tỏ cơ chế thích nghi hoạt động hiệu quả, tự động bù trừ các bất định động lực học.

Từ các kết quả trên có thể xác nhận bộ điều khiển trượt thích nghi không chỉ đạt độ chính xác cao trong bám quỹ đạo mà còn đảm bảo tính bền vững và khả năng ứng dụng thực tế cho tay máy mở cửa cầu thang trong môi trường có nhiều bất định và nhiễu loạn.

3.2. Kết quả thực nghiệm

Quá trình thực nghiệm được tiến hành trên cửa gỗ gia đình và cửa chống cháy được sử dụng tại nhà chung cư. Để kiểm tra khả năng điều khiển tay máy của bộ điều khiển trượt thích nghi được thiết kế, nghiên cứu sẽ tiến hành thực nghiệm với quá trình tay máy 5-DOF tiến từ vị trí gốc đến vị trí tay nắm cửa để nắm được đúng tay nắm cửa vì đây là quá trình quan trọng nhất, nó quyết định tới việc có mở được cửa hay không. Để có thể thực hiện, toàn bộ hệ thống phần cứng tay máy được thể hiện tóm tắt trên Hình 4.

Kết quả thí nghiệm thể hiện trên Bảng 3 cho thấy sai lệch vị trí giữa tâm bàn tay robot 5-DOF và tâm tay nắm cửa trên ba trục X, Y, Z. Các sai số đo được dao động từ 2,7 mm đến 4,8 mm, tương ứng với tỷ lệ nhỏ hơn 5% so với kích thước làm việc của bàn tay robot (80 mm, 150 mm và 100 mm theo các trục X, Y, Z). Các kết quả thực nghiệm khẳng định hiệu quả và tính tin cậy của hệ tay máy 5-DOF trong đó có bộ điều khiển trượt thích nghi bài báo thiết kế trong ứng dụng mở cửa thực tế, nó không chỉ đảm bảo tính chính xác cao trong bám quỹ đạo mà còn tự động thích nghi với thay đổi tải trọng và điều kiện môi trường.



Hình 4. Cấu trúc hệ thống điều khiển tay máy 5-DOF gắn trên robot chữa cháy

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm được thực hiện với hai loại cửa, thể hiện sai lệch giữa tâm bàn tay và tâm tay nắm cửa tính theo các trục tọa độ X, Y, Z (mm)

Lần TH	Loại cửa	Sai lệch			Lần TH	Loại cửa	Sai lệch		
		X	Y	Z			X	Y	Z
1	Cửa gia đình	3,9	3,4	3,8	6	Cửa chống cháy	4,2	4,2	4,2
2	Cửa gia đình	3,2	3,8	3,9	7	Cửa chống cháy	3,1	3,0	3,3
3	Cửa gia đình	4,1	4,1	3,7	8	Cửa chống cháy	4,8	4,8	4,5
4	Cửa gia đình	3,5	3,2	3,5	9	Cửa chống cháy	3,6	3,6	3,9
5	Cửa gia đình	2,7	3,5	3,6	10	Cửa chống cháy	4,5	4,4	4,1

