

ỨNG DỤNG MẠNG ANFIS CHO ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT ĐỒNG BỘ TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG 3 BẬC TỰ DO

APPLYING ANFIS NETWORKS TO SYNCHRONIZED SLIDING MODE CONTROL OF 3-DOF PLANAR PARALLEL ROBOTIC MANIPULATORS

Dương Tấn Quốc¹, Nguyễn Tấn Hòa², Lê Tiến Dũng^{3*}

¹Trường Đại học Duy Tân; duongtanquoc@dtu.edu.vn

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng; tanhoa75@gmail.com

^{3*}Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; ltdung@dut.udn.vn

Tóm tắt - Bài báo đề xuất một phương pháp sử dụng mạng ANFIS trong việc tự động điều chỉnh tham số của bộ điều khiển trượt đồng bộ, được ứng dụng trong điều khiển tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR. Thuật toán điều khiển trượt đồng bộ được xây dựng dựa trên thuật toán điều khiển trượt truyền thống và các giá trị sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo được lấy từ bộ điều khiển đồng bộ. Sau đó thuật toán đề xuất ứng dụng mạng ANFIS kết hợp từ thuật toán điều khiển mờ và mạng nơ ron giúp tự động điều chỉnh tham số của bộ điều khiển trượt đồng bộ giúp bù nhanh được các tác động từ tham số bất định, lực ma sát và các nhiễu ngoại lực giúp hệ thống luôn bám sát quỹ đạo đặt. Kết quả của thuật toán đề ra được mô phỏng so sánh trên phần mềm MATLAB/SIMULINK với đầy đủ các trường hợp chịu tác động ngoại lực và tải khi làm việc.

Từ khóa - Tay máy robot song song phẳng; mạng ANFIS; trượt đồng bộ; sai số đồng bộ; sai số đồng bộ chéo.

1. Đặt vấn đề

Tay máy robot song song bao gồm cả khâu chấp hành cuối có thể coi như một hệ thống cơ khí có động học khép kín. Chính vì vậy, nó mang nhiều ưu điểm vượt trội hơn khi so sánh với tay máy nối tiếp như độ chính xác, độ bền và khả năng tải lớn. Bên cạnh đó, nó cũng có một số điểm hạn chế, đó là có các cấu hình kỳ dị và mô hình động lực học phức tạp đòi hỏi các thuật toán điều khiển phải ngày càng linh hoạt hơn [1].

Thời gian gần đây, đã có nhiều nghiên cứu giải quyết các vấn đề về cấu hình kỳ dị cũng như các thuật toán điều khiển của các loại tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do, trong đó thường gặp nhất là loại 3-RRR (Revolute – Revolute – Revolute) được nêu ra trong [2]. Đối với thuật toán điều khiển trượt (SMC - Sliding Mode Control) [3] và điều khiển tính mô men (CTC - Computed Torque Control) [4] đã đem lại kết quả điều khiển tốt. Tuy nhiên, các phương pháp này được tính toán tương đối phức tạp khi sử dụng mạng nơ ron và tự động điều chỉnh tham số online khi hệ thống làm việc dẫn đến khó khăn khi thực hiện mô hình. Trong bài báo [5], Shang đã trình bày thuật toán điều khiển đồng bộ nhưng chưa có cách giải quyết việc tự động điều chỉnh các tham số của bộ điều khiển khi bị tác động bởi nhiễu ngoại lực hoặc các tham số bất định giúp hệ thống bám tốt hơn quỹ đạo đặt. Ren [6], Sun [7-9] đã trình bày thuật toán điều khiển thích nghi cùng sai số đồng bộ, tuy nhiên thuật toán này cùng việc dự đoán để bù lực tính toán giúp giảm sai số chỉ được áp dụng cho các cơ cấu hoặc các tay máy robot nối tiếp kết hợp với nhau hoặc trên hệ trục tọa độ Cartesian của khâu chấp hành cuối, chứ chưa được đề cập đối với mô hình của tay

Abstract - The paper proposes a method using ANFIS network for automatically adjusting the parameters of the synchronous sliding mode controller, which is applied to 3 degree-of-freedom planar parallel robotic manipulator 3-RRR. The proposed synchronous sliding mode control algorithm is based on the traditional sliding mode control algorithm and synchronous error, cross-coupling error is obtained from the synchronous controller. The algorithm proposes an ANFIS network application combining the fuzzy control and neural network algorithms to automatically adjust the parameters of the synchronous sliding mode controller to compensate for the effects of uncertainty parameters, Friction and external disturbance to keep the system always track to the desired trajectory. The result of the proposed algorithm is simulated on MATLAB/SIMULINK with much external force and load when working.

Key words - Planar parallel robotic manipulators; ANFIS; Synchronous sliding mode; Synchronous error; Cross-coupling error.

máy robot song song phẳng. Trong [10], Qi cũng đã thành công khi ứng dụng bộ điều khiển mờ kết hợp với điều khiển trượt trong điều khiển tay máy robot bám tốt giá trị đặt. Tuy nhiên, hệ thống chưa xét hết các tác động mang tính phi tuyến của nhiễu ngoại lực và các tham số bất định.

