

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DÙNG MÔ HÌNH NƠON MỜ

Nguyễn Hoàng Dũng¹ và Dương Hoài Nghĩa²

ABSTRACT

The remarkable feature of sliding mode control (SMC) is the stability robustness against disturbances and variations of the system. However to design SMC, the exact model of the plant has to be known. Moreover the large gain of an SMC may intensify the chattering on the sliding surface. To cope with the above drawbacks, we propose to use a radial basis function neural network (RBFNN) to estimate the plant model and to use a fuzzy based gain for the SMC. This SMC gain is developed based on Lyapunov stability theory. The proposed algorithm is applied to control a three degrees of freedom robot manipulator, which is a complex MIMO (Multi input multi output) nonlinear system. Simulation results are provided to illustrate the proposed method.

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

Title: Adaptive sliding mode control using fuzzy based Neural Network

TÓM TẮT

Ưu điểm nổi bật của bộ điều khiển trượt là tính ổn định bền vững ngay cả khi hệ thống có nhiễu hoặc khi thông số của đối tượng 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, nếu biên độ của luật điều khiển trượt quá lớn sẽ gây ra hiện tượng dao động (chattering) quanh mặt trượt. Để giải quyết khó khăn trên, bài báo đề nghị sử dụng mạng nơon hàm cơ sở xuyên tâm (RBFNN) để ước lượng trực tuyến các hàm phi tuyến trong luật điều khiển. Và sử dụng logic mờ để ước lượng biên độ của luật điều khiển dựa vào lý thuyết ổn định Lyapunov. Giải thuật đề nghị sẽ áp dụng để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Với bộ điều khiển này, đáp ứng của hệ tay máy: độ vọt lố $\pm \frac{\pi}{2} \pm 3\%$ (Rad), thời gian tăng $5 \pm 3\%$ (s) và sai số xác lập xấp xỉ 1%. 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 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 (M. Önder Efe *et al.*, 2000; M. Önder Efe *et al.*, 2001; Wilfrid Perruquetti *et al.*, 2002; Trần Quang Thuận, 2006). 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.

¹ Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

² Khoa Điện-Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa TP HCM

Để có được bộ điều khiển trượt, người thiết phải biết chính xác mô hình đối tượng. Trong thực tế, vấn đề này không phải lúc nào cũng thực hiện được. Do đó để giải quyết khó khăn trên, chúng tôi đề nghị dùng mạng RBFNN để ước lượng trực tuyến các hàm phi tuyến trong luật điều khiển. Ngoài ra nếu biên độ của luật điều khiển trượt lớn, quỹ đạo pha sẽ dao động quanh mặt trượt (Nasser Sadati *et al*, 2005). Để làm giảm hiện tượng dao động, bài báo đề nghị sử dụng logic mờ để ước lượng biên độ của luật điều khiển.

Giải thuật trên sẽ được áp dụng để điều khiển hệ tay máy ba bậc tự do. Đây là hệ phi tuyến MIMO. Đối với đối tượng này, có một số nhà khoa học đã nghiên cứu như: (Ayca Gokhan Ak *et al.*, 2006) sử dụng luật điều khiển tương đương và luật điều khiển chuyển đổi để đưa quỹ đạo pha quay về mặt trượt và duy trì ổn định trên mặt trượt đó; (Xie Jian *et al.*, 2003) khảo sát đặc tính động học của hệ tay máy; (Subashini Elangovan *et al.*, 2004) sử dụng logic mờ để ước lượng các hàm phi tuyến và nhiễu nhằm loại bỏ dao động trong bộ điều khiển trượt.

2 MÔ HÌNH HỆ TAY MÁY

Mô hình động học hệ tay máy 3 bậc tự do như sau (Ayca Gokhan Ak *et al.*, 2006)

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

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 ma trận quán tính, $F=[F_1 \ F_2 \ F_3]^T$ là vector ma sát,

$G=[G_1 \ G_2 \ G_3]^T$ là vector trọng lực, $d(t)$ là tín hiệu nhiễu, $u=[u_1 \ u_2 \ u_3]^T$ là vector tín hiệu điều khiển, $\theta=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ là góc các khớp của hệ tay máy,

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

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

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

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

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

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

$$q = 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2,$$

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

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

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

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

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

Các thông số của hệ tay máy:

$m_1=1\text{kg}$ là khối lượng của khớp 1,

$m_2=0.8\text{kg}$ là khối lượng của khớp 2,
 $m_3=0.5\text{kg}$ là khối lượng của khớp 3,
 $l_1=1\text{m}$ là chiều dài của khớp 1,
 $l_2=0.8\text{m}$ là chiều dài của khớp 2,
 $l_3=0.6\text{m}$ là chiều dài của khớp 3,
 $g=9.81\text{ m/s}^2$ là gia tốc trọng trường.

