

ADAPTIVE FUZZY CONTROL OF ROBOT ARM SYSTEMNguyen Chi Ngon^{1*}, Cao Thi Yen², Truong Thi Thanh Tuyen¹¹Can Tho University, ²An Giang Vocational College

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 07/8/2021	Due to their nonlinear characteristics, the robotic dynamic systems have been attracted several research interests. Robot control algorithms from classical to modern and intelligent, have been deployed. However, to approach a specific robot control technique, the reader may have difficulty with a lot of scholarly literature. This paper aims to synthesize documents and present detailed process of building a simulation model and testing the adaptive fuzzy sliding mode control algorithm, illustrated on a 2-degree-of-freedom (2-DOF) manipulator model, in the MATLAB/Simulink environment. The hard-to-control components in robot model, as well as in the control law, such as friction, noise, and other uncertainties, are approximated by fuzzy systems. With the adaptive mechanism applied, the sliding control law is flexible enough to adapt to the robot's parameter variation and is stable according to Lyapunov's theory. Simulations on the 2-DOF manipulator model show that the adaptive fuzzy sliding mode controller can give responses without overshoot, small settling time (0.15 s) and negligible steady-state error (0.0012 rad). The case of increasing the manipulator's load up to 100% also shows that the actual trajectory tracking well to the reference and does not appear significant fluctuations in the control signal.
Revised: 29/11/2021	
Published: 30/11/2021	
KEYWORDS	
2-DOF robot	
Adaptive fuzzy control	
Fuzzy approximation	
Fuzzy logic	
Sliding mode control	

ĐIỀU KHIỂN MỜ THÍCH NGHI HỆ CÁN TAY ROBOTNguyễn Chí Ngõn^{1*}, Cao Thị Yến², Trương Thị Thanh Tuyền¹¹Trường Đại học Cần Thơ, ²Trường Cao đẳng nghề An Giang

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 07/8/2021	Do đặc điểm phi tuyến, hệ động lực học robot luôn là chủ đề thu hút nhiều nghiên cứu. Các giải thuật điều khiển robot từ cổ điển đến hiện đại và thông minh, đã được triển khai. Tuy nhiên, để tiếp cận một kỹ thuật điều khiển robot cụ thể, người đọc gặp phải rất nhiều tài liệu mang nặng tính học thuật. Bài báo này nhằm mục tiêu tổng hợp tài liệu, trình bày chi tiết quá trình xây dựng mô hình và mô phỏng kiểm nghiệm giải thuật điều khiển trượt mờ thích nghi cho hệ robot, đồng thời minh họa trên mô hình tay máy 2 bậc tự do, trong môi trường MATLAB/Simulink. Thành phần khó kiểm soát trong mô hình đối tượng, cũng như trong luật trượt kinh điển là ma sát, nhiễu và các yếu tố bất định khác, được xấp xỉ bằng các hệ mờ. Với cơ chế thích nghi được áp dụng, luật điều khiển trượt đủ linh hoạt để thích ứng với sự biến đổi tham số của robot và ổn định theo lý thuyết Lyapunov. Mô phỏng trên mô hình tay máy 2 bậc tự do cho thấy bộ điều khiển trượt mờ thích nghi cho đáp ứng không xuất hiện vọt lố, thời gian xác lập nhỏ (0,15 giây) và sai số xác lập không đáng kể (0,0012 rad). Trường hợp tăng tải trọng của tay máy lên 100% cũng cho thấy quỹ đạo đáp ứng bám tốt quỹ đạo tham khảo và không xuất hiện dao động đáng kể trong tín hiệu điều khiển.
Ngày hoàn thiện: 29/11/2021	
Ngày đăng: 30/11/2021	
TỪ KHÓA	
Robot 2 bậc tự do	
Điều khiển mờ thích nghi	
Xấp xỉ mờ	
Hệ mờ	
Điều khiển trượt	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4867>

* Corresponding author. Email: ncngon@ctu.edu.vn

1. Giới thiệu

Một yêu cầu quan trọng trong điều khiển robot là kiểm soát chúng bám quỹ đạo mong muốn. Trong quá trình vận hành, các thông số của robot có thể bị thay đổi dưới tác động của các yếu tố như tải trọng và nhiễu, dẫn tới khả năng mất ổn định hoặc mất kiểm soát. Thật vậy, các nghiên cứu đã chỉ rõ nhiều yếu tố gây bất ổn và tác động trực tiếp lên động lực học của robot. Với ưu điểm về tính ổn định và bền vững ngay cả khi hệ thống có nhiễu hoặc khi thông số của đối tượng thay đổi, bộ điều khiển trượt là một lựa chọn tiêu biểu trong điều khiển robot. Tuy nhiên, khi biên độ của luật điều khiển thay đổi lớn và với tác động của hàm dẫu, tín hiệu điều khiển có thể bị dao động (chattering), kém ổn định và tác động xấu đến các bộ drivers.