Bộ điều khiển đồng bộ được nêu ra bởi Liu [11] dù đem lại hiệu quả điều khiển tốt nhưng cấu trúc đơn giản cũng sẽ không hiệu quả khi hệ thống luôn chịu sự tác động của nhiễu ngoại lực và các tham số bất định. Những tác động này sẽ làm hệ thống bị lệch ra khỏi quỹ đạo đặt hoặc khi kết hợp với bộ điều khiển trượt, có thể xảy ra hiện tượng mà các bộ điều khiển trượt thường mắc phải đó là hiện tượng “chattering”. Hiện tượng này xảy ra khi bộ điều khiển trượt đồng bộ không thể thay đổi các tham số của nó kịp thời với sự thay đổi của các tham số mô hình, hay khi hệ thống bị tác động bởi ngoại lực. Lúc này lực kéo quỹ đạo hệ thống về quỹ đạo đặt sẽ đổi dấu liên tục, do đó hệ thống dao động mạnh mẽ quanh quỹ đạo đặt.

Để giảm hiện tượng đó thì bộ điều khiển mờ kết hợp với mạng nơ ron ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) như được trình bày trong [12], để tự động cập nhật tham số trong bộ điều khiển trượt đồng bộ giúp bộ điều khiển trượt đồng bộ được tự động thay đổi giá trị đầu ra phù hợp với sự thay đổi của sai số đồng bộ, điều này giúp bộ điều khiển sẽ tự động bù các lực do tác động bên ngoài. Làm bộ điều khiển trượt đồng bộ kết với mạng ANFIS đem lại hiệu quả tốt hơn, giúp hệ thống luôn bám sát quỹ đạo đặt. Tuy nhiên, để đạt được hiệu quả như vậy tác giả đã xây dựng mạng ANFIS với năm lớp (Layer), điều này thực sự phức tạp và tốn nhiều thời gian trong tính toán cũng như thực hiện mô hình, dẫn đến đòi hỏi cấu hình phần cứng phải rất mạnh mẽ và tốn kém.

Trong bài báo này, thuật toán đề xuất được xây dựng dựa trên thuật toán điều khiển trượt đồng bộ. Sau đó, ứng dụng mạng ANFIS được xây dựng chỉ với một lớp giúp dễ dàng tính toán các thông số nhằm tối ưu tham số của bộ điều khiển trượt đồng bộ giúp đem lại hiệu quả cao hơn. Thuật toán được ứng dụng trên tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do loại 3-RRR. Kết quả của thuật toán đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/SIMULINK.

2. Mô hình động lực học

Đã có nhiều phương pháp để xây dựng mô hình động lực học được đề ra như phương pháp DH (Denavit & Hartenberg) trong [13] nhưng tương đối phức tạp. Bên cạnh đó, các mô hình được xây dựng theo phương pháp hình học [2, 4] đơn giản hơn và được sử dụng trong bài báo này. Mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR theo không gian khớp chủ động được trình bày theo phương trình sau:

$$\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \Delta \tau = \tau_a \quad (1)$$

Trong đó:

- τ_a là véc tơ lực tác động vào khớp chủ động;
- $\dot{\mathbf{q}}_a, \ddot{\mathbf{q}}_a$ là véc tơ vận tốc và gia tốc của khớp chủ động;
- $\mathbf{M}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_t \mathbf{W} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính;
- $\mathbf{C}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_t \dot{\mathbf{W}} + \mathbf{W}^T \mathbf{C}_t \mathbf{W} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận lực Coriolis và lực ly tâm;
- $\Delta \tau$ là véc tơ chứa các thành phần lực ma sát và các nhiễu ngoại lực, với $\Delta \tau = \mathbf{F}_a + \mathbf{d}(\mathbf{t})$, $\mathbf{F}_a$ là lực ma sát và $\mathbf{d}(\mathbf{t})$ là thành phần nhiễu ngoại lực.

Các ma trận $\mathbf{M}_t$; $\mathbf{C}_t$; $\mathbf{W}$ được suy ra từ các ma trận Jacobian được mô tả trong [2, 4].

3. Điều khiển trượt truyền thống

Bộ điều khiển trượt truyền thống đòi hỏi trước tiên phải thiết kế mặt trượt dựa vào sai số tại các khớp chủ động và được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \lambda \mathbf{e} = \dot{\mathbf{q}}_a - (\dot{\mathbf{q}}_{da} - \lambda \mathbf{e}) = \dot{\mathbf{q}}_a - \dot{\mathbf{q}}_{ar} \quad (2)$$

Trong đó, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ với $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ là những hằng số xác định dương xác định mặt trượt

Từ đó suy ra thêm các giá trị $\dot{\mathbf{q}}_{ar}$ và đạo hàm của nó:

$$\dot{\mathbf{q}}_{ar} = \dot{\mathbf{q}}_{da} - \lambda \mathbf{e} \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ar} = \ddot{\mathbf{q}}_{da} - \lambda \dot{\mathbf{e}} \quad (4)$$

Bước tiếp theo để thiết kế bộ điều khiển trượt truyền thống là thiết kế luật điều khiển theo công thức:

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 \quad (5)$$

Với $\tau_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là lực tác động liên tục để giữ cho quỹ đạo luôn bám sát mặt trượt và $\tau_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là lực tác động không liên tục để đưa quỹ đạo chuyển động quay về mặt trượt khi bị vượt ra ngoài.

