

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI HỆ PHI TUYẾN DÙNG MẠNG NƠON HÀM CƠ SỞ XUYÊN TÂM

Nguyễn Hoàng Dũng¹

ABSTRACT

The remarkable characteristic of sliding mode control is the robust stability with disturbance and variable model parameters of the system. However to design the controller, the exact model of the plant has to be known. In practically, the problem is hard to solve. Moreover the large gain of an SMC may intensify the chattering on this sliding surface. To improve the above drawbacks, in this paper, radial basis neural network is used to estimate the nonlinear functions of sliding mode control and the gains of the controller are modified basing on Lyapunov stability theory. The radial basis function neural network is considered as an adaptive controller. Weights of the network are modified online due to the feedback output signals of the plant. And sliding mode controller is used to complement approximation of errors to guarantee the stability of the closed loop system. The above mentioned algorithm is applied to control three degree of a freedom robot manipulator. With the novel controller, the response of the plant is flat, non-overshoot, non-chattering and zero setting error. The method is tested with Matlab simulation software.

Keywords: Neural network, radial basis function, nonlinear system control, system modeling, robot manipulator

Title: Radial basis function neural network based adaptive sliding mode control for nonlinear system

TÓM TẮT

Ưu điểm của bộ điều khiển trượt là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống nhiễu hoặc thông số của mô hình thay đổi theo thời gian. Tuy nhiên, để thiết kế được bộ điều khiển trượt, người thiết kế cần biết chính xác mô hình của đối tượng. Trong thực tế, vấn đề này không phải lúc nào cũng thực hiện được. Hơn thế nữa, đối với biên độ của luật điều khiển trượt nếu không được lựa chọn phù hợp sẽ gây ra hiện tượng dao động quanh mặt trượt. Để giải quyết khó khăn trên, bài báo đề nghị sử dụng mạng nơon hàm cơ sở xuyên tâm để ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển trượt và biên độ của luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Mạng hàm cơ sở xuyên tâm đóng vai trò như một bộ điều khiển thích nghi. Các trọng số của mạng được cập nhật trực tuyến dựa trên các tín hiệu hồi tiếp ở ngõ ra. Và bộ điều khiển trượt được sử dụng bù sai số xấp xỉ nhằm đảm bảo hệ kín ổn định. Giải thuật điều khiển nghiên cứu được sẽ áp dụng để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Với bộ điều khiển này, đáp ứng của hệ tay máy: phẳng, không có độ vọt lố, không có dao động và sai số xác lập tiến về zero. Kết quả điều khiển được kiểm chứng bằng phần mềm mô phỏng Matlab.

Từ khóa: Mạng nơon, hàm cơ sở xuyên tâm, điều khiển hệ phi tuyến, mô hình hóa hệ thống, hệ tay máy

¹ Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

1 GIỚI THIỆU

Khái niệm đầu tiên về điều khiển trượt cho hệ thống bậc hai được nghiên cứu bởi Emelyanov vào cuối những năm 1960 (M. Önder Efe, Okyay Kaynak and Bogdan M. Wilamowski, 2000), (M. Önder Efe, Okyay Kaynak, Xinghuo Yu and Bogdan M. Wilamowski, 2001), (Wilfrid Peruquetti, and Jean Pierre Barbot, 2002), (Trần Quang Thuận, 2006). Sau đó phương pháp này đã được nhiều nhà khoa học quan tâm hơn vì tính bền vững và tính ổn định ngay cả khi có sự tác động của nhiễu cũng như sự thay đổi thông số của mô hình. Trong bài báo này, phương pháp điều khiển trượt được dùng để điều khiển hệ phi tuyến MIMO (Multi input multi output).

Để có được bộ điều khiển trượt, người thiết kế cần xác định chính xác mô hình của đối tượng. Tuy nhiên, trong thực tế việc xác định mô hình không phải lúc nào cũng thực hiện được. Do đó để giải quyết vấn đề này, mạng nơron hàm cơ sở xuyên tâm RBFNN (Radial basis function neural network) được dùng để ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển trượt dựa trên mô hình của đối tượng. Độ lợi trượt hàm sign trong luật điều khiển trượt được tính toán theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Độ lợi này nếu không được lựa chọn thích hợp rất dễ gây ra hiện tượng dao động (Nasser Sadati, Rasoul Ghadami and Mahdi Bagherpour, 2005).

