

ĐIỀU KHIỂN MỜ THÍCH NGHI BACKSTEPPING KẾT HỢP CHO TAY MÁY ROBOT KHỚP ĐÀN HỒI

Nguyễn Văn Hải^{1*}, Vũ Hòa Tiến², Nguyễn Thanh Tiên², Trần Xuân Anh³

Tóm tắt: Bài báo này trình bày vấn đề tổng hợp thuật toán điều khiển bám vị trí cho tay máy robot khớp đàn hồi có xét đến động học của động cơ chấp hành và nhiễu loạn tác động. Thuật toán được tổng hợp trên cơ sở Backstepping có sử dụng hệ mờ thích nghi xấp xỉ hàm và điều khiển chuyển mạch ở bước cuối cùng với mục đích tăng tính bền vững; kết quả mô phỏng cho tay máy hai khâu trên cơ sở Matlab-Simulink được trình bày để chứng minh tính hội tụ của luật điều khiển đã đề xuất.

Từ khóa: Backstepping, Hệ mờ thích nghi xấp xỉ hàm, Tay máy khớp mềm.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các tay máy robot, hệ thống truyền động là khâu quan trọng ghép nối các khâu tạo ra chuyển động bao gồm các động cơ chấp hành, khớp quay, khớp nối, thanh truyền, cơ cấu giảm tốc với cơ cấu chấp hành. Khi chế tạo các bộ phận truyền động cho tay máy robot, người ta luôn mong muốn chúng đạt được độ cứng tuyệt đối, nói cách khác, thuộc tính đàn hồi là yếu tố không mong muốn trong các đối tượng điều khiển. Tuy nhiên loại bỏ hoàn toàn tính chất đàn hồi trong một hệ truyền động là điều phi thực tế, vì các loại vật liệu thường có độ đàn hồi nhất định, do vậy các bộ phận truyền động tùy theo cấu trúc sẽ có tính chất đàn hồi đặc trưng.

Khi xét tới sự tồn tại và ảnh hưởng của các yếu tố đàn hồi trong các khớp, người ta thấy rằng bậc hàm truyền của hệ thống điều khiển tăng lên so với các tay máy robot giả thiết là hoàn toàn cứng. Việc tổng hợp điều khiển cho các hệ thống bậc cao luôn là vấn đề khó khăn, đặc biệt khi xét đến các ảnh hưởng của nhiễu loạn và bất định tham số. Khi đó, các phương pháp điều khiển có tính bền vững với bất định và nhiễu loạn được quan tâm như điều khiển mờ [5], mạng nơron [1], [3], điều khiển trượt [2, 3]. Để nâng cao chất lượng điều khiển, một số nghiên cứu đã tập trung vào việc đánh giá các thành phần bất định [1], [3] trên cơ sở mạng nơron RBF. Tuy nhiên, các nghiên cứu [1],[3] mới chỉ dừng ở việc tổng hợp điều khiển cho đối tượng tay máy 1 khâu, điều này đã mất đi tính tổng quát của nghiên cứu.

Trong thực tế, có nhiều phương pháp xấp xỉ bất định, trong đó việc xấp xỉ bất định sử dụng hệ mờ có ưu điểm là dễ dàng thiết kế và áp dụng các hiểu biết về đối tượng trong việc thiết kế điều khiển. Việc sử dụng hệ mờ có cấu trúc feedforward cũng tương đồng với mạng nơron đa lớp feedforward trong xấp xỉ hàm [4].

Với mục tiêu nâng cao chất lượng hệ điều khiển tay máy robot khớp đàn hồi có xét đến động học của động cơ chấp hành trên cơ sở sử dụng công cụ mờ để xấp xỉ và bù trừ các thành phần bất định, nhiễu loạn tồn tại trong mô hình đối tượng, bài báo định hướng vào việc tổng hợp bộ điều khiển Backstepping kết hợp sử dụng hệ mờ để xấp xỉ bất định cho đối tượng này.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ TỔNG HỢP ĐIỀU KHIỂN

2.1. Xây dựng mô hình, đặt bài toán bám sát

Xét mô hình động lực học tay máy robot khớp đàn hồi n khớp quay với động học của động cơ chấp hành được mô tả như phương trình (1) [1].

