

Bộ điều khiển trượt dựa trên mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm

Huỳnh Minh Vũ

Trường Đại học Kỹ thuật - Công nghệ Cần Thơ

TÓM TẮT

Bộ điều khiển trượt có ưu điểm là có tính ổn định, bền vững ngay cả khi hệ thống có nhiễu hoặc khi đối tượng có thông số thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên, để thiết kế được bộ điều khiển trượt, người thiết kế cần biết chính xác mô hình toán học của đối tượng điều khiển. Trong thực tế, vấn đề này không phải lúc nào cũng thực hiện được. Nghiên cứu này đề xuất một giải pháp là sử dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển của bộ điều khiển trượt, giải pháp này được áp dụng để điều khiển mô hình tay máy một bậc tự do. Đồng thời, tính bền vững của bộ điều khiển được đánh giá bằng cách thay đổi về tín hiệu tham chiếu, khối lượng vật gắn của tay máy và dưới tác động của nhiễu. Với bộ điều khiển này được áp dụng, đáp ứng của tay máy có độ vọt lố không đáng kể, luật điều khiển không có dao động và sai số xác lập tiến về zero. Kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm Simulink/MATLAB cho thấy hiệu quả của phương pháp điều khiển này, ngay khi thông số đối tượng thay đổi và dưới tác động của nhiễu.

Từ khóa: điều khiển trượt, hàm cơ sở xuyên tâm (RBF), mạng nơ-ron, điều khiển hệ thống phi tuyến, mô hình hóa

1. GIỚI THIỆU

Khái niệm đầu tiên về điều khiển trượt cho hệ thống bậc hai được đưa ra bởi Emelyanov vào cuối những năm 1960 [1]. Sau đó phương pháp này đã được nhiều nhà khoa học quan tâm hơn vì tính ổn định, bền vững đối với nhiễu và thay đổi thông số của mô hình. Ý tưởng cơ bản của điều khiển trượt là ép buộc quỹ đạo hệ thống hướng tới một mặt trượt và giữ nó trên bề mặt này bởi một luật chuyển đổi (switching rule). Điều khiển trượt làm giảm bậc của hệ thống, vì vậy dễ đạt được đáp ứng mong muốn. Thêm vào đó, với đặc tính ổn định cao (robustness), điều khiển trượt đối phó tốt với tính phi tuyến, nhiễu và sai số mô hình [2]. Tuy nhiên, việc thiết kế bộ điều khiển trượt đòi hỏi phải xác định được mô hình toán học của đối tượng điều khiển [3]. Trong những năm gần đây, một số giải thuật điều khiển thông minh đã được đề nghị để cải tiến bộ điều khiển trượt truyền thống. Cụ thể là

phương pháp điều khiển trượt sử dụng mô hình mờ Takagi-Sugeno được kiểm chứng là phù hợp để điều khiển mô hình tay máy một bậc tự do. Trong đó, mô hình mờ được dùng để thay thế hàm sign trong luật điều khiển trượt với mục đích giảm dao động quanh mặt trượt [4]. Hơn nữa, sự kết hợp giữa mạng nơ-ron và bộ điều khiển trượt cũng mang lại hiệu quả điều khiển với các hệ phi tuyến. Trong đó, mạng nơ-ron được dùng để ước lượng các hàm phi tuyến của bộ điều khiển trượt áp dụng cho mô hình tay máy ba bậc tự do [5].

Trên thực tế, xác định được mô hình toán học của đối tượng phi tuyến, đặc biệt là các đối tượng phi tuyến mạnh sẽ gặp nhiều khó khăn và đôi lúc không đạt được kết quả. Trong quá trình phát triển của các giải thuật thông minh, mạng nơ-ron nhân tạo được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển với vai trò xấp xỉ các

Tác giả liên hệ: ThS. Huỳnh Minh Vũ

Email: hmvu@ctu.edu.vn

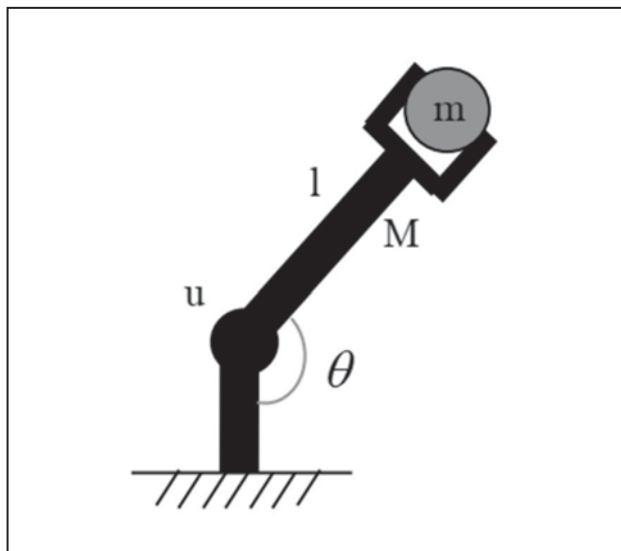
tham số bất định.