Giải thuật trên sẽ được áp dụng để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Đây là hệ phi tuyến MIMO rất khó điều khiển. Đối với đối tượng này, có một số nhà khoa học đã nghiên cứu như (Ayca Gokhan Ak and Galip Canserver, 2006) sử dụng hai luật điều khiển (luật điều khiển tương đương và luật điều khiển chuyển đổi) để đưa quỹ đạo của hệ thống quay về mặt trượt. Luật điều khiển tương đương được xây dựng bằng mạng RBFNN và luật điều khiển chuyển đổi được thiết kế dựa trên logic mờ; (Xie Jian and Li Zushu, 2003) đã khảo sát đặc tính động học của hệ tay máy ba bậc tự do. Mục đích của bài báo của Xie Jian là nhằm mô phỏng lại các kỹ năng phức tạp đối với người luyện tập thể thao như vận người, xích đu, giữ thăng bằng trên hai tay và nhào lộn; (Subashini Elangovan and Peng-Yung Woo, 2004) áp dụng giải thuật trượt mờ thích nghi để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Trong bài báo này Subashini Elangovan đã sử dụng logic mờ để ước lượng các hàm phi tuyến và nhiễu ngoài nhằm loại bỏ dao động trong bộ điều khiển trượt.

2 MÔ HÌNH HỆ TAY MÁY BA BẬC TỰ DO

Hệ tay máy ba bậc tự do là đối tượng được sử dụng trong bài báo để minh chứng cho giải thuật điều khiển trượt thích nghi dùng mạng RBFNN. Dựa trên phương trình Euler-Lagrange, phương trình động học của hệ tay máy được thiết kế như sau:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + F(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + d(t) = u \quad (1)$$

với $M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$ là vector quán tính, $F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$ là vector ma sát,

$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}$ là vector trọng lực, $d(t) = 0.01.\sin(0.06\pi t)$ là tín hiệu nhiễu, $u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$ là

vector điện áp điều khiển và $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$ là vị trí góc của hệ tay máy,

trong đó:

$$M_{11} = m_1 l_1^2 + m_2 [l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2)] + m_3 [l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2) + 2l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{12} = M_{21} = m_2 [l_2^2 + l_1 l_2 \cos(\theta_2)] + m_3 [l_2^2 + l_3^2 + l_1 l_2 \cos(\theta_2) + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{13} = M_{31} = m_3 [l_3^2 + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{22} = m_2 l_2^2 + m_3 [l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{23} = M_{32} = m_3 [l_3^2 + l_2 l_3 \cos(\theta_3)]$$

$$M_{33} = m_3 l_3^2,$$

$$F_1 = -(m_2 + m_3) l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin(\theta_2) - m_3 l_1 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_3),$$

$$F_2 = (m_2 + m_3) \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2) + m_3 l_1 l_3 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - m_3 l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_3),$$

$$F_3 = m_3 l_1 l_3 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + m_2 l_2 l_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin(\theta_3),$$

$$G_1 = m_1 g l_1 \cos(\theta_1) + m_2 g [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1)] + m_3 g [l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)],$$

$$G_2 = m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_3 g [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)],$$

$$G_3 = m_3 g l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3),$$

Bảng 1: Các thông số sử dụng trong mô hình hệ tay máy ba bậc tự do

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
m_1	Khối lượng của khớp 1	1	kg
m_2	Khối lượng của khớp 2	0.8	kg
m_3	Khối lượng của khớp 3	0.5	kg
l_1	Chiều dài của khớp 1	1	m
l_2	Chiều dài của khớp 2	0.8	m
l_3	Chiều dài của khớp 3	0.6	m
g	Gia tốc trọng trường	9.81	m/s ²

3 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI CHO HỆ TAY MÁY DÙNG MẠNG RBFNN

3.1 Bộ điều khiển trượt

Giả sử hệ phi tuyến được viết dưới dạng phương trình trạng thái như sau

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (2)$$

trong đó $f(x)$ và $g(x)$ là hai hàm phi tuyến, $x_i (i = \overline{1, n})$ là các biến trạng thái.