Các lực này được phân tích khi hệ thống bỏ qua ma sát và các nhiễu ngoại lực như sau:

$$\tau_1 = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar} + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_{ar} \quad (6)$$

$$\tau_2 = -\mathbf{A} \mathbf{s} - \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}) \quad (7)$$

Trong đó $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$, $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, a_3)$

với $k_i, a_i (i = 1, 2, 3)$ là những hằng số xác định dương, $\text{sign}(\mathbf{s})$ là hàm dấu của mặt trượt.

Bước cuối cùng là thay công thức (6), (7) vào (5), sẽ được bộ điều khiển trượt truyền thống cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR như phương trình:

$$\tau_a = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar} + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_{ar} - \mathbf{A} \mathbf{s} - \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}) \quad (8)$$

Bộ điều khiển này đã được chứng minh trong [14] với hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M}_a \mathbf{s} \quad (9)$$

Và giá trị của các tham số khác được chọn:

$$k_i \geq |\Delta \tau_i|, i = (1, 2, 3) \quad (10)$$

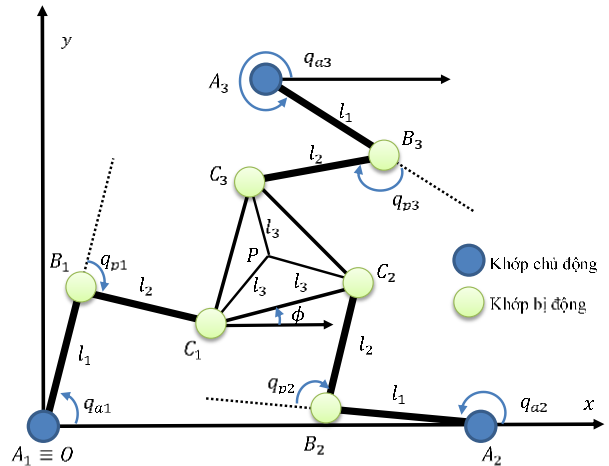
Với $|\Delta \tau_i|$ là độ lớn của lực tác động vào hệ thống để hệ thống tiệm cận về ổn định. Từ đó có thể chứng minh được:

$$\dot{V} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{A} \mathbf{s} \leq 0 \quad (11)$$

Như vậy, hàm Lyapunov chọn như trên đã chứng minh được hệ thống ổn định với các tham số như trình bày. Tuy nhiên, hàm sign trong phương trình (8) là hàm dấu sẽ thay đổi liên tục để đưa quỹ đạo về mặt trượt, điều đó làm cho bộ điều khiển có hiện tượng dao động liên tục, tức hiện tượng “chattering”. Hiện tượng làm cho cơ cấu chấp hành khó đáp ứng nổi nếu tần số dao động quá lớn dẫn đến chất lượng điều khiển của bộ điều khiển trượt truyền thống không được tốt. Để giải quyết vấn đề này, hàm sign sẽ được thay thế bằng hàm sat như công thức sau:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\delta}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\delta} & |s| \leq \delta \\ \text{sign}(s) & |s| > \delta \end{cases} \quad (12)$$

Với δ là độ lớn của biên độ lực tác động.



Hình 1. Tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR

4. Điều khiển trượt truyền thống ứng dụng mạng ANFIS

Bài báo đề xuất một phương pháp tinh chỉnh tham số hệ thống một cách tự động bằng mạng ANFIS như mô hình trong Hình 2.

Bộ điều khiển đề xuất được xây dựng từ các sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo được lấy từ nguyên lý của bộ điều khiển đồng bộ vốn có rất nhiều ưu điểm khi dùng với các loại tay máy robot song song [1]. Sau đó, ứng dụng vào bộ điều khiển trượt truyền thống tạo nên bộ điều khiển trượt

đồng bộ, bộ điều khiển đề xuất có sai số đồng bộ và đạo hàm của nó tại các khớp chủ động như sau:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = e_1 - e_2 \\ \epsilon_2 = e_2 - e_3 \\ \epsilon_3 = e_3 - e_1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \dot{e}_1 - \dot{e}_2 \\ \dot{\epsilon}_2 = \dot{e}_2 - \dot{e}_3 \\ \dot{\epsilon}_3 = \dot{e}_3 - \dot{e}_1 \end{cases} \quad (14)$$

Lực tác động sẽ đưa sai số vị trí $e_i = 0$ cùng lúc, để đưa sai số đồng bộ của khớp thứ $(i - 1), i = (1,2,3)$ về không nhờ sai số đồng bộ chéo được định nghĩa theo [11]:

$$\mathbf{e}^* = \mathbf{e} + \Phi \cdot \boldsymbol{\epsilon} \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{e}}^* = \dot{\mathbf{e}} + \Phi \cdot \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (16)$$

Với $\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3]^T$, $\mathbf{e}^*$ là sai số đồng bộ chéo, Φ là ma trận xác định dương giúp cân bằng giữa sai số vị trí và sai số đồng bộ.