Tay máy công nghiệp là một trong những đối tượng được sử dụng phổ biến và mang lại hiệu quả cao trong sản xuất, sinh hoạt, ... nhưng đồng thời cũng là đối tượng có tính phi tuyến mạnh, các tham số bất định lớn và chịu nhiều tác động của nhiễu. Song song với việc nâng cao độ chính xác trong các khâu lắp ghép cơ khí thì điều khiển cũng là một vấn đề hết sức quan trọng để cải thiện đáng kể chất lượng làm việc của tay máy. Hiện nay có nhiều phương pháp điều khiển đã được công bố và áp dụng thành công cho tay máy [6]. Tuy nhiên, đến nay bài toán điều khiển robot vẫn luôn dành được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học nghiên cứu giải quyết để cải thiện chất lượng động học của tay máy. Tay máy công nghiệp là đối tượng phi tuyến nên rất khó xác định được chính xác các thông số đo lường tại các thời điểm nhất định [7].

Trong nghiên cứu này, áp dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để xấp xỉ các tham số bất định của bộ điều khiển trượt. Kết quả kiểm nghiệm được mô phỏng trên phần mềm Simulink/MATLAB.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC TAY MÁY

Khảo sát mô hình máy một bậc tự do, được trình bày như Hình 1.



Hình 1. Mô hình tay máy một bậc tự do

Tay máy sẽ quay quanh trục nhờ moment u , vị trí θ của tay máy được xác định bằng góc hợp bởi phương thẳng đứng và phương của tay máy. Như vậy, u sẽ là ngõ vào điều khiển hệ tay máy và θ là ngõ ra của hệ thống (đơn vị là radian). Giả sử, thời điểm ban đầu tay máy chưa gấp vật, sau khoảng thời gian t tay máy sẽ gấp một vật nặng có khối lượng m .

Dựa trên việc phân tích phương trình Euler-Lagrange, phương trình động lực học của tay máy một bậc tự do được thiết lập như (1) [8].

$$(J + ml^2)\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + (ml + Ml_c)\sin(\theta) = u \quad (1)$$

Trong đó: $J = Ml_c^2$ là moment quán tính của cánh tay, các thông số còn lại của mô hình được mô tả chi tiết như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số mô hình tay máy

Kí hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
M	Khối lượng cánh tay	1 kg
m	Khối lượng vật nặng	0.1 kg
L	Chiều dài tay máy	0.4 m
l_c	Khoảng cách từ trọng tâm đến trục quay	0.15 m
B	Hệ số ma sát nhớt	0.2 kg.m ² /s
g	Gia tốc trọng trường	9.81 m ² /s

Đặt:

$$\begin{cases} x_1 = \theta = y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2 \\ x_2 = \dot{\theta} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{\theta} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{u - Bx_2 - (ml + Ml_c)g \sin(x_1)}{J + ml^2} \end{cases} \quad (3)$$

Với: x_1, x_2 là các biến trạng thái và ngõ ra $y = \theta = x_1$.

3. ĐIỀU KHIỂN MÔ HÌNH TAY MÁY

3.1. Điều khiển trượt

Dễ dàng thấy được phương trình (2) ở dạng bậc hai, nên ta xét hệ thống phi tuyến bậc hai có dạng như (4).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\theta, \dot{\theta}) + bu + d(t) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: $f(\theta, \dot{\theta})$ là thành phần phi tuyến; u sẽ là ngõ vào điều khiển hệ tay máy và θ là ngõ ra của hệ thống ($b > 0$); $d(t)$ là thành phần nhiễu của hệ thống.

Gọi e là tín hiệu lỗi và x_d là tín hiệu đặt của mô hình điều khiển, ta có (5).

$$e = x_1 - x_d \quad (5)$$

Định nghĩa hàm trượt bậc hai như phương trình (6) [9].

$$s = \dot{e} + \lambda e, \lambda > 0 \quad (6)$$

Suy ra ta có phương trình (7).

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \\ &= f(\theta, \dot{\theta}) + bu + d(t) - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e} \end{aligned} \quad (7)$$

Đặt:

$$\dot{s} = k \text{sign}(s) + d(t), k > 0 \quad (8)$$

Từ phương trình (7) và (8) suy ra được luật điều khiển như phương trình (9).

$$u = \frac{1}{b} (-f + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k \text{sign}(s)) \quad (9)$$

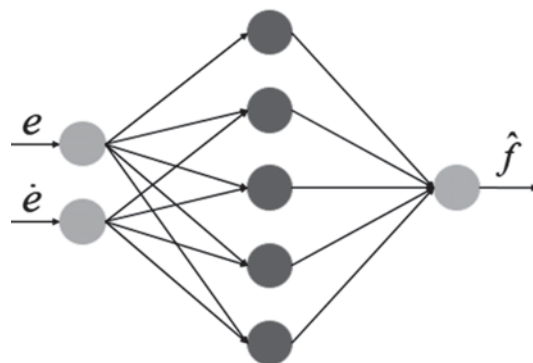
Thành phần f trong phương trình (8) là thành phần phi tuyến bất định nên có thể dùng một số thuật toán để xấp xỉ nó, trong nghiên cứu này đề xuất sử dụng mạng nơ-ron RBF để xấp xỉ f .

