

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT CÓ XÉT ĐẾN MÔ HÌNH CỦA ĐỘNG CƠ TRUYỀN ĐỘNG

DESIGNING ADAPTIVE CONTROLLERS FOR ROBOT MANIPULATORS CONSIDERING MOTOR MODEL

Bùi Hữu Thành¹, Lê Tiến Dũng²

¹Nhà máy Lọc dầu Dung Quất, Công ty Lọc hóa dầu Bình Sơn; thanhbh@bsr.com.vn

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; ltdung@dut.udn.vn

Tóm tắt - Bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển thích nghi cho tay máy robot công nghiệp có xét đến mô hình của động cơ truyền động. Trước hết, mô hình động lực học tổng quát của tay máy robot công nghiệp có xét đến động cơ truyền động được xây dựng. Dựa trên mô hình này, một thuật toán điều khiển trượt truyền thống được trình bày. Tiếp đó, bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển thích nghi trên cơ sở cải tiến thuật toán điều khiển trượt truyền thống bằng cách sử dụng kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo, bộ ước lượng sai số và một thành phần bền vững. Mạng nơ-ron nhân tạo và bộ ước lượng sai số có khả năng tự chỉnh và hoạt động online để bù các thành phần bất định của hệ thống. Sự ổn định của thuật toán được chứng minh bằng lý thuyết ổn định Lyapunov. Để kiểm chứng sự hiệu quả của thuật toán đề xuất, các mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink và SimMechanics cho tay máy robot hai bậc tự do.

Từ khóa - tay máy robot công nghiệp; điều khiển thích nghi; động cơ truyền động; tự chỉnh online; mạng nơ-ron nhân tạo; điều khiển trượt.

Abstract - This paper proposes an adaptive control algorithm for robot manipulators considering motor model. First, a general dynamic model of robot manipulators including motor model is developed. Based on this dynamic model, a traditional sliding mode control algorithm is presented. Then, an adaptive control algorithm is proposed based on the improvement of traditional sliding mode controller using the combination of a neural network, an error estimator and a robust term. The neural network and the error estimator can self adjust and work online to compensate for the uncertainties of the control system. The stability of the proposed control algorithm is proved by Lyapunov theory. To demonstrate the effectiveness of the proposed control algorithm, simulations are conducted on Matlab/Simulink and SimMechanics for a 2 DOF robot manipulator.

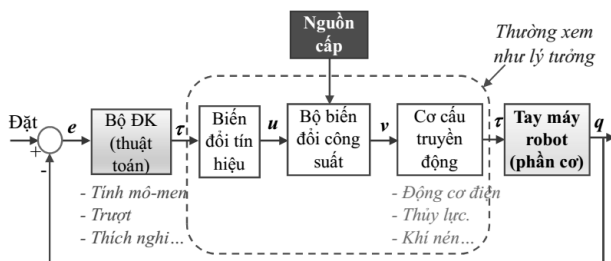
Key words - robot manipulators; adaptive control; actuator motor; online tuning; neural network; sliding mode control.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, việc ứng dụng các kỹ thuật điều khiển thông minh để điều khiển tay máy robot công nghiệp nhận được rất nhiều sự quan tâm. Quá trình thiết kế các bộ điều khiển robot thường chỉ tập trung vào phần động học. Trong khi mô hình động lực học của robot thông thường được xây dựng với tín hiệu đầu vào là mô-men truyền động cho các khớp. Các tín hiệu mô-men này là tín hiệu ra của bộ điều khiển. Và các nghiên cứu về điều khiển robot xem cơ cấu truyền động là lý tưởng, nghĩa là bộ điều khiển yêu cầu mô-men bao nhiêu thì cơ cấu chấp hành thực hiện chính xác mô-men yêu cầu đó.

robot. Vì vậy, để thiết kế được chính xác tín hiệu điều khiển nhằm điều khiển chính xác tay máy robot bám theo các quỹ đạo mong muốn, cần thiết phải tính đến mô hình của cơ cấu truyền động.

Để giải quyết vấn đề nêu trên, đã có một số công trình đi trước nghiên cứu đề xuất các giải pháp điều khiển. Trong bài báo [1], các tác giả Claudio Urrea và John Kern đã nghiên cứu mô hình hóa, mô phỏng động cơ điện một chiều có xét đến tải là cánh tay robot. Các tác giả đã dùng mô hình toán của động cơ để xuất một số phương pháp điều khiển tốc độ, điều khiển vị trí của động cơ servo HS 755 HB. Tác giả Goor trong bài báo [2] đã chứng tỏ sự quan trọng của động lực học cơ cấu truyền động trong điều khiển robot và đã chỉ ra được động lực học của động cơ chi phối như thế nào đến các hành động của robot. Trong bài báo [3], tác giả Rong-Jong Wai đã nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo tay máy robot 2 bậc tự do có xét đến động cơ truyền động. Bài báo đã đề xuất dùng các bộ điều khiển phản hồi tuyến tính hóa bền vững (robust feedback linearization control - RFLC) và bộ điều khiển mờ-neuron bền vững (robust neural-fuzzy-network control - RNFNC) để điều khiển quỹ đạo tay máy robot bám theo quỹ đạo mong muốn. Một số công trình nghiên cứu khác đã được công bố trong các tài liệu [4 - 6] theo hướng ứng dụng các thuật toán thông minh để đề xuất thuật toán điều khiển cho tay máy robot có xét đến động cơ truyền động. Tuy nhiên, các giải pháp đề xuất đều còn tồn tại nhược điểm là có cấu trúc thuật toán phức tạp, khối lượng tính toán lớn và thực tế là các mạng nơ-ron nhân tạo hoặc hệ logic mờ không thể ước lượng được hoàn toàn chính xác các thành phần bất định.