Để khắc phục nhược điểm của bộ điều khiển trượt, nhiều nhà khoa học đã nghiên cứu và đề xuất kết hợp kỹ thuật điều khiển trượt với mạng nơ-ron [1], giải thuật di truyền, đặc biệt là kết hợp với bộ điều khiển mờ [2]-[8]. Trong đó, điều khiển mờ được nhiều nhà khoa học nghiên cứu sử dụng vì tính đơn giản trong thiết kế của nó. Chẳng hạn, bộ điều khiển mờ được áp dụng trong việc kiểm soát robot thực hiện các nhiệm vụ phức tạp mà các mô hình phân tích kiểm soát thông thường khó có thể thực hiện được [2] hay điều khiển robot đa hướng [3]. Tuy nhiên, bộ điều khiển mờ với thiết kế cố định vẫn chưa đủ linh hoạt, trong nhiều trường hợp vẫn chưa đáp ứng được quá trình điều khiển robot. Vì vậy, kỹ thuật điều khiển mờ thích nghi đã được một số nhà khoa học quan tâm. Chẳng hạn, điều khiển mờ thích nghi được ứng dụng để điều khiển robot mài nhẵn [4], hệ thống điều khiển vô-lãng điện cho ô tô [5], hệ phi tuyến MIMO (multiple-input multiple-output) với nhiều yếu tố bất định [6], xấp xỉ thành phần không chắc chắn của hệ thống phi tuyến [7] và kiểm soát hệ phi tuyến với độ trễ lớn, không xác định [8]. Việc kết hợp kỹ thuật điều khiển trượt và điều khiển mờ thích nghi nhằm xây dựng một bộ điều khiển trượt mờ thích nghi áp dụng cho hệ cánh tay robot là một chủ đề nghiên cứu hấp dẫn và vẫn còn được tiếp tục phát triển [9], [10].

Bài báo này nhằm mục tiêu tổng hợp tài liệu, trình bày chi tiết quá trình xây dựng bộ điều khiển và mô phỏng kiểm nghiệm giải thuật điều khiển trượt mờ thích nghi cho hệ robot và minh họa trên hệ tay máy 2 bậc tự do, trong môi trường MATLAB/Simulink. Nội dung của bài báo tập trung vào các vấn đề, gồm: (i) Trình bày mô hình tổng quát của robot và xây dựng lại mô hình hệ động lực học của robot 2 bậc tự do trên MATLAB/Simulink; (ii) Tổng hợp lý thuyết và thiết kế bộ điều khiển trượt mờ thích nghi; và (iii) Đánh giá hiệu quả của giải thuật điều khiển.

2. Thiết kế hệ thống

2.1. Mô hình cánh tay robot

Một cách tổng quát, hệ robot n-bậc tự do [12], [13] có phương trình động học được mô tả như (1):

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (1)$$

Trong đó, $q \in R^n$ là vectơ các góc khớp của robot; $D(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận mô-men quán tính, $C(q, \dot{q}) \in R^n$ gồm các thành phần lực hướng tâm và lực Coriolis, $G(q) \in R^n$ là các thành phần trọng lực và $F(\dot{q}) \in R^n$ là lực ma sát, $\tau_d \in R^n$ là nhiễu và $\tau \in R^n$ là mô-men tác động lên các khớp.

Gọi $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ là hàm chứa lực ma sát $F(\dot{q})$, nhiễu τ_d và các thành phần bất định khác thì (1) được viết gọn lại thành (2):

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\ddot{q}, \dot{q}, q) = \tau \quad (2)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

2.2.1. Kỹ thuật điều khiển trượt

Kỹ thuật điều khiển trượt đã được nhiều nghiên cứu chứng minh tính ổn định và bền vững của nó [1], [9]-[11]. Trong mục này, bộ điều khiển trượt được tổng hợp ngắn gọn, mà không đi vào chứng minh lại các tính chất đó.

