

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI PID PHÂN SỐ SỬ DỤNG LOGIC MỜ CHO TAY MÁY ROBOT DESIGN ADAPTIVE FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER USING FUZZY LOGIC FOR ROBOT MANIPULATOR

Vũ Thị Yến¹, Phạm Văn Cường^{1*}, Nguyễn Đức Hải²

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, ²Trường Đại học Sao Đỏ

Ngày nhận bài: 27/03/2024, Ngày chấp nhận đăng: 27/06/2024, Phản biện: PGS. TS Nguyễn Văn Tiềm

Tóm tắt:

Bài báo này đưa ra bộ điều khiển thích nghi PID phân số trên cơ sở điều khiển mờ (AFOF) cho robot nhằm nâng cao độ chính xác trong điều khiển bám. Robot là đối tượng phi tuyến, có cấu trúc bất định và trong quá trình làm việc luôn chịu tác động của nhiễu. Bộ điều khiển đề xuất là sự kết hợp ưu điểm của bộ điều khiển mờ thích nghi và bộ điều khiển trượt giúp hệ thống tác động nhanh và chính xác. Ngoài ra, chất lượng của bộ điều khiển cũng được kiểm soát tốt hơn nhờ việc kết hợp tính linh hoạt của bộ điều khiển PID phân số. Luật thích nghi được thiết kế bằng việc lựa chọn hàm Lyapunov phù hợp để hệ thống đạt được khả năng ổn định toàn bộ của bộ điều khiển. Ngoài ra, tính ổn định và bền vững cũng như hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất được kiểm chứng thông qua kết quả mô phỏng trên tay máy robot 2 bậc tự do.

Từ khóa:

Điều khiển PID phân số; điều khiển thích nghi; điều khiển trượt; điều khiển mờ; tay máy robot.

Abstract:

This paper presents an Adaptive Fractional Order PID controller based on Fuzzy Logic (AFOF) for robot manipulators to improve accuracy of the tracking control. Robots are nonlinear system with uncertain model, and in the working process, they are always affected by noise. The proposed controller is combined with the advantages of adaptive fuzzy logic and sliding mode control to control system effect fast, and accurately. Furthermore, the quality of the control system is better controlled by combining the flexibility of Fractional Order PID. The adaptive laws are designed based on selecting a suitable Lyapunov function to the control system obtain the global stability. In addition, the stability and robustness as well as the the performance of the proposed controller are proved through simulation results on two link robot manipulators.

Keywords:

Fractional Order PID control; Adaptive control; Sliding mode control; Fuzzy logic controller; Robot manipulators

1. GIỚI THIỆU

Robot là đối tượng MIMO có tính phi tuyến mạnh, các tham số bất định và trong quá trình làm việc luôn có nhiễu bên ngoài tác động. Để nâng cao hiệu suất làm việc của robot, bên cạnh việc nâng cao độ chính xác trong các bước lắp ráp cơ khí,

việc điều khiển cũng đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện hiệu suất làm việc. Vì vậy, thiết kế được một bộ điều khiển phù hợp là một bài toán khó cần giải quyết. Để giải quyết vấn đề này, đã có nhiều giải pháp được nghiên cứu và đề xuất trong [1-8], như bộ điều khiển PID, điều khiển