Gọi θ_d là đáp ứng mong muốn của hệ tay máy, θ là đáp ứng thực của hệ tay máy. Mục tiêu của bài toán điều khiển là làm sao đưa θ tiến đến θ_d với sai số nhỏ nhất.

Phương trình sai số được thiết lập như sau:

$$e = \theta - \theta_d \quad (3)$$

Hàm trượt được định nghĩa sao cho hệ kín ổn định và đáp ứng của hệ bám theo quỹ đạo chuẩn.

$$s = \dot{e} + \frac{1}{\tau}e \quad (4)$$

với τ là thời hằng của hàm trượt và là hằng số dương được chọn trước.

Từ (2) suy ra $u = \frac{1}{g(x)} [-f(x) + \dot{\theta}]$ (5)

Mặt khác theo Lyapunov, chọn một hàm xác định dương $V = \frac{1}{2}s^2$, suy ra

$\dot{V} = s.\dot{s} < 0$ thì hệ thống đã cho ổn định.

Chọn $\dot{s} = -k\text{sign}(s)$ (6)

Bảng 2 mô tả hàm \dot{V} xác định âm và k được chọn tương ứng để hệ ổn định.

Bảng 2: Mối quan hệ giữa k và s

s	\dot{s}	k	\dot{v}
>0	<0	>0	<0
<0	>0	<0	<0
=0	=0	=0	=0

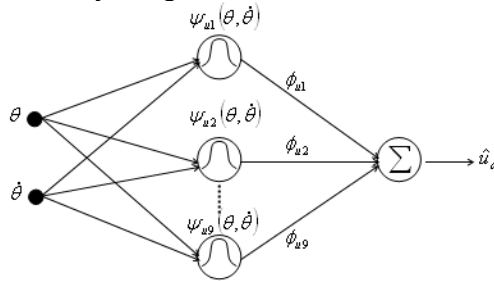
Giá trị k trong (5) phải được lựa chọn thỏa mãn bảng 2.

Luật điều khiển trượt tổng quát cho hệ tay máy ba bậc tự do được thiết kế dựa trên (4), (5) và (6)

$$u = \frac{1}{g(x)} \left[-f(x) + \ddot{\theta}_d - \frac{1}{\tau} \dot{e} - k \text{sign}(s) \right] \tag{7}$$

3.2 Bộ điều khiển thích nghi dùng mạng nơron hàm cơ sở xuyên tâm

Bộ điều khiển thích nghi đóng vai trò ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển trượt và giữ cho quỹ đạo của hệ tay máy bám theo quỹ đạo chuẩn. Ngõ vào của luật điều khiển là $[\theta, \dot{\theta}]^T$, ngõ ra là luật điều khiển thích nghi là u_{ec} . Sơ đồ mạng RBFNN được trình bày trong hình 1.



Hình 1: Mạng RBFNN

Trong đó:

Luật điều khiển thích nghi là $u_{ec}(\theta, \dot{\theta}) = \phi_u^T \psi_u(\theta, \dot{\theta})$ (8)

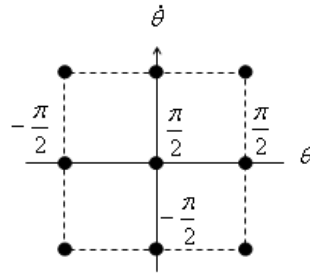
Luật cập nhật trọng số là $\dot{\phi}_u = Q_u^{-1} \psi_u e$ (9)

Với Q_u là ma trận xác định dương, $\psi_u(\theta, \dot{\theta}) = [\psi_{u1}(\theta, \dot{\theta}) \ \psi_{u2}(\theta, \dot{\theta}) \ \dots \ \psi_{u9}(\theta, \dot{\theta})]^T$ là hàm cơ sở Gauss, $\phi_u = [\phi_{u1} \ \phi_{u2} \ \dots \ \phi_{u9}]^T$ là thông số cập nhật.