Gọi q_d và q là các véc-tơ góc tham khảo và góc lệch thực tế của cánh tay, thì véc-tơ $e = q_d - q$ được dùng làm cơ sở để xác định mặt trượt, như (3), với λ là ma trận xác định dương [12]:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (3)$$

Đạo hàm 2 vế (3) ta có:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q} + \lambda \dot{e} \quad (4)$$

Thay (2) vào (4), ta có:

$$\dot{s} = \ddot{q}_d - D^{-1}(q) \tau - C(q, \dot{q}) \dot{q} - G(q) - F(\ddot{q}, \dot{q}, q) + \lambda \dot{e} \quad (5)$$

Từ (5), để $q \equiv q_d$ và $s \rightarrow 0$, luật điều khiển trượt mong muốn là:

$$u = \tau = D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(\ddot{q}, \dot{q}, q) + D^{-1}(q) \lambda \dot{e} \quad (6)$$

Ta có thể viết (6) dạng:

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (7)$$

Trong đó, tín hiệu điều khiển trượt gồm 2 thành phần: thành phần tín hiệu điều khiển tương đương u_{eq} và thành phần tín hiệu điều khiển gián đoạn Δu , với:

$$u_{eq} = D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (8)$$

và thành phần tín hiệu điều khiển gián đoạn được xác định là [12]:

$$\Delta u = -K_D s - W \operatorname{sgn}(s) \quad (9)$$

với $K_D = \operatorname{diag}(K_i), K_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$; $W = \operatorname{diag}[\omega_{M_1}, \dots, \omega_{M_n}]$, $\omega_{M_i} \geq |\omega_i|, i = 1, 2, \dots, n$; và $\operatorname{sgn}(\cdot)$ là hàm dấu của mặt trượt s .

Thay (8) và (9) vào (6), luật điều khiển trượt tổng quát là:

$$u = \tau = D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}, \ddot{q}) - K_D s - W \operatorname{sgn}(s) \quad (10)$$

Điểm yếu cơ bản của luật trượt (10) là các thành phần $D(q), C(q, \dot{q})$ và $G(q)$ vốn chứa các tham số của robot, có thể bị thay đổi trong quá trình điều khiển, chẳng hạn như tải. Tuy nhiên, các thành phần này hoàn toàn có thể xác định bằng nhiều kỹ thuật khác nhau, như mạng nơ-ron nhân tạo [1], không thuộc phạm vi tập trung của nghiên cứu này. Điều quan trọng hơn là thành phần $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ bao gồm ma sát, nhiễu và các thành phần chưa xác định khác, thường khó kiểm soát hoặc có sai số lớn, dẫn tới chất lượng điều khiển trượt trong một số trường hợp còn hạn chế. Bên cạnh đó, thành phần tín hiệu điều khiển gián đoạn cũng gây ra hiện tượng giao động trên mặt trượt (chattering), ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Tuy vậy, nhiều nghiên cứu đã chứng minh được khả năng giảm dao động này bằng cách xấp xỉ hàm dấu $\operatorname{sgn}(\cdot)$ trong (10) bằng các hàm liên tục của biên mặt trượt [11]. Do vậy, trong phần tiếp theo, để đơn giản hóa, nghiên cứu này không lặp lại các vấn đề trên, mà tập trung vào việc ứng dụng hệ mờ để ước lượng thành phần $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$, cũng như khảo sát tính ổn định bền vững của luật trượt (10) khi thay thế thành phần ước lượng này.

2.2.2. Mô hình xấp xỉ mờ

Mô hình hệ mờ có thể được sử dụng để ước lượng các hàm phi tuyến. Gọi x_i là 2 ngõ vào của hệ mờ, p_i là số tập mờ của mỗi biến đầu vào và $\hat{f}(x|\theta)$ là ngõ ra của hệ mờ với θ là một véc-tơ tham số. Các bước thiết kế, được thực hiện theo [12]:

Bước 1: Biến $x_{ij=1,2}$, được mờ hóa thành $p_{ij=1,2}$ tập mờ: $A_i^l (l_i = 1, 2, 3, 4, 5; i = 1, 2)$.

Bước 2: Bộ luật mờ được xây dựng gồm $\prod_{i=1}^2 p_i = p_1 \times p_2 = 25$ luật để xấp xỉ mờ $\hat{f}(x|\theta)$. Luật mờ thứ j được biểu diễn như:

$$R^{(j)} : \text{Nếu } x_1 \text{ là } A_1^{l_1} \text{ và } x_2 \text{ là } A_2^{l_2} \text{ thì } \hat{f} \text{ là } B^{l_1 l_2} \quad (11)$$

Trong đó, $l_i = 1, 2, 3, 4, 5; i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 25$, B^{l_i} là tập hợp mờ của $\hat{f}(x|\theta)$. Quá trình suy diễn mờ được thực hiện như sau:

(1) Sử dụng công cụ suy diễn mờ MAX-PROD [12], ta được $\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)$

(2) Mờ hóa singleton cho biến ngõ ra để tính $y_f^{-l_i}$, với $y_f^{-l_i} = f(x_1, x_2)$ tại nhất cắt (x_1, x_2) mà ở đó $\mu_{B^{l_i}}(y_f^{-l_i})$ có độ phụ thuộc lớn nhất, tức bằng 1.