3 ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DÙNG MẠNG RBFNN VÀ LOGIC MỜ

3.1 Điều khiển trượt

Gọi θ_d là đáp ứng mong muốn của hệ tay máy, θ là ngõ ra thực của hệ tay máy. Mục tiêu điều khiển là đưa θ tiến về θ_d với sai số bé nhất. Định nghĩa sai số điều khiển như (2).

$$e = \theta - \theta_d \tag{2}$$

Mặt trượt s_i (với $i = \overline{1,3}$)

$$s_i = \dot{e}_i + a_i e_i, a_i > 0 \tag{3}$$

Chọn luật điều khiển u sao cho

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \dot{s}_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_1 \cdot \text{sign}(s_1) \\ k_2 \cdot \text{sign}(s_2) \\ k_3 \cdot \text{sign}(s_3) \end{bmatrix} \tag{4}$$

Luật điều khiển trượt

$$u = [F(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)] + M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d} - a_1(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1d}) - k_1 \text{sign}(s_1) \\ \ddot{\theta}_{2d} - a_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2d}) - k_2 \text{sign}(s_2) \\ \ddot{\theta}_{3d} - a_3(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_{3d}) - k_3 \text{sign}(s_3) \end{bmatrix} \tag{5}$$

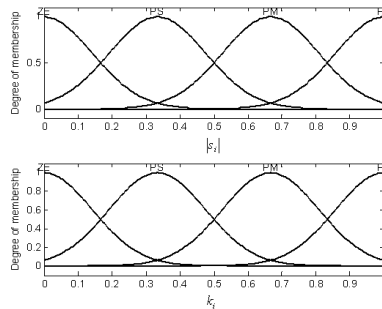
với k_i : biên độ luật điều khiển khớp thứ i .

3.2 Điều khiển trượt mờ

Biên độ của luật điều khiển được ước lượng trực tuyến bằng hệ suy diễn mờ với các luật mờ có dạng sau:

IF s_i is A_i^m THEN k_i is B_i^m , với $i = \overline{1,3}$

trong đó A_i^m và B_i^m là các tập mờ (Hình 1).



Hình 1: Tập mờ của s_i và k_i

Các hàm thành viên được sử dụng là hàm Gauss (Ayca Gokhan Ak *et al.*, 2006).

$$\mu_A(s_i) = \exp\left(-\left(\frac{s_i - \alpha_i}{\sigma_i}\right)^2\right), \quad i = \overline{1,3} \tag{6}$$

trong đó α_i, σ_i lần lượt là tâm và độ rộng của hàm Gauss thứ i .

Chọn một hàm xác định dương

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 s_i^2 \tag{7}$$

$$\text{Suy ra } \dot{V} = -\sum_{i=1}^3 s_i \cdot k_i \cdot \text{sign}(s_i) = -\sum_{i=1}^3 |s_i| \cdot k_i \tag{8}$$

Do đó, luật mờ được định nghĩa như sau:

IF $|s_i|$ is ZE THEN k_i is ZE

IF $|s_i|$ is PS THEN k_i is PS

IF $|s_i|$ is PM THEN k_i is PM

IF $|s_i|$ is PB THEN k_i is PB

với ZE: Zero, PS: Positive Small, PM: Positive Medium, PB: Positive Big

3.3 Điều khiển trượt dùng mạng RBFNN

Hệ phi tuyến được cho như (9)

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \tag{9}$$

với $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ là vector trạng thái, u là tín hiệu vào, y là tín hiệu ra, $f(x)$ và $g(x)$ là các hàm phi tuyến mô tả đặc tính động học của hệ thống.