3.2. Xây dựng bộ điều khiển trượt dựa trên mạng nơ-ron RBF

Gọi $\hat{f}$ là giá trị xấp xỉ của f trong phương trình (9). Mạng nơ-ron RBF có cấu trúc được thiết kế như Hình 2 giữ vai trò xấp xỉ giá trị nói trên sao cho hệ kín ổn định. Ngõ vào của mạng nơ-ron RBF là giá trị $x = [e, \dots, \dot{e}]^T$, ma trận trọng số là $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_i]^T$ (i là số nút của lớp ẩn), hàm kích hoạt là hàm Gauss được định nghĩa như (10) [10].

$$h_i(x) = \exp \left\{ -\frac{\|c_i - x\|^2}{2b_i^2} \right\} \quad (10)$$

với c_i và b_i là tâm và độ rộng của hàm Gauss tại nút thứ i của lớp ẩn.



Hình 2. Cấu trúc mạng RBF

Khi đó, ngõ ra của mạng là giá trị xấp xỉ $\hat{f}$ được tính theo công thức (11) [10].

$$\hat{f} = \mathbf{w}^T \mathbf{h} \quad (11)$$

Hàm lỗi của mạng nơ-ron RBF được trình bày như công thức (12).

$$E(t) = \frac{1}{2} (f(t) - \hat{f}(t))^2 \quad (12)$$

Theo phương pháp Gradient Descent, trọng số được cập nhật như công thức (13) và (14), với η là hệ số học ($\eta \in (0, 1)$), α là hệ số momentum ($\alpha \in (0, 1)$) [10].

$$w_i(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_i} = \eta (f(t) - \hat{f}(t)) h_i \quad (13)$$

$$w(t) = w_i(t-1) + \Delta w_i(t) + \alpha w_i((t-1) - w_i(t-2)) \quad (14)$$

Sau khi sử dụng mạng nơ-ron RBF để xấp xỉ thành phần phi tuyến bất định, luật điều khiển (9) có thể viết lại thành (15).

$$u = \frac{1}{b} (-\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k \text{sign}(s)) \quad (15)$$

3.3. Kết quả mô phỏng

Tiến hành kiểm chứng đáp ứng của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả chọn các thông số khởi tạo của mạng RBF như Bảng 2 và các giá trị $\lambda = 10$ và $k = 0.1$.

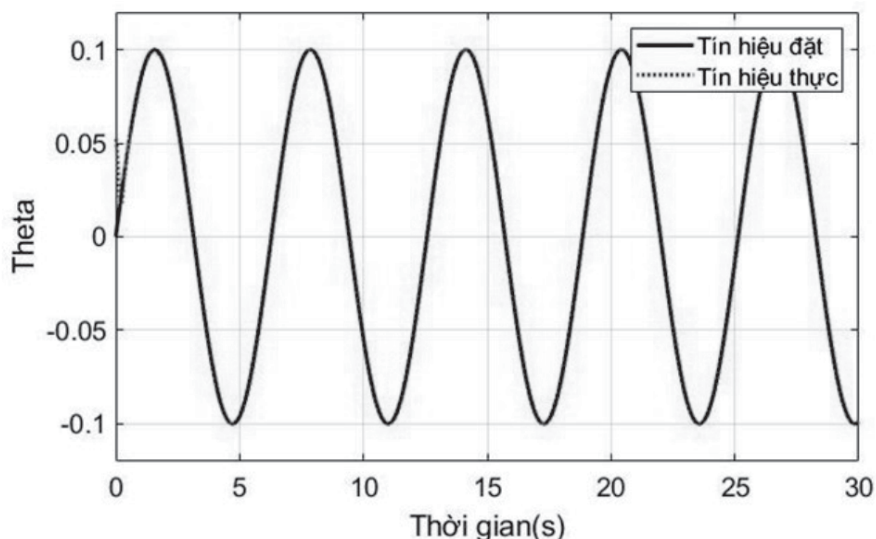
Bảng 2. Thông số khởi tạo của mạng RBF được chọn theo bảng

Kí hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
c_{ij}	Vector trọng tâm của mạng RBF	$\begin{bmatrix} -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \\ -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$
b_j	Hệ số độ mở của trung tâm	$[5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5]^T$
w	Vector trọng số	$[0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T$
i	Số ngõ vào mạng	2
j	Số nơ-ron lớp ẩn	5

Để thấy rõ khả năng điều khiển của bộ điều khiển SMC dựa trên mạng nơ-ron RBF (SMC_RBF), kết quả mô phỏng sẽ được khảo sát với các tín hiệu đặt khác nhau, khối lượng vật