Hình 1. Cấu trúc của một hệ thống điều khiển tay máy robot công nghiệp có xét đến cơ cấu truyền động

Trong thực tế, cấu trúc đầy đủ của một hệ thống điều khiển tay máy robot công nghiệp được thể hiện như Hình 1. Phần truyền động cho các khớp của tay máy robot bao gồm Bộ biến đổi tín hiệu, Bộ biến đổi công suất và Cơ cấu truyền động thường bị bỏ qua và xem là lý tưởng trong cách tiếp cận truyền thống. Thực tế phần truyền động này không lý tưởng, và việc điều khiển mô-men của cơ cấu truyền động phụ thuộc vào tải trọng là các khớp và thanh của

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một thuật toán điều khiển mới cho tay máy robot công nghiệp có xét đến mô hình của động cơ truyền động. Trong đó, một mạng nơ-ron truyền thẳng với cấu trúc 3 lớp được sử dụng để ước lượng các thành phần bất định của robot. Khác với các công trình đi trước, thuật toán đề xuất bổ sung thêm một thành phần ước lượng sai số để bù sai số của mạng nơ-ron khi ước lượng các thành phần bất định. Ngoài ra, một thành phần bền vững được thêm vào để nâng cao sự ổn định của hệ thống.

Các phần tiếp theo của bài báo được tổ chức như sau. Trong mục 2, mô hình toán học của tay máy robot có xét đến động cơ truyền động được trình bày. Thuật toán điều khiển trượt truyền thống cho tay máy robot có xét đến động cơ truyền động được trình bày trong mục 3. Mục 4 trình bày thuật toán điều khiển thích nghi cho tay máy robot có xét đến mô hình động cơ truyền động, trên cơ sở cải tiến thuật toán điều khiển trượt. Mục 5 trình bày mô phỏng kiểm chứng cho trường hợp tay máy robot 2 bậc tự do. Cuối cùng, các kết luận được đưa ra trong mục 6.

2. Mô hình toán học của tay máy robot có xét đến động cơ truyền động

Một cách tổng quát, tay máy robot n bậc tự do truyền động bằng n động cơ điện một chiều điều khiển điện áp phản ứng được mô tả bằng các phương trình sau:

$$\tau_e = K_T i_a \quad (1)$$

$$\tau_e = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + \tau_m \quad (2)$$

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \dot{\theta}_m \quad (3)$$

Trong đó, τ_e là vector mô men điện từ của động cơ ($n \times 1$); τ_m là vector mô men tải ($n \times 1$); θ_m là vector góc quay của động cơ ($n \times 1$); v_a là vector điện áp ngõ vào phản ứng của động cơ ($n \times 1$); K_T là ma trận chéo hằng số mô men động cơ ($n \times n$); K_E là ma trận chéo hằng số sức điện động ngược động cơ ($n \times n$); i_a là vector dòng điện phản ứng động cơ ($n \times 1$); J_m là ma trận chéo mô-men quán tính động cơ ($n \times n$); B_m là ma trận chéo hệ số ma sát xoắn ($n \times n$); R_a là ma trận chéo điện trở thuần cuộn dây phản ứng ($n \times n$); L_a là ma trận chéo hệ số tự cảm cuộn dây phản ứng ($n \times n$).

Giả sử mỗi động cơ truyền động cho khớp của tay máy robot thông qua bộ giảm tốc có tỷ số truyền:

$$g_{ri} = \frac{\theta_{mi}}{q_i} = \frac{\tau_i}{\tau_{mi}}, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

trong đó, g_{ri} là ma trận chéo tỷ số truyền của khớp nối thứ i ; τ_i là vector mô men điều khiển đặt lên khớp nối thứ i ; q_i là góc quay của khớp nối thứ i . Định nghĩa $G_r = \text{diag}(g_{r1}, g_{r2}, \dots, g_{rn})$ là ma trận tỉ số truyền của các bộ giảm tốc tại các khớp.