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{q}_1)\ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{C}(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{g}(\mathbf{q}_1) &= \mathbf{K}(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) + \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{K}(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) &= \mathbf{K}_b \mathbf{I}_u + \mathbf{d}_2 \\ \mathbf{L}_u \dot{\mathbf{I}}_u + \mathbf{R}_u \mathbf{I}_u + \mathbf{K}_b \dot{\mathbf{q}}_2 &= \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: $\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1 \in R^n$ - là các vectơ vị trí và vận tốc góc của các khâu; $\mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2 \in R^n$ - là các vectơ vị trí và vận tốc góc của các động cơ chấp hành; $\mathbf{D}(\mathbf{q}_1), \mathbf{J} \in R^{n \times n}$ - là ma trận mômen quán tính của khâu và rô to động cơ chấp hành; $\mathbf{C}(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1) \in R^{n \times n}$ - ma trận lực hướng tâm và lực Coriolis; $\mathbf{B} \in R^{n \times n}$ - ma trận hệ số ma sát nhớt; \mathbf{d}_1 và \mathbf{d}_2 là véc tơ tổng hợp các thành phần nhiễu loạn và không xác định của mô hình tay máy; $\mathbf{g}(\mathbf{q}_1) \in R^n$ - véc tơ lực hấp dẫn; \mathbf{K}_b - ma trận hệ số phụ thuộc kết cấu động cơ; $\mathbf{I}_u, \mathbf{u}, \mathbf{L}_u, \mathbf{R}_u$ - tương ứng là tham số dòng điện, điện áp, điện cảm và điện trở phần ứng của động cơ. Thành phần $\mathbf{K}(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1)$ đặc trưng cho mô men đàn hồi của khớp.

Bằng cách đặt biến trạng thái như sau: $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}_1$; $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}_1$; $\mathbf{x}_3 = \mathbf{q}_2$; $\mathbf{x}_4 = \dot{\mathbf{q}}_2$; $\mathbf{x}_5 = \mathbf{I}_u$; và đặt $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -\mathbf{x}_3 - \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{x}_1)[\mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{K}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1) + \mathbf{d}_1]$, $\mathbf{b} = \mathbf{L}_u^{-1}$
 $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = -\mathbf{x}_5 + \mathbf{J}^{-1}[\mathbf{K}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3) - \mathbf{B}\mathbf{x}_4 + \mathbf{K}_b\mathbf{x}_5 - \mathbf{d}_2]$; $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = -\mathbf{L}_u^{-1}\mathbf{R}_u\mathbf{x}_5 - \mathbf{L}_u^{-1}\mathbf{K}_b\mathbf{x}_4$.

Ta nhận được hệ:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2; \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{x}_3 + \mathbf{g}(\mathbf{x}); \dot{\mathbf{x}}_3 = \mathbf{x}_4; \dot{\mathbf{x}}_4 = \mathbf{x}_5 + \mathbf{h}(\mathbf{x}); \dot{\mathbf{x}}_5 = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}\mathbf{u} \quad (2)$$

Bài toán điều khiển đặt ra là tìm cấu trúc tín hiệu điều khiển là điện áp phần ứng của động cơ, sao cho đại lượng đầu ra bám sát theo giá trị mong muốn cho trước ($\mathbf{x}_1 \rightarrow \mathbf{x}_{1d}$), với giả thiết tín hiệu đặt có tồn tại các đạo hàm bậc cao. Ta thấy hàm $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ trong (2) không phụ thuộc vào các biến trạng thái $\mathbf{x}_4, \mathbf{x}_5$, như vậy hệ (2) có tính chất kết tầng, khi đó ta có thể ứng dụng phương pháp tổng hợp Backstepping.

2.2. Tổng hợp điều khiển Backstepping với ước lượng bất định

Khi các hàm bất định được ước lượng, chúng ta có thể áp dụng các bước tổng hợp điều khiển Backstepping cho đối tượng (2) như sau:

+ Đặt $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d}$ là dạng sai số đầu ra với \mathbf{x}_{1d} quỹ đạo mong muốn cần đạt tới trong bài toán bám sát.