Hàm cơ sở Gauss thứ i được định nghĩa $\psi_{ui} = \exp\left(-\frac{(\theta - c_{1i})^2 + (\dot{\theta} - c_{2i})^2}{\delta_i^2}\right)$ (10)

Các hàm cơ sở Gauss được phân bố đều trong không gian trạng thái. Độ rộng của các hàm cơ sở Gauss được chọn bằng nhau $\sigma_i = 0.8$ ($i = 1,9$). Tâm của hàm cơ sở c_{ki}

($k = \overline{1,2}$) được trình bày trong hình 2. Số điểm tham chiếu được chọn dựa trên (Hui Peng *et al.*, 2003) và (Trần Quang Thuận, 2006).



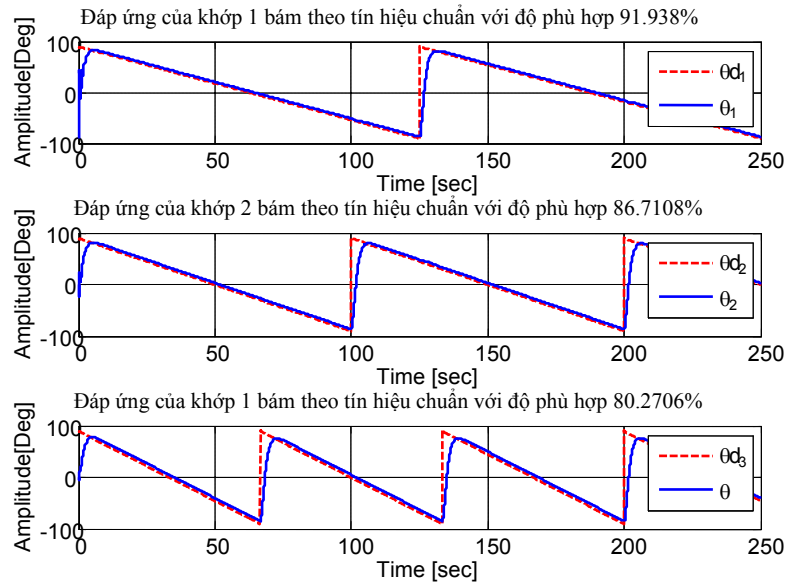
Hình 2: Vị trí tâm của hàm cơ sở RBFNN

4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

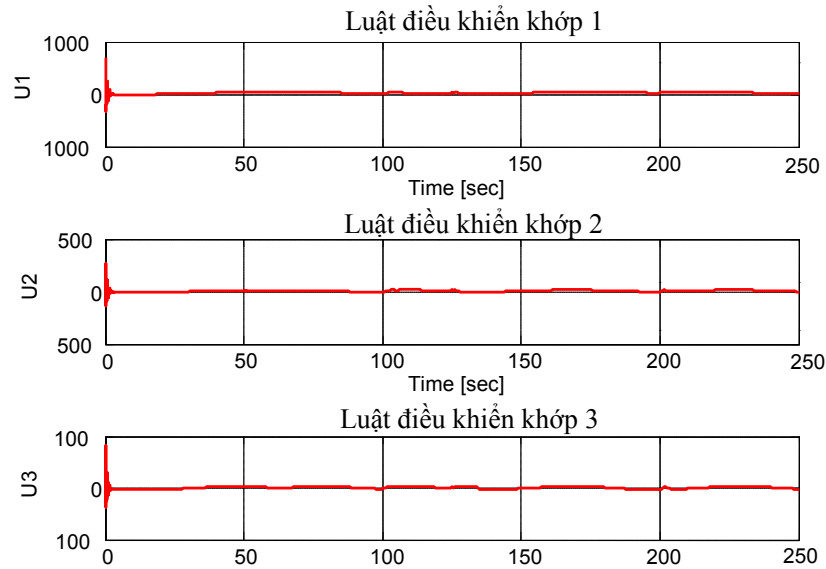
Luật điều khiển trượt thích nghi dùng mạng RBFNN đã điều khiển tốt đối tượng hệ tay máy ba bậc tự do kể cả trường hợp có nhiễu và thông số của đối tượng thay đổi theo thời gian. Kết quả điều khiển cho thấy: đáp ứng của hệ tay máy phẳng và bám theo tín hiệu chuẩn mong muốn. Đáp ứng không có vọt lố, không có dao động (xem Hình 3), sai số xác lập tiến đến lân cận zero (xem Hình 7) và quỹ đạo tiến về mặt trượt nhanh (xem Hình 5).

