

ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CON LẮC NGƯỢC SỬ DỤNG MẠNG NƠON

NGUYỄN ĐỨC MINH, NGUYỄN ĐỨC THÀNH, DƯƠNG HOÀI NGHĨA

Đại học Bách khoa Tp. Hồ Chí Minh

Abstract. The paper introduces an application in adaptive sliding mode control [6] on Inverted Pendulum. The simulation results show that neural networks can learn sliding mode control rules without the model parameters, the experiment results demonstrate the robustness of the sliding mode control using neural networks under the uncertainties and effects of the disturbance.

Tóm tắt. Bài báo giới thiệu một ứng dụng dùng phương pháp điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơon [6] lên đối tượng con lắc ngược xoay. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy khả năng học được luật điều khiển trượt của mạng nơon trong điều kiện không biết trước các thông số mô hình của đối tượng và các kết quả thực nghiệm đã chứng minh được tính bền vững của bộ điều khiển trượt dùng mạng nơon trong điều kiện bất định và chịu ảnh hưởng của nhiễu.

Keywords. Sliding Mode Control (SMC), Decoupled Adaptive Neural Sliding Mode Control (DANSMC), Chattering Phenomenon.

1. GIỚI THIỆU

Điều khiển trượt (SMC) là một phương pháp điều khiển phi tuyến kinh điển, đơn giản và rất hiệu quả. Tuy nhiên do tín hiệu điều khiển trượt cổ điển có dạng hàm chuyển mạch nên tồn tại hiện tượng dao động với tần số cao (chattering) của các quỹ đạo pha xung quanh mặt trượt. Hơn nữa, điều khiển SMC yêu cầu phải biết rõ thông số mô hình, các chặn trên của nhiễu cũng như các thành phần bất định của hệ thống. Để giải quyết vấn đề, này trong những năm gần đây, một số nghiên cứu áp dụng mạng nơon hoặc nơon mờ [1]-[4] để ước lượng trực tuyến thành phần điều khiển tương đương trong điều khiển trượt, và nhờ vào tính liên tục của ngõ ra mạng nơon nên hiện tượng chattering đã được làm suy giảm. Tuy nhiên về bản chất thì các luật điều khiển của các bộ điều khiển nêu trên vẫn dựa trên luật điều khiển trượt cổ điển nên việc làm suy giảm hiện tượng chattering sẽ làm giảm tính bền vững của hệ thống và ngược lại. Trong bài báo [6] các tác giả đã giới thiệu bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơon bao gồm cả hai thành phần điều khiển tương đương và điều khiển hiệu chỉnh với khả năng học trực tuyến các luật điều khiển trượt. Tuy nhiên các kết quả chỉ dừng lại ở việc mô phỏng và chưa áp dụng được cho hệ đa biến. Tiếp tục phát triển các nghiên cứu trong bài báo [6], bài báo này giới thiệu một luật điều khiển trượt bền vững không có thành phần chuyển mạch nhằm khắc phục hiện tượng chattering của điều khiển trượt cổ điển. Dựa trên hàm điều khiển Lyapunov, một luật cập nhật để huấn luyện

mạng trở thành bộ điều khiển theo luật điều khiển trượt nêu trên được phát triển. Tiếp theo việc kết hợp giữa bộ điều khiển trượt dùng mạng nơron và lý thuyết điều khiển phân ly [5] được kết hợp để hình thành bộ điều khiển trượt thích nghi phân ly DANSMC áp dụng cho các hệ thống đa biến. Các nghiên cứu về lý thuyết được kiểm chứng thông qua việc mô phỏng và thực nghiệm trên đối tượng con lắc ngược hai bậc xoay tự do.

Nội dung của bài báo như sau. Mục 2, giới thiệu bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơron với luật điều khiển và luật cập nhật thích nghi. Trong Mục 3, luật điều khiển phân ly được ứng dụng để phát triển bộ điều khiển trượt thích nghi ở Mục 2 thành bộ điều khiển trượt thích nghi phân ly dùng mạng nơron (DASMC) cho các hệ thống phi tuyến bậc bốn. Mục 4 trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm trên con lắc ngược hai bậc xoay tự do. Mục 5 là kết luận.

2. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DÙNG MẠNG NƠN

2.1. Mô hình toán học

Xét một hệ thống phi tuyến với biểu diễn trạng thái sau

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u + d \end{cases} \quad (2.1)$$

$$y = x_1,$$

trong đó, u là tín hiệu vào điều khiển, y là tín hiệu ra, x là vector trạng thái, d là tín hiệu nhiễu. Giả sử $g(x) \neq 0$, $f(x)$, $g(x)$ là các hàm trơn và bị chặn, $\|d\| \leq D$.