Từ các phương trình (1), (2), (3) và (4) có thể tính được vector điện áp phản ứng như sau:

$$v_a = L_n \ddot{\tau} + R_n \tau + L_n J_n \ddot{q} + (R_n J_n + L_n B_n) \dot{q} + (R_n B_n + K_{en}) \dot{q} \quad (5)$$

trong đó $L_n = L_a (G_r K_T)^{-1}$, $R_n = R_a (G_r K_T)^{-1} J_n = G_r^2 J_m$, $B_n = G_r^2 B_m$ và $K_{en} = K_e G_r$.

Phương trình động lực học Lagrange của tay máy robot n bậc tự do:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + N = \tau \quad (6)$$

Trong đó, $M(q)$ là ma trận quán tính của tay máy robot ($n \times n$); $C(q, \dot{q})$ là ma trận lực li tâm và lực Coriolis của tay máy robot ($n \times n$); $G(q)$ là vector trọng lực của tay máy robot ($n \times 1$); N là vector các thành phần nhiễu, ma sát và các thành phần động học chưa xác định ($n \times 1$). Ma trận $M(q)$ được viết tách thành hai thành phần: $M(q) = M_n + M_\theta(q)$, trong đó một thành phần chỉ liên quan đến các tham số, một thành phần có chứa biến khớp.

Mô hình (6) xem phần truyền động cho các khớp là lý tưởng, nghĩa là mong muốn mô-men truyền động cho các khớp bao nhiêu thì phần truyền động sẽ tạo ra mô-men chính xác theo yêu cầu. Trong thực tế điều này rất khó xảy ra. Vì vậy cần xét đến phần truyền động cho các khớp của robot.

Thay (6) vào (5), ta rút ra được phương trình động lực học mô tả tay máy robot n bậc tự do có xét đến động lực học của cơ cấu truyền động như sau:

$$M^*(q) \ddot{q} + D(q, \dot{q}, \ddot{q}) \dot{q} + d = v_a \quad (7)$$

Trong đó:

+ $v_a (n \times 1)$ là vector tín hiệu điện áp đặt vào phần ứng để điều khiển các động cơ;

+ Các ma trận được tính như sau:

$$M^* = L_n (M_n + J_n) \quad (8)$$

$$D(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \{L_n [M_\theta(q, \dot{q}) + C(q, \dot{q}) + B_n] + R_n [M(q) + J_n]\} \ddot{q} + L_n \dot{C}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \dot{q} + R_n C(q, \dot{q}) \dot{q} + R_n B_n \dot{q} + K_{en} \dot{q} + L_n \dot{G}(q, \dot{q}) + R_n G(q) \quad (9)$$

$$d = L_n M_\theta(q) \ddot{q} + L_n \dot{N} + R_n N \quad (10)$$

d là tổng của nhiễu hệ thống và các thành phần động lực học không xác định được. Ta chấp nhận giả thiết d bị chặn như sau:

$$\|d\| < d_b \quad (11)$$

(trong đó d_b là một số thực dương đã biết và $\|\cdot\|$ là chuẩn Euclid của vector).

Mô hình động lực học (7) là cơ sở để xây dựng bộ điều khiển cho tay máy robot công nghiệp khi có xét đến động lực học của động cơ truyền động.

So với mô hình (6) khi chưa xét đến động cơ truyền động, ta thấy mô hình (7) có đạo hàm đến bậc 3. Do đó khi thiết kế thuật toán điều khiển sẽ khó khăn và cần nhiều kỹ thuật nâng cao hơn so với trường hợp không xét đến động lực học của động cơ truyền động.

3. Thuật toán điều khiển trượt cho tay máy robot công nghiệp có xét đến động cơ truyền động

Gọi:

+ $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t)$: là vector quỹ đạo góc, vận tốc góc và gia tốc góc mong muốn của tay máy robot.

+ $q(t)$: là vector quỹ đạo góc thực của robot.

+ $q_e(t)$: là sai lệch giữa quỹ đạo mong muốn và quỹ đạo thực của robot.

$$q_e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (12)$$

Định nghĩa hàm trượt như sau:

$$\mathbf{s}(t) = \dot{\mathbf{q}}_e(t) + \mathbf{K}_a \mathbf{q}_e(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{q}_e(t) \quad (13)$$

Trong đó, $\mathbf{K}_a$ và $\mathbf{K}_b$ là các ma trận chéo, xác định dương. Theo bài báo [2], chọn thuật toán điều khiển trượt kinh điển U_r cho tay máy robot n bậc tự do (7) có xét đến động lực học của động cơ truyền động như sau:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{M}^*(\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_c \mathbf{q}_e + \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{k}_r \text{sgn}(\mathbf{s}) \quad (14)$$

$$\mathbf{K}_c = \mathbf{M}^{*-1} \text{sgn}(\mathbf{s}) \text{sgn}(\mathbf{q}_e^T) \quad (15)$$

$$k_r = d_b \quad (16)$$

trong đó $\text{sgn}(\cdot)$ là hàm dấu.