Giả sử (10) không chứa u và (11) có chứa u .

$$\frac{d^{r-1}y}{dt^{r-1}} = L_f^{(r-1)}h(x) + L_f^{(r-2)}L_g h(x)u \tag{10}$$

$$\frac{d^r y}{dt^r} = L_f^{(r)}h(x) + L_f^{(r-1)}L_g h(x)u \tag{11}$$

với $L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x)$ là đạo hàm Lie theo phương $f(x)$ và $L_g h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x)$ là

đạo hàm Lie theo phương $g(x)$.

Từ (11) suy ra $y^{(r)} = a(x) + b(x)u$ (12)

Với $a(x) = L_f^{(r)}h(x)$, $b(x) = L_f^{(r-1)}L_g h(x)$

Luật điều khiển u được xác định sao cho $y^{(r)} = v(t)$ (13)

Với $v(t)$ là tín hiệu điều khiển mới.

Từ (12) và (13) suy ra

$$u^*(x) = \frac{1}{b(x)} [-a(x) + v(t)] \tag{14}$$

Luật điều khiển $v(t)$ được xác định dựa trên phương pháp gán cực với phương trình đặc trưng:

$$e^{(r)} + k_1 e^{(r-1)} + \dots + k_{r-1} e = 0 \tag{15}$$

với $e(t) = y_m(t) - y(t)$ (16)

và k_1, k_2, \dots, k_{r-1} được chọn sao cho (15) có nghiệm xác định âm.

Từ (13), (15) và (16) suy ra

$$y_m^{(r)}(t) - v(t) + k_1 e^{(r-1)} + \dots + k_{r-1} e = 0 \tag{17}$$

$$\text{hay } v(t) = y_m^{(r)}(t) + k_1 e^{(r-1)} + \dots + k_{r-1} e \tag{18}$$

$$\text{Đặt } \bar{e}_s + \eta e_s(t) = k_1 e^{(r-1)} + \dots + k_{r-1} e$$

Với $e_s(t) = e^{(r-1)} + k_1 e^{(r-2)} + \dots + k_{r-1} e$, η là hằng số dương và $\bar{e}_s = \dot{e}_s - e^{(r)}$, (Huỳnh Thái Hoàng, 2006).

$$\text{Luật điều khiển (14) được xấp xỉ bằng mạng RBFNN } \hat{u}(x) = \phi_u^T \psi_u(x) \tag{19}$$

Trong đó $\psi_u(x)$ là hàm cơ sở Gauss, ϕ_u là trọng số cập nhật sao cho \hat{u} tiến đến u^* .

Do \hat{u} được ước lượng bằng mạng RBFNN với số neuron ở lớp ẩn hữu hạn nên không tránh khỏi sai số. Gọi $\delta_u(x)$ là sai số cấu trúc, ta có

$$u^*(x) = \phi_u^{*T} \psi_u(x) + \delta_u(x) \tag{20}$$

Sai lệch giữa \hat{u} và u^*

$$\hat{u}(x) - u^*(x) = \tilde{\phi}_u^T \psi_u(x) - \delta_u(x) \tag{21}$$

với $\tilde{\phi}_u^T = \phi_u - \phi_u^*$ sai số thông số ước lượng. Do có sai số cấu trúc nên luật điều khiển có dạng sau [9]

$$u = \hat{u} + u_s \tag{22}$$

với u_s là luật điều khiển trượt được chọn sao cho hệ kín ổn định.

Từ (12) suy ra

$$\begin{aligned} y^{(r)} &= a(x) + b(x)u(t) \\ &= a(x) + b(x)u^*(t) + b(x)[u(t) - u^*(t)] \end{aligned} \tag{23}$$

so sánh (14) và (23), ta có:

$$y^{(r)} = v(t) + b(x)[u(t) - u^*(t)] \tag{24}$$

Sai số ngõ ra được thiết lập

$$e^{(r)} = y_m^{(r)} - y^{(r)} \tag{25}$$

Thay (24) vào (25)

$$e^{(r)} = -\bar{e}_s - \eta e_s - b \tilde{\phi}_u^T \psi_u + b \delta_u - b u_s \tag{26}$$

Từ (26) ta có

$$\dot{e}_s + \eta e_s = -b \tilde{\phi}_u^T \psi_u + b \delta_u - b u_s \tag{27}$$