(3) Công cụ suy diễn mờ MAX-PROD cho tập mờ ngõ ra tương ứng với luật mờ tác động là $y_f^{-l_i} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)$. Phép hợp MAX (union operator) của công cụ suy diễn cho tập mờ tổng hợp ở ngõ ra là: $\sum_{l_1=1}^5 \sum_{l_2=1}^5 y_f^{-l_i} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)$.

(4) Giải mờ bằng phương pháp trung bình trọng tâm (center average defuzzifier) thu được:

$$\hat{f}(x_1|\theta) = \frac{\sum_{l_1=1}^5 \sum_{l_2=1}^5 y_f^{-l_i} \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^5 \sum_{l_2=1}^5 \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (12)$$

Gọi $\theta = [y_f^{-1} \dots y_f^{-25}]^T$ là véc-tơ độc lập và $\xi(x)$ là véc-tơ cơ sở mờ, (12) có thể biểu diễn thành:

$$\hat{f}(x|\theta) = \hat{\theta}^T \xi(x), \quad (13)$$

trong đó, véc-tơ $\xi(x)$ gồm $\prod_{i=1}^2 p_i = p_1 \times p_2 = 25$ phần tử, với phần tử thứ $l_1 l_2$ là:

$$\xi_{l_1 l_2}(x) = \frac{\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^5 \sum_{l_2=1}^5 \left(\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (14)$$

Mô hình xấp xỉ mờ này được ứng dụng để ước lượng thành phần $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ trong luật trượt (10), với giả thiết các thành phần $D(\cdot)$, $C(\cdot)$ và $G(\cdot)$ đã biết, hoặc được nhận dạng bằng kỹ thuật khác. Khi đó, ta có:

$$F(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) + \varepsilon = \hat{\Theta}^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) + \varepsilon, \quad (15)$$

với ε là sai số xấp xỉ hàm.

2.2.3. Cơ chế thích nghi

Thay (15) vào (10) ta được:

$$u = \tau = D(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\ddot{q}_r + G(q) + \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) - K_D s - W \operatorname{sgn}(s) \quad (16)$$

$\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta)$ có thể được mô tả như sau:

$$\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta_1) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta_1^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \vdots \\ \Theta_n^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Ta định nghĩa hàm Lyapunov như sau:

$$V(t) = \frac{1}{2} \left(s^T Ds + \sum_{i=1}^n (\tilde{\Theta}_i^T \Gamma_i \tilde{\Theta}_i) \right) \quad (18)$$

trong đó, $\tilde{\Theta}_i = \Theta_i^* - \Theta_i$, Θ_i^* là trọng số lý tưởng và $\Gamma_i > 0$.

Theo [12], đạo hàm 2 vế (18) ta được:

$$\dot{V}(t) = s^T D\dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{D}s + \sum_{i=1}^n \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\Theta}}_i = -s^T (D\dot{q}_r + C\dot{q}_r + G + F - \tau) + \sum_{i=1}^n \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\Theta}}_i \quad (19)$$

Kết hợp (15), (16) và (19) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -s^T F(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta^*) + K_D s + W \operatorname{sgn}(s) + \sum_{i=1}^n \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\Theta}} \\ &= -s^T K_D s - s^T W \operatorname{sgn}(s) - s^T \varepsilon + \sum_{i=1}^n \tilde{\Theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\Theta}} - s_i \tilde{\Theta}_i^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{aligned} \quad (20)$$

trong đó, $\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta^*) - \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) = \Theta^T \xi(\tilde{q}, \dot{q}, \ddot{q})$.

Nếu chọn luật thích nghi như (21) và thay vào (20), ta được:

$$\dot{\tilde{\Theta}}_i = -\Gamma_i^{-1} s_i \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s - s^T W \operatorname{sgn}(s) - s^T \varepsilon \quad (22)$$

Từ (22) ta thấy rằng, khi sai số xấp xỉ hàm ε nhỏ, nếu chọn K_D và W đủ lớn thì $\dot{V}(t) < 0$. Khi $\dot{V}(t) \equiv 0$ và $s \equiv 0$, theo lý thuyết bất biến LaSalle, hệ thống vòng lặp kín sẽ ổn định tiệm cận khi $t \rightarrow \infty$ và $s \rightarrow 0$ [12].