Từ các giá trị sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo, bộ điều khiển trượt đồng bộ được suy ra từ hàm trượt như sau [3, 4]:

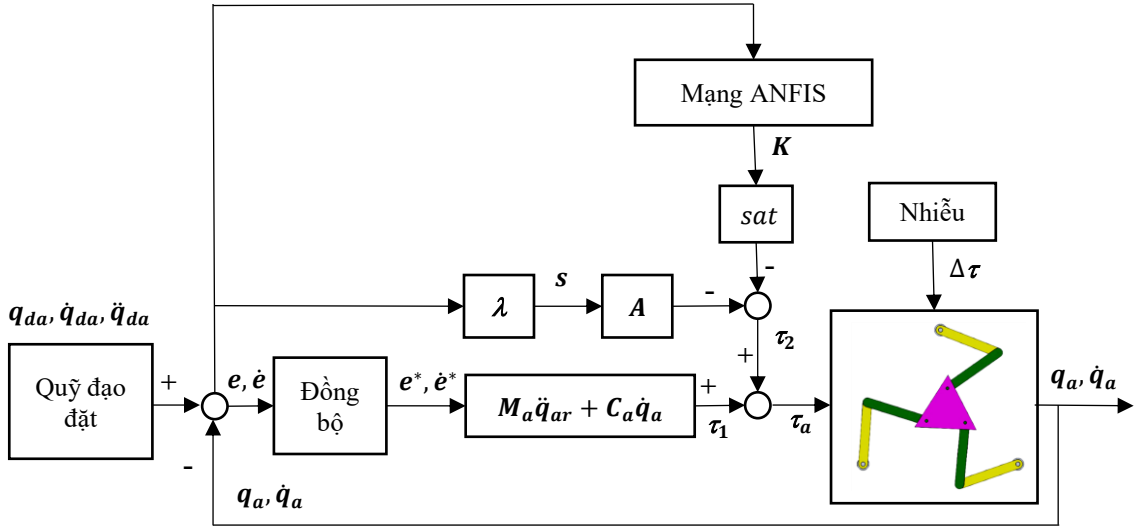
$$\mathbf{s}^* = \dot{\mathbf{e}}^* + \lambda \mathbf{e}^* = \dot{\mathbf{q}}_a - \dot{\mathbf{q}}_{ar}^* \quad (17)$$

$$\text{Với } \dot{\mathbf{q}}_{ar}^* = \dot{\mathbf{q}}_{da} - \lambda \mathbf{e}^*.$$

Từ đó, bộ điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR khi bỏ qua lực ma sát và các nhiễu ngoại lực được viết lại như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_a = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar}^* + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_{ar}^* - \mathbf{A} \mathbf{s}^* - \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}^*) \quad (18)$$

$$\text{Với } \ddot{\mathbf{q}}_{ar}^* = \ddot{\mathbf{q}}_{da} - \lambda \dot{\mathbf{e}}^*$$



Hình 2. Bộ điều khiển trượt đồng bộ ứng dụng mạng ANFIS

Phương trình (18) là bộ điều khiển trượt đồng bộ sử dụng các sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo kết hợp với thuật toán điều khiển trượt truyền thống. Có thể dễ dàng nhận thấy, hằng số xác định dương $k_i (i = 1,2,3)$ trong ma trận $\mathbf{K}$ là các hằng số nên làm hệ thống hay dẫn đến hiện tượng “chattering”. Để linh hoạt trong việc tinh chỉnh tham số k_i , bộ điều khiển đề xuất sử dụng mạng ANFIS, đây là bộ điều khiển kết hợp giữa mạng nơ ron và bộ điều khiển mờ với đầu vào là sai số $\mathbf{e}^*$ và đạo hàm sai số $\dot{\mathbf{e}}^*$; đầu ra là $k_i (i = 1,2,3)$.

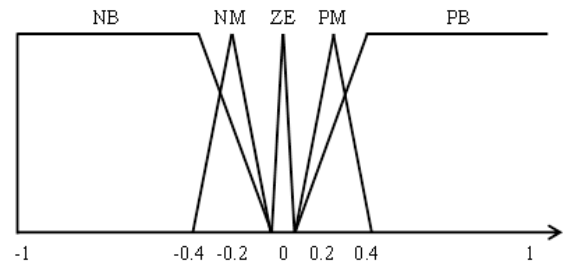
Việc tác động vào bộ điều khiển thông qua tham số k_i đã được chứng minh với việc chọn hàm Lyapunov tương tự công thức (9).