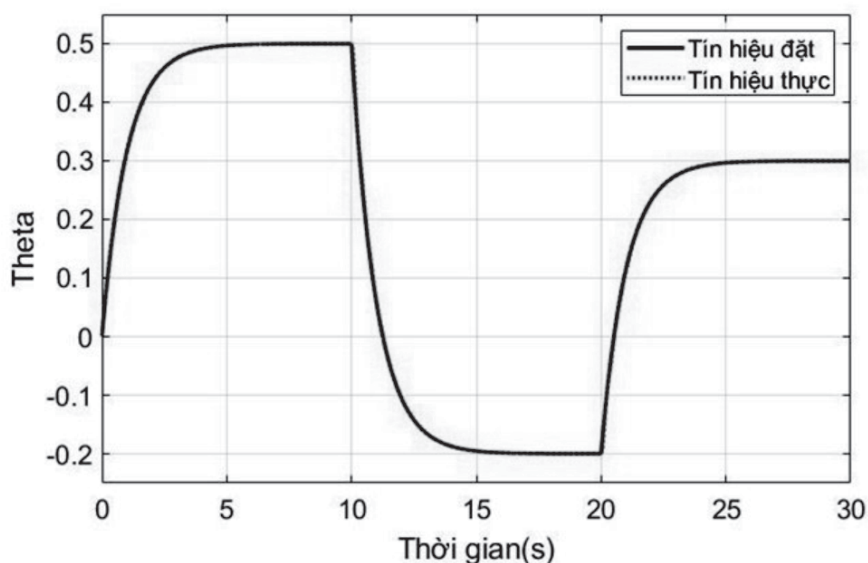
gấp thay đổi và dưới tác động của nhiễu.

Kết quả mô phỏng của hệ thống khi tín hiệu đặt là hình sin được thể hiện như Hình 3.

**Hình 3.** Đáp ứng hệ thống khi tín hiệu đặt hình sin

Để thấy được hiệu quả của bộ điều khiển, tác giả thay đổi tín hiệu đặt thành tín hiệu hàm

nấc. Kết quả mô phỏng được trình bày như Hình 4.

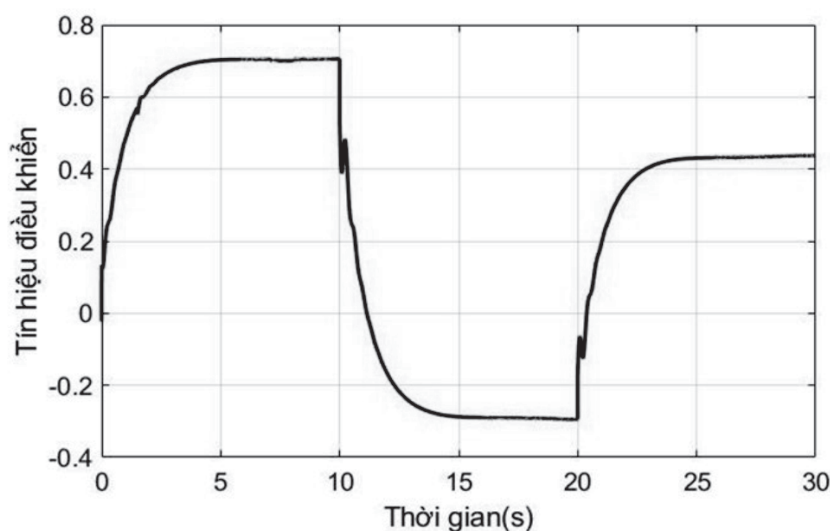
**Hình 4.** Đáp ứng hệ thống khi tín hiệu đặt là hàm nấc

Tín hiệu điều khiển với tín hiệu đặt là hàm nấc có biên độ từ -0.3 đến 0.7, được trình bày ở Hình 5.

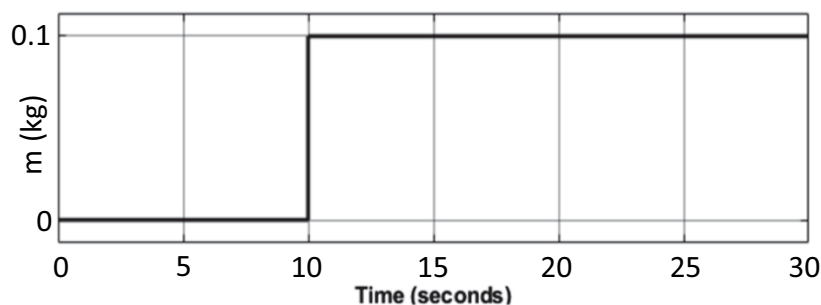
Kết quả Hình 4 và Hình 5 cho thấy hiệu quả điều khiển của bộ điều khiển SMC_RBF khi tín hiệu đặt hàm nấc đã qua bộ lọc tương đối tốt, đảm bảo các tiêu chí chất lượng hệ thống như độ vọt lố, thời gian tăng, thời gian xác lập và sai số xác lập.