Chọn hàm xác định dương

$$V = \frac{1}{2b} e_s^2 + \frac{1}{2} \tilde{\phi}_u^T Q_u \tilde{\phi}_u \tag{28}$$

$$\Rightarrow \dot{V} = \frac{1}{b} e_s \dot{e}_s - \frac{\dot{b}}{2b^2} e_s^2 + \tilde{\phi}_u^T Q_u \dot{\tilde{\phi}}_u \tag{29}$$

với $\dot{\tilde{\phi}}_u = \dot{\phi}_u$, Q_u là ma trận xác định dương. Thay (27) vào (29)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{\eta e_s^2}{b} - e_s u_s + e_s \delta_u \\ &\quad + \tilde{\phi}_u^T (Q_u \dot{\phi}_u - \psi_u \dot{e}_s) - \frac{\dot{b}}{2b^2} e_s^2 \end{aligned} \tag{30}$$

Dựa trên (Huỳnh Thái Hoàng, 2006) và (30) luật cập nhật thông số thích nghi

$$\dot{\phi}_u = Q_u^{-1} \psi_u e_s \tag{31}$$

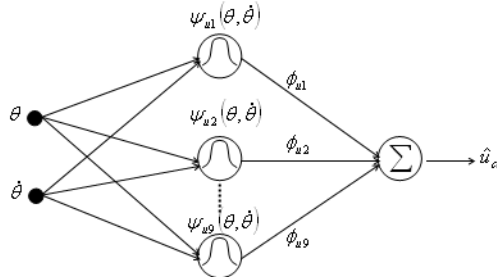
Thay (31) vào (30), ta có

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{\eta e_s^2}{b} - e_s u_s + e_s \left(\delta_u - \frac{b}{2b^2} e_s \right) \\ &\leq -\frac{\eta e_s^2}{b} - e_s u_s + |e_s| \left(\bar{\delta}_u + \frac{D_b}{2b^2} |e_s| \right) \end{aligned} \tag{32}$$

với $|b(x)| \leq D_b$, D_b là hàm liên tục (Huỳnh Thái Hoàng, 2006).

Nếu chọn $u_s = \left(\bar{\delta}_u + \frac{D_b}{2b^2} |e_s| \right) \text{sign}(e_s)$, (32) trở thành $\dot{V} = -\frac{\eta e_s^2}{b} \leq 0$. Suy ra hệ kín ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

Mạng RBFNN (Hình 2) giữ vai trò ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển sao cho hệ kín ổn định. Ngõ vào của mạng là $[\theta_i, \dot{\theta}_i]^T$, ngõ ra là luật điều khiển thích nghi u_{ce} . Trọng số được cập nhật trực tuyến dựa trên (31).



Hình 2: Mạng RBFNN

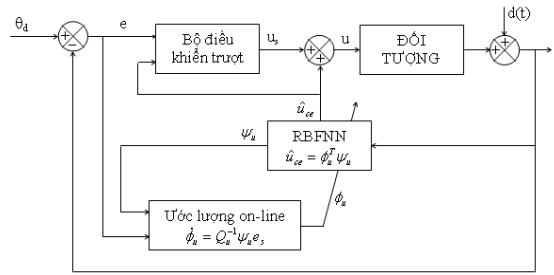
$\psi_i = [\psi_{1i} \ \psi_{2i} \ \dots \ \psi_{9i}]^T$ hàm cơ sở Gauss, $\phi_i = [\phi_{1i} \ \phi_{2i} \ \dots \ \phi_{9i}]^T$ là thông số cập nhật. Hàm cơ sở Gauss thứ j được định nghĩa như sau:

$$\psi_{ji} = \exp\left(-\frac{(\theta_i - c_{1j})^2 + (\dot{\theta}_i - c_{2j})^2}{\delta_j^2}\right) \tag{33}$$

với $j = \overline{1,9}$, độ rộng của các hàm cơ sở Gauss được chọn bằng nhau $\sigma_j = 0.9$ và c_{kj} ($k = \overline{1,2}$) là tâm hàm cơ sở.

3.4 Bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ

Bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ là sự kết hợp giữa bộ điều khiển trượt mờ và bộ điều khiển trượt dùng mạng RBFNN. Bộ điều khiển u_s trong (22) được ước lượng trực tuyến bằng logic mờ nhằm giảm dao động. Và mạng RBFNN sẽ nhận dạng luật điều khiển dựa trên việc ước lượng các hàm phi tuyến trong luật điều khiển sao cho hệ kín ổn định. Sơ đồ mô tả bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ được trình bày trong (Hình 3).