Các hàm liên thuộc của bộ điều khiển mờ truyền thống được xây dựng mô tả với 5 đầu vào của sai số $\mathbf{e}^*$ (NB, NM, ZE, PM, PB) đại diện cho các giá trị (negative big – âm lớn, negative medium – âm trung bình, zero – không, positive medium – dương trung bình, positive big – dương lớn) và hai giá trị của đạo hàm sai số $\dot{\mathbf{e}}^*$ (N, P) đại diện cho (negative – âm và positive – dương) như Hình 3 và Hình 4. Giá trị của đầu ra $k_i (i = 1,2,3)$ và các luật điều khiển được xây dựng cùng công thức tính PROD-PROBOR như Hình 5.

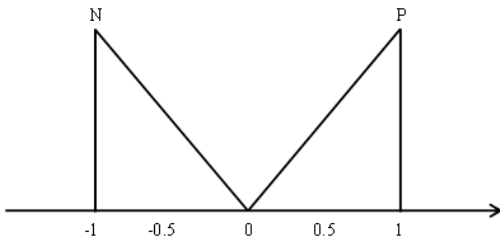
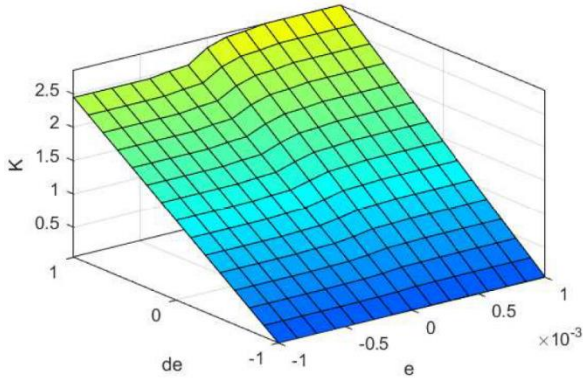
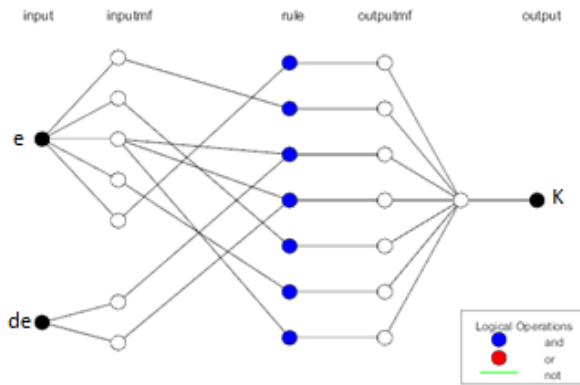
Cấu trúc của mạng ANFIS được xây dựng có một lớp với bảy luật điều khiển linh hoạt như Hình 6. Đầu tiên dữ

liệu huấn luyện được lấy từ bộ điều khiển mờ truyền thống. Sau đó, được huấn luyện theo phương pháp kết hợp giữa phương pháp lan truyền ngược và phương pháp bình phương cực tiểu, với 3 chu kỳ huấn luyện, sai số cuối cùng đạt được thông qua giao diện ANFIS-GUI trong MATLAB/SIMULINK là 0,0276007, ngôn ngữ mờ được sử dụng là Sugeno.

Như vậy, thông qua việc ứng dụng mạng ANFIS vào bộ điều khiển trượt đồng bộ, tham số đầu ra $k_i (i = 1,2,3)$ đã được tự động điều chỉnh phù hợp với từng trạng thái hệ thống, giúp đưa hệ thống luôn bám sát giá trị đặt. Điều này giúp thành phần τ_2 sẽ luôn thay đổi giá trị để bù vào sai số của hệ thống do các tác động của lực ma sát và nhiễu ngoại lực.



Hình 3. Hàm liên thuộc của sai số $\mathbf{e}$

Hình 4. Hàm liên thuộc của sai số e Hình 5. Đầu ra của tham số k_i ($i = 1,2,3$)

Hình 6. Cấu trúc của điều khiển ANFIS

5. Mô phỏng kiểm chứng

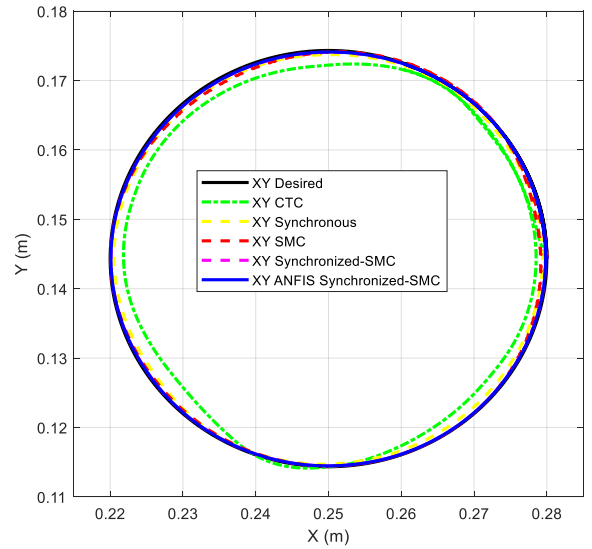
Kết quả mô phỏng để kiểm chứng kết quả của bộ điều khiển đề xuất được thực hiện với tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR với mô hình cơ khí được xây dựng trên phần mềm SOLIDWORKS.