Để khảo sát tính bền vững của bộ điều khiển,

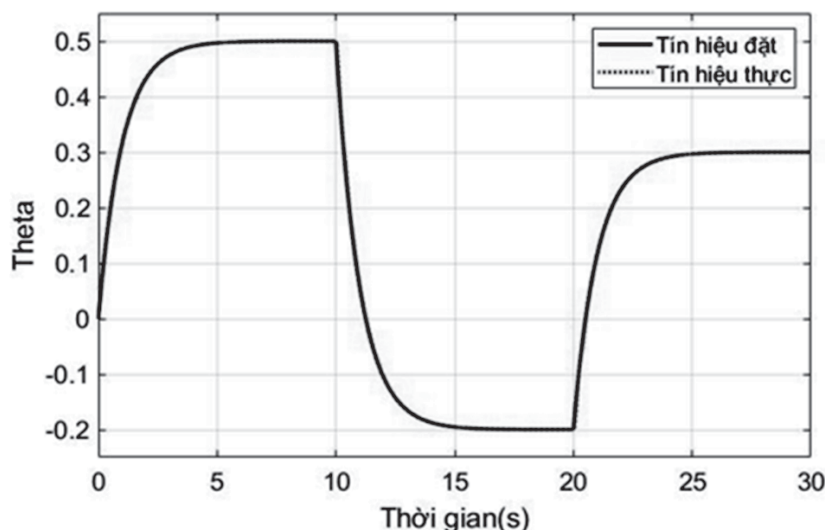
tác giả đã giả sử khối lượng vật gấp của tay máy thay đổi theo thời gian (được trình bày như Hình 6), cụ thể là ban đầu tay máy sẽ hoạt động không tải, sau đó sẽ gấp một vật nặng có khối lượng $m = 0.1\text{kg}$. Từ kết quả mô phỏng Hình 7 và Hình 8 cho thấy, tín hiệu điều khiển có bị ảnh hưởng, tuy nhiên tín hiệu thực vẫn bám tốt với tín hiệu đặt khi tay máy chuyển từ trạng thái hoạt động không tải sang có tải.



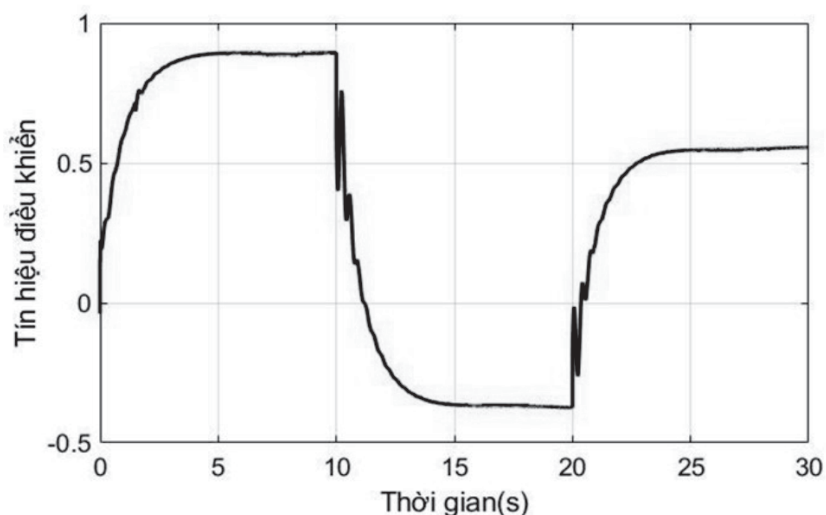
Hình 5. Tín hiệu điều khiển khi tín hiệu đặt là hàm nấc



Hình 6. Khối lượng của vật gấp thay đổi theo thời gian



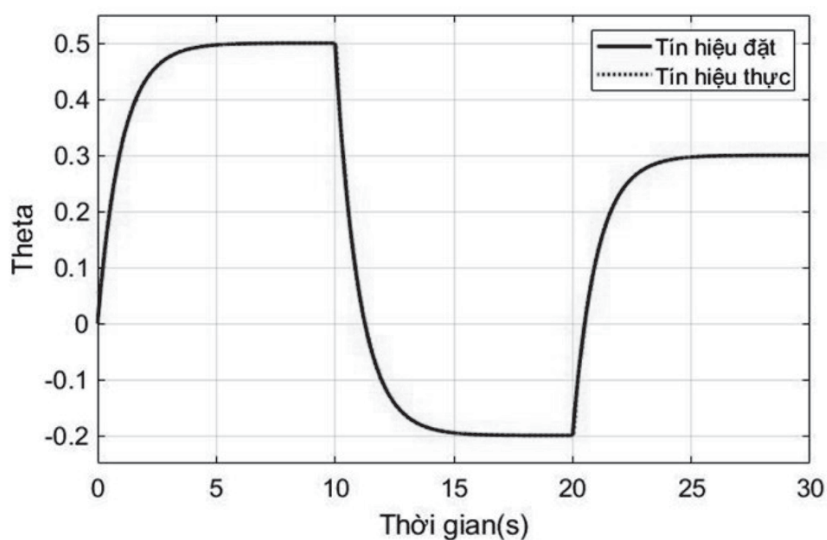
Hình 7. Đáp ứng hệ thống khi tải trọng thay đổi theo thời gian