Bài toán điều khiển là xác định tín hiệu điều khiển u sao cho tín hiệu ra y bám theo tín hiệu đặt r .

Định nghĩa tín hiệu sai lệch

$$e = y - r \quad (2.2)$$

và hàm s

$$s = e^{n-1} + c_{n-1}e^{n-1} + \dots + c_2\dot{e} + c_1e, \quad (2.3)$$

trong đó c_1, \dots, c_{n-1} là các hệ số được chọn trước sao cho đa thức đặc trưng của (2.3) thỏa mãn điều kiện Hurwitz (có tất cả các nghiệm với phần thực âm). Kết quả là khi $s = 0$, tín hiệu sai lệch $\rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Phương trình $s = 0$, xác định một mặt cong S trong không gian n chiều, gọi là mặt trượt S (sliding surface).

2.2. Thiết kế bộ điều khiển

Mô tả bộ điều khiển mạng nơron

Một mạng nơron truyền thẳng N hai lớp có n ngõ vào, m nơron ở lớp ẩn, 1 ngõ ra, với các trọng số có thể điều chỉnh được dùng làm bộ điều khiển cho hệ (2.1) Ngõ ra của mạng nơron có dạng

$$u = N(w, E) = \sum_{i=1}^m w_{0i} z_i = \sum_{i=1}^m w_{0i} \delta(w_i^T E), \quad (2.4)$$

trong đó, $w_i = [w_{i1} \dots w_{in}]^T$ là trọng số ngõ vào của nơron thứ i ($i = 1..m$); $z = [z_1 \dots z_m]^T$ là ngõ ra nơron lớp ẩn; $w_0 = [w_{01} \dots w_{0m}]^T$ là trọng số lớp ra của mạng. Ngõ ra u của mạng cũng là ngõ vào của hệ thống (2.1). Ngõ vào của mạng được kết nối các ngõ ra sai số trạng thái của (2.1)

$$E = [e_1 e_2 \dots e_n]^T = [e_1 e \dots e^{n-1}]^T.$$

Hàm ngõ ra là hàm tuyến tính. Hàm tác động $\delta(\cdot)$ ở lớp ẩn là hàm sigmoid lưỡng cực có dạng

$$\delta(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1. \quad (2.5)$$

Bài toán ở đây là tìm ra luật cập nhật phù hợp để huấn luyện mạng N , sao cho bộ điều khiển mạng nơron có thể điều khiển được s tiến tới 0 theo một đáp ứng cho trước và duy trì ổn định trên đó.

Luật điều khiển trượt

Định nghĩa hàm

$$V = \frac{1}{2} s^2. \quad (2.6)$$

Điều kiện để $s \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ là

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \leq 0. \quad (2.7)$$

Nếu chọn đáp ứng của hàm s sao cho

$$\dot{s} = -\rho s, \quad \rho \text{ hằng số dương} \quad (2.8)$$

thì không những điều kiện (2.7) được thỏa mãn, mà đáp ứng của s sẽ có dạng hàm mũ với thời hằng là $\tau = 1/\rho$.

Lấy đạo hàm (2.3) và sử dụng (2.1), (2.2) ta có

$$\dot{s} = e^{(n)} + c_{n-1} e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} = f(x) + c_{n-1} e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + d - r^{(n)} + g(x)u. \quad (2.9)$$

Thay (2.8) vào (2.9) vào phương trình vừa tìm được, suy ra luật điều khiển u thỏa mãn điều kiện (2.8) là

$$u = -\frac{1}{g(x)} (\rho \cdot s + f(x) + c_{n-1} e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + d - r^{(n)}). \quad (2.10)$$

Lưu ý: luật điều khiển (2.10) không có thành phần chuyển mạch như trong điều khiển trượt cổ điển.

Luật cập nhật thích nghi để huấn luyện mạng

Định nghĩa hàm

$$V = \frac{1}{2}(\tau.\dot{s} + s)^2. \quad (2.11)$$

Điều kiện (2.8) sẽ thỏa mãn nếu có thể tìm được luật cập nhật \dot{w} , sao cho $\dot{V} < 0$.

