

VỀ MỘT PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ROBOT SCARA SỬ DỤNG KẾT HỢP LOGIC MỜ VÀ THÍCH NGHI LEE-SLOTINE

ON A SCARA ROBOT CONTROL METHOD USING A COMBINATION OF FUZZY LOGIC AND ADAPTIVE CONTROL LEE-SLOTINE

Vũ Duy Thuận^{1,*}, Nguyễn Anh Hoa¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.160>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một cấu trúc điều khiển lai cho robot SCARA 4 bậc tự do dựa trên sự kết hợp giữa luật thích nghi Lee-Slotine và bộ bù logic mờ. Trong cấu trúc đề xuất, luật Lee-Slotine được sử dụng như thành phần điều khiển chính để khai thác mô hình động lực học tuyến tính theo tham số của robot, thực hiện bù động lực học danh định và cập nhật các tham số chưa biết theo tiêu chuẩn Lyapunov. Trên nền đó, bộ logic mờ được thiết kế như một bộ bù phần dư, có nhiệm vụ xấp xỉ và bù các bất định phi cấu trúc còn lại như ma sát phi tuyến, tải thay đổi và nhiễu ngoài mà khối thích nghi tham số chưa xử lý hết. Với cách phân chia như vậy, luật điều khiển lai vừa giữ được tính chặt chẽ về mặt ổn định của Lee-Slotine, vừa nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo và tính bền vững trước sự biến thiên của tải. Kết quả mô phỏng với các quỹ đạo khác nhau cho thấy bộ điều khiển đề xuất cải thiện sai số bám, đặc biệt trong các tình huống có thay đổi tải và bất định.

Từ khóa: Robot Scara, Lee-Slotine, logic mờ.

ABSTRACT

This paper presents a hybrid control structure for a 4-DOF SCARA robot based on a combination of the Lee-Slotine adaptive law and a fuzzy residual compensator. In the proposed architecture, the Lee-Slotine controller serves as the main model-based component to compensate the nominal robot dynamics and update the unknown structured parameters according to Lyapunov theory. On that basis, the fuzzy logic block is not introduced as a general heuristic tuning mechanism, but as a residual compensator used to approximate and suppress the remaining unstructured uncertainties, such as nonlinear friction, payload variations, and external disturbances that are not completely handled by the structured adaptive part. With this unified interpretation, the hybrid controller preserves the theoretical rigor of the Lee-Slotine framework while improving trajectory-tracking accuracy and robustness under varying operating conditions.

Keywords: Robot Scara, Lee-Slotine, Fuzzy Logic.

¹Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực

*Email: thuanvd@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/02/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Trong nhiều hệ thống sản xuất dây chuyền hiện đại, tay máy robot SCARA là một loại robot được sử dụng rất rộng rãi vì có cấu trúc đơn giản, chắc chắn theo phương thẳng đứng, có khả năng mềm dẻo linh hoạt, chọn lọc trong mặt phẳng làm việc. Robot SCARA có cấu trúc cơ khí gọn gàng, số bậc tự do không lớn (thường là 3-4 bậc tự do) nhưng bài toán điều khiển tay máy robot SCARA lại

không đơn giản. Lý do là động lực học của tay máy có tính phi tuyến mạnh, các khâu liên kết với nhau tạo ra tương tác, đồng thời các tham số như khối lượng, mô men quán tính, ma sát khớp, tải gắn ở tay cầm... thường không có giá trị chính xác hoặc biến đổi theo thời gian nên nếu sử dụng những luật điều khiển đơn giản tuyến tính như PID với tham số cố định thường không đảm bảo đồng thời yêu cầu về bám quỹ đạo chính xác, đáp ứng nhanh, bền vững trước nhiễu và thay đổi tải.

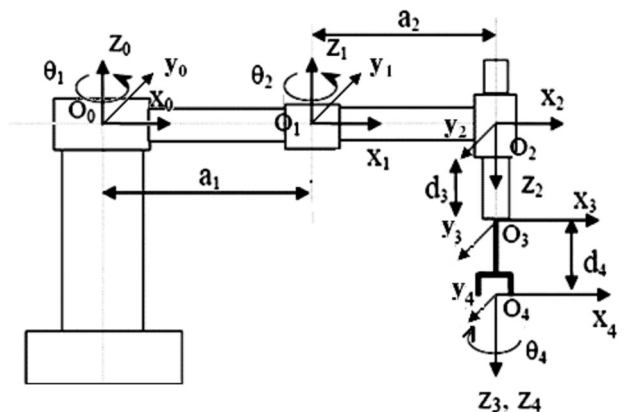
Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot SCARA và robot công nghiệp trong điều kiện có bất định. Zhen và cộng sự [5] đề xuất điều khiển bám ràng buộc robust cho robot SCARA với bất định động lực học dựa trên công thức Udwadia-Kalaba và đã kiểm chứng thực nghiệm, song cấu trúc vẫn thuần robust, chưa có thành phần mờ hay thích nghi kiểu Lee-Slotine. Mai Ngọc Anh [1] xây dựng mô hình và mô phỏng điều khiển mờ phối hợp giữa bám quỹ đạo và tránh vật cản cho robot SCARA kiểu RRP, nhưng chủ yếu ở mức hành vi và động học, không dùng khung thích nghi Lyapunov cho động lực học đầy đủ. Trần Anh Dũng và cộng sự [2] thiết kế bộ điều khiển mờ Mamdani cho điều khiển vị trí robot SCARA 2 bậc tự do, cho kết quả đáp ứng tốt nhưng vẫn là điều khiển mờ thuần, chưa kết hợp với luật thích nghi dựa trên mô hình. Ở hướng điều khiển robot nói chung, Yin và cộng sự [15] đề xuất điều khiển bám quỹ đạo dạng thích nghi mờ trượt cho robot nối tiếp nhiều bậc tự do, còn Zhang và cộng sự [14] phát triển bộ điều khiển trượt kết hợp mờ type-2 thích nghi cho tay máy phi tuyến, đều dùng điều khiển mờ như bộ xấp xỉ bất định trên nền trượt. Xu và He [12] tiếp tục mở rộng theo hướng điều khiển mờ thích nghi cho robot với tham số chưa biết và lỗi chấp hành... Tuy nhiên, trong các công trình gần đây, hầu như chưa có nghiên cứu nào xây dựng và phân tích một cấu trúc điều khiển lai Lee-Slotine kết hợp điều khiển mờ cho robot SCARA 4 bậc tự do, có xét tới tính bất định động lực và tải thay đổi, đồng thời chứng minh ổn định Lyapunov cho cả phần tham số động lực và tham số mờ.