Tín hiệu vào của các khớp được chọn là hàm dốc và lệch pha nhau. Tại những thời điểm mà tín hiệu vào của một khớp thay đổi trạng thái đột ngột không làm ảnh hưởng nhiều đến đáp ứng của các khớp còn lại (xem Hình 3). Giả sử trong quá trình tính toán có sai số (khối lượng của các khớp thay đổi, xem Hình 6). Tại những thời điểm mà khối lượng các khớp thay đổi sẽ không ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng của hệ tay máy. Có được kết quả này là do bộ điều khiển trượt thích nghi. Bộ điều khiển này hoạt động tốt là do mặt trượt của hệ thống được chọn phù hợp và độ lợi k trước hàm sign trong luật điều khiển trượt được tính toán dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

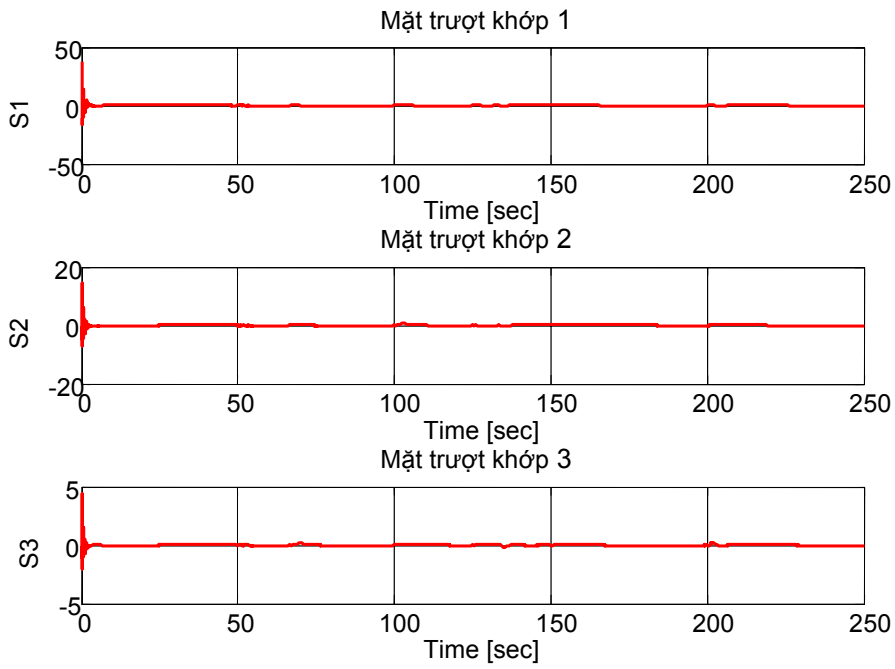
Giá trị k được chọn trong khoảng $[0.9, 25]$ và thời hằng của mặt trượt được chọn $[0.03875, 0.9]$ sẽ cho kết quả điều khiển tốt nhất. Nếu mặt trượt không được chọn phù hợp (thời hằng trong hàm trượt hoặc độ lợi k trước hàm sign) sẽ làm cho đáp ứng của hệ tay máy bị dao động tại những thời điểm mà trạng thái của tín hiệu vào thay đổi một cách đột ngột (xem Hình 8).