Để có được $\mathbf{e}_1 \rightarrow 0$, định nghĩa hàm Lyapunov như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 \quad (3)$$

Vi phân hàm Lyapunov (3), thế các biểu thức liên quan và chọn

$$\mathbf{x}_2 = -\mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{x}}_{1d} \quad (4)$$

Với $\mathbf{K}_1 \in R^{n \times n}$ là ma trận xác định dương. Ta được

$$\dot{V}_1 = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 \leq 0 \quad (5)$$

+ Thực hiện các bước tương tự, bằng cách chọn hàm Lyapunov theo (3)

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i, \quad i = 1 \div 5 \quad (6)$$

Và các điều khiển giả định như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{2d} &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{x}}_{1d} \\ \mathbf{x}_{3d} &= -\mathbf{e}_1 - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2 - \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) + \dot{\mathbf{x}}_{2d} \\ \mathbf{x}_{4d} &= -\mathbf{e}_2 - \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_3 + \dot{\mathbf{x}}_{3d} \\ \mathbf{x}_{5d} &= -\mathbf{e}_3 - \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_4 - \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) + \dot{\mathbf{x}}_{4d1} \end{aligned} \quad (7)$$

Thực hiện các biến đổi tương tự ta sẽ có được vi phân của V_5 [3]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 &= -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3^T \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_4^T \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_4 + \mathbf{e}_2^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x})) \\ &+ \mathbf{e}_3^T (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}) + \mathbf{e}_4^T (\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})) + \mathbf{e}_5^T (\mathbf{e}_4 + \mathbf{f}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{5d1} + \mathbf{b}\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (8)$$

Từ (8), ta có thể chọn luật điều khiển như sau:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_{sw} \quad (9)$$

Trong đó, $\mathbf{u}_{eq} = \mathbf{b}^{-1}(-\mathbf{e}_4 - \hat{\mathbf{f}}_1 + \dot{\mathbf{x}}_{5d1})$ là thành phần điều khiển bù và $\mathbf{u}_{sw} = -\mathbf{K}_5 \mathbf{b}^{-1} \text{sgn}(\mathbf{e}_5)$ là thành phần điều khiển chuyển mạch, \hat{f}_1 là ước lượng của f_1 .

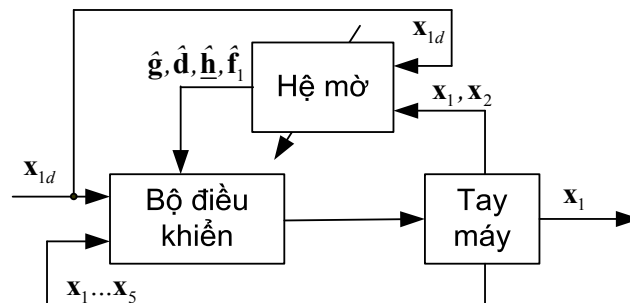
Khi đó:

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 &= -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3^T \mathbf{K}_3 \mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_4^T \mathbf{K}_4 \mathbf{e}_4 - \mathbf{K}_5 \mathbf{e}_5^T \text{sgn}(\mathbf{e}_5) \\ &+ \mathbf{e}_2^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x})) + \mathbf{e}_3^T (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}) + \mathbf{e}_4^T (\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})) + \mathbf{e}_5^T (\mathbf{f}_1 - \hat{\mathbf{f}}_1) \end{aligned} \quad (10)$$

Nếu $\hat{\mathbf{g}} \rightarrow \mathbf{g}, \hat{\mathbf{d}} \rightarrow \mathbf{d}, \hat{\mathbf{h}} \rightarrow \mathbf{h}, \hat{\mathbf{f}}_1 \rightarrow \mathbf{f}_1$ chúng ta nhận được $\dot{V}_5 \leq 0$. Để có được thông tin các hàm bất định trên, chúng ta có thể sử dụng hệ mờ để xấp xỉ chúng.

2.3. Thiết kế điều khiển với hệ thống Fuzzy xấp xỉ hàm bất định

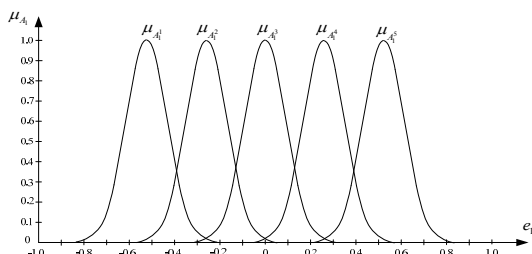
Để có thông tin của $\hat{\mathbf{g}}, \hat{\mathbf{d}}, \hat{\mathbf{h}}, \hat{\mathbf{f}}_1$ ta sử dụng hệ mờ để xấp xỉ chúng. Khi đó cấu trúc bộ điều khiển như hình 1.