Sự ổn định của hệ thống điều khiển tay máy robot công nghiệp (7) khi sử dụng thuật toán điều khiển (14) được chứng minh như sau:

Chọn một hàm Lyapunov xác định dương:

$$V_r = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M}^* \mathbf{s} \quad (17)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov (17) được tính như sau:

$$\dot{V}_r = \mathbf{s}^T \mathbf{M}^* \dot{\mathbf{s}} \quad (18)$$

Từ (7), (13) và (14) ta có:

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{K}_c \mathbf{q}_e - \mathbf{M}^{*-1}[\mathbf{k}_r \text{sgn}(\mathbf{s}) - \mathbf{d}] \quad (19)$$

Từ đó thay vào (18) suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{V}_r &= \mathbf{s}^T \mathbf{M}^* \{-\mathbf{K}_c \mathbf{q}_e - \mathbf{M}^{*-1}[\mathbf{k}_r \text{sgn}(\mathbf{s}) - \mathbf{d}]\} \\ &= -\mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \text{sgn}(\mathbf{q}_e^T) \mathbf{q}_e - \mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \mathbf{k}_r + \mathbf{s}^T \mathbf{d} \\ &\leq -\mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \text{sgn}(\mathbf{q}_e^T) \mathbf{q}_e - \mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) d_b + \\ &\quad + \mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \|\mathbf{d}\| \\ &\leq -\mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \text{sgn}(\mathbf{q}_e^T) \mathbf{q}_e - \mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) (d_b - \|\mathbf{d}\|) \end{aligned} \quad (20)$$

Trong biểu thức (20) ta thấy: $\mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \geq 0$ và $(d_b - \|\mathbf{d}\|) \geq 0$. Vì vậy:

$$\dot{V}_r \leq -\mathbf{s}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) \text{sgn}(\mathbf{q}_e^T) \mathbf{q}_e \leq 0 \quad (21)$$

Do đó hệ thống ổn định theo lý thuyết Lyapunov.

Trong thực tế, thành phần hàm dấu trong thuật toán điều khiển có nhiều nhược điểm như khó chế tạo với tần số chuyển mạch cao, gây ra hiện tượng rung (chattering)... Để hạn chế các khuyết điểm trên, trong phần tiếp theo bài báo sẽ đề xuất một thuật toán điều khiển thích nghi ứng dụng mạng nơ-ron và bộ ước lượng sai số.

4. Điều khiển thích nghi cho tay máy robot công nghiệp có xét đến động cơ truyền động

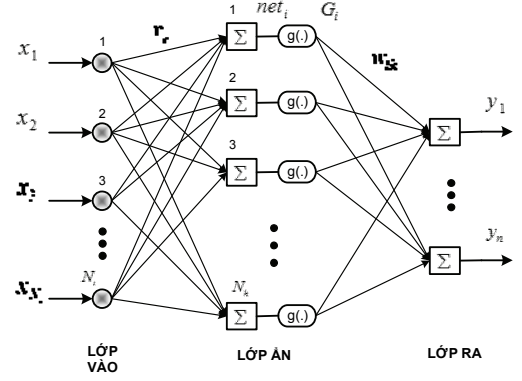
Dựa trên thuật toán điều khiển (14), (15) và (16) ở mục 3, bài báo đề xuất thay thế hàm $\text{sign}(\mathbf{s})$ bằng hàm bão hòa (sat), đồng thời thay thành phần $\mathbf{k}_r \text{sgn}(\mathbf{s})$ bằng một mạng nơ-ron kết hợp với bộ ước lượng sai số nhằm bù các thành phần bất định. Các phương trình của bộ điều khiển thích nghi mà bài báo đề xuất được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{M}^*(\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_c \mathbf{q}_e + \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{U}_{NN} + \mathbf{f}_{est} - \mathbf{T} \tilde{\mathbf{s}} \quad (22)$$

$$\mathbf{K}_c = \mathbf{M}^{*-1} \text{sat}\left(\frac{\mathbf{s}}{\boldsymbol{\theta}}\right) \text{sat}\left(\frac{\mathbf{q}_e^T}{\boldsymbol{\theta}}\right) \quad (23)$$

$$\text{sat}\left(\frac{\mathbf{s}}{\boldsymbol{\theta}}\right) = \begin{cases} \text{sgn}(\mathbf{s}) & \text{nếu } |\mathbf{s}| > \boldsymbol{\theta} \\ \frac{\mathbf{s}}{\boldsymbol{\theta}} & \text{nếu } |\mathbf{s}| \leq \boldsymbol{\theta} \end{cases} \quad (24)$$

Trong đó $\mathbf{U}_{NN}$ là một mạng nơ-ron nhân tạo có 3 lớp có cấu trúc như Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc mạng nơ-ron truyền thẳng 3 lớp

Lớp ngõ vào có vector tín hiệu vào xác định như sau:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_i}]^T \quad (25)$$

Trong đó, N_i là số lượng ngõ vào.