bền vững, điều khiển thích nghi,... Bộ điều khiển thích nghi là phương pháp tổng hợp bộ điều khiển với mục đích giữ cho hệ thống luôn được ổn định, ngay cả khi trong quá trình làm việc có sự thay đổi cấu trúc, các tham số bất định hoặc có sự xuất hiện của nhiễu không mong muốn. Trong quá trình làm việc, đối tượng có sự thay đổi, lập tức bộ điều khiển sẽ tự động chỉnh định lại tham số và cấu trúc sao cho chất lượng của hệ thống luôn được giữ ổn định [7]. Điều khiển trượt là phương pháp điều khiển đơn giản cho đối tượng phi tuyến, đem lại hiệu quả cao, có khả năng chống nhiễu tốt, tác động nhanh và ít nhạy với sự thay đổi các thông số của hệ thống trong quá trình làm việc. Tuy nhiên, khó khăn trong việc thiết kế bộ điều khiển trượt cần phải biết rõ mô hình toán học của đối tượng cũng như giới hạn chặn trên của các thành phần bất định của mô hình. Bên cạnh đó, quanh mặt trượt luôn tồn tại hiện tượng dao động tần số cao [8]. Ngày nay, các bộ điều khiển thông minh trên sở của bộ điều khiển mờ được sử dụng rộng rãi trong trường hợp mô hình bất định và nhiễu không biết trước. Logic mờ mang lại những thuận lợi trong quá trình điều khiển những hệ thống có tham số bất định bằng luật suy diễn mờ. Các luật suy diễn mờ của bộ điều khiển được thiết lập bằng việc tận dụng kinh nghiệm và hiểu biết của người thiết kế về hệ thống. Với tính năng nổi bật đó, logic mờ đã được xem xét kết hợp với điều khiển trượt để tăng hiệu suất cũng như tính bền vững trong quá trình điều khiển [9-11]. Để chất lượng điều khiển của hệ thống được tốt hơn, bài báo đề xuất bộ điều khiển thích nghi PID phân số trên cơ sở logic mờ. Khi đó bộ điều khiển sẽ làm việc linh hoạt hơn nhờ điều chỉnh thêm 2 tham số α, β của bộ điều khiển PID phân số so với bộ điều khiển PID kinh điển [12]. Khi áp dụng bộ điều khiển này cho tay máy robot đã đem lại hiệu quả bám tốt hơn, tốc độ hội tụ cũng như chất lượng điều khiển đã được cải thiện.

2. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ROBOT N BẬC TỰ DO

Phương trình động lực học của robot n bậc có dạng như sau [13]:

$$D_{IDM}(\delta)\ddot{\delta} + C_{IDM}(\delta, \dot{\delta})\dot{\delta} + G_{IDM}(\delta) + F_{IDM}(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}) + \tau_{IDMd} = \tau_{IDM} \quad (1)$$

ở đây: $\delta \in R^{n \times 1}$ là vị trí các khớp, $\dot{\delta} \in R^{n \times 1}$ là tốc độ các khớp, $\ddot{\delta} \in R^{n \times 1}$ là gia tốc góc của các khớp. $\tau_{IDM} \in R^{n \times 1}$ là mô men tác động lên các khớp của robot. $D_{IDM}(\delta) \in R^{n \times n}$ là ma trận quán tính. $C_{IDM}(\delta, \dot{\delta}) \in R^{n \times n}$ là ma trận mô tả thành phần ly tâm và Coriolis. $G_{IDM}(\delta) \in R^{n \times n}$ là véc tơ mô tả thành phần trọng lượng. $F_{IDM}(\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}) \in R^{n \times 1}$ là véc tơ lực ma sát. $\tau_{IDMd} \in R^{n \times 1}$ là véc tơ mô tả thành phần nhiễu tác động lên robot. Ma trận $D_{IDM}(\delta)$ là ma trận dương đối xứng, do đó (1) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} = & D_{IDM}(\delta)^{-1} \tau_{IDM} \\ & - D_{IDM}(\delta)^{-1} C_{IDM}(\delta, \dot{\delta}) \dot{\delta} \\ & - D_{IDM}(\delta)^{-1} G_{IDM}(\delta) \\ & - D_{IDM}(\delta)^{-1} \tau_{IDMd} \end{aligned} \quad (2)$$

Biểu diễn (2) trong không gian trạng thái như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= D_{IDM}(x_1)^{-1} \tau_{IDM} \\ & - D_{IDM}(x_1)^{-1} C_{IDM}(x_1, x_2) x_2 \\ & - D_{IDM}(x_1)^{-1} G_{IDM}(x_1) \\ & - D_{IDM}(x_1)^{-1} \tau_{IDMd} \end{aligned} \quad (3)$$

trong đó, $x_1 = \delta, x_2 = \dot{\delta}$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ

Cấu trúc chung của bộ điều khiển mờ gồm 3 khâu:

Khâu 1 (Mờ hóa): có nhiệm vụ chuyển giá trị rõ của biến ngôn ngữ đầu vào thành vector μ có số phần tử bằng số tập mờ đầu vào.

Khâu 2 (Thiết bị hợp thành): Triển khai luật hợp thành R

Khâu 3 (Giải mờ): có chức năng chuyển tập mờ đầu ra thành giá trị rõ để điều khiển đối tượng.