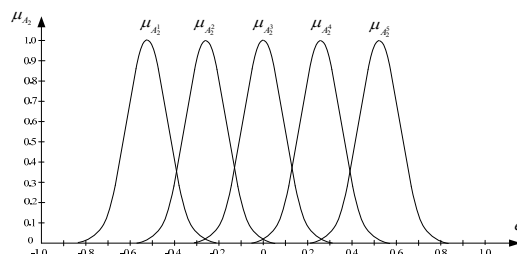
Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển thích nghi Backstepping –trượt với hệ mờ xấp xỉ hàm bất định.

Để làm rõ các bước xấp xỉ một hàm bất định, ta xây dựng thuật toán xấp xỉ một hàm g của tay máy robot, khi đó các bước xấp xỉ được thực hiện như sau [6]

+ Định nghĩa các tập mờ:



Hình 2. Hàm liên thuộc tập mờ e_1 .



Hình 3. Hàm liên thuộc tập mờ e_2 .

Chọn đầu vào của hệ mờ là sai số và tốc độ sai số $x = [e_1 \ e_2]^T$, định nghĩa các tập mờ đầu vào $A_1^1, A_1^2, \dots, A_1^5$ trên khoảng $[-1, 1]$ của e_1 có hàm thuộc $\mu_{A_1^p(e_1)}$, $p = 1, 2, \dots, 5$ dạng hàm Gauss như hình 2 với:

$$\mu_{A_1^p(e_1)} = \exp[-((e_1 + \pi/6 - (p-1)*\pi/12) / (\pi/24))^2] \quad (11)$$

Các tập mờ đầu vào $A_2^1, A_2^2, \dots, A_2^5$ trên khoảng $[-1, 1]$ của e_2 có hàm thuộc $\mu_{A_2^q(e_2)}$, $q = 1, 2, \dots, 5$ dạng hàm Gauss như hình 3 với:

$$\mu_{A_2^q(e_2)} = \exp[-((e_2 + \pi/6 - (q-1)*\pi/12) / (\pi/24))^2] \quad (12)$$

Các tập mờ đầu ra E^{pq} được định nghĩa dạng singleton (hàm Kronecker) tại các điểm y_{pq} được chọn bằng luật thích nghi phù hợp.

+ Xây dựng các luật điều khiển:

Trên cơ sở các tập mờ đã chọn, ta thiết lập các luật điều khiển theo cấu trúc:

Nếu e_1 là A_1^p và e_2 là A_2^q thì g là E^{pq} với $p = 1, 2, \dots, 5$; $q = 1, 2, \dots, 5$.

Các luật điều khiển được thể hiện như bảng sau:

g		e_1				
		A_1^1	A_1^2	A_1^3	A_1^4	A_1^5
e_2	A_2^1	E^{11}	E^{21}	E^{31}	E^{41}	E^{51}
	A_2^2	E^{12}	E^{22}	E^{32}	E^{42}	E^{52}
	A_2^3	E^{13}	E^{23}	E^{33}	E^{43}	E^{53}
	A_2^4	E^{14}	E^{24}	E^{34}	E^{44}	E^{54}
	A_2^5	E^{15}	E^{25}	E^{35}	E^{45}	E^{55}

+ Chọn thiết bị hợp thành:

Chọn nguyên tắc triển khai sum-PROD cho mệnh đề hợp thành, tích đại số cho phép giao và công thức Lukasiewicz cho phép hợp thì tập mờ đầu ra E' khi đầu vào là một giá trị rõ $x = [e_{01}, e_{02}]^T$ sẽ là [6]:

$$\mu_{E'}(y) = \min \left\{ 1, \sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^5 (\mu_{B^{pq}}(y) \mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02})) \right\} \quad (13)$$

Vì $\mu_{B^{pq}}(y)$ là hàm Kronecker, khi đó

$$\mu_{E'}(y) = \min \left\{ 1, \sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^5 (\mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02})) \right\} \quad (14)$$

+ *Chọn phương pháp giải mờ:*

Chọn phương pháp độ cao để giải mờ, phép lấy MIN ở công thức trên có thể bỏ qua mà không ảnh hưởng tới kết quả, đầu ra của hệ mờ được xác định như sau [7]:

$$\hat{g} = \frac{\sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^5 y^{pq} (\mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02}))}{\sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^5 (\mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02}))} \quad (15)$$

Đặt
$$\zeta(x) = \frac{\mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02})}{\sum_{p=1}^5 \sum_{q=1}^5 (\mu_{A_p}(e_{01}) \mu_{A_q}(e_{02}))} \quad (16)$$

là véc tơ tham số hệ mờ và $\hat{\theta} = y^{pq}$.