Lấy đạo hàm (2.11)

$$\dot{V} = (\tau.\dot{s} + s)(\tau.\ddot{s} + \dot{s}). \quad (2.12)$$

Ta có

$$\ddot{s} = \frac{d}{dt}\dot{s} = \frac{\partial \dot{s}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w} \dot{w} = g(x) \frac{\partial u}{\partial w} \dot{w}, \quad (2.13)$$

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w} \dot{w} = h(x) \frac{\partial u}{\partial w} \dot{w}. \quad (2.14)$$

trong đó

$$h(x) = \frac{\partial \dot{s}}{\partial u} = \int_0^l g(x) d\tau. \quad (2.15)$$

Thay (2.13), (2.14) vào (2.12), và để ý rằng $\dot{V} < 0$ nếu luật cập nhật cho mạng được chọn như sau

$$\dot{w} = -\alpha \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot \text{sign}(\tau.g(x) + h(x)) \frac{\partial u}{\partial w} = -\alpha \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot \frac{\partial u}{\partial w}. \quad (2.16)$$

Thay (2.4) vào (2.16) và áp dụng luật Chain để triển khai cho các trọng số của lớp ra

$$\dot{w}_{0i} = -\alpha \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot z_i, \quad i = 1..m. \quad (2.17)$$

Và các trọng số của nơon thứ i lớp ẩn

$$\dot{w}_{ij} = -\alpha \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot w_{0i} \frac{1}{2}(1 - z_i^2) \cdot e_j, \quad j = 1..n. \quad (2.18)$$

Rời rạc hóa (2.17) và (2.18) với thời gian lấy mẫu là T và viết lại dưới dạng vector, luật cập nhật huấn luyện mạng được phát biểu như sau

+ Đối với nơon ở ngõ ra

$$\Delta w_0(k) = -\mu \cdot \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot z^T. \quad (2.19)$$

+ Đối với nơon thứ i ở lớp ẩn

$$\Delta w_i(k) = -\mu \cdot \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(\tau.\dot{s} + s) \cdot w_{0i}(k) \frac{1}{2}(1 - z_i^2) E^T, \quad (2.20)$$

trong đó $\mu = \alpha T$ là hệ số học.

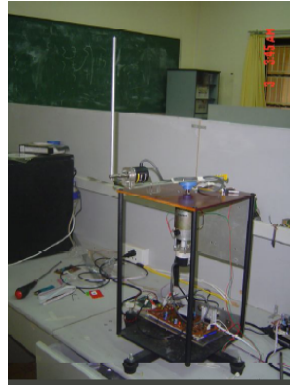
3. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI PHÂN LY CON LẮC NGƯỢC HAI BẬC XOAY TỰ DO

Con lắc ngược xoay có cấu tạo gồm có một motor gắn với một cánh tay xoay ngang với góc xoay α , đầu ngoài cùng của cánh tay có gắn một thanh dài (con lắc) quay tự do theo chiều thẳng đứng với góc quay β .

Phương trình động học mô tả con lắc [6] có dạng

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} &= -a_p \dot{\alpha} + K_p \cdot u, \\ \ddot{\beta} &= -\frac{C_1}{J_1} \dot{\theta}_1 + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_1}{J_1} a_p + \frac{K_1}{J_1} K_p \cdot u,\end{aligned}\quad (3.1)$$

trong đó, $f_1 = -a_p$; $g_1 = K_p$; $f_2 = -\frac{C_1}{J_1} x_4 + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_1}{J_1} \cdot \sin(x_3) - \frac{K_1}{J_1} a_p$; a_p và K_p hằng số mô tả động học của mô tơ; m_1 và J_1 là khối lượng và quán tính của con lắc, l_1 chiều dài trọng tâm con lắc; g là gia tốc trọng trường; C_1 là hằng số ma sát giữa con lắc và cánh tay xoay.



Hình 1. Mô hình con lắc ngược trong phòng thí nghiệm
Dùng phương pháp đổi biến trong [5] để đưa (3.1) về dạng chuẩn, đặt

$$y = \alpha - \frac{J_1}{K_1} \beta. \quad (3.2)$$

Lấy vi phân (3.2), kết quả là

$$\dot{y} = \dot{\alpha} - \frac{J_1}{K_1} \dot{\beta}. \quad (3.3)$$

Hệ thống (3.1) có thể phân ly thành hai hệ thống con nối tiếp có dạng

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)x_3,$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_4 = f_2(x) + g_2(x)u.$$

Định nghĩa

$$s_1 = c_1 x_1 + x_2, \quad c_1 > 0 \quad (3.6)$$

và hàm

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2. \quad (3.7)$$

Lấy đạo hàm (3.7)

$$\dot{V}_1 = s_1 \cdot \dot{s}_1. \quad (3.8)$$

Từ (3.8) và (3.4)

$$\dot{V}_1 = s_1 \cdot \dot{s}_1 = s_2 (c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2) = s_2 (c_1 x_2 + f_1(x) + g_1(x) x_3). \quad (3.9)$$