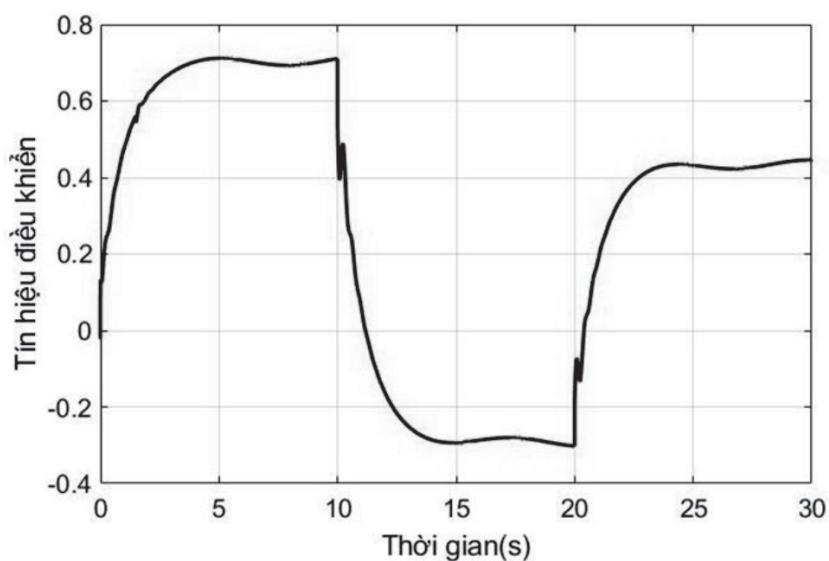
Hình 8. Tín hiệu điều khiển khi hệ thống tải trọng thay đổi

Để kiểm tra hiệu quả của bộ điều khiển dưới tác động của nhiễu, tác giả đã giả sử hệ thống chịu tác động bởi nhiễu có như sau: $d(t) = 0.35 \sin(t)$.

Kết quả mô phỏng được trình bày như Hình 9 và tín hiệu điều khiển khi có tác động của nhiễu được trình bày như Hình 10.



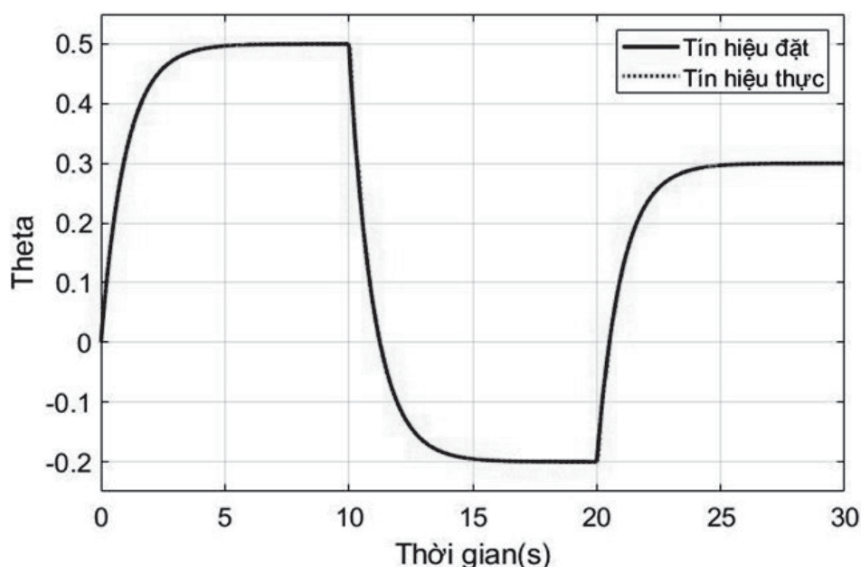
Hình 9. Đáp ứng hệ thống khi có nhiễu tác động



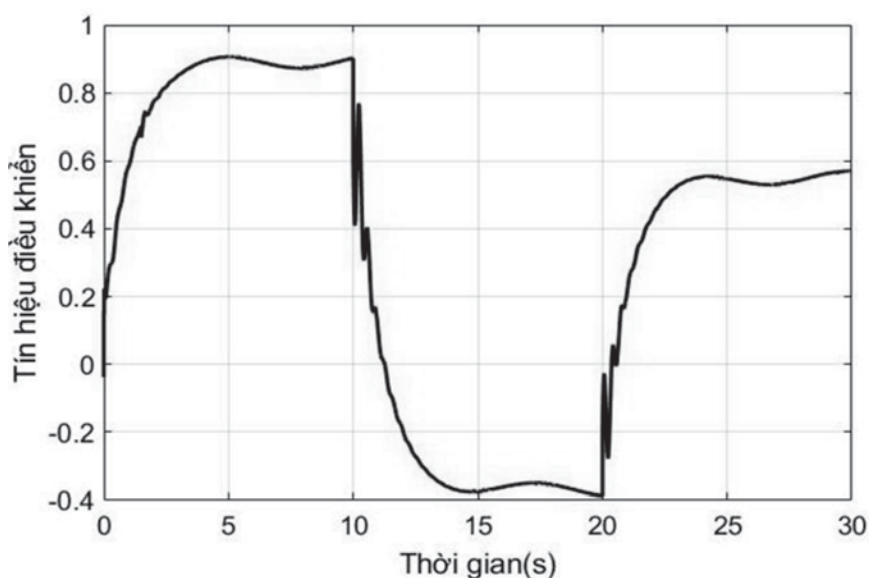
Hình 10. Tín hiệu điều khiển khi hệ thống dưới tác động của nhiễu

Nhằm khẳng định chất lượng của bộ điều khiển SMC_RBF tác giả đã giả sử hệ thống gần với thực tế là tải trọng sẽ thay đổi và tác động bởi nhiễu.