Phương trình (15) được viết như sau:

$$\hat{g}(x | \theta) = \hat{\theta} \cdot \zeta^T(x) \quad (17)$$

Khái quát trong trường hợp tay máy n khâu, khi đó, các hàm bất định $\mathbf{g}, \mathbf{d}, \mathbf{h}, \mathbf{f}_1$ được biểu diễn dưới dạng véc tơ. Luật hợp thành được chọn như (14), giải mờ theo công thức (17) khi đó đầu ra của hệ mờ là:

$$\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x} | \theta_1) = \hat{\theta}_1 \zeta_1^T(\mathbf{x}); \hat{\mathbf{d}}(\mathbf{x} | \theta_2) = \hat{\theta}_2 \zeta_2^T(\mathbf{x}); \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x} | \theta_3) = \hat{\theta}_3 \zeta_3^T(\mathbf{x}); \hat{\mathbf{f}}_1(\mathbf{x} | \theta_4) = \hat{\theta}_4 \zeta_4^T(\mathbf{x}) \quad (18)$$

Phương trình xấp xỉ các hàm bất định $\mathbf{g}, \mathbf{d}, \mathbf{h}, \mathbf{f}_1$ sử dụng hệ mờ như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{g} = \underline{\theta}_1 \zeta_1^T(\mathbf{x}) + \underline{\epsilon}_1; \\ \mathbf{d} = \underline{\theta}_2 \zeta_2^T(\mathbf{x}) + \underline{\epsilon}_2; \\ \mathbf{h} = \underline{\theta}_3 \zeta_3^T(\mathbf{x}) + \underline{\epsilon}_3; \\ \mathbf{f}_1 = \underline{\theta}_4 \zeta_4^T(\mathbf{x}) + \underline{\epsilon}_4 \end{cases} \quad (19)$$

Với $\underline{\theta}_k = \begin{bmatrix} \theta_{k1} & & \\ & \ddots & \\ & & \theta_{ki} \end{bmatrix}$; $\hat{\theta}_k = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{k1} & & \\ & \ddots & \\ & & \hat{\theta}_{ki} \end{bmatrix}$; Trong đó, θ_{ki} là ma trận tham số hệ mờ,

$\hat{\theta}_{ki}$ là ma trận tham số ước lượng, $\zeta_k^T = [\zeta_{k1} \ \zeta_{k2} \ \dots \ \zeta_{ki}]^T$; với ζ_{ki} được xác định như (16), $\underline{\epsilon}_k^T = [\epsilon_{k1} \ \epsilon_{k2} \ \dots \ \epsilon_{ki}]^T$, $\|\underline{\epsilon}_k\| < \epsilon_N$ là véc tơ sai số xấp xỉ; $k = 1, 2, \dots, 4; i = 1, 2, \dots, n$.

Định nghĩa Θ là ma trận đường chéo tham số hệ mờ, $\hat{\Theta}$ là ma trận đường chéo tham số ước lượng

$$\Theta = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \underline{\theta}_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \underline{\theta}_4 \end{bmatrix}, \hat{\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \hat{\theta}_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \hat{\theta}_4 \end{bmatrix} \text{ với } \|\Theta\|_F \leq \Theta_M, \tilde{\Theta} = \Theta - \hat{\Theta} \quad (20)$$

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = V_5 + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\Theta}^T \lambda \tilde{\Theta}) \quad (21)$$

Với λ là ma trận xác định dương. Vì phân hàm Lyapunov (21), qua một số phép biến đổi và thay thế các biểu thức liên quan, khi đó:

$$\dot{V} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K} \mathbf{e} - \mathbf{K}_5 \|\mathbf{e}_5\| + \mathbf{e} \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}^T + \text{tr}(\tilde{\Theta}^T \lambda \dot{\hat{\Theta}} + \mathbf{e} \tilde{\Theta} \underline{\boldsymbol{\zeta}}^T) \quad (22)$$

Với \mathbf{K} là ma trận hệ số bộ điều khiển và $\dot{\hat{\Theta}} = -\hat{\Theta}$. Chọn luật thích nghi:

$$\dot{\hat{\Theta}} = \mathbf{e} \underline{\boldsymbol{\zeta}}^T \lambda^{-1} - n \|\mathbf{e}\| \lambda^{-1} \hat{\Theta} \quad (23)$$

khi đó $\dot{V} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K} \mathbf{e} - \mathbf{K}_5 \|\mathbf{e}_5\| + \mathbf{e} \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}^T + n \|\mathbf{e}\| \text{tr}(\tilde{\Theta}^T (\Theta - \hat{\Theta}))$