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một giải pháp điều khiển trượt thích nghi cho tay máy 5-DOF gắn trên robot chữa cháy nhằm thực hiện nhiệm vụ mở cửa cầu thang trong điều kiện thực tế. Trên cơ sở mô hình động học, động lực học và luật điều khiển được thiết kế, các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã chứng minh rằng bộ điều khiển đề xuất không chỉ đạt độ chính xác cao trong bám quỹ đạo mà còn đảm bảo tính bền vững trước sai lệch mô hình và nhiễu ngoài. Thử nghiệm với các loại cửa khác nhau cho thấy hệ thống có thể hoạt động ổn định, duy trì sai số nhỏ và đáng tin cậy. Quá trình mở cửa được thực hiện thành công cho cả hai loại cửa gỗ và cửa chống cháy. Nghiên cứu này đóng góp một bước tiến quan trọng trong việc phát triển giải pháp điều khiển bền vững cho robot làm việc trong môi trường cứu hộ – cứu nạn, góp phần nâng cao mức độ tự động hóa và an toàn trong các hoạt động ứng phó khẩn cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. W. Marzouk, A. Elbaset, and A. I. A. Galal, "Modelling, Analysis and Simulation for A 6 Axis Arm Robot by PID Controller," *IJMPERD*, vol. 9, no. 4, pp. 363–376, 2019,
- [2] T. M. N. Nguyen and X. B. Dang, "A neural flexible PID controller for task-space control of robotic manipulators," *Front. Robot. AI*, vol. 9, Jan. 2023, Art. no. 975850.
- [3] R. Fellag, T. Benyahia, M. Drias, M. Guiatni, and M. Hamerlain, "Sliding mode control of a 5 dofs upper limb exoskeleton robot," in *2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)*, Boumerdes: IEEE, Oct. 2017, pp. 1–6.
- [4] X. Cheng, Y. Zhang, H. Liu, D. Wollherr, and M. Buss, "Adaptive neural backstepping control for flexible-joint robot manipulator with bounded torque inputs," *Neurocomputing*, vol. 458, pp. 70–86, Oct. 2021.
- [5] Y. Zhao, M. Wu, J. Mei, W. Zhao, and Y. Jin, "Sliding mode control with self-adaptive parameters of a 5-DOF hybrid robot," *Science Progress*, vol. 107, no. 4, pp. 1–21, Oct. 2024,
- [6] P. Yang, X. Ma, J. Wang, G. Zhang, Y. Zhang, and L. Chen, "Disturbance Observer-Based Terminal Sliding Mode Control of a 5-DOF Upper-Limb Exoskeleton Robot," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62833–62839, 2019.
- [7] W. K. Alqaisi, M. Soliman, A. Badawi, I. M. Elzein, and C. Z. El-Bayeh, "Four DOF Robot Manipulator Control Using Feedback Linearization Based on Sliding Mode Control," *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 781–793, Feb. 2025,
- [8] Y. Wang, L. Wang, and Y. Zhao, "Research on Door Opening Operation of Mobile Robotic Arm Based on Reinforcement Learning," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 10, pp. 1–19, May 2022,
- [9] H. Peralta-Caprachin, R. Angeles-Orahulio, and E. Paiva-Peredo, "Design and Position Control of a Robot with 5 Degrees of Freedom," *IJMERR*, vol. 13, no. 2, pp. 241–248, 2024,
- [10] Z. Gan, G. Huang, J. Zhang, X. Liu, and C. Shan, "The Control System and Application Based on ROS Elevating Fire-Fighting Robot," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2029, no. 1, pp. 1–12, Sept. 2021.
- [11] A. A. Mohammed and M. Sunar, "Kinematics modeling of a 4-DOF robotic arm," in *2015 International Conference on Control, Automation and Robotics*, Singapore: IEEE, May 2015, pp. 87–91.
- [12] L. Bao, D. Kim, S.-J. Yi, and J. Lee, "Design of a Sliding Mode Controller with Fuzzy Rules for a 4-DoF Service Robot," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 19, no. 8, pp. 2869–2881, Aug. 2021,
- [13] M. Crenganis, A. Barsan, M. Tera, and A. Chicea, "Dynamic analysis of a five degree of freedom robotic arm using MATLAB-Simulink Simscape," *MATEC Web Conf.*, vol. 343, pp. 1–11, 2021,
- [14] H. Z. Ting, M. H. M. Zaman, M. F. Ibrahim, and A. M. Moubark, "Kinematic Analysis for Trajectory Planning of Open-Source 4-DoF Robot Arm," *IJACSA*, vol. 12, no. 6, pp. 760–777, 2021.
- [15] J. Baek, M. Jin, and S. Han, "A New Adaptive Sliding-Mode Control Scheme for Application to Robot Manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3628–3637, June 2016.