Điều kiện để $s_1 \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ là $\dot{V}_1 < 0$ có thể chọn

$$x_3 = -\gamma \text{sign}(s_1) \text{sign}(g_1(x)) = \gamma \text{sign}(s_1) \quad (3.10)$$

với

$$\gamma > \left| \frac{1}{g_1(x)} (c_1 x_2 + f_1(x)) \right|.$$

Để x_3 là hàm trơn, hàm $\text{sign}(s_1)$ trong (3.10) được thay thế bằng hàm sigmoid

$$x_3 = z = y \left(\frac{2}{1 + \exp^{-s_1}} - 1 \right). \quad (3.11)$$

Với luật điều khiển (3.11), điều kiện $\dot{V}_1 < 0$ thỏa mãn nên $s_1 \rightarrow 0$, điều đó dẫn đến x_1, x_2 tiến tới 0 và để ý rằng $\lim_{s_1 \rightarrow 0} (x_3) = 0$. Cho thấy lúc đó $x_3 \rightarrow 0$.

Định nghĩa

$$s_2 = c_2 (x_3 - z) + x_4. \quad (3.12)$$

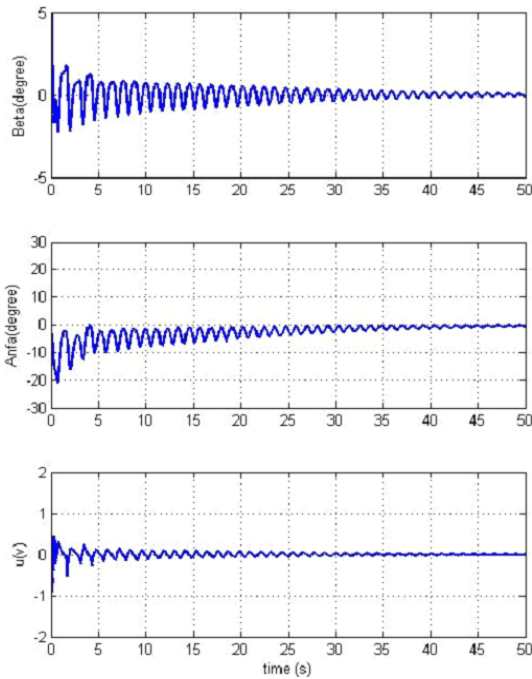
Áp dụng mạng nơron như đã mô tả ở Mục 2 để điều khiển tín hiệu mặt trượt $s_2 \rightarrow 0$. Mạng nơron có ngõ vào là x , ngõ ra là tín hiệu điều khiển u , luật cập nhật thích nghi để huấn luyện mạng là các luật (2.19) và (2.20) với $s = s_2$.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

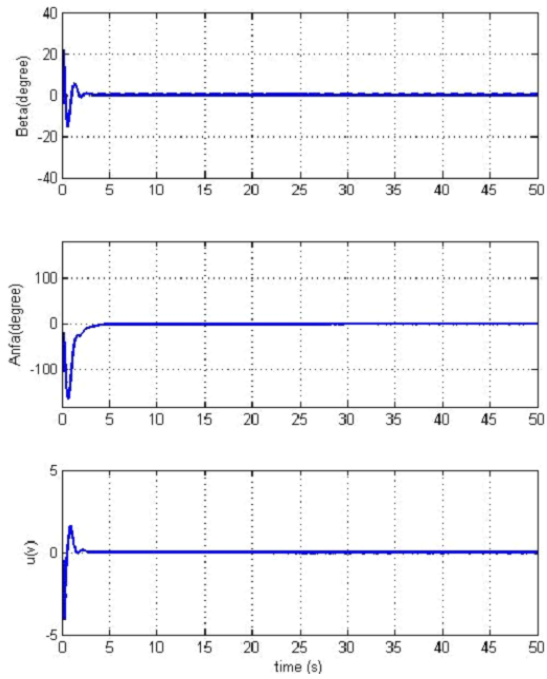
Các thông số điều khiển được chọn như sau. Mạng nơron N có 12 nơron ở lớp ẩn; Thời gian lấy mẫu $t = 0,005$; Hệ số học $\mu = 0,01$; $C_1 = 4$; $C_2 = 1$; $\rho = 10$; $\gamma = 0,6$.

Các kết quả mô phỏng của phiên điều huấn luyện đầu tiên và phiên huấn luyện thứ năm (mỗi phiên huấn luyện là 50s) cho ở hình (2) và (3), cho thấy quá trình hình thành và hội tụ của luật điều khiển của mạng nơron. Đáp ứng ở phiên huấn luyện thứ năm cho thấy không còn hiện tượng chattering trên tín hiệu điều khiển.