Theo bất đẳng thức Schwarz ta có: $\text{tr}(\tilde{\Theta}^T (\Theta - \hat{\Theta})) \leq \|\tilde{\Theta}\|_F \|\Theta\|_F - \|\hat{\Theta}\|_F^2$, và $k_{\min} \|\mathbf{e}\|^2 \leq \mathbf{e}^T \mathbf{K} \mathbf{e}$, k_{\min} là giá trị nhỏ nhất của \mathbf{K} . Khi đó ta có được [3]:

$$\dot{V} \leq -k_{\min} \|\mathbf{e}\|^2 + \varepsilon_N \|\mathbf{e}\| + n \|\mathbf{e}\| \left(\|\tilde{\Theta}\|_F \|\Theta\|_F - \|\hat{\Theta}\|_F^2 \right) \leq -\|\mathbf{e}\| \left(k_{\min} \|\mathbf{e}\| - \varepsilon_N + n \left(\|\tilde{\Theta}\|_F - \frac{1}{2} \Theta_M \right)^2 - \frac{n}{4} \Theta_M^2 \right)$$

Điều này nói lên rằng $\dot{V} < 0$ với điều kiện

$$\|\mathbf{e}\| > \frac{\varepsilon_N + \frac{n}{4} \Theta_M^2}{k_{\min}} \text{ hoặc } \|\tilde{\Theta}\|_F > \frac{1}{2} \Theta_M + \sqrt{\frac{\Theta_M^2}{4} + \frac{\varepsilon_N}{n}} \quad (24)$$

Như vậy, ta có thể kết luận rằng: Với bài toán điều khiển bám sát giá trị góc của khớp tay máy đàn hồi cho trong mô hình (1), luật điều khiển tổng hợp theo (9) với đánh giá xấp xỉ hàm theo (18) thỏa mãn điều kiện (24) thì sai số bám sát ổn định tiệm cận theo Lyapunov 2.

3. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1. Tham số mô phỏng

Để đánh giá tính đúng đắn của thuật toán trên, ta xây dựng thực nghiệm trên Matlab – Simulink cho tay máy hai khâu với khớp đàn hồi. Các tham số của tay máy sử dụng cho mô phỏng được chọn như sau:

$$J = \text{diag}(0.216, 0.216)(\text{kg.m}^2), B = \text{diag}(0.1, 0.1)(\text{Nm.s / rad}), g = 9,8\text{m / s}^2,$$

$$K_m = \text{diag}(0.1, 0.1)(\text{Nm / A}), K_b = \text{diag}(0.1, 0.1)(\text{Nm / A}), m_1 = m_2 = 0,2\text{kg}$$

$$R_u = \text{diag}(5.0, 5.0)(\Omega), L_u = \text{diag}(200, 200)(\text{mH}), l_1 = l_2 = 0,2\text{m}$$

$$k_{e1} = k_{e2} = 100 + 30 \cos(0,5t) (Nm / rad), l_{c1} = l_{c2} = 0,1m$$

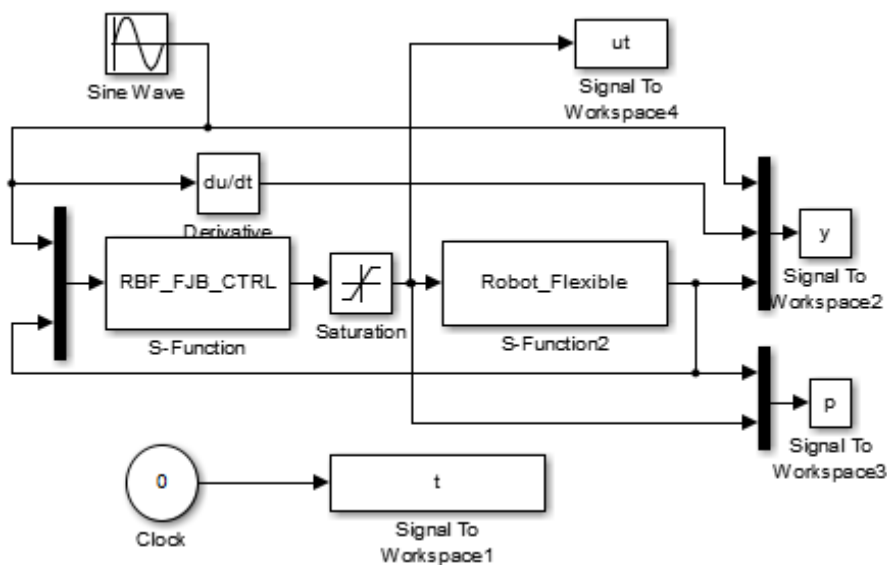
Nhiều tác động được giả thiết có dạng sóng vuông, biên độ 0.5 với chu kỳ π :