Đặc điểm của luật Lee-Slotine áp dụng cho robot SCARA là khai thác trực tiếp cấu trúc tuyến tính theo tham số của mô hình động lực học để bù các thành phần quán tính, Coriolis - ly tâm và trọng lực, đồng thời cập nhật các tham số chưa biết theo tiêu chuẩn Lyapunov. Tuy nhiên, trong thực tế vận hành vẫn còn tồn tại một lớp bất định khác không dễ biểu diễn dưới dạng tuyến tính theo tham số, chẳng hạn như ma sát phi tuyến, độ rơ cơ khí, tải thay đổi, sai số chưa mô hình hóa đầy đủ và nhiễu ngoài.

Vì vậy, trong bài báo này, cấu trúc điều khiển được xây dựng theo nguyên tắc phân vai rõ ràng và thống nhất: luật Lee-Slotine giữ vai trò là bộ điều khiển chính để xử lý phần động lực học có cấu trúc và bất định tham số, còn bộ logic mờ được sử dụng như một bộ bù phần dư để xấp xỉ và triệt tiêu các bất định phi cấu trúc còn lại. Theo cách hiểu này, bộ mờ không thay thế luật Lee-Slotine và cũng không được sử dụng như một bộ điều chỉnh kinh nghiệm tổng quát, mà chỉ đóng vai trò bổ sung nhằm làm giảm sai số bám còn dư và nâng cao tính bền vững của hệ khi tải và điều kiện làm việc thay đổi.

2. MÔ HÌNH ROBOT SCARA

Robot SCARA 4 bậc tự do thường có cấu trúc như hình 1.



Hình 1. Cấu trúc Robot SCARA 4 bậc tự do [21]

Xét robot SCARA 4 bậc tự do, có động lực học chuẩn tay máy được ký hiệu như sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

Trong đó, q là các biến khớp, $M(q) > 0$ và thỏa mãn tính chất: $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}) = 0$

Với cấu trúc ở hình 1, ta xây dựng được bộ thông số DH cho robot, ta có được ma trận biến đổi thuần nhất từ gốc đến khâu thao tác:

$${}^0T_4(q) = A_1(q_1) A_2(q_2) A_3(q_3) A_4(q_4) \quad (2)$$

Từ đó, tính được tọa độ điểm làm việc:

$$x = f(q) = [x(q) \ y(q) \ z(q) \ \theta(q)] \quad (3)$$

và ma trận Jacobian $J(q)$ thỏa mãn điều kiện:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (4)$$

Với bài toán được xây dựng là bám quỹ đạo làm việc cho trước $x_d(t)$, chúng ta đã chuyển thành bài toán bám quỹ đạo trong không gian khớp $q_d(t)$ thông qua bài toán động học ngược.

Tính động lực học cho robot SCARA:

Sử dụng phương pháp Lagrange, ta có được mô hình động lực học của robot nối tiếp n bậc tự do như sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F(\dot{q}) = \tau + d(q, \dot{q}, t) \quad (5)$$

Với: $F(\dot{q})$ là tổng hợp các ma sát của robot; $d(q, \dot{q}, t)$: là các bất định của mô hình như tải thay đổi, nhiễu ngoài không mong muốn...

Từ (5), mô hình có thể viết dưới dạng tuyến tính theo tham số như sau:

$$M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)\theta \quad (6)$$

$Y(t) \in R^{n \times p}$ là ma trận hồi quy, còn $\theta \in R^p$ là vec tơ tham số động học, quán tính chưa biết.

Bài toán bám quỹ đạo trong không gian khớp với logic mờ:

Cho quỹ đạo tham chiếu: $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t)$ trơn và giới hạn, ta đặt sai lệch (sai số bám):

$$e = q - q_d; \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d \quad (7)$$

Định nghĩa véc tơ trượt:

$$r = \dot{e} + \Lambda(t)e \quad (8)$$

Với $\Lambda(t)$ là ma trận hệ số dương, xác định theo thời gian được suy ra từ bộ suy luận mờ.

Trong bài báo này, ma trận hệ số Λ được chọn dương xác định và xem như tham số thiết kế của mặt trượt. Bộ logic mờ không được dùng để sinh trực tiếp Λ , mà được sử dụng riêng như một bộ bù phần dư cho bất định phi cấu trúc trong luật điều khiển ở phần sau.

Gia tốc tham chiếu sẽ là:

$$\ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \Lambda(t)\dot{e} \quad (9)$$

Như vậy, khi $r \rightarrow 0$ và q_d trơn thì $e \rightarrow 0$, tức là robot sẽ bám quỹ đạo tham chiếu.

3. XÂY DỰNG LUẬT ĐIỀU KHIỂN

3.1. Luật điều khiển thích nghi Lee-Slotine cổ điển

Luật điều khiển:

Từ (5), (6), thay $\dot{q}_r, \ddot{q}_r$, ta có được:

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r = \tau - Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\theta + \ddot{d} \quad (10)$$

Với $\ddot{d} = \ddot{d} + F(\dot{q})$: gộp các bất định.

Trong trường hợp lý tưởng, không có các bất định, thì $\ddot{d} = 0$, lúc này, luật điều khiển Lee-Slotine được viết lại thành:

$$\tau_{LS} = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\theta} - K_r r \quad (11)$$

Trong đó, $K_r = \text{diag}(k_{r1}, k_{r2}, \dots, k_{rn}) > 0$ là ma trận khuếch đại dương, còn $\hat{\theta}$ là ước lượng của θ

Luật cập nhật tham số:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)r \quad (12)$$

Với $\Gamma = \Gamma^T > 0$ là ma trận hệ số thích nghi.