Lớp ẩn có N_h nơ-ron, ma trận trọng số liên kết giữa ngõ vào và lớp ẩn được xác định như sau:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{N_h}]^T \in R^{N_i \times N_h}; \quad (26)$$

$$\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN_i}] \in R^{N_i}, i = \overline{1, N_h} \quad (27)$$

Quan hệ vào - ra của lớp ẩn được xác định như sau:

$$\text{net}_i = \sum_{j=1}^{N_i} v_{ij} x_j \quad (28)$$

$$G_i = g(\text{net}_i), \ i = \overline{1, N_h} \quad (29)$$

Trong đó: $g(\cdot)$ là hàm truyền (chuyển đổi) của lớp ẩn, được chọn là hàm sigmoid như sau:

$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (30)$$

Lớp ngõ ra có ma trận trọng số liên kết với lớp ẩn xác định như sau:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_{N_h}]^T \in R^{N_h \times n} \quad (31)$$

$$\mathbf{w}_i = [w_{i1}, w_{i2}] \in R^n, \ i = \overline{1, N_h} \quad (32)$$

Các ngõ ra của mạng nơ-ron được xác định như sau:

$$y_k = \sum_{i=1}^{N_h} w_{ik} G_i, \ k = 1, \dots, n \quad (33)$$

Một cách tổng quát, các ngõ ra của mạng nơ-ron trên có thể được viết lại dưới dạng vector như sau:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \in R^n \quad (34)$$

Trong phương trình (22), $\tilde{\mathbf{s}} = [\tilde{s}_1, \tilde{s}_2]^T$ là mặt trượt bậc nhất được định nghĩa như sau:

$$\tilde{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{q}}_e + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{q}_e \quad (35)$$

Mục đích của mạng nơ-ron $\mathbf{U}_{NN}$ là để xấp xỉ và bù online cho thành phần bất định $\Delta \mathbf{v}_r$ của tay máy robot. Tuy nhiên trong thực tế ngõ ra của mạng nơ-ron không thể xấp xỉ chính xác giá trị $\Delta \mathbf{v}_r$, dẫn đến sai số xác lập của hệ thống không thể hội tụ về 0, do đó ta cần phải dùng thêm bộ ước lượng $\mathbf{f}_{est} = -\boldsymbol{\xi} \int \tilde{\mathbf{s}} dt$ nhằm làm suy giảm các sai lệch. Ngoài ra, thành phần $\mathbf{T} \tilde{\mathbf{s}}$ được sử dụng nhằm làm tăng thêm tính bền vững cho hệ thống; $\mathbf{T} = \text{diag}(T_1, T_2)$, $\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$, $\boldsymbol{\xi} = \text{diag}(\xi_1, \xi_2)$ là các ma trận chéo có phần tử là các hằng số dương.

Ta chọn ngõ vào của mạng nơ-ron là một vector bao

gồm các tín hiệu sai lệch và đạo hàm của sai lệch:

$$\mathbf{x} = [q_{e1}, \dot{q}_{e1}, \dots, q_{en}, \dot{q}_{en}]^T \in R^{2n} \quad (36)$$

Sai số giữa giá trị chính xác (tối ưu) và giá trị ước lượng của thành phần bất định như sau:

$$\Delta \mathbf{v}_r - \mathbf{U}_{NN} = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{V}^*) - \widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{G}(\mathbf{x}, \widehat{\mathbf{V}}) + \boldsymbol{\varepsilon}_N \quad (37)$$

Trong đó:

+ $\mathbf{W}^* \in R^{N_h \times n}$ và $\mathbf{V}^* \in R^{2n \times N_h}$ là các giá trị tối ưu của các ma trận trọng số $\mathbf{W}$ và $\mathbf{V}$ trong mạng nơ-ron;

+ $\widehat{\mathbf{W}} \in R^{N_h \times n}$ và $\widehat{\mathbf{V}} \in R^{2n \times N_h}$ là giá trị ước lượng của các ma trận trọng số tối ưu ($\mathbf{W}^*$ và $\mathbf{V}^*$);

+ $\boldsymbol{\varepsilon} \in R^n$ là sai số ước lượng.

Để đơn giản, phương trình (37) được viết lại như sau:

$$\Delta \mathbf{v}_r - \mathbf{U}_{NN} = \mathbf{W}^{*T} \tilde{\mathbf{G}} + \widehat{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{G}} + \boldsymbol{\varepsilon}_N \quad (38)$$

Trong đó: $\mathbf{G}^* \equiv \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{V}^*)$, $\widehat{\mathbf{G}} \equiv \mathbf{G}(\mathbf{x}, \widehat{\mathbf{V}})$, $\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{G}^* - \widehat{\mathbf{G}}$, $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W}^* - \widehat{\mathbf{W}}$.