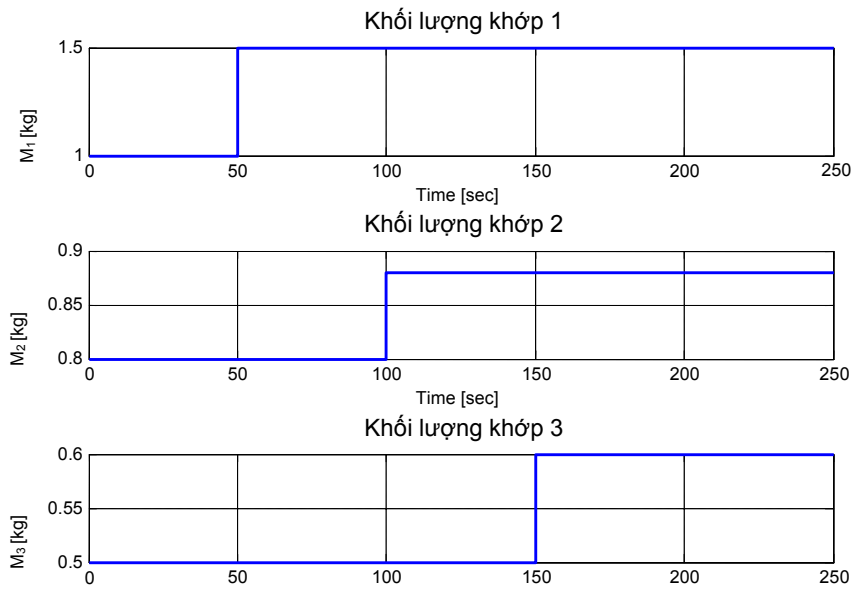
Hình 3: Đáp ứng của hệ tay máy bám theo tín hiệu chuẩn