Đặt sai số tham số $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, thay (11) vào (10), với $\ddot{d} = 0$, ta có được động lực r :

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\tilde{\theta} - K_r r \quad (13)$$

Theo tài liệu [21] thì hệ thống ổn định Lyapunov.

3.2. Luật điều khiển thích nghi Lee-Slotine với bộ bù mờ cho bất định phi cấu trúc.

Trong bài toán điều khiển robot SCARA, có thể tách bất định của hệ thành hai nhóm. Nhóm thứ nhất là bất định có cấu trúc tuyến tính theo tham số, có thể được biểu diễn trong mô hình hồi quy $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\theta$; nhóm này được xử lý bởi luật thích nghi Lee-Slotine thông qua tham số ước lượng $\hat{\theta}$. Nhóm thứ hai là bất định phi cấu

trúc, bao gồm ma sát phi tuyến, tải thay đổi, nhiễu ngoài và các thành phần chưa mô hình hóa đầy đủ; nhóm này được gom vào một hàm dư $\Delta(q, \dot{q}, t)$. Với cách phân tách như vậy, bộ logic mờ trong bài báo không được dùng để thay đổi trực tiếp luật Lee-Slotine hoặc điều chỉnh theo kinh nghiệm, mà được sử dụng nhất quán như một bộ xấp xỉ và bù phần bất định phi cấu trúc còn dư. Do đó, logic mờ chỉ tác động lên phần sai số mô hình còn lại sau khi phần thích nghi Lee-Slotine đã xử lý xong thành phần bất định có cấu trúc.

Tính bất định mô hình và thiết kế bộ bù mờ

Trong thực tế, robot SCARA có nhiều tính bất định như: tham số quán tính, độ dài của các khâu khớp cũng như khối lượng không chính xác. Các ma sát phi tuyến, độ cứng khớp, tải thay đổi theo thời gian...

Với các bất định còn lại, được tuyến tính hóa theo θ vào một vector $\Delta(q, \dot{q}, t) \in R^n$ sao cho:

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\tilde{\theta} - K_r r + \Delta(q, \dot{q}, t) \quad (14)$$

Ý tưởng ở đây là dùng bộ suy luận mờ để xấp xỉ hàm $\Delta(q, \dot{q}, t)$:

$$\Delta(q, \dot{q}, t) \approx \hat{\Delta}(e, r) = \Phi(e, r)\hat{W} \quad (15)$$

Trong đó:

e, r là vector lỗi bám vị trí và lỗi trượt của mỗi khớp.

$\Phi(e, r)$ là ma trận hàm cơ sở, phụ thuộc vào số luật mờ.

$\hat{W}$ là vector tham số của bộ mờ.

Giả sử tồn tại tham số lý tưởng W^* sao cho:

$$\Delta(q, \dot{q}, t) = \Phi(e, r)W^* + \varepsilon(e, r) \quad (16)$$

Với $\varepsilon(e, r)$ là sai số xấp xỉ hữu hạn, bị chặn.

Đặt sai số tham số mờ là: $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$

Luật điều khiển kết hợp giữa Lee-Slotine và logic mờ.

Từ đây, ta đề xuất xây dựng cấu trúc bộ điều khiển như sau:

$$\begin{aligned} \tau &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\theta} - K_r r + \hat{\Delta}(e, r) \\ &= Y\hat{\theta} - K_r r - \Phi(e, r)\tilde{W} \end{aligned} \quad (17)$$

Trong (17), thì có thể thấy:

$Y\hat{\theta} - K_r r$ là bộ điều khiển thích nghi Lee-Slotine bù động lực học danh định.

$\hat{\Delta}(e, r) = \Phi(e, r)\hat{W}$ là bộ bù mờ, dùng các luật mờ trên từng khớp để suy ra lượng bù phi tuyến bổ sung.

Cần lưu ý rằng trong cấu trúc trên, bộ logic mờ không được sử dụng để thay đổi trực tiếp dạng của luật Lee-Slotine hoặc điều chỉnh các hệ số khuếch đại theo kinh nghiệm, mà được xem như một bộ xấp xỉ bất định phi cấu trúc $\Delta(q, \dot{q}, t)$. Vì vậy, trong phân tích ổn định, phần thích

nghe Lee-Slotine và phần thích nghi mờ có thể được xem như hai cơ chế cập nhật tham số cho hai lớp bất định khác nhau: tham số động lực học có cấu trúc và bất định phi cấu trúc còn dư.

Luật cập nhật tham số cho bộ điều khiển lai: đối với Lee-Slotine, ta vẫn giữ cập nhật tham số theo (12), còn với luật mờ, ta bổ sung luật cập nhật tham số cho bộ mờ như sau:

$$\dot{W} = \Gamma_f \Phi^T(e, r)r \quad (18)$$

Trong đó, $\Gamma_f = \Gamma_f^T > 0$ là ma trận hệ số thích nghi cho bộ điều khiển mờ.

Như vậy, cấu trúc điều khiển lai được viết dưới dạng tổng của hai thành phần: phần Lee-Slotine đảm nhận bù động lực học danh định và cập nhật tham số mô hình, còn phần mờ chỉ bù phần dư phi cấu trúc.

Xét tính ổn định theo Lyapunov.

Thay (17) vào (14), kết hợp (16), ta có được:

$$\begin{aligned} M\dot{r} + Cr &= -K_r r + Y\tilde{\theta} + \Delta \\ M\dot{r} + Cr &= -K_r r + Y\tilde{\theta} + \Phi W^* + \varepsilon \\ M\dot{r} + Cr &= -K_r r + Y\tilde{\theta} + \Phi \tilde{W} + \Phi \tilde{W} + \varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

Chọn hàm Lyapunov mở rộng:

$$V = \frac{1}{2} r^T M(q)r + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} \tilde{W} \quad (20)$$

Ta thấy, do $M(q)$ đối xứng, nên luôn tồn tại hằng số $m_1, m_2 > 0$ sao cho:

$$m_1 \|v\|^2 \leq v^T M(q)v \leq m_2 \|v\|^2, \forall v \in R^n \quad (21)$$

Nên hàm V theo (20) là xác định dương, bị chặn dưới bởi hằng số dương tỉ lệ với các tham số $\|r\|^2, \|\tilde{\theta}\|^2, \|\tilde{W}\|^2$