Luật hợp thành của bộ điều khiển mờ được xây dựng theo mệnh đề NẾU-THÌ:

R^l : Nếu $x_1 = A_1^l$ và $x_2 = A_2^l$ và ... và $x_n = A_n^l$, thì $y = B^l$,
 $l = 1, 2, \dots, N$

Với $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ là đầu vào của bộ điều khiển mờ, và y là đầu ra của bộ điều khiển mờ. Hàm liên thuộc của A_i^l là $\mu_{A_i^l}(x_i)$, và B^l có hàm liên thuộc $\mu_{B^l}(y)$. N là số luật hợp thành.

Bộ điều khiển mờ MIMO có đầu ra được tính toán theo công thức sau:

$$y_j(x) = \frac{\sum_{l=1}^N \prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i) \bar{y}_j^l}{\sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i) \right)}, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

trong đó $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ và $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ là véc tơ đầu vào và đầu ra của bộ điều khiển mờ. Nếu ta coi $\prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i) / \sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i) \right)$ là hàm cơ sở mờ và $\bar{y}_j^l$ là tham số. Khi đó (4) có được viết lại như sau:

$$y_j = \sum_{l=1}^N \bar{y}_j^l W_l(x), j = 1, 2, \dots, m$$

$$W_l = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i)}{\sum_{l=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{(A_i^l)}(x_i) \right)} \quad (5)$$

ở đây $W(x) = [W_1(x), W_2(x), \dots, W_N(x)]^T \in R^N$ là vector cơ sở mờ. $\phi_j = [\bar{y}_j^1, \bar{y}_j^2, \dots, \bar{y}_j^N]^T \in R^N$ là vector tham số.

Đầu ra của bộ điều khiển mờ (4) được viết lại như sau:

$$y(x) = \phi^T W(x) \quad (6)$$

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ PHÂN SỐ

Bộ điều khiển PID phân số được định nghĩa như sau [12]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \frac{d^{-\alpha}}{dt} e(t) + k_d \frac{d^{\beta}}{dt} e(t) \quad (7)$$

trong đó: k_p, k_i, k_d lần lượt tương ứng là hằng số của khâu tỉ lệ, tích phân, vi phân. α, β là các hằng số thực.

Theo cấu trúc bộ điều khiển trong Hình 1, luật điều khiển được xác định như sau:

$$\tau_{IDM} = D_{IDM}(x_1) \tau_{PID} + D_{IDM}(x_1) \tau_{SMC} + D_{IDM}(x_1) \tau_F \quad (8)$$

ở đây, τ_{PID} là bộ điều khiển PID phân số, τ_{SMC} là bộ điều khiển trượt, và τ_F là bộ điều khiển mờ.

Bộ điều khiển PID phân số được xác định như sau:

$$\tau_{PID} = k_p e_2(t) + k_i \frac{d^{-\alpha}}{dt} e_2(t) + k_d \frac{d^{\beta}}{dt} e_2(t) \quad (9)$$

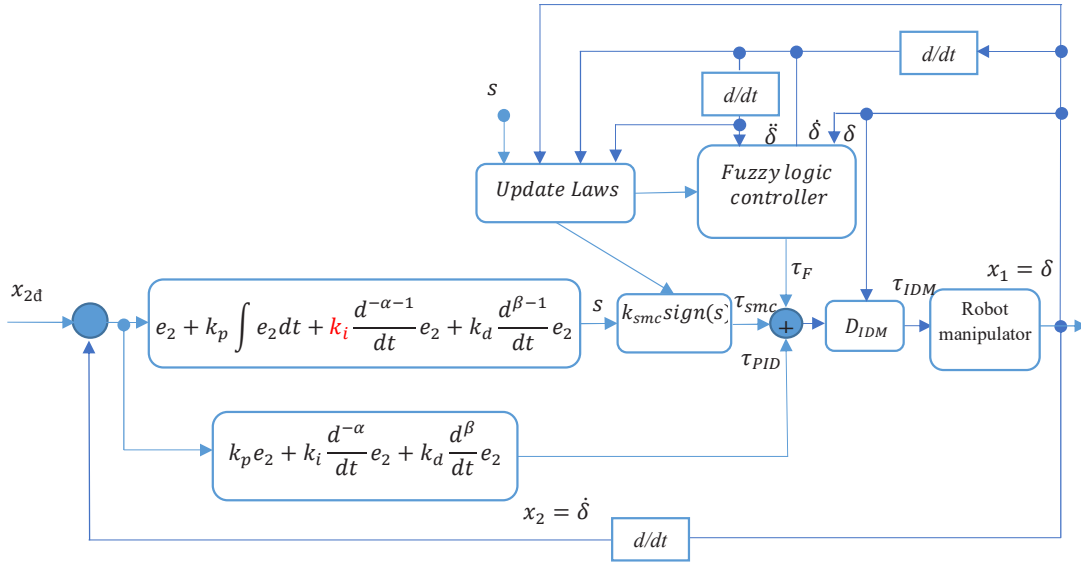
Bộ điều khiển trượt được lựa chọn như sau:

$$\tau_{SMC} = k_{smc} \text{sign}(s) \quad (10)$$

Bộ điều khiển mờ được xác định như sau:

$$\tau_F = \phi^T W(x_1, x_2, \dot{x}_2) \quad (11)$$

Mặt trượt được lựa chọn như sau:



Hình 1. Cấu trúc hệ thống điều khiển robot

$$s = e_2(t) + k_p \int_0^t e_2(t) dt + k_i \frac{d^{-\alpha-1}}{dt} e_2(t) + k_d \frac{d^{\beta-1}}{dt} e_2(t) \quad (12)$$

trong đó:

$$e_2 = x_{2d} - x_2 \quad (13)$$

với $e_2 = [e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2n}]^T$; $x_{2d} = [x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}]^T$ là giá trị đặt của $x_2 = [x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}]^T$ n số bậc tự do của robot.

Đạo hàm 2 về phương trình (13), sử dụng (3) và luật điều khiển (8) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_{2d} - \tau_{PID} - \tau_{SMC} - \tau_F \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} C_{IDM}(x_1, x_2) x_2 \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} G_{IDM}(x_1) \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} \tau_{IDMd} \end{aligned} \quad (14)$$

Thay (9), (10), (11) vào (12) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_{2d} - k_{SMC} \text{sign}(s) - \phi^T W(x_1, x_2, \dot{x}_2) \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} C_{IDM}(x_1, x_2) x_2 \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} G_{IDM}(x_1) \\ &+ D_{IDM}(x_1)^{-1} \tau_{IDMd} \end{aligned} \quad (15)$$

Luật cập nhật được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \dot{k}_{smc} &= -\frac{1}{k_{SMC}} s^T \dot{x}_{2d} + s^T \text{sign}(s) \\ &- \frac{1}{k_{SMC}} D_{IDM}(x_1)^{-1} s^T C_{IDM}(x_1, x_2) x_2 \\ &- \frac{1}{k_{SMC}} D_{IDM}(x_1)^{-1} s^T G_{IDM}(x_1) \\ &- \frac{1}{k_{SMC}} D_{IDM}(x_1)^{-1} s^T \tau_{IDMd} \\ \dot{\phi} &= k_{\phi}^{-1} s W(x_1, x_2, \dot{x}_2) \end{aligned} \quad (16)$$

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống, hàm Lyapunov được lựa chọn như sau:

$$L = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} k_{SMC}^2 + \frac{1}{2} k_{\phi} \phi^T \phi \quad (17)$$

Lấy đạo hàm bậc nhất của hàm Lyapunov theo thời gian:

$$\dot{L} = s^T \dot{s} + k_{SMC} \dot{k}_{SMC} + k_{\phi} \phi^T \dot{\phi} \quad (18)$$

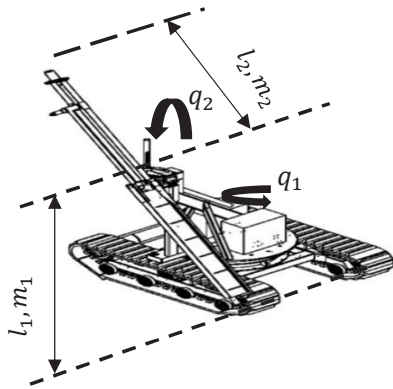
Thay (15) và (16) vào (18), ta có:

$$L \leq 0 \quad (19)$$

Hệ thống ổn định không phụ thuộc vào s

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm chứng kết quả bộ điều khiển, chúng ta thực hiện mô phỏng bộ điều khiển cho tay máy robot 2 bậc tự do [14]:



Hình 2. Tay máy Robot 2 bậc tự do

Phương trình động học của robot như sau:

Ở đây:

$$D_{11} = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos(\delta_2)$$

$$D_{12} = D_{21} = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(\delta_2)$$

$$D_{22} = m_2l_2^2$$

$$C_{11} = -m_2l_1l_2 \sin(\delta_2) \dot{\delta}_2$$

$$C_{12} = -m_2l_1l_2 \sin(\delta_2) (\dot{\delta}_1 + \dot{\delta}_2)$$

$$C_{21} = m_2l_1l_2 \sin(\delta_2) \dot{\delta}_1$$

$$C_{22} = 0$$

$$G_1 = (m_1 + m_2)gl_1 \cos(\delta_2) + m_2gl_2 \cos(\delta_2) (\delta_1 + \delta_2)$$

$$G_2 = m_2gl_2 \cos(\delta_2) (\delta_1 + \delta_2)$$

trong đó, m_1, m_2 lần lượt là khối lượng của thanh 1 và thanh 2 của robot. Chiều dài thanh 1 và thanh 2 lần lượt là l_1, l_2 . Gia tốc trọng trường $g = 9,8(m/s)$. $\delta = [\delta_1 \ \delta_2]$ lần lượt là vị trí thanh 1 và thanh 2 của robot. Chọn quỹ đạo mẫu cho thanh 1 và thanh 2 như sau:

$$\delta_d = [\delta_{1d} \ \delta_{2d}]^T = [0,3 \sin \pi t \ 0,3 \sin \pi t]^T$$

Vị trí ban đầu của các thanh $\delta_0 = [-0 \ 0]^T$, gia tốc ban đầu của các thanh $\dot{\delta}_0 = [0,0 \ 0,0]^T$

Khối lượng và chiều dài của các thanh lần lượt là:

$$m_1 = 1(kg), m_2 = 2(kg);$$

$$l_1 = 1(m), l_2 = 0,8(m)$$

Trường hợp 1: Chọn các tham số của bộ điều khiển khi mô phỏng

$$k_p = \text{diag}[50, 50], k_i = \text{diag}[0,3; 0,3];$$

$$k_d = \text{diag}[80, 80]; \alpha = 0,8; \beta = 0,02;$$

$$K_{SMC} = 0,10; k_o = 0,02$$

$$\tau_{IDmd} = [0,2 \sin(1,5t); 0,2 \sin(1,5t)]$$

Hàm liên thuộc mờ được chọn như sau:

$$\mu_{F_i^l}(x_i) = \exp \left(- \left[\frac{d\delta_i + \frac{\pi}{6} - (l_i - 1) \cdot \frac{\pi}{12}}{\frac{\pi}{24}} \right]^2 \right)$$

với $l_i = 1:3$

Kết quả mô phỏng quỹ đạo bám, sai lệch bám và mô men điều khiển được thể hiện trên Hình 3.

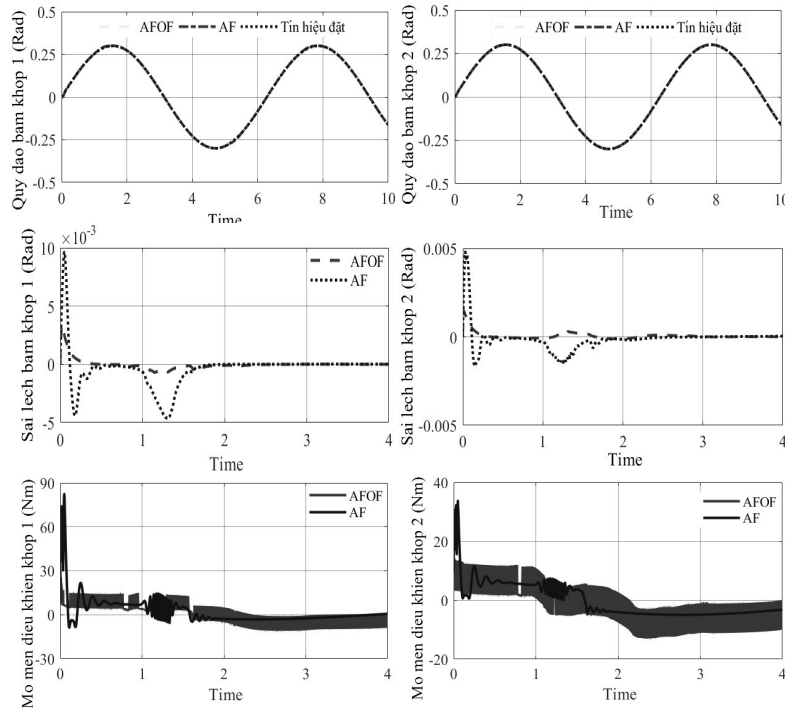
Trường hợp 2: Các thông số mô phỏng được chọn như trường hợp 1. Khi hệ thống đang làm việc, sau 1,5s thì nhiễu đột ngột tác động vào hệ thống, nhiễu được chọn có dạng:

Kết quả mô phỏng quỹ đạo bám, sai lệch bám và mô men điều khiển khi có nhiễu tác động thể hiện trên Hình 4.

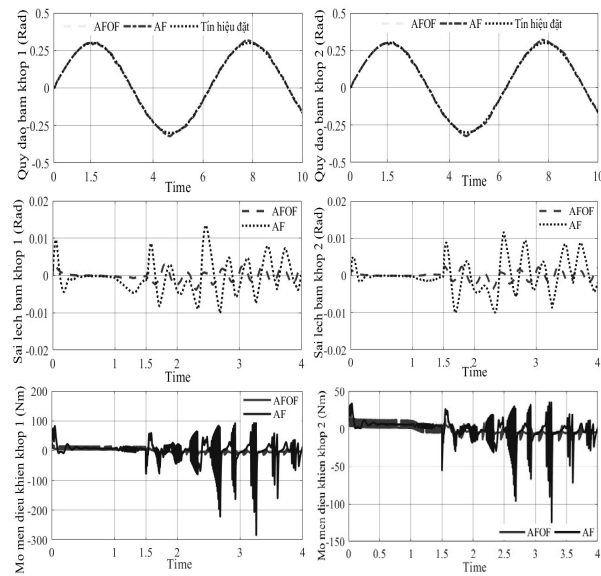
Nhận xét: Thực hiện mô phỏng hoạt động của bộ điều khiển thích nghi PID phân số trên cơ sở của logic mờ (AFOF) cho robot 2 bậc tự do và so sánh với bộ điều khiển mờ thích nghi (AF) [15]. Từ kết quả mô phỏng trong 2 trường hợp khi không có nhiễu bên ngoài tác động và khi có nhiễu đột ngột tác động (Hình 3,4), chúng ta thấy rằng bộ điều khiển AFOF và AF đều làm cho hệ ổn định và hội tụ. Tuy nhiên bộ điều khiển AFOF giúp hệ thống bám tốn hơn và hội tụ nhanh hơn bộ điều khiển mờ thích nghi bởi bộ điều khiển AFOF có sự kết hợp của bộ điều khiển PID phân số và bộ điều khiển trượt giúp cải thiện chất lượng điều khiển của hệ thống. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy khả năng ứng dụng bộ điều khiển AFOF cho robot n bậc tự do có mô hình bất định và chịu ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tác động.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra bộ điều khiển thích nghi PID phân số điều khiển tay máy robot 2 bậc tự do trên cơ sở logic mờ đã đảm bảo được khả năng ổn định và bền vững trong các môi trường làm việc khác nhau. Bằng việc sử dụng thuyết ổn định Lyapunov, nhóm tác giả đã chứng minh được hệ thống luôn ổn định trên toàn vùng làm việc. Hơn thế nữa, hiệu quả của bộ điều khiển cũng được chứng minh thông qua kết quả mô phỏng và so sánh với bộ điều khiển mờ thích nghi. Kết quả mô phỏng cho thấy tốc độ hội tụ, khả năng bám và sai lệch bám của bộ điều khiển AFOF tốt hơn bộ điều khiển mờ thích nghi. Như vậy có thể khẳng định khả năng ứng dụng của bộ điều khiển AFOF cho robot n bậc tự do có mô hình bất định và chịu ảnh hưởng của nhiễu tác động.