Kết quả mô phỏng và tín hiệu điều khiển khi hệ thống có tải trọng thay đổi và dưới tác động của nhiễu được trình bày như Hình 11 và Hình 12.



Hình 11. Đáp ứng của hệ thống khi tải trọng thay đổi và có nhiễu tác động



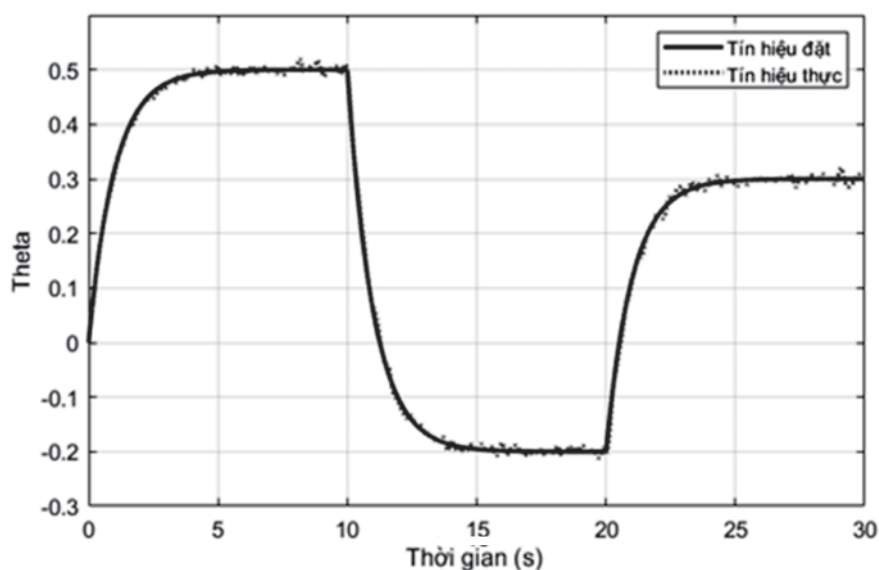
Hình 12. Tín hiệu điều khiển khi hệ thống tải trọng thay đổi và có nhiễu tác động

Từ các Hình 9, 10, 11 và 12 cho thấy, khi tay máy chuyển từ trạng thái không tải sang có tải hay chịu tác động của nhiễu hay bị ảnh hưởng của cả hai yếu tố trên thì tín hiệu điều khiển sẽ bị ảnh hưởng, tuy nhiên tín hiệu thực vẫn bám theo tín hiệu tham khảo.

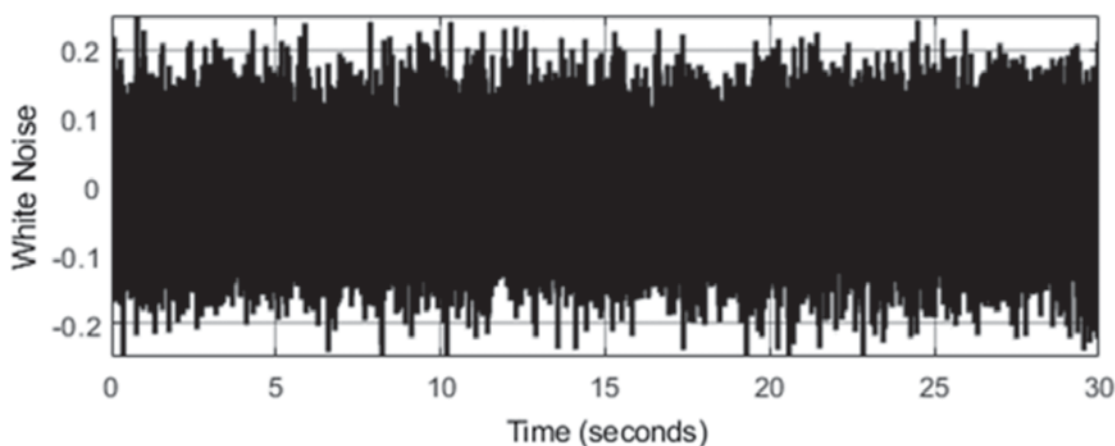
Để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển khi bị ảnh hưởng bởi nhiễu, tác giả đã giả lập hệ thống

chịu tác động của nhiễu trắng (được trình bày như Hình 14). Kết quả mô phỏng được trình bày như Hình 13 một lần nữa khẳng định được chất lượng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất với mô hình tay máy một bậc tự do.