Đạo hàm (20), ta được:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} r^T \dot{M}r + \frac{1}{2} r^T M\dot{r} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{2} \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} \dot{\tilde{W}} \quad (22)$$

Thay (19) vào $M\dot{r}$ và sử dụng $M - 2C = 0$, có được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= r^T \left(\frac{1}{2} \dot{M} - C \right) r + r^T (-K_r r + Y\tilde{\theta} + \Phi \tilde{W} + \varepsilon) \\ &\quad + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (-\dot{\tilde{\theta}}) + \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} (-\dot{\tilde{W}}) \\ &= -r^T K_r r + r^T Y\tilde{\theta} + r^T \Phi \tilde{W} + r^T \varepsilon \\ &\quad + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (-\dot{\tilde{\theta}}) + \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} (-\dot{\tilde{W}}) \end{aligned} \quad (23)$$

Thay luật cập nhật thông số (12), (18), hai số hạng $Y\tilde{\theta}, \Phi \tilde{W}$ bị triệt tiêu nên ta được:

$$\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (-\dot{\tilde{\theta}}) = \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \Gamma Y^T r = \tilde{\theta}^T Y^T r = r^T Y^T \tilde{\theta} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} (-\dot{\tilde{W}}) &= \tilde{W}^T \Gamma_f^{-1} (-\Gamma_f \Phi^T r) \\ &= -\tilde{W}^T \Phi^T r = -r^T \Phi \tilde{W} \end{aligned} \quad (25)$$

Thay (24), (25) vào (23), vì hai số hạng $Y\tilde{\theta}, \Phi \tilde{W}$ bị triệt tiêu nên (23) viết lại thành:

$$\dot{V} = r^T K_r r + r^T \varepsilon \quad (26)$$

Sử dụng bất đẳng thức:

$$-r^T \varepsilon \leq \|r\| \|\varepsilon\| \leq \bar{\varepsilon} \|r\| \quad (27)$$

Vì sai số xấp xỉ ε bị chặn bởi $\|\varepsilon\| \leq \bar{\varepsilon}$, nên:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\gamma_{\min}(K_r) \|r\|^2 + \|r\| \bar{\varepsilon} \\ &\leq -\gamma_{\min}(K_r) \|r\|^2 + \bar{\varepsilon} \|r\| \end{aligned} \quad (28)$$

Nên viết lại (28) thành:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\left(\gamma_{\min}(K_r) \|r\| - \frac{\bar{\varepsilon}}{2}\right) \|r\| - \frac{\bar{\varepsilon}}{2} \|r\| \\ &\leq -\alpha \|r\|^2 - \frac{\bar{\varepsilon}^2}{4\gamma_{\min}(K_r)} \end{aligned} \quad (29)$$

Với $\alpha = \frac{1}{2} \gamma_{\min}(K_r)$

Từ (29), suy ra $\dot{V} < 0$ khi:

$$\|r\| > \frac{\bar{\varepsilon}}{\gamma_{\min}(K_r)} \quad (30)$$

Vì vậy, có thể kết luận rằng tất cả các tín hiệu của hệ kín đều bị chặn, và véc tơ trượt $r(t)$ hội tụ vào lân cận hữu hạn, suy ra sai số bám $e(t)$ và $\dot{e}(t)$ cũng bị chặn và hội tụ về một lân cận nhỏ của gốc. Kích thước lân cận này phụ thuộc vào chặn trên và sai số xấp xỉ mờ, giá trị của ma trận khuếch đại cũng như khả năng lựa chọn các tham số mờ và bộ điều khiển.

Công thức (29) cho thấy đạo hàm của hàm Lyapunov xác định âm ngoài một lân cận của $r = 0$, với kích thước lân cận phụ thuộc vào chặn trên của sai số xấp xỉ mờ.

Nói cách khác, khi tăng đủ lớn các phần tử của K_r và cải thiện khả năng xấp xỉ của bộ bù mờ để giảm sai số xấp xỉ, kích thước lân cận này sẽ thu nhỏ lại. Điều đó cho phép nâng cao chất lượng bám quỹ đạo.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Cấu hình robot SCARA được cho như sau:

Chiều dài tay máy: $a_1 = 0,4$ (m); $a_2 = 0,3$ (m)

Giả thiết trọng tâm là ở giữa mỗi khâu. Gia tốc trọng trường $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Khối lượng: $m_1 = 5$ (kg); $m_2 = 3$ (kg); $m_3 = 2$ (khối lượng của khâu trượt và khối lượng tải ban đầu)

Quán tính quay $J_4 = 0,2$ (kg.m²)

Tải thay đổi tại thời điểm mô phỏng là $t_0 + 10\text{s}$, khối lượng tăng thêm là 3kg để đánh giá chất lượng của các bộ điều khiển.

Quỹ đạo tham chiếu: sử dụng 3 quỹ đạo dạng hình tròn, zig zag và đường cong.

Trạng thái ban đầu của các khâu được mô tả ở bảng 1.

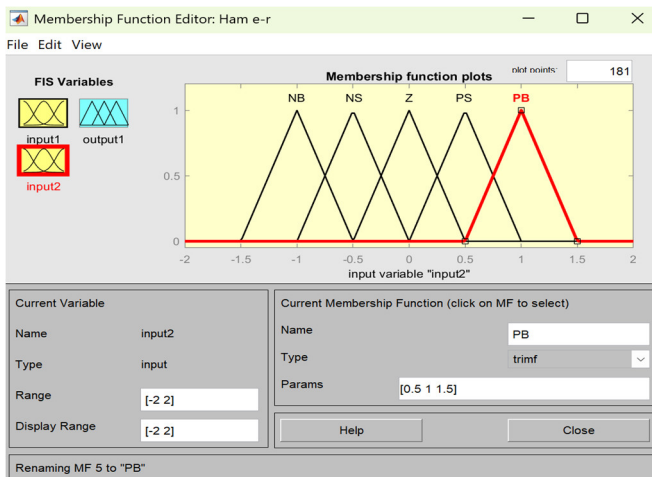
Bảng 1. Trạng thái ban đầu của robot SCARA so với gốc 0

q_1 (rad)	q_2 (rad)	d_3 (m)	q_4 (rad)
-0,96	2,1	0,15	0

Xây dựng luật mờ:

Luật điều khiển mờ có 2 biến vào: sai số vị trí khớp e và sai số trượt r . Hai biến này được dùng để suy luận lượng bù phi tuyến còn dư, tức là phần bất định chưa được khối thích nghi Lee-Slotine xử lý hết.