Hình 3: Sơ đồ điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ

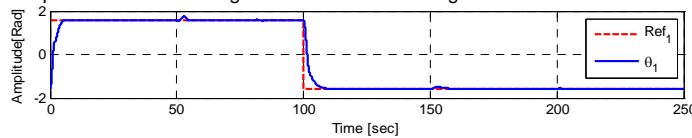
4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Khi cho nhiễu $d(t)=0.01*\sin(0.06\pi t)$ hoặc nhiễu ngẫu nhiên (có trung bình bằng không, phương sai 0.01, giá trị ban đầu là ngẫu nhiên) tác động lên hệ tay máy và thông số đối tượng thay đổi như sau: khối lượng khớp 1 tăng 50% tại thời điểm 10s, khớp 2 tăng 10% tại 20s và khớp 3 tăng 20% tại 40s. Kết quả cho thấy, đáp ứng của hệ tay máy không có dao động và vọt lố, sai số xác lập tiến đến zero (xem Bảng 1). Độ phù hợp giữa đáp ứng của hệ tay máy và tín hiệu chuẩn đạt 96% (Hình 4). Quỹ đạo pha không có hiện tượng dao động quanh mặt trượt (hình 8). Có được kết quả này là do sự ước lượng trực tuyến luật điều khiển u_s sử dụng logic mờ (Hình 7) và nhận dạng trực tuyến luật điều khiển dựa trên việc ước lượng các hàm phi tuyến dùng mạng RBFNN (Hình 6). Luật điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ được trình bày trong hình 5.

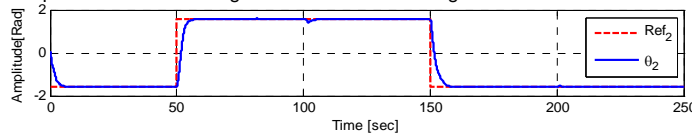
Bảng 1: Thông số chất lượng của đáp ứng hệ tay máy

	Khớp 1	Khớp 2	Khớp 3
Overshoot	$\pm \frac{\pi}{2} \pm 3\%(Rad)$	$\pm \frac{\pi}{2} \pm 4\%(Rad)$	$\pm \frac{\pi}{2} \pm 4\%(Rad)$
Risetime	$5 \pm 3\%(s)$	$5 \pm 3\%(s)$	$5 \pm 3\%(s)$
Ess	0.68%	1.24%	1.32%

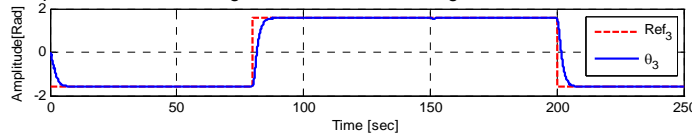
The response of link1 tracking on desired reference signal with validate fitness 96.3775%



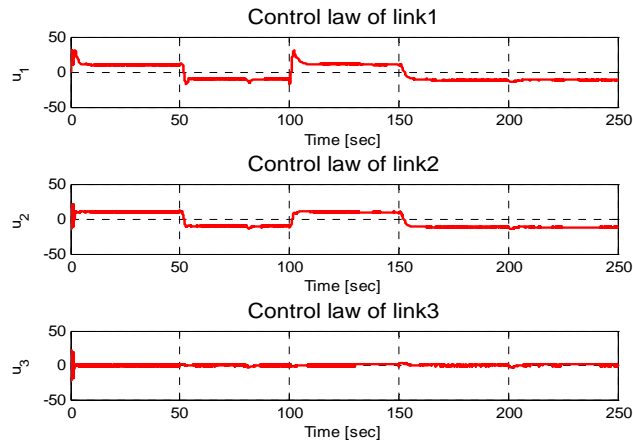
The response of link2 tracking on desired reference signal with validate fitness 95.5114%