Các tham số cơ khí với kích thước: chiều dài các thanh $l_1 = 0.2$ (m); $l_2 = 0.2$ (m); $l_3 = 0.0722$ (m); khoảng cách giữ hai khớp chủ động là 0.5 (m). Khối lượng và mô men quán tính của thanh l_1, l_2 là $m_1 = 0.503$ (kg), $m_2 = 0.551$ (kg) và $I_1 = 0.002$ (kg.m²), $I_2 = 0.0025$ (kg.m²). Khâu chấp hành cuối có khối lượng và mô men quán tính là $m_p = 0.171$ (kg), $I_p = 0.000565$ (kg.m²).

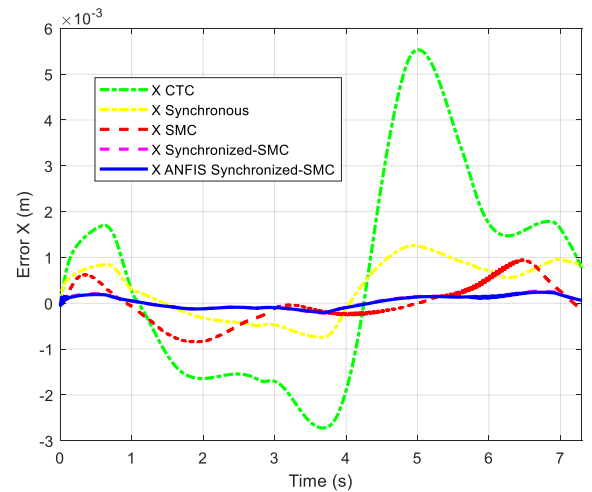
Quỹ đạo đặt là hình tròn có tâm tại tọa độ $[0.25; 0.1443]$ (m) với bán kính 0.03 (m) và có góc quay ban đầu là $\phi_p = 0^\circ$. Tọa độ điểm xuất phát ban đầu của khâu chấp hành cuối là $[0.28; 0.1443]$ (m). Lực ma sát Coulomb được định nghĩa trong [3,4] theo công thức:

$$\mathbf{F}_a = F_{ci} \text{sign}(\dot{\mathbf{q}}_a) + F_{vi} \dot{\mathbf{q}}_a \quad (19)$$

$$\text{Với } \mathbf{F}_a = [F_{a1}, F_{a2}, F_{a3}]^T; F_{ci} = 0.02; F_{vi} = 0.02$$



Hình 7. Kết quả điều khiển bám quỹ đạo đặt

Hình 8. (a) So sánh sai số theo trục x

Tại thời điểm $t = 1$ (s) để thể hiện khả năng mang tải của tay máy robot trong quá trình làm việc, khối lượng và mô men quán tính của khâu chấp hành cuối được tăng lên gấp 10 lần giá trị ban đầu. Ngoài ra, tay máy robot còn chịu tác động nhiều ngoại lực, các thông số này được chọn theo phương trình biến thiên liên tục, theo công thức $d(t) = d_1(t) + d_2(t)$. Với $d_1(t) = [d_a, d_a, d_a]^T$; $d_a = 0.001$ tại thời điểm $t = 2$ (s) và $d_2(t) = [d_b, d_b, d_b]^T$; $d_b = 0.03 \cos(2t)$ bắt đầu tại thời điểm $t = 0$ (s). Khâu chấp hành cuối của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR được cho chạy theo quỹ đạo đặt với phương trình:

$$\begin{cases} x_a = 0.25 + 0.03 \cos(t) \\ y_a = \frac{0.5\sqrt{3}}{6} + 0.03 \sin(t) \end{cases} \quad (20)$$

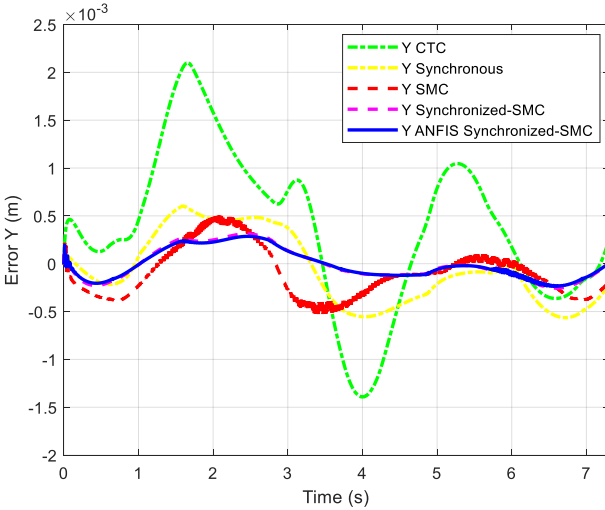
Để thể hiện ưu điểm của bộ điều khiển đề xuất, bài báo so sánh với các bộ điều khiển:

- Bộ điều khiển tính mô men truyền thống (CTC) như công thức:

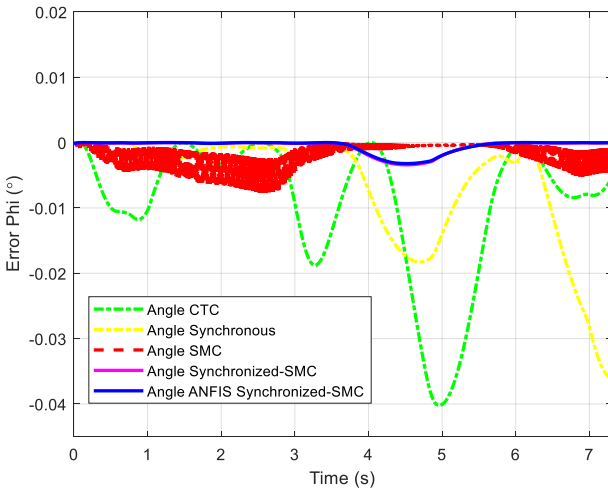
$$\boldsymbol{\tau}_a = \mathbf{M}_a(\ddot{\mathbf{q}}_{da} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{F}_a \quad (21)$$

Trong đó, các tham số được chọn của thuật toán PD là $K_d = 20 \times I^{3 \times 3}$, $K_p = 50 \times I^{3 \times 3}$.

- Bộ điều khiển tính mô men đồng bộ (Synchronous), tương tự bộ điều khiển CTC truyền thống nhưng có sử dụng sai số đồng bộ và sai số đồng bộ chéo.
- Bộ điều khiển trượt truyền thống (SMC) sử dụng sai số như công thức (8) với các tham số $K = 1.1 \times I^{3 \times 3}$, $\lambda = 7 \times I^{3 \times 3}$, $\partial = [0.5, 0.5, 0.5]^T$.
- Bộ điều khiển trượt đồng bộ (Synchronized-SMC) như công thức (18) với các tham số tương tự bộ điều khiển trượt truyền thống nhưng có sử dụng sai số đồng bộ và sai số đồng bộ chéo.



Hình 9. So sánh sai số theo trục y



Hình 10. So sánh sai số góc quay khâu chấp hành cuối

Kết quả mô phỏng và các sai số của các bộ điều khiển được trình bày từ Hình 7 đến Hình 10 cho thấy bộ điều khiển đề xuất cho kết quả bám tốt hơn cả. Bộ điều khiển tính mô men truyền thống cho sai số lớn nhất so với các bộ điều khiển khác vì nó vốn không hiệu quả đối với điều khiển các loại tay máy robot song song. Khi sử dụng các sai số đồng bộ và sai số đồng bộ chéo, thì bộ điều khiển tính mô men đồng bộ cho hiệu quả tốt hơn một chút. Với bộ điều khiển trượt truyền thống, khi hệ thống bị tác động bởi nhiễu

và tham số bất định có thể thấy hiện tượng dao động thể hiện rõ trên hình vẽ. Điều này có được là nhờ ưu điểm của mạng ANFIS đã được sử dụng để điều chỉnh tham số của ma trận K một cách tối ưu nhất. Có thể nói, sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo kết hợp với bộ điều khiển trượt truyền thống đem lại kết quả rất tốt bám quỹ đạo đặt. Hơn nữa bộ điều khiển ANFIS sẽ giúp việc điều chỉnh tham số làm cho lực tác động được linh hoạt hơn, giảm được hoàn toàn hiện tượng “chattering”, giúp thích nghi nhanh với sự thay đổi của sai số và bù vào một cách nhanh chóng các lực làm cho quỹ đạo của hệ thống lệch khỏi quỹ đạo đặt.

Bảng 1. So sánh sai số RMSE theo trục x và trục y

Bộ điều khiển	$E_{RMSE}(m)$
Bộ điều khiển CTC	0.00252343
Bộ điều khiển tính mô men đồng bộ	0.00079401
Bộ điều khiển trượt truyền thống (SMC)	0.00052668
Bộ điều khiển trượt đồng bộ	0.00021719
Bộ điều khiển đề xuất	0.00020295

Bảng 2. So sánh sai số RMSE theo góc quay của khâu chấp hành cuối

Bộ điều khiển	$E_{\phi RMSE}(^{\circ})$
Bộ điều khiển CTC	0.01389691
Bộ điều khiển tính mô men đồng bộ	0.01222221
Bộ điều khiển trượt truyền thống (SMC)	0.00292921
Bộ điều khiển trượt đồng bộ	0.00115698
Bộ điều khiển đề xuất	0.00109898

Để thấy rõ hơn hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, sai số trung bình bình phương cực tiểu (RMSE - Root Mean Square Error) được đưa ra để tính toán theo công thức [5]:

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (e_x^2(j) + e_y^2(j))} \quad (22)$$

$$E_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e_{\phi}^2(j)} \quad (23)$$

Với E là sai số theo trục x và y; E_{ϕ} là sai số của góc quay của khâu chấp hành cuối; $e_x(j)$, $e_y(j)$ là sai số theo trục x và trục y; $e_{\phi}(j)$ là sai số góc quay của khâu chấp hành cuối.