Ngoài ra, điều khiển trượt thích nghi phân ly dùng mạng nơron đã thử nghiệm thành công trên mô hình thực nghiệm (Hình 1) với board điều khiển ezDsp TMS2812. Chương trình mô tả bộ điều khiển được viết bằng ngôn ngữ C trên nền của phần mềm CCS (Code Composer Studio) v3.1. Hình 4 là các đáp ứng của β , α và u sau nhiều phiên huấn luyện. Đáp ứng ở Hình 4b cho thấy góc tay quay chỉ di chuyển trong khoảng $\pm 2^0$ xung quanh vị trí giữa, còn ở Hình 4a, góc con lắc có sai số rất nhỏ trong khoảng $\pm 1^0$ xung quanh vị trí cân bằng trong điều kiện bất ổn của các thông số của con lắc cơ khí và ảnh hưởng của nhiễu do rung cơ học và nhiễu điện động.



Hình 2. Phiên huấn luyện đầu tiên

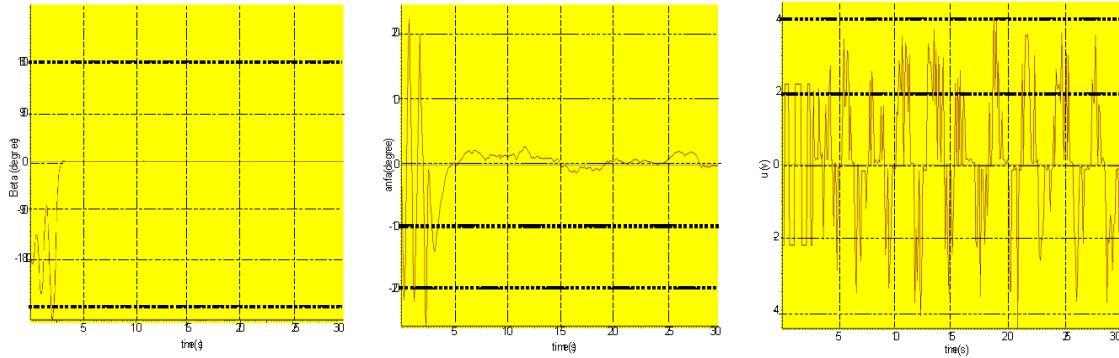


Hình 3. Phiên huấn luyện thứ năm

5. KẾT LUẬN

Mạng nơron được dùng làm bộ điều khiển trượt thích nghi phân ly được giới thiệu trong bài báo này đã thay thế hoàn toàn bộ điều khiển trượt chứ không chỉ thay thế thành phần điều khiển tương đương như các mạng nơron được dùng làm bộ điều khiển trượt thích nghi được giới thiệu trong các bài báo [1-4]. Hơn nữa luật điều khiển trượt có dạng hàm trơn nên đã khắc phục được hiện tượng chattering. Kết quả mô phỏng quá trình huấn luyện cho thấy các luật điều khiển trượt được hình thành và hội tụ trong quá trình điều khiển.

Kết quả thực nghiệm trên con lắc ngược xoay đã cho thấy tính bền vững của hệ thống điều khiển trong điều kiện bất ổn của các thông số của hệ thống thực và dưới ảnh hưởng của nhiễu cũng như tiềm năng ứng dụng của bộ điều khiển lên các đối tượng phi tuyến phức tạp khác trong thực tiễn.



Hình 4. Đáp ứng của các góc β , α và u trong thực nghiệm

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.A. Hussain and H.P. Yee, Adaptive sliding mode control with neural network based hybrid models, *Journal of Process Control* **14** (2) (2004) 157–176.
- [2] M. Zhihong, H.R. Wu, M. Palaniswami, An adaptive tracking controller using neural networks for a class of nonlinear systems, *IEEE Transactions on Neural Networks* **9** (5) (1998) 947–955.
- [3] X. Yu, M. Zhihong, SMM. Rahman, Adaptive sliding mode approach for learning in a feedforward neural network, *Neural Computing and Applications* **7** (1998) 289–294.
- [4] Lon-Chen Hung and Hung-Yuan Chung, Decoupled control using neural network-based sliding-mode controller for nonlinear systems, *International Journal of Approximate Reasoning* **32** (4) (2007) 1168–1182.
- [5] Vadim Utkin et al, *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, Taylor & Francis, 1999.
- [6] Nguyễn Đức Minh, Dương Hoài Nghĩa, Nguyễn Đức Thành, Điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơron, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ* (71) (2009) 1–5.

Nhận bài ngày 25 - 10 -2010