2.3. Minh họa trên mô hình tay máy 2 bậc tự do

2.3.1. Mô hình tay máy 2 bậc tự do

Mô hình tay máy 2-bậc tự do (gọi ngắn gọn là robot, Hình 1), được dùng để mô phỏng kiểm chứng, có phương trình mô tả như sau [12], [13]:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} D_{11}(q_2) & D_{12}(q_2) \\ D_{21}(q_2) & D_{22}(q_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -C_{12}(q_2)\dot{q}_2 & -C_{12}(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ C_{12}(q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} g_1(q_1 + q_2)g \\ g_2(q_1 + q_2)g \end{pmatrix} + F(\ddot{q}, \dot{q}, q) = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

Trong đó:

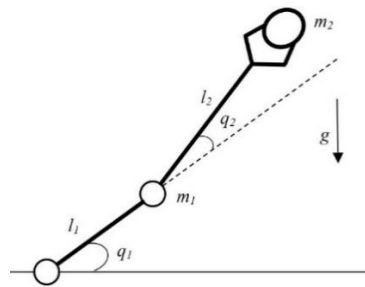
$$D_{11}(q_2) = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos(q_2); \quad D_{12}(q_2) = D_{21}(q_2) = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2)$$

$$D_{22}(q_2) = m_2l_2^2; \quad C_{12}(q_2) = m_2l_1l_2 \sin(q_2)$$

$$g_1 = (m_1 + m_2)l_1 \cos(q_1) + m_2l_2 \cos(q_1 + q_2); \quad g_2 = m_2l_2 \cos(q_1 + q_2); \quad G = [g_1; g_2]$$

với các thông số của robot được cho trong Bảng 1. Đồng thời, mô hình lực ma sát và nhiễu tác động được giả lập như sau:

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 10\dot{q}_1 + 3\operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ 10\dot{q}_2 + 3\operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}; \quad \tau_d = \begin{bmatrix} 0.05 \sin(20t) \\ 0.1 \sin(20t) \end{bmatrix} \quad (24)$$



Hình 1. Tay máy 2 bậc tự do

Bảng 1. Các tham số cánh tay robot 2 bậc tự do [12]

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị	Giá trị
m_1	Khối lượng quy về khớp 2	Kg	1,0
m_2	Khối lượng quy về tải	Kg	1,5
l_1	Chiều dài cánh tay 1	m	1,0
l_2	Chiều dài cánh tay 2	m	0,8
q_1, q_2	Góc quay khớp 1,2	Radian	-
τ_1, τ_2	Mô-men tác động khớp 1,2	Nm	-

Để biểu diễn quỹ đạo robot, gọi (x, y) là tọa độ đầu mút của cánh tay, phương trình biểu diễn quan hệ giữa các góc khớp và tọa độ đầu mút là [13], [14]:

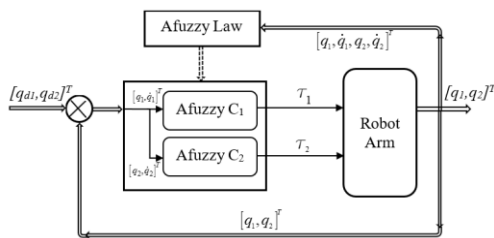
$$x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2); \quad y = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (25)$$

Mỗi khớp cánh tay có bộ truyền động với tỷ số truyền ke . Dưới tác động $[\tau_1, \tau_2]^T$, các khớp nối sẽ lệch góc $[\theta_1, \theta_2]^T$, qua hệ truyền động, góc lệch cánh tay sẽ là $[q_1, q_2]^T$, xác định như sau [14]:

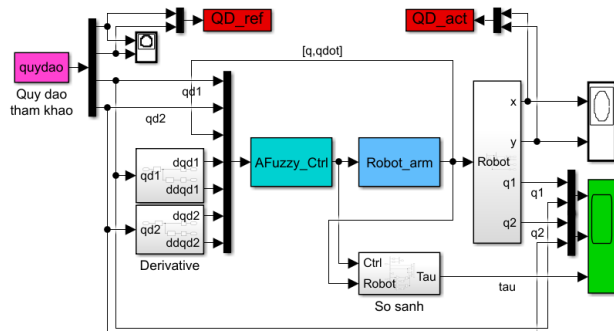
$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_e & 0 \\ k_e & k_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

2.3.2. Bộ điều khiển trượt mờ thích nghi cho robot

Sơ đồ tổng quát của hệ thống điều khiển được mô tả trên Hình 2. Trong đó, mỗi ngõ vào của robot nhận tín hiệu điều khiển từ một bộ điều khiển trượt mờ, với cơ chế thích nghi được xây dựng dựa theo đáp ứng của nó. Hai bộ điều khiển này được thiết kế cơ bản là giống nhau và tích hợp trên MATLAB/Simulink theo sơ đồ Hình 3.