Từ kết quả trong Bảng 1 và Bảng 2 cho thấy, sai số RMSE của bộ điều khiển đề xuất cho kết quả sai số ít nhất, sai số này giảm được một ít so với bộ điều khiển trượt truyền thống. Tuy nhiên, so sánh với các bộ điều khiển khác nó giảm được sai số rất lớn. Điều này có thể được lý giải nhờ sử dụng sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo, cộng thêm ứng dụng mạng ANFIS vào trong bộ điều khiển trượt, giúp đem lại kết quả bám rất tốt quỹ đạo đặt. Các lực tác động được bù vào đáp ứng nhanh khi hệ thống bị tác động bởi nhiễu và các tham số bất định.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày về ứng dụng mạng ANFIS vào bộ điều khiển trượt đồng bộ. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/SIMULINK đã chứng minh được hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Bộ điều khiển trượt truyền thống vốn

đem lại hiệu quả tương đối tốt, nhưng bị hiện tượng “chattering”. Tuy nhiên, khi kết hợp với giá trị của bộ điều khiển đồng bộ, và ứng dụng mạng ANFIS tự động điều chỉnh tham số thì bộ điều khiển đề xuất đem lại hiệu quả rất tốt, phù hợp với các loại tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do 3-RRR.

Lời ghi nhận: Bài báo là kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Bộ Giáo dục & Đào tạo mã số KYTH-17 năm 2017, tên đề tài “Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Merlet J.P., *Parallel Robots*, Springer, 2006.
- [2] Dương Tấn Quốc, Lê Tiến Dũng, “Phân tích động học và các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - ĐH Đà Nẵng*, Số 5 (114), tr. 76-80, 2017.
- [3] T. D. Le, H. J. Kang, Y. S. Suh, “Chattering-Free Neuro-Sliding Mode Control of 2-DOF Planar Parallel Manipulators”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. No. Robot Arm issue, pp. 1-15, 2013.
- [4] Q. D. Le, H. J. Kang, T. D. Le, “Adaptive Extended Computed Torque Control of 3 DOF Planar Parallel Manipulators Using Neural Network and Error Compensator”. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9773, pp. 437-448, 2016.
- [5] W. Shang, S. Cong, S. Jiang, “Synchronization control of a parallel manipulator with redundant actuation in the task space”, *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 26, no. 4, pp. 432-440, 2011.
- [6] L. Ren, J. K. Mills, D. Sun, “Adaptive Synchronization Control of a Planar Parallel Manipulator”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, pp. 976-979, 2006.
- [7] Sun D, Mills J.K., “Adaptive synchronized control for coordination of multi robot assembly tasks”. *IEEE Trans Robot Autom*, 18(4), pp. 498-510, 2002.
- [8] Sun D, Li S, Gao F, Zhu Q. “Robust adaptive terminal sliding mode-based synchronised position control for multiple motion axes systems”. *IET Control Theory Appl*, vol. 3, no. 1, pp. 136-150, 2009.
- [9] Sun D, “Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control”. *Automatica* 39, pp. 997-1005, 2003.
- [10] Qi Z., McInroy J. and Jafari F. “Trajectory Tracking with Parallel Robots Using Low Chattering, Fuzzy Sliding Mode Controller”. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 48, pp. 333-356, 2007.
- [11] L. Liu, Q. Zhu, L. Cheng, Y. Wang, D. Zhao, *Applied Methods and Techniques for Mechatronic Systems*. Springer, 2014.
- [12] L. D. Khoa, D. Q. Truong, K. K. Ahn, “Synchronization controller for a 3-R planar parallel pneumatic artificial muscle (PAM) robot using modified ANFIS algorithm”, *Mechatronics – Elsevier*, vol. 23, pp. 462-479, 2013.
- [13] S. Kütçük, “Inverse Dynamics of RRR Fully Planar Parallel Manipulator Using DH Method”, InTech, 2012.
- [14] L.T. Dũng, Đ.Q. Vinh, D.T. Quốc, “Thiết kế thuật toán điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động”, *Hội nghị - Triển lãm Quốc tế lần thứ 4 về Điều khiển và Tự động hóa VCCA-2017*, tr. 52, 2017.

(BBT nhận bài: 27/11/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 22/01/2019)