Khai triển Taylor mở rộng cho $\tilde{\mathbf{G}}$ với mỗi giá trị $\mathbf{x}$ cho trước như sau:

$$\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{G}_V \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x} + O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) \quad (39)$$

$$\mathbf{G}_V = \left[\frac{\partial \mathbf{G}_1}{\partial \mathbf{V}^T \mathbf{x}} \quad \frac{\partial \mathbf{G}_2}{\partial \mathbf{V}^T \mathbf{x}} \quad \dots \quad \frac{\partial \mathbf{G}_{N_h}}{\partial \mathbf{V}^T \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{V}=\widehat{\mathbf{V}}}^T \in R^{N_h \times N_h} \quad (40)$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = \mathbf{V}^* - \widehat{\mathbf{V}} \quad (41)$$

$O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) \in R^{N_h}$ là vector tổng các thành phần bậc cao, được giả định là bị chặn.

Thay (39) vào phương trình sai lệch xấp xỉ (38), ta được:

$$\Delta \mathbf{v}_r - \mathbf{U}_{NN} = \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{G}_V \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x} + \widehat{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{G}} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (42)$$

trong đó:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{G}_V \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x} + \mathbf{W}^{*T} O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}_N \quad (43)$$

Giải thuật học online của mạng nơ-ron và cấu trúc của bộ ước lượng sai số được chọn như sau:

$$\dot{\widehat{\mathbf{W}}} = -\eta \tilde{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{s}}^T \quad (44)$$

$$\dot{\widehat{\mathbf{V}}} = -\mu \mathbf{x} (\mathbf{G}_V \widehat{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{s}})^T \quad (45)$$

$$\dot{\mathbf{f}}_{est} = -\xi \tilde{\mathbf{s}} \quad (46)$$

$$\mathbf{f}_{est} = -\xi \int \tilde{\mathbf{s}} dt \quad (47)$$

Để phân tích ổn định cho giải thuật điều khiển và giải thuật bù online nói trên, ta chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

Với

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{s}}^T \mathbf{M}^* \tilde{\mathbf{s}} \quad (48)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} tr(\tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\eta}^{-1} \tilde{\mathbf{W}}) \quad (49)$$

$$V_3 = \frac{1}{2} tr(\tilde{\mathbf{V}}^T \boldsymbol{\mu}^{-1} \tilde{\mathbf{V}}) \quad (50)$$

$$V_4 = \frac{1}{2} tr(\tilde{\boldsymbol{\delta}}^T \boldsymbol{\xi}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\delta}}) \quad (51)$$

Đạo hàm của từng thành phần của hàm V được tính như sau:

$$\dot{V}_1 = \tilde{\mathbf{s}}^T (\mathbf{D} \mathbf{s} + \mathbf{v}_r - \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} - \Delta \mathbf{v}_r - \mathbf{M}^* (\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{s})) \quad (52)$$

Thay thuật toán điều khiển (23) vào ta có:

$$\dot{V}_1 = \tilde{\mathbf{s}}^T (-\widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{G}_V \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x} - \widehat{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{G}} - \boldsymbol{\delta} + \mathbf{f}_{est} - \mathbf{T} \tilde{\mathbf{s}}) \quad (53)$$

Đạo hàm của các thành phần V_2 , V_3 và V_4 lần lượt là:

$$\dot{V}_2 = -tr(\tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\eta}^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}), \quad \dot{V}_3 = -tr(\tilde{\mathbf{V}}^T \boldsymbol{\mu}^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{V}}}) \quad \text{và} \quad \dot{V}_4 = -tr(\tilde{\boldsymbol{\delta}}^T \boldsymbol{\xi}^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\delta}}}).$$

Từ đó ta có đạo hàm của hàm Lyapunov:

$$\dot{V} = \tilde{\mathbf{s}}^T (-\widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{G}_V \tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x} - \widehat{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{G}} - \boldsymbol{\delta} + \mathbf{f}_{est} - \mathbf{T} \tilde{\mathbf{s}}) - tr(\tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\eta}^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) - tr(\tilde{\mathbf{V}}^T \boldsymbol{\mu}^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{V}}}) - tr(\tilde{\boldsymbol{\delta}}^T \boldsymbol{\xi}^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\delta}}}) \quad (54)$$

Thay các luật học online vào phương trình trên ta có:

$$\dot{V} = -\tilde{\mathbf{s}}^T \mathbf{T} \tilde{\mathbf{s}} \leq 0 \quad (55)$$

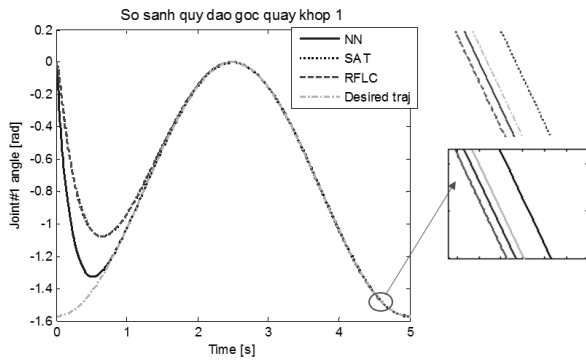
Vì vậy hệ thống ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