Mỗi biến có 5 tập mờ: NB, NS, Z, PS, PB. Như vậy có tổng cộng $5 \times 5 = 25$ luật. Ta sử dụng suy luận mờ Sugeno, mỗi luật cho ra 1 hằng số, kết quả là trung bình có trọng số. Đầu ra của bộ mờ là một lượng bù bổ sung cho phần dư bất định, chứ không phải một bộ điều chỉnh đáp ứng độc lập. Sử dụng 5 tập mờ như hình 2.

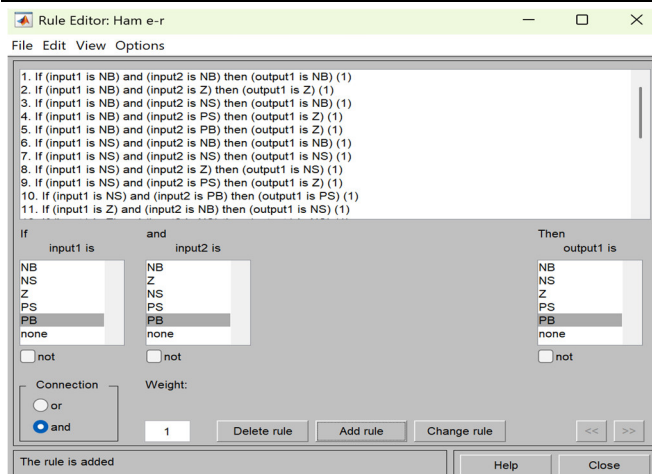


Hình 2. Biến đầu vào e và r của luật mờ

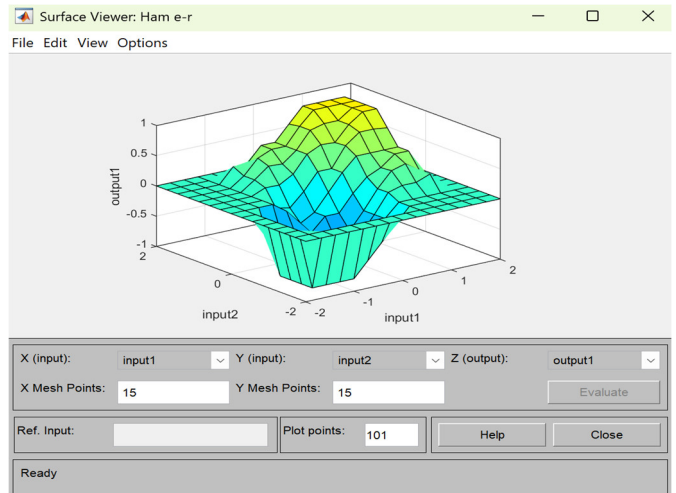
Bảng luật mờ như thể hiện trong bảng 2 và hình 3, 4.

Bảng 2. Bảng luật mờ cho điều khiển robot SCARA

$r \backslash e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	Z	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	Z	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

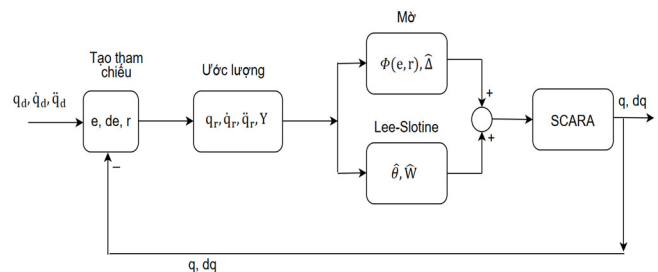


Hình 3. Các luật điều khiển logic mờ



Hình 4. Luật mờ trên không gian 3D

Sơ đồ khối điều khiển như thể

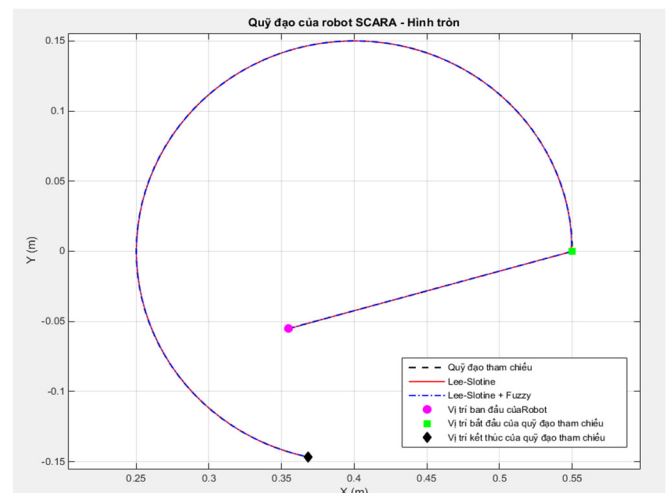


Hình 5. Sơ đồ khối điều khiển lai giữa luật Lee-Slotine và logic mờ cho robot SCARA

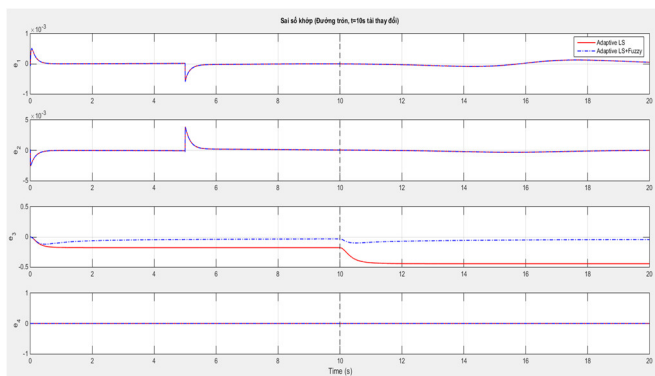
Cấu trúc điều khiển được thiết kế: Lee-Slotine xử lý động lực học có cấu trúc, còn bộ mờ làm giảm sai số còn dư do tải thay đổi, ma sát và nhiễu

Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink:

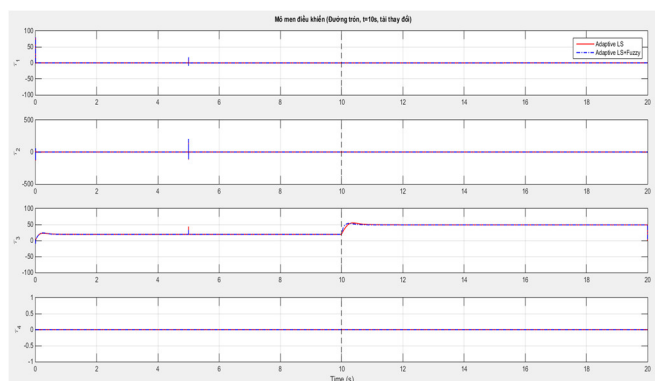
Trường hợp 1: Quỹ đạo tham chiếu là hình tròn. Kết quả như được thể hiện trên hình 6 ÷ 8.



Hình 6. Quỹ đạo di chuyển theo hình tròn của robot SCARA

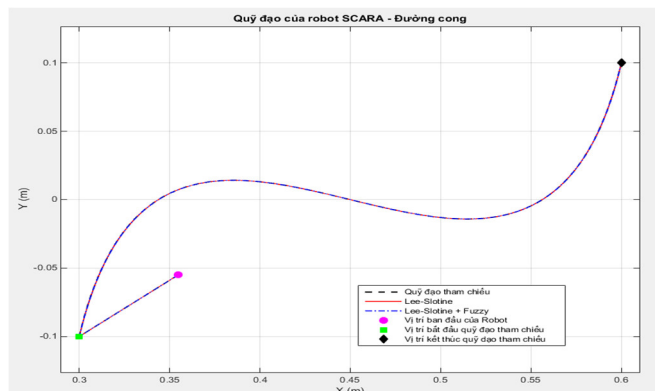


Hình 7. Sai số giữa các khớp của quỹ đạo hình tròn

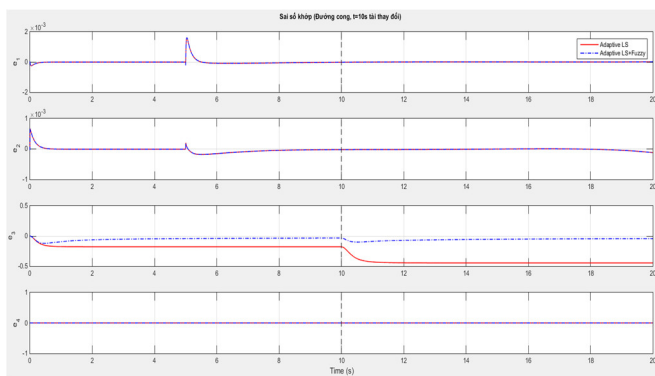


Hình 8. Mô men điều khiển các khớp của quỹ đạo hình tròn

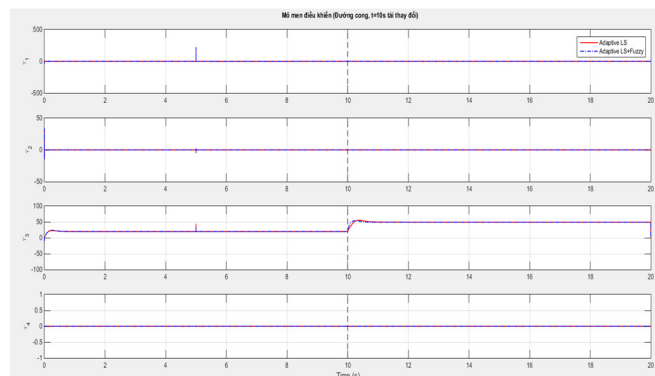
Trường hợp 2: Quỹ đạo tham chiếu là đường cong. Kết quả như được thể hiện trên hình 9 ÷ 11.