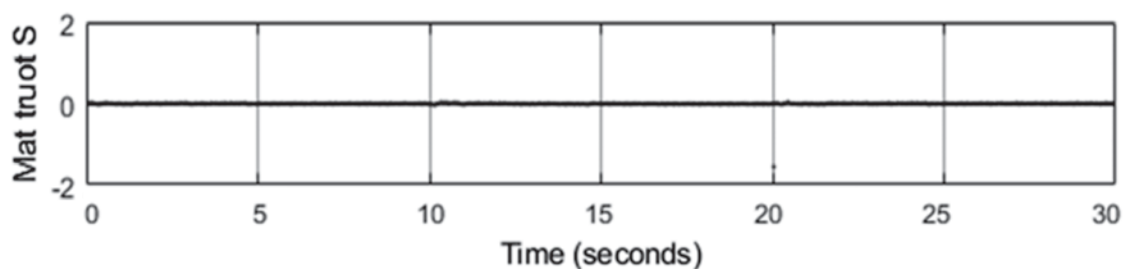
Hình 15 mô tả mặt trượt của bộ điều khiển SMC_RBF. Kết quả cho thấy mặt trượt xác lập tại lân cận zero và biên độ dao động không đáng kể.



Hình 13. Đáp ứng của hệ thống khi tải trọng thay đổi và có nhiễu trắng tác động



Hình 14. Tín hiệu nhiễu trắng



Hình 15. Mặt trượt của bộ điều khiển SMC_RBF

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, tác giả đã đề xuất một giải pháp để tối ưu bộ điều khiển trượt là dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để xấp xỉ các tham số phi tuyến bất định.

Các kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng thực tế bám tín hiệu đặt rất tốt với độ vọt lố không đáng kể và sai số xác lập gần như được triệt tiêu. Hơn

thế, hiệu quả của bộ điều khiển SMC_RBF còn được kiểm chứng khi điều khiển góc khớp của mô hình tay máy một bậc tự do bám theo tín hiệu đặt trước ngay cả trong khi tải trọng thay đổi và dưới sự tác động của nhiễu.

Hướng nghiên cứu tiếp theo là áp dụng bộ điều khiển được đề xuất vào mô hình tay máy thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot, *Sliding mode control in engineering*. Place of publication: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [2] T. T. Hùng, N. Q. Hiếu và Q. Hà, “Điều khiển vị trí với bộ điều khiển trượt – PID”, *Hội nghị toàn quốc lần thứ 7 về Cơ điện tử - VCM*, 2014.
- [3] Vadim Utkin, *Variable structure systems with sliding mode*, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 22, pp. 212–222, 1977.
- [4] N. H. Dũng, “Điều khiển trượt hệ phi tuyến dùng mô hình mờ”, *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 15b: 46-55, 2010.
- [5] N. H. Dũng, “Điều khiển trượt thích nghi hệ phi tuyến dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm”, *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 15a: 263-272, 2010.
- [6] T. H. Nguyễn, “Điều khiển thích nghi phi tuyến robot công nghiệp trên cơ sở mạng nơ-ron nhân tạo”, *Luận án tiến sĩ*, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2014.
- [7] H. M. Vũ, T. T. Hùng và N. C. Ngôn, “Điều khiển robot SCARA sử dụng giải thuật mờ-nơ-ron”, *Tạp chí Khoa học Giáo Dục Kỹ thuật*, số 54 (09/2019): 80-86, 2019.
- [8] N. H. Dũng, “Điều khiển trượt dựa trên hàm trượt kiểu PID”, *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 21a: 30-36, 2012.
- [9] Christopher Edwards, Yuri Shtessel, Leonid Fridman and Arie Levant, *Sliding Mode Control and Observation*. Place of publication: Birkhäuser Basel, 2014.
- [10] Jinkun Liu, *Radial Basis Function (RBF) neural network control for mechanical systems*. Place of publication: Springer Science & Business Media, 2013.

Radial basis function neural networks based sliding mode control

Huynh Minh Vu

ABSTRACT

The sliding mode control has strong point is the stability, robustness against disturbances or variations of controlled plant. However, in order to design a sliding controller, the designer needs to know exactly the mathematical model of the control plant. In practice, this problem is not always possible. This study proposes a solution that is to use radial basis function neural networks to estimate the nonlinear functions in the control law of the sliding controller, this solution is applied to control the one degree of freedom manipulator model. At the same time, the sustainability of the controller is assessed by changes in the reference signal, the weight of the robot and under the influence of disturbances. With this controller applied, the response of the manipulator has negligible overshoot, the control law without oscillation, and zero setting error.

The simulation results based on Simulink/MATLAB software show the effectiveness of this control method as soon as the object parameters change and under the impact of disturbances.

Keywords: *sliding mode control, radial basis function (RBF), neural networks, nonlinear system control, systems modeling*

Received: 13/07/2021

Revised: 30/08/2021

Accepted for publication: 05/09/2021