5. Mô phỏng kiểm chứng

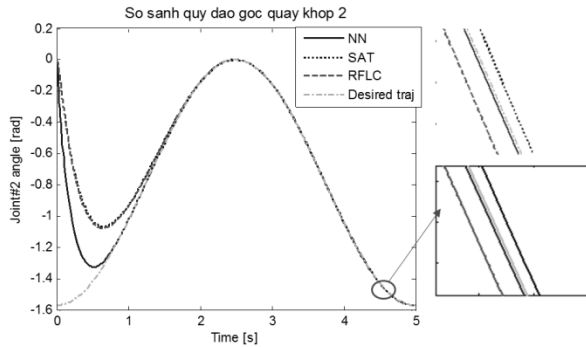
Để kiểm chứng sự hiệu quả của thuật toán đề xuất, đề tài thực hiện mô phỏng kiểm chứng cho trường hợp một tay máy robot 2 bậc tự do. Mô hình cơ khí của tay máy robot được xây dựng trong SimMechanics theo cách dựng mô tả trong tài liệu [7]. Các thông số của robot được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của tay máy robot 2 bậc tự do

Tên thông số	Ký hiệu	Khớp 1	Khớp 2	Đơn vị
Khối lượng thanh tay máy robot	m	3,55	0,75	[kg]
Chiều dài thanh tay máy robot	l	0,205	0,210	[m]
Khoảng cách từ khớp đến trọng tâm thanh của robot	l_c	0,1548	0,105	[m]
Moment quán tính của động cơ	J_m	3,7 x 10 ⁻⁵	1,47 x 10 ⁻⁴	[kgm ²]
Hệ số ma sát xoắn của động cơ	B_m	1,3 x 10 ⁻⁵	2,0 x 10 ⁻⁵	[Nms/rad]
Điện cảm phản ứng động cơ	L_a	0,003	0,0024	[H]
Điện trở cuộn dây động cơ	R_a	2,8	4,8	[Ω]
Hằng số mô-men động cơ	K_a	0,21	0,23	[Nm/A]
Hằng số sức điện động ngược của động cơ	K_e	2,42 x 10 ⁻⁴	2,18 x 10 ⁻⁴	[Vs/rad]
Tỷ số truyền bộ giảm tốc	g_r	60	30	[]
Công suất định mức động cơ	P_{dm}	220	200	[W]
Điện áp định mức động cơ	U_{dm}	100	100	[V]
Dòng điện định mức động cơ	I_{dm}	6,0	5,5	[A]



Hình 3. Kết quả điều khiển bám quỹ đạo của khớp 1



Hình 4. Kết quả điều khiển bám quỹ đạo của khớp 2

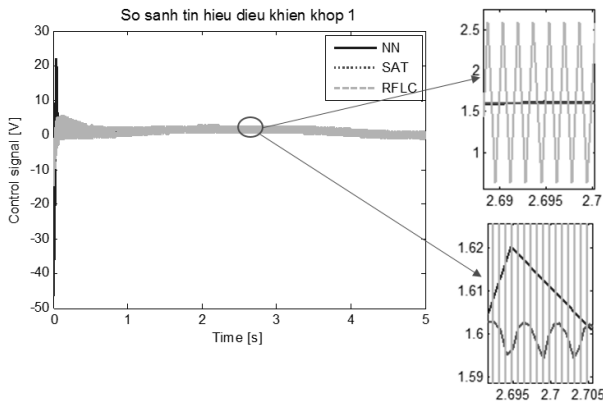
Quỹ đạo mong muốn (desired trajectory) được thiết lập như sau:

$$q_{1d} = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}(1 - \cos(1,26t)) \quad (56)$$

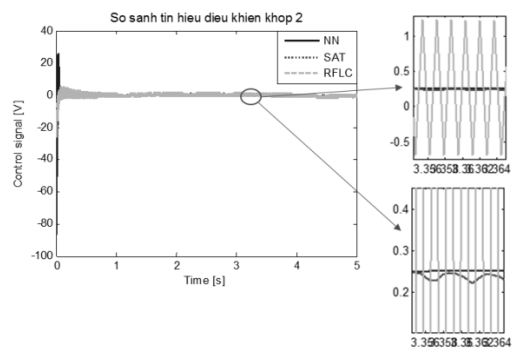
$$q_{2d} = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}(1 - \cos(1,26t)) \quad (57)$$

Mô phỏng so sánh kết quả đáp ứng cho 3 trường hợp: Trường hợp dùng thuật toán điều khiển trượt với hàm bão hòa (SAT), trường hợp dùng thuật toán RFLC trong tài liệu [3] và trường hợp dùng thuật toán của bài báo đề xuất (NN).

Trên Hình 3 và Hình 4 biểu diễn kết quả điều khiển bám quỹ đạo của khớp 1 và khớp 2 của tay máy robot cho 3 trường hợp. Chúng ta có thể thấy trường hợp sử dụng thuật toán điều khiển thích nghi dùng mạng nơ-ron của bài báo đề xuất (NN) cho kết quả tốt nhất: quỹ đạo thực tiến nhanh về quỹ đạo mong muốn và bám sát quỹ đạo mong muốn nhất.