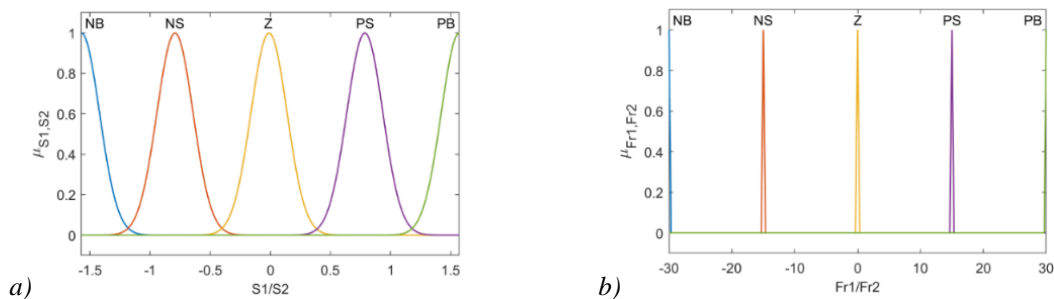
Hình 2. Nguyên tắc chung



Hình 3. Mô hình mô phỏng trên Simulink

Gọi $[q_1, q_2]^T$ là 2 góc khớp của robot (ngõ ra), tương ứng với 2 góc tham khảo là $[q_{d1}, q_{d2}]^T$; $x_1^1 = q_1, \dot{q}_1^T$ và $x_1^2 = q_2, \dot{q}_2^T$ là 2 véc-tơ ngõ vào của 2 mô hình mờ để xấp xỉ hàm $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ gồm các thành phần F_r, τ_d và các yếu tố bất định khác trong (23). Các ngõ vào x_i^1 và x_i^2 đều được mờ hóa bằng 5 tập mờ Gauss $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$ như (27), với $\rho \in [-\pi, \pi]$ và $\sigma = \pi/24$ và được minh họa trên Hình 4a. Tương tự, ngõ ra các bộ xấp xỉ mờ được mờ hóa bằng các tập mờ singleton như Hình 4b.

$$\mu_{A_i^j}(x_i^j) = \exp\left(-\left(\frac{x_i^j - \rho}{\sigma}\right)^2\right) \quad (27)$$