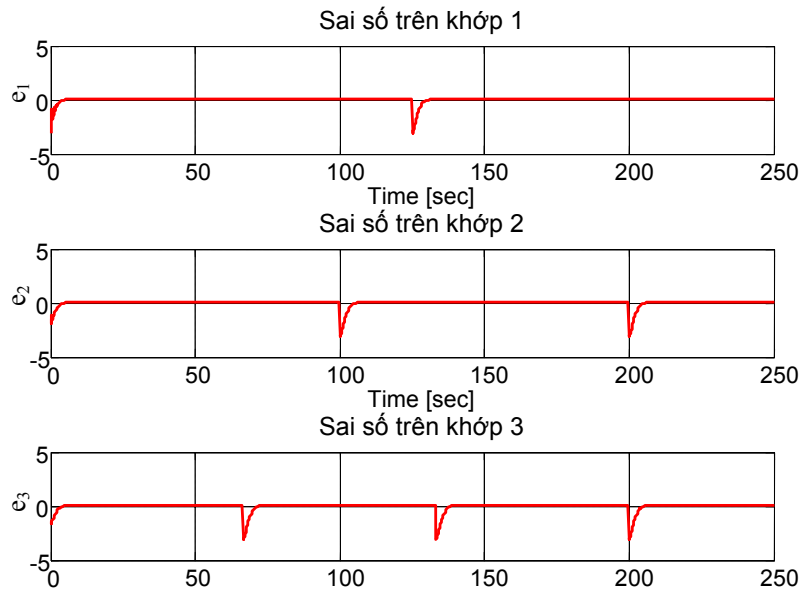
Hình 4: Luật điều khiển thích nghi



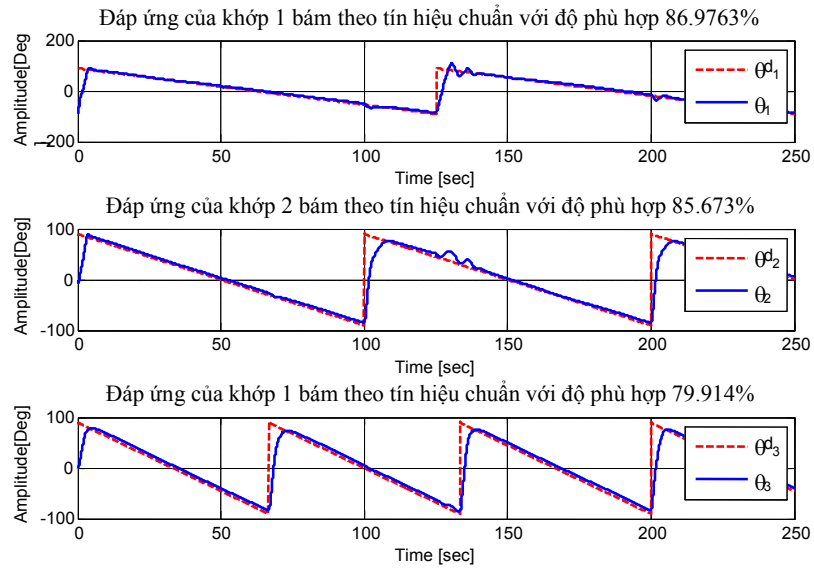
Hình 5: Mặt trượt của hệ tay máy



Hình 6: Khối lượng của các khớp thay đổi theo thời gian



Hình 7: Sai số xác lập



Hình 8: Đáp ứng của hệ tay máy bám theo tín hiệu chuẩn với k và τ được chọn không phù hợp

5 KẾT LUẬN

Bộ điều khiển trượt thích nghi được thiết kế dựa trên mạng RBFNN có vai trò đảm bảo cho đáp ứng của hệ tay máy bám theo tín hiệu chuẩn. Và luật điều khiển trượt có tác dụng bù sai số xấp xỉ để đảm bảo hệ kín ổn định.

Trong bài báo này, mạng RBFNN được dùng để ước lượng các hàm phi tuyến. Đồng thời độ lợi trước hàm sign trong luật điều khiển trượt cũng được hiệu chỉnh dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov để đảm bảo hệ kín ổn định. Giải thuật này được áp dụng để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Kết quả thí nghiệm cho thấy đáp ứng của tay máy phẳng, không có vọt lố, sai số xác lập tiến đến lân cận zero. Đáp ứng tay máy bám theo quỹ đạo mong muốn, kể cả trong trường hợp có nhiễu và thông số của mô hình đối tượng thay đổi. Mạng RBFNN với luật cập nhật trọng số thích nghi đã giúp cho bộ điều khiển thích ứng được khi thông số của mô hình thay đổi hoặc có nhiễu can thiệp vào.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ayca Gokhan Ak, Galip Canserver, 2006. Adaptive neural network based fuzzy sliding mode control of robot manipulator; 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Bangkok, p1-6
- Huỳnh Thái Hoàng, 2006. Hệ thống điều khiển thông minh; Trường Đại Học Quốc Gia TPHCM, lần 1, trang 307-336.
- Hui Peng, Tohru Ozaki, Valerie Haggan-Ozaki, and Yukihiko Toyoda, 2003. A Parameter Optimaization Method for Radial basis Function Type Models in: IEEE Transactions On Neural Network, Vol.14, No.2, pp.432-438.
- Nasser Sadati, Rasoul Ghadami and Mahdi Bagherpour, 2005. Adaptive Neural Network Multiple Models Sliding Mode Control of Robotic Manipulators Using Soft Switching; Proceeding of The IEEE Conference on tools with Artificial Intelligence, p431-438.
- M. Önder Efe., Okyay Kaynak and Bogdan M. Wilamowski, 2000. Creating a Sliding Mode in a Motion Control System by Adopting a Dynamic Defuzzification Strategy in an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System; The 26th Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society, vol.2, p894-899.
- M. Önder Efe, Okyay Kaynak, Xinghuo Yu and Bogdan M. Wilamowski, 2001. Sliding Mode Control of Nonlinear Systems Using Gaussian Radial Basis Function Neural Networks; IEEE transaction on Neural Networks, vol.1, p474-479
- Subashini Elangovan, Peng-Yung Woo, 2004. Adaptive Fuzzy Sliding Control for a Three-Link Passive Robotic Manipulator; The proceeding of the 2004 IEEE American control conference, Vol.6, p5274-5279.
- Trần Quang Thuận, 2006. Điều khiển trượt dùng mạng noron hàm cơ sở xuyên tâm; Luận văn thạc sỹ ngành tự động hóa, Trường Đại Học Bách Khoa, trang 37-86.
- Xie Jian, Li Zushu, 2003. Dynamic Model and Motion Control Analysis of Three-Link Gymnastic Robot on Horizontal Bar; The proceeding of the 2003 IEEE International conference on Robotics, Intelligent systems, System and signal Processing Changsha, China, p83-87.
- Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot, 2002. Sliding mode control in engineering, Chapter 1: Overview of classical sliding mode control, Marcel Dekker, Inc.