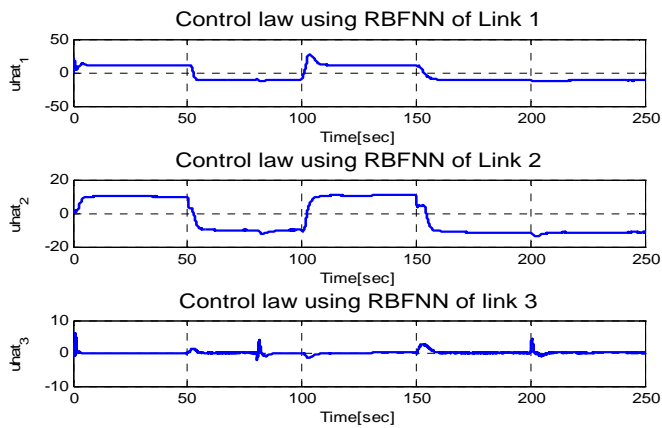
The response of link3 tracking on desired reference signal with validate fitness 95.4282%



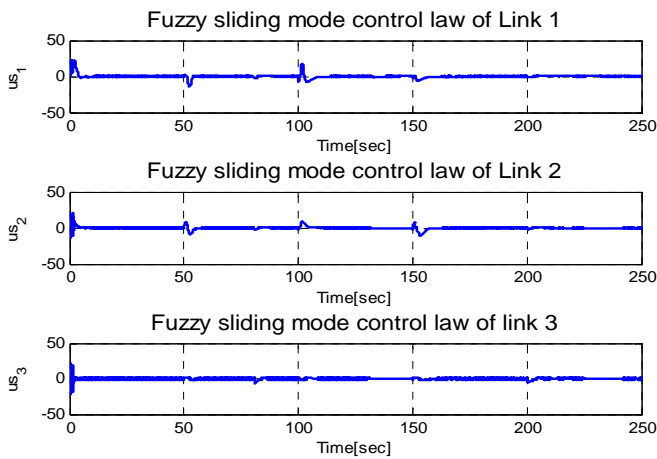
Hình 4: Đáp ứng của hệ tay máy



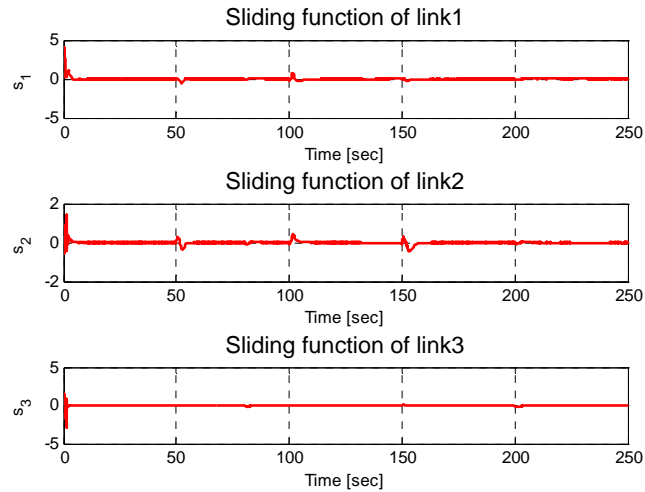
Hình 5: Luật điều khiển $u = \hat{u} + u_s$



Hình 6: Luật điều khiển thích nghi được nhận dạng bằng mạng RBFNN



Hình 7: Luật điều khiển trượt được ước lượng bằng logic mờ



Hình 8: Mặt trượt của hệ tay máy

5 KẾT LUẬN

Bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mô hình nơron mờ đã thể hiện được tính thích nghi cả về nhiễu và thông số của đối tượng thay đổi theo thời gian. Trong bộ điều khiển này, chúng tôi sử dụng logic mờ để ước lượng trực tuyến biên độ luật điều khiển nhằm hạn chế dao động. Đồng thời sử dụng mạng RBFNN để nhận dạng luật điều khiển dựa trên việc ước lượng các hàm phi tuyến nhằm đảm bảo cho hệ kín ổn định.

Với giải thuật điều khiển đề nghị, kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của hệ tay máy không có dao động và vọt lố $\pm \frac{\pi}{2} \pm 3\% (Rad)$, sai số xác lập xấp xỉ 1%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- 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
- Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot, 2002. *Sliding mode control in engineering*, Chapter 1: Overview of classical sliding mode control, Marcel Dekker, Inc.
- 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
- Trần Quang Thuận, 2006. *Điều khiển trượt dùng mạng nơron 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
- 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
- Huỳnh Thái Hoàng, 2006. *Hệ thống điều khiển thông minh*; Đại Học Quốc Gia TP HCM, lần 1, trang 307-336.