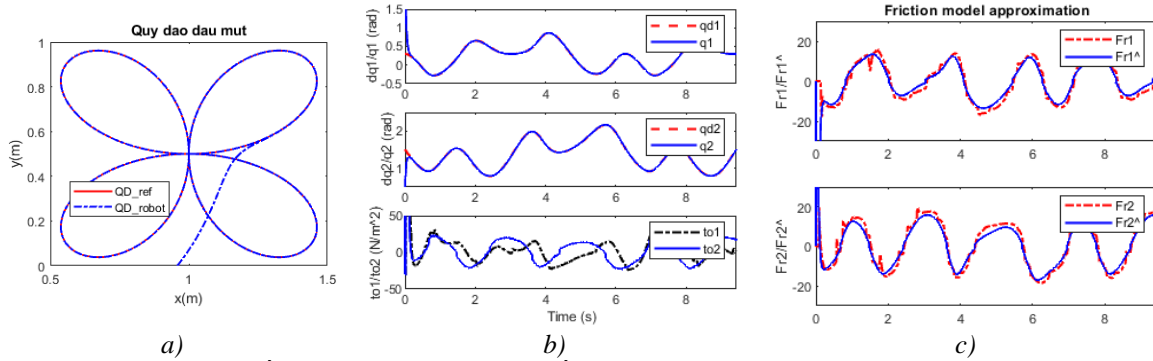


Hình 4. Mờ hóa ngõ vào/ra bộ xấp xỉ mờ: (a) Ngõ vào, (b) Ngõ ra

3. Kết quả và bàn luận

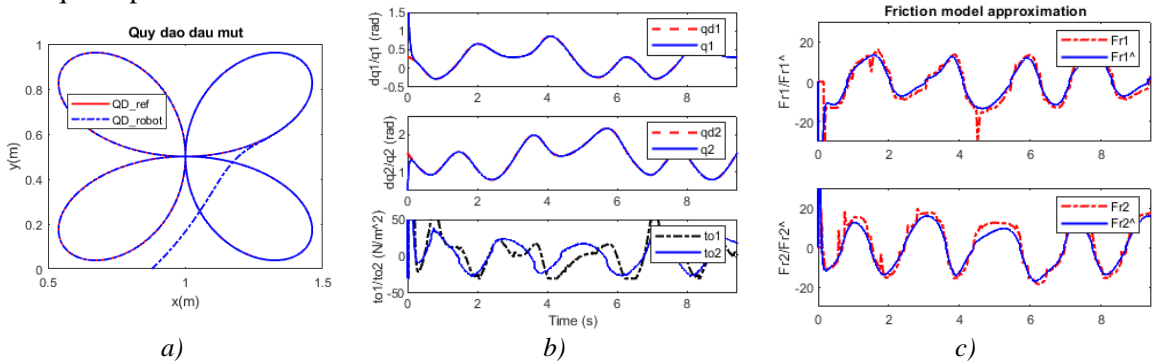
Ta tiến hành mô phỏng và thay đổi thông số tải của robot (Hình 3) để kiểm chứng giải thuật điều khiển. Các tham số được chọn thử - sai cho bộ điều khiển gồm: hệ số mặt trượt $\lambda = [30, 30]^T$, tham số thích nghi $\Gamma = [0.0001, 0.0001]^T$, các tham số của luật trượt gồm $K_D = \text{diag}[400, 400]$ và $W = \text{diag}[1.5, 1.5]$, điều kiện đầu (vị trí “home”) $q_1(0) = 2, q_2(0) = 0.3$ và $\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$.

Hình 5 trình bày kết quả mô phỏng với tham số robot trong Bảng 1. Quỹ đạo của robot bám tốt quỹ đạo tham khảo trên Hình 5a. Hình 5b minh họa đáp ứng và tín hiệu tham khảo của 2 khớp robot, cùng với tín hiệu điều khiển $[\tau_1, \tau_2]^T$. Hình 5c trình bày kết quả xấp xỉ hàm của mô hình mờ.



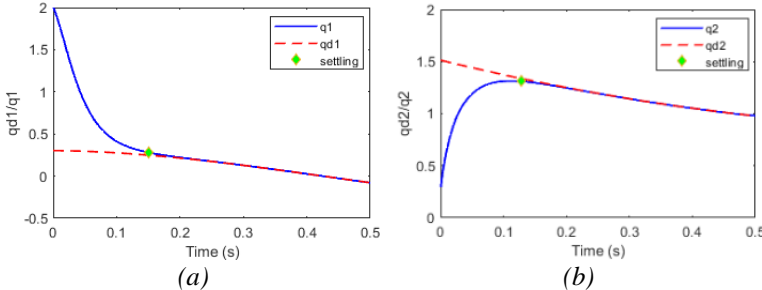
Hình 5. Kết quả mô phỏng với tham số robot trong Bảng 1 ($m_1=1$ kg, $m_2=1,5$ kg)
 a) Quỹ đạo tham khảo/đáp ứng; b) Đáp ứng và tín hiệu điều khiển; c) Xấp xỉ mờ

Hình 6 trình bày kết quả điều khiển khi tải của cánh tay được tăng 100%. Tương tự kết quả trên Hình 5, quỹ đạo của robot bám tốt quỹ đạo tham khảo ở Hình 6a. Hình 6b minh họa đáp ứng và tín hiệu tham khảo của 2 khớp robot, cùng với tín hiệu điều khiển $[\tau_1, \tau_2]^T$. Hình 6c trình bày kết quả xấp xỉ hàm của mô hình mờ.



Hình 6. Kết quả mô phỏng với tham số tải tăng 100% ($m_1=2$ kg, $m_2=3$ kg)
 a) Quỹ đạo tham khảo/đáp ứng; b) Đáp ứng và tín hiệu điều khiển; c) Xấp xỉ mờ

Hình 7 và Bảng 2 trình bày các chỉ tiêu kỹ thuật của hệ điều khiển. Kết quả cho thấy đáp ứng của ngõ ra không xuất hiện vọt lố, thời gian xác lập đạt 0,13-0,15 giây và sai số xác lập đạt 0,0002-0,0012 rad.



Hình 7. Cận đáp ứng của robot: (a) Ngõ ra 1 (b) Ngõ ra 2

Bảng 2. Chỉ tiêu chất lượng

Chỉ tiêu	q_1	q_2
POT	0 (%)	0 (%)
t_{st}	0,15(s)	0,13(s)
E_{ss}	0,0002(rad)	0,0012(rad)

POT: Độ vọt lố; t_{st} : Thời gian xác lập; E_{ss} : Sai số xác lập

Rõ ràng, bộ điều khiển mờ thích nghi cho đáp ứng của tay máy 2 bậc tự do ổn định và bền vững với sự biến thiên của tải. Mã QR-Code ở cuối bài chứa link của clip mô phỏng minh họa.