$$d_1 = [0.5, -0.5]^T \text{ với } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2} \text{ và } d_1 = [-0.5, 0.5]^T \text{ với } \frac{\pi}{2} \leq t \leq \pi ;$$

$$d_2 = [-0.5, 0.5]^T \text{ với } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2} \text{ và } d_2 = [0.5, -0.5]^T \text{ với } \frac{\pi}{2} \leq t \leq \pi$$

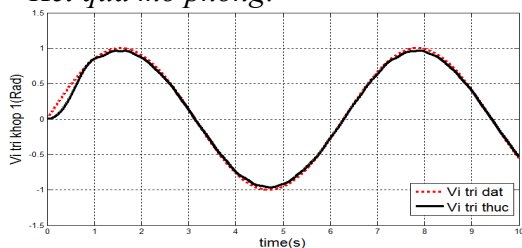
3.2. Kết quả mô phỏng

+ Sơ đồ mô phỏng được xây dựng trên Matlab – Simulink có dạng như hình 4.

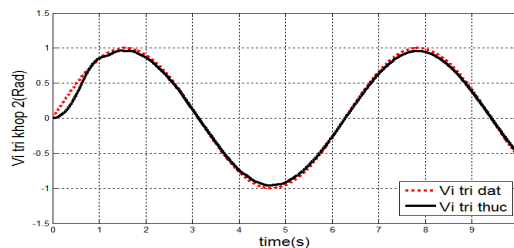


Hình 4. Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển Backstepping với hệ mờ thích nghi xấp xỉ hàm bất định.

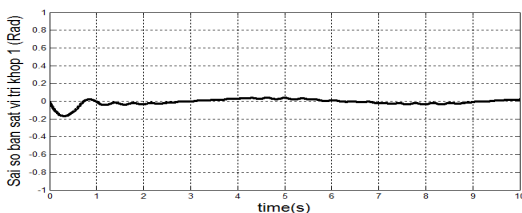
+ Kết quả mô phỏng:



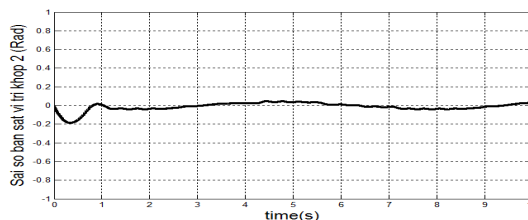
Hình 5. Giá trị vị trí góc của khớp 1.



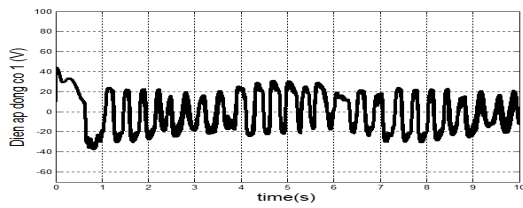
Hình 6. Giá trị vị trí góc của khớp 2.



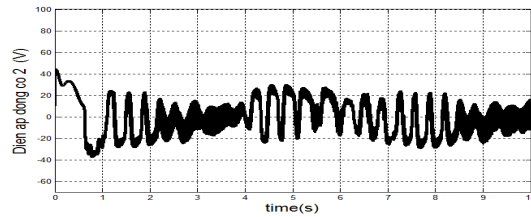
Hình 7. Sai số bám vị trí khớp 1.



Hình 8. Sai số bám vị trí khớp 2.



Hình 9. Điện áp phản ứng động cơ 1.



Hình 10. Điện áp phản ứng động cơ 2.

- Đối với khớp 1: thời gian quá độ là 1.03s; độ quá chỉnh là 1%; sai số tĩnh lớn nhất là 4.5%. Đối với khớp 2: thời gian quá độ là 1.04s, độ quá chỉnh là 1.5%; sai số tĩnh lớn nhất là 4.6%.