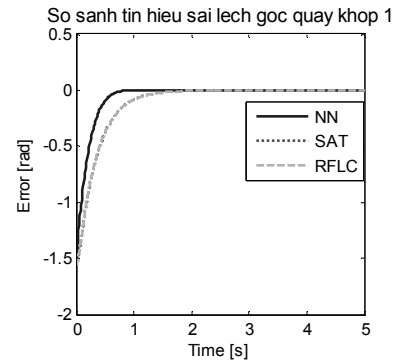


Hình 5. So sánh tín hiệu điều khiển của khớp 1

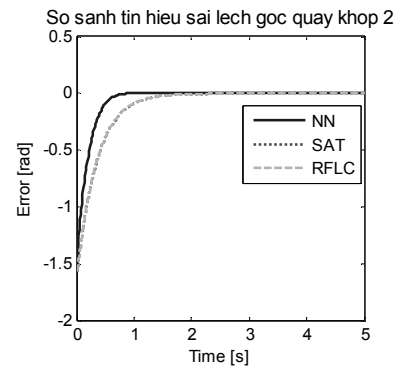


Hình 6. So sánh tín hiệu điều khiển của khớp 2

Đồ thị của tín hiệu điện áp điều khiển cấp cho 2 động cơ truyền động cho 2 khớp quay của robot được thể hiện như trên Hình 5 và Hình 6. Kết quả cho thấy trường hợp sử dụng thuật toán điều khiển của bài báo đề xuất (NN) cho kết quả ít bị rung động (chattering) nhất. Như vậy trong thực tế bộ biến đổi có thể thực hiện được dễ dàng các giá trị điện áp này để cấp cho động cơ truyền động. Chúng ta cũng có thể thấy với trường hợp sử dụng bộ điều khiển RFLC, tín hiệu điện áp có nhiều rung động nhất.



Hình 7. So sánh sai số điều khiển của khớp 1



Hình 8. So sánh sai số điều khiển của khớp 2

Hình 7 và Hình 8 biểu diễn sai số điều khiển của khớp 1 và khớp 2. Kết quả cho thấy trường hợp sử dụng thuật toán điều khiển của bài báo đề xuất (NN) cho kết quả sai số nhỏ nhất.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày quá trình thiết kế và đề xuất một thuật toán điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo và bộ ước lượng sai số để điều khiển tay máy robot công nghiệp có xét đến mô hình của động cơ truyền động.

Dựa trên thuật toán điều khiển trượt truyền thống, một mạng nơ-ron truyền thẳng với cấu trúc 3 lớp được sử dụng để ước lượng các thành phần bất định của robot và thay cho thành phần chuyển mạch của tín hiệu điều khiển. Khác với các công trình đi trước, thuật toán đề xuất bổ sung thêm một thành phần ước lượng sai số để bù sai số của mạng nơ-ron khi ước lượng các thành phần bất định. Ngoài ra, một thành phần bền vững được thêm vào để nâng cao sự ổn định của hệ thống. Sự ổn định của thuật toán được chứng minh bằng lý thuyết ổn định Lyapunov. Các mô phỏng kiểm chứng cho thấy thuật toán điều khiển của bài báo đề xuất có chất lượng bám quỹ đạo tốt hơn các thuật toán đi trước và có độ rung động (chattering) được cải thiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Claudio Urrea and John Kern, "A New Model for Analog Servo Motors. Simulation and Experimental Results", *Canadian Journal on Automation, Control and Intelligent Systems*, Vol. 2, No. 2, March 2011.
- [2] R. M. Goor, "A new approach to minimum time robot control", General Motors Res. Labs., Warren, MI, Res. Pub. GMR-4869, 1985.
- [3] Rong-Jong Wai, Senior Member, IEEE, and Po-Chen Chen, "Robust Neural-Fuzzy-Network Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, August 2006.
- [4] Rong-Jong Wai, Senior Member, IEEE, and Rajkumar Muthusamy, "Fuzzy-Neural-Network Inherited Sliding-Mode Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics", *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol. 24, No. 2, February 2013.
- [5] Wai, Rong-Jong, and Zhi-Wei Yang. "Adaptive fuzzy neural network control design via a T-S fuzzy model for a robot manipulator including actuator dynamics." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 38.5 (2008): 1326-1346.
- [6] Wai, Rong-Jong, and Rajkumar Muthusamy. "Fuzzy-neural-network inherited sliding-mode control for robot manipulator including actuator dynamics." *IEEE Transactions on Neural Networks and learning systems* 24.2 (2013): 274-287.
- [7] Le Tien Dung, Kang, Hee-Jun, and Young-Shick Ro. "Robot manipulator modeling in Matlab-SimMechanics with PD control and online gravity compensation." *Strategic Technology (IFOST), 2010 International Forum on*. IEEE, 2010.

(BBT nhận bài: 14/11/2016, hoàn tất thủ tục phản biện: 04/01/2017)