Hình 3. Đáp ứng vị trí, sai lệch bám và mô men điều khiển của tay máy robot khi không chịu tác động của nhiễu



Hình 4. Đáp ứng vị trí, sai lệch bám và mô men điều khiển của tay máy robot khi chịu tác động của nhiễu

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tae-Yong Kuc, Woong – Gie Han. An adaptive PID learning control of robot manipulators. Automatica, 2000, 36: 717-725.
- [2]. Shanchao Yi, Junyong Zhai. Adaptive second – order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators. ISA Transactions, 2019, 90: 41-51.
- [3]. Ilse Cervantes, Jose Alvarez- Ramirez. On the PID tracking control of robot manipulators. Systems & control letters 2001, 42: 37-46.
- [4]. Gang Feng. Robust adaptive control for robot manipulators in task space. IFAC 12th Triennial World congress, sydney, Australia, 1993.
- [5]. Dong Ki Han, Pyung Hun Chang, Maolin Jin. Robust trajectory control of robot manipulators using time delay control with adaptive compensator. The international Federation of Automatics Control Seoul, Korea, July, 2008.
- [6]. Man Z, Palaniswami M. A variable structure model reference adaptive control for nonlinear robotic manipulators. Int. J. Adaptive Control and Signal Processing, 1993, 7(539 – 562).
- [7]. Islam S, Liu X P. Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2444-2453.
- [8]. Li K, Wen R. Robust Control of a Walking Robot System and Controller Design. Procedia Engineering, 2017, 174(947 – 955).
- [9]. Sun F C, Sun Z Q, Feng G. An Adaptive Fuzzy Controller Based on Sliding Mode for Robot Manipulators. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics - part B, 1999, 29(5): 661-667.

- [10]. B C, C L, P L X, et al. Adaptive Fuzzy Tracking Control for a Class of MIMO Nonlinear Systems in Nonstrict-Feedback Form. IEEE Transaction on Cybernetics, 2015, 45(12): 2744-2755.
- [11]. Kumar V, Rana K P S. Nonlinear adaptive fractional order fuzzy PID control of a 2-link planar rigid manipulator with payload. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(993-1022).
- [12]. Tribhi Kathuria, Vineet Kumar, K.P.S. Rana and Ahmad Taher Azar. Control of a three link manipulator Using Fractional Order PID controller. Elsevier.
- [13]. Meng Joo Er, and Yang Gao. Robust adaptive control of robot manipulators using generalized fuzzy neural networks. IEEE transactions on industrial electronic, 2023, 50(3): 620-628.
- [14]. Cuong Van Pham, Yao Nan Wang. Robust adaptive trajectory tracking sliding mode control based on neural networks for cleaning and detecting robot manipulators. Intelligent Robot system, 2014.
- [15]. Byung Kool, and Woon Chul Ham. Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator. IEEE transactions on fuzzy systems, 2000: 186-199.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Vũ Thị Yến tốt nghiệp đại học tại Trường đại học kỹ thuật công nghiệp Thái Nguyên năm 2008. Năm 2012 nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Tự động hóa tại Trường đại học kỹ thuật công nghiệp Thái Nguyên. Năm 2019 nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Khoa học và kỹ thuật điều khiển tại trường Đại học Hồ Nam Trung Quốc. Hiện nay tác giả đang công tác tại Khoa Điện - Trường Đại học Công nghiệp Hà nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Điều khiển robot, điều khiển phi tuyến, điều khiển mờ, điều khiển nơ ron



Tác giả Phạm Văn Cường tốt nghiệp đại học tại Trường Học viện kỹ thuật quân sự năm 2007. Năm 2010 nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển tại Trường Học viện kỹ thuật quân sự. Năm 2016 nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Khoa học và kỹ thuật điều khiển tại trường Đại học Hồ Nam Trung Quốc. Hiện nay tác giả đang công tác tại Phòng Đào tạo - Trường Đại học Công nghiệp Hà nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Lý thuyết điều khiển thông minh, điều khiển thích nghi, điều khiển bền vững, điều khiển robot.



Tác giả Nguyễn Đức Hải tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam năm 2008. Năm 2011 nhận bằng thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật tàu thủy tại Trường Đại học Bách khoa Hà nội. Hiện nay tác giả đang làm nghiên cứu sinh tiến sĩ tại Đại học Hồ Nam - Trung Quốc.

Lĩnh vực nghiên cứu: Cơ học chất lỏng, cơ học và sức bền vật liệu, điều khiển robot, vật liệu composite.