3.3. Đánh giá kết quả

Vị trí của khớp tay máy đã bám theo vị trí đặt với độ chính xác điều khiển chấp nhận được, thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh nhỏ ngay cả khi hệ số đàn hồi biến thiên. Kết quả mô phỏng được xây dựng trong trường hợp tổng quát là tay máy robot 2 khâu với hệ số đàn hồi biến thiên đã mang lại chất lượng điều khiển bám sát chấp nhận được, sai số bám sát nhỏ. Như vậy, có thể kết luận là mô hình bộ điều khiển Backstepping kết hợp hệ mờ để xấp xỉ bất định cho ta hệ thống luôn ổn định với chất lượng điều khiển chấp nhận được trong thực tế công nghệ. Sai số bám sát vị trí xảy ra tại thời điểm chuyển đổi trạng thái của tín hiệu đặt. Điều này là phù hợp với đặc tính đàn hồi của khớp. Việc kết hợp điều khiển bù bất định và điều khiển chuyển mạch đã nâng cao chất lượng của hệ khi không có bù bất định [2]. Hiện tượng chattering do điều khiển chuyển mạch gây ra đã được hạn chế đáng kể (hình 9,10).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã chỉ ra phương pháp tổng hợp luật điều khiển bám vị trí cho tay máy khớp đàn hồi có tính đến động học của động cơ chấp hành là động cơ điện một chiều kích từ bằng nam châm vĩnh cửu trên cơ sở phương pháp tổng hợp điều khiển mờ thích nghi Backstepping kết hợp cho trường hợp tổng quát là tay máy robot khớp đàn hồi và có tác động của nhiễu loạn và yếu tố bất định. Mô hình tay máy khớp đàn hồi có thể ứng dụng trong các nhà máy lắp ráp đạn tên lửa với các yêu cầu chuyển động khắt khe.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tien Nguyen Thanh, Hai Nguyen Van, Tien Vu Hoa, “Synthesizing tracking controller for Robot Manipulator with Flexible Joints, Dynamics of executive Motors and affect of disturbance Based on Radial Basic Function (RBF) Neural Network”, Proceedings of the 2014 IEEE (2014).
- [2]. Nguyễn Văn Hải, Vũ Hỏa Tiên, Nguyễn Thanh Tiên. “Động học của động cơ chấp hành và yếu tố đàn hồi của khớp trong thuật toán điều khiển tay máy robot”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số 33, 10 – 2014.
- [3]. Nguyễn Văn Hải, Vũ Hỏa Tiên, Nguyễn Thanh Tiên. “Tổng hợp điều khiển hệ phi tuyến trên cơ sở ứng dụng phương pháp Backstepping – trượt kết hợp sử

- dụng mạng nơ ron hàm bán kính cơ sở và bộ quan sát trạng thái*". Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, số 40, 12-2015.
- [4]. K. Hornik (1994), "Fuzzy systems as universal approximators," IEEE transactions on computers, vol 43.
- [5]. M. Hosseinpour, P. Nikdel (2011), "Modelling and control of flexible joint robot based on Takagi–Sugeno fuzzy approach and its stability analysis via sum of squares" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011.
- [6]. Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước (2004), "Lý thuyết điều khiển mờ", Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [7]. Jinkun Liu (2012), "Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems", Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

ABSTRACT

ADAPTIVE FUZZY – BACKSTEPPING COMBINATION CONTROL FOR ROBOT MANIPULATOR WITH FLEXIBLE JOINTS

This paper presents synthesis checking controller for robot manipulator with flexible joints, dynamics of executive motors and effect of disturbance based on Fuzzy system. A control algorithm is synthesized based on the combination of backstepping with Fuzzy adaptive system in order to approximate the functions and switching control in the last step to increase robustness. Finally, simulation results of a manipulator robot with two links flexible joints based on Matlab-Simulink are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed control algorithms.

Keywords: Backstepping, Sliding mode control, Fuzzy system, Robot.

*Nhận bài ngày 31 tháng 08 năm 2016
Hoàn thiện ngày 20 tháng 10 năm 2016
Chấp nhận đăng ngày 26 tháng 10 năm 2016*

Địa chỉ: ¹ CĐN Công nghệ và Nông lâm Phú Thọ;
² Học viện KTQS;
³ Trung tâm đo lường chất lượng 1 - Quân chủng Hải quân.
*Email: Haind.nguyen@gmail.com.