Hình 9. Quỹ đạo di chuyển theo đường cong của robot SCARA

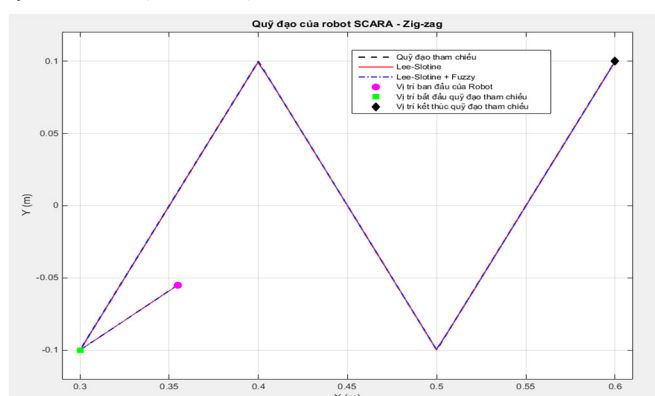


Hình 10. Sai số giữa các khớp của quỹ đạo đường cong

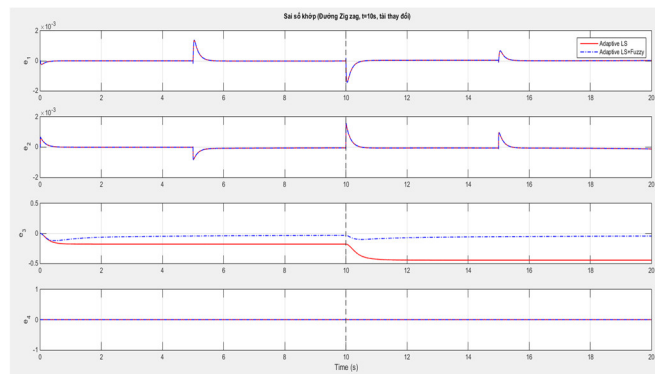


Hình 11. Mô men điều khiển các khớp của quỹ đạo đường cong

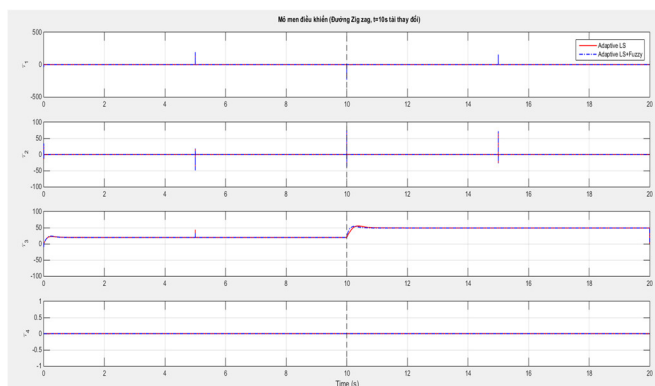
Trường hợp 3: Quỹ đạo tham chiếu là hình zig-zac. Kết quả như được thể hiện trên hình 12 ÷ 14.



Hình 12. Quỹ đạo di chuyển theo Zig zag của robot SCARA



Hình 13. Sai số giữa các khớp của quỹ đạo đường Zig zag



Hình 14. Mô men điều khiển các khớp của quỹ đạo đường cong

Kết quả mô phỏng cho thấy, ở cả ba quỹ đạo tham chiếu, bộ điều khiển lai đều bám tốt quỹ đạo đặt. Tuy nhiên, điểm cần nhấn mạnh không chỉ là khả năng bám trong điều kiện danh định, mà là ứng xử của hệ khi tải thay đổi tại thời điểm $t = 10s$. Trong tình huống này, bộ điều khiển Lee-Slotine đơn lẻ vẫn giữ được tính ổn định nhờ cơ chế thích nghi tham số, nhưng sai số quá độ tăng lên do xuất hiện thành phần bất định chưa mô hình hóa hết. Khi bổ sung bộ bù mờ, sai số bám và sai số trượt được kéo giảm nhanh hơn, biên độ dao động sau thời điểm đổi tải nhỏ hơn và thời gian xác lập ngắn hơn. Điều đó phù hợp với cách phân vai đã nêu trong bài: Lee-Slotine xử lý phần bất định có cấu trúc của mô hình, còn bộ mờ bù phần bất định phi cấu trúc và tải thay đổi còn dư, nhờ đó nâng cao độ bền vững của toàn hệ.

Bảng 4. Bảng so sánh giá trị RMSE của hai phương pháp điều khiển trên toàn bộ thời gian mô phỏng

Quỹ đạo	XY_LS	XY_LS+Fuzzy	SS_LS	SS_LS+Fuzzy
Hình tròn	6,1621E-05	6,1553E-05	2,3010E-01	5,5968E-02
Đường cong	2,8386E-05	2,8377E-05	2,3010E-01	5,5967E-02
Zig-zag	4,7139E-05	4,7102E-05	2,3010E-01	5,5967E-02

XY: sai số trên mặt phẳng quỹ đạo; SS: sai số tổng 4 khớp; Thời gian: 0 → 20s

Sai số trên mặt phẳng quỹ đạo cho thấy hai phương pháp gần như tương đương nhau, tuy nhiên, khi xét sang sai số tổng hợp của 4 khớp thì thấy rằng luật điều khiển Lee-Slotine kết hợp với logic mờ (LS+Fuzzy) cho kết quả tốt hơn rất nhiều (từ 0,2301 về 0,05596) bởi ưu điểm khi sử dụng kết hợp với logic mờ là khả năng xử lý bất định và tải thay đổi ở động lực khớp (bảng 3).

Bảng 5. So sánh giá trị RMSE của hai phương pháp tại khớp 3 khi tải thay đổi

Sai số RMSE chung trước khi tải thay đổi (từ 0 đến 10s)		
Quỹ đạo	Luật LS	Luật LS+Fuzzy
	q3	q3
Hình tròn	1,2054E-01	5,1257E-02
Đường cong	1,2054E-01	5,1257E-02
Zig-zag	1,2054E-01	5,1257E-02
Sai số RMSE chung sau khi tải thay đổi (từ 10s đến 20s)		
Quỹ đạo	Luật LS	Luật LS+Fuzzy
	q3	q3
Hình tròn	3,0226E-01	6,0310E-02
Đường cong	3,0226E-01	6,0310E-02
Zig-zag	3,0226E-01	6,0310E-02

Ở bảng 4, có thể thấy trước và sau khi tải thay đổi, giá trị RMSE tăng mạnh đối với luật điều khiển LS, còn

LS+Fuzzy giảm đi. Điều này cho thấy bộ điều khiển logic mờ có tác dụng ở thời điểm biến đổi tải (vùng bất định, phi cấu trúc và nhiễu) khi mà bộ điều khiển LS đơn thuần chưa xử lý được hết.

5. KẾT LUẬN

Robot SCARA là một đối tượng điển hình trong sản xuất tự động hóa, đòi hỏi độ chính xác bám quỹ đạo cao và tính bền vững trước bất định. Trong bài báo này, cấu trúc điều khiển lai được xây dựng trên cơ sở phân tách rõ hai lớp bất định của hệ. Luật thích nghi Lee-Slotine được sử dụng để xử lý phần động lực học có cấu trúc tuyến tính theo tham số, thông qua cơ chế bù động lực học danh định và cập nhật tham số theo Lyapunov. Trên nền đó, bộ logic mờ được thiết kế nhất quán như một bộ bù phần dư, dùng để xấp xỉ và khử các bất định phi cấu trúc như ma sát phi tuyến, tải thay đổi và nhiễu ngoài mà phần thích nghi tham số chưa triệt tiêu hết. Với cách tổ chức này, logic mờ không thay thế Lee-Slotine mà chỉ đóng vai trò hỗ trợ nhằm làm giảm sai số bám còn dư và nâng cao tính bền vững của toàn hệ.