4. Kết luận

Bài báo trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển mờ thích nghi cho hệ robot. Thành phần khó kiểm soát trong mô hình đối tượng, cũng như trong luật trượt kinh điển là ma sát, nhiễu và các yếu tố bất định khác được xấp xỉ bằng các hệ mờ. Với cơ chế thích nghi được áp dụng, luật điều khiển trượt đủ linh hoạt để thích ứng với sự biến đổi tham số của robot và ổn định theo lý thuyết Lyapunov. Mô hình tay máy 2 bậc tự do được sử dụng để minh họa cho phương pháp thiết kế. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho thấy bộ điều khiển trượt mờ thích nghi hoàn toàn phù hợp để kiểm soát tay máy. Đáp ứng của robot không xuất hiện vọt lố, thời gian xác lập nhỏ và sai số xác lập không đáng kể. Mô phỏng với trường hợp tăng tải của tay máy lên 100% cũng cho thấy quỹ đạo đáp ứng bám tốt quỹ đạo tham khảo và không xuất hiện dao động đáng kể trong tín hiệu điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Lee, D. Nam, and C. H. Park, "A sliding mode controller using neural networks for robot manipulator," *Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks Bruges (Belgium)*, 28-30 April 2004, d-side publi., ISBN 2-930307-04-8, pp. 193-198.
- [2] E. Tunstel, M. Akbarzadeh-T, K. Kumbala, and M. Jamshidi, "Soft computing paradigms for learning fuzzy controllers with applications to robotics," *Proc. of North American Fuzzy Information Processing*, 1996, pp. 355-359, doi: 10.1109/NAFIPS.1996.534759.
- [3] Y.-F. Peng, C.-H. Chiu, W.-R. Tsai, and M.-H. Chou, "Design of an omni-directional spherical robot: using fuzzy control," *Proc. of the Inter. Multiconference of Engineers and Computer Scientists - IMECS 2009*, vol. 1, March 18 - 20, 2009, Hong Kong.
- [4] F.-Y. Hsu and L.-C. Fu, "Intelligent robot deburring using adaptive fuzzy hybrid position/force control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 4, pp. 325-335, 2000.
- [5] Z. Wang, "Adaptive fuzzy system compensation based Model-free control for steer-by-wire systems with uncertainty," *Inter.J. Innov. Computing, Info. and Control*, vol. 17, no. 1, pp. 141-152, 2021.
- [6] T. Yang, N. Sun, and Y. Fang, "Adaptive Fuzzy Control for a Class of MIMO Underactuated Systems With Plant Uncertainties and Actuator Deadzones: Design and Experiments," *IEEE Transactions on Cybernetics*, doi: 10.1109/TCYB.2021.3050475.
- [7] G. Lin, J. Yu, and J. Liu, "Adaptive Fuzzy Finite-Time Command Filtered Impedance Control for Robotic Manipulators," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50917-50925, 2021.
- [8] S. Diao, W. Sun, L. Wang, *et al.*, "Finite-Time Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Systems with Unknown Backlash-Like Hysteresis," *Int. J. Fuzzy System*, 2021.
- [9] A. Karami-Mollaei and H. Tirandaz, "Adaptive Fuzzy Fault Tolerant Control Using Dynamic Sliding Mode," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 360-367, 2018.
- [10] S. D. Nguyen, S. Choi, and T. Seo, "Adaptive fuzzy sliding control enhanced by compensation for explicitly unidentified aspects," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 2906-2920, 2017.
- [11] T. T. Nguyen, C. D. Nguyen, and T. T. Nguyen, "Research and application of Adaptive fuzzy sliding mode controller for electro-hydraulic tracking position servo systems," *Proc. of Vietnam Conference on Control and Automation – VCCA 2015*, 2015, pp. 13-20.
- [12] J. Liu, *Intelligent control design and MATLAB simulation*. Springer, 2018.
- [13] N. M. Ghaleb and A. A. Aly, "Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm," *Inter. J. of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 8-23, 2018.
- [14] C. N. Nguyen and H. N. Duong, "Internal model control using neural networks: Application to SCARA robot," *J. of Sci. & Tech. Development*, VNU Ho Chi Minh City, vol. 4, no. 8 & 9, pp. 65-71, 2001.