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển lai cho sai số bám nhỏ hơn và phục hồi nhanh hơn khi tải thay đổi, chứng tỏ tính khả thi của cấu trúc điều khiển đã đề xuất. Như vậy, đóng góp chính của bài báo không nằm ở việc dùng bộ mờ như một bộ điều chỉnh kinh nghiệm tổng quát, mà ở việc tích hợp bộ bù mờ như một khối bù bất định phi cấu trúc còn dư trên nền điều khiển thích nghi Lee-Slotine.

Với việc sử dụng bộ điều khiển lai giữa luật Lee-Slotine với logic mờ, có thể thấy bộ điều khiển lai này giúp nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo của robot SCARA khi dịch chuyển theo các quỹ đạo định trước trong mặt phẳng làm việc xOy và cả theo phương z. Đã làm giảm ảnh hưởng của tải và nhiễu mô men ngoài khi có va chạm nhẹ, tải thay đổi... Đảm bảo được đáp ứng bền vững ngay cả khi mô hình động lực học được giản ước và không có đầy đủ chính xác các tham số. Là cơ sở để mở rộng sang các thuật toán tối ưu hóa tham số khác cho tham số luật mờ như giải thuật di truyền, PSO trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Ngọc-Anh Mai, "Modelling and simulation of fuzzy-based coordination of trajectory planning and obstacle avoiding for RRP-typed SCARA robots," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(4):39-47, 2021.

- [2]. Trần Anh Dũng, Đinh Anh Tuấn, Đào Quang Khanh, "Nghiên cứu điều khiển vị trí cho robot SCARA sử dụng bộ điều khiển mờ," *Tạp chí Khoa học & Công nghệ - Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội (JST-HaUI)*, 59(4):36-44, 2023.
- [3]. Huỳnh Minh Vũ, Trần Thanh Hùng, Nguyễn Chí Ngôn, "Điều khiển robot SCARA bằng thuật toán mờ - nơ-ron," *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật*, 14(4):80-86, 2019.
- [4]. Vu Ngoc Dan, Binh Van, "Adaptive control for uncertain nonlinear systems based on fuzzy logic," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2023.
- [5]. Shengchao Zhen, Chaoqun Meng, Haowen Xiao, Xiaoli Liu, Ye-Hwa Chen, "Robust approximate constraint following control for SCARA robots system with uncertainty and experimental validation," *Control Engineering Practice*, 138, Article 105610, 2023.
- [6]. Guanglei Wu, Bin Niu, Qiancheng Li, "Trajectory tracking control of fast parallel SCARA robots with fuzzy adaptive iterative learning control for repetitive pick-and-place operations," *Electronics*, 12(24):4995, 2023.
- [7]. Woranut Em-Udom, Pitcha Amnatchotiphan, "Adaptive sliding mode control with integral sliding surface for 3-DOF SCARA robot manipulators," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3):22445-22451, 2025.
- [8]. Duy-Thuan Vu, Ngoc-Khoat Nguyen, Ngoc-Nhan Hoang, "Study on novel model-based adaptive control strategy for a multi-DoF industrial robot (4-DoF SCARA)," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 58(3):563-572, 2025.
- [9]. João P. M. Tinoco, et al., "Benchmarking controllers for low-cost agricultural SCARA manipulators," *Sensors*, 25(9):2676, 2025.
- [10]. Vidyapati Kumar, Ankita Mistri, "Fuzzy logic-based synchronization of trajectory planning and obstacle avoidance for RRP SCARA robot," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2025.
- [11]. Bayram Melih Yilmaz, Sukru Unver, Erman Selim, Irem Saka, Enver Tatlicioglu, "Fuzzy logic based adaptive control of robot manipulators driven by BLDC motors," *Journal of the Franklin Institute*, 362(4), 2025.
- [12]. Shoulin Xu, Bin He, "Robust adaptive fuzzy fault tolerant control of robot manipulators with unknown parameters," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(9):3081-3092, 2023.
- [13]. M. Van, Shoulin Xu, Bin He, "Adaptive fuzzy fault tolerant control for robot manipulators with fixed-time convergence," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, early access, 2025.
- [14]. Qianqian Zhang, Mingye Mu, Heyuan Ji, Qiushi Wang, Xingyu Wang, "An adaptive type-2 fuzzy sliding mode tracking controller for a robotic manipulator," *Electronic Research Archive*, 31(7):3791-3813, 2023.
- [15]. Xiuxing Yin, Linjun Pan, Shibo Cai, "Robust adaptive fuzzy sliding mode trajectory tracking control for serial robotic manipulators," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 72:101884, 2021.
- [16]. Huadi Shan, Yulian Jiang, Yanzheng Zhu, Shenquan Wang, "Fixed-time self-triggered fuzzy adaptive control of N-link robotic manipulators," *Fuzzy Sets and Systems*, 2025.
- [17]. Tong Li, Guoyong Zhang, Tianyu Zhang, Jihong Pan, "Adaptive neural network tracking control of robotic manipulators based on disturbance observer," *Processes*, 12(3):499, 2024.
- [18]. Mohammadali Ghafarian, Bijan Shirinzadeh, Ammar Al-Jodah, Tilok Kumar Das, "Adaptive fuzzy sliding mode control for high-precision motion tracking of a multi-DOF micro/nano manipulator," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 2020.
- [19]. Nima Zaare, Mohammad R. Soltanpour, "Adaptive fuzzy global coupled nonsingular fast terminal sliding mode control of n-rigid-link elastic-joint robot manipulators in presence of uncertainties," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163:108165, 2022.
- [20]. Y. Liu, et al., "A novel trajectory tracking control approach for uncertain 6-DOF manipulators based on fuzzy sliding mode of radial basis function neural network," in *Proceedings of the IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 237(6):1032-1044, 2023.
- [21]. Duy-Thuan Vu, Ngoc-Khoat Nguyen, "A Comparative Study of Various Control Strategies for a 4-DOF Scara Robot," *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11, 4, 175-183, 2024.

AUTHORS INFORMATION

Vu Duy Thuan, Nguyen Anh Hoa

Faculty of Control and Automation, Electric Power University, Vietnam