

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DÙNG MẠNG NƠ - RÔN ADAPTIVE NEURAL SLIDING MODE CONTROL

Nguyễn Đức Minh, Dương Hoài Nghĩa, Nguyễn Đức Thành
Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Tp Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Dựa vào lý thuyết điều khiển trượt và kỹ thuật mạng nơ - ron, bài báo này giới thiệu bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ - ron (ANSMC) cho một lớp các đối tượng phi tuyến bất định, hoặc không rõ mô hình. Đầu tiên, dựa vào một hàm Lyapunov, một luật điều khiển trượt (SMC) được thiết kế để bảo đảm tính ổn định của hệ thống. Sau đó một mạng truyền thẳng được sử dụng để tạo tín hiệu ra cho bộ điều khiển. Cuối cùng giải thuật huấn luyện mạng được xây dựng sao cho quỹ đạo pha của hệ thống hội tụ về mặt trượt trong điều kiện đối tượng bất định. Kết quả mô phỏng trên hệ thống con lắc ngược, một đối tượng phi tuyến, không ổn định và không cực tiểu pha, đã cho thấy bộ điều khiển đề nghị không chỉ khắc phục được hiện tượng dao động mà còn có chất lượng và tính bền vững tốt.

ABSTRACT

Based on the sliding mode control theory and the neural network technique, this paper introduces a new adaptive neural sliding mode controller (ANSMC) for a class of uncertain or unknown nonlinear systems. First, based on a Lyapunov function candidate, a sliding mode controller (SMC) is designed to guarantee the stability of the system. Next, a feedforward neural network is introduced to provide the output of the sliding mode controller. Finally, the learning algorithm of the neural network is designed such that the state trajectories of the system converge to the sliding surface in presence of system uncertainty. Simulation results on an inverted pendulum, which is a nonlinear, unstable and non minimum phase system, show that the proposed control strategy can not only reduce the phenomenon of chattering in effect, but also has good dynamic performance and robustness.

I. GIỚI THIỆU

Điều khiển trượt 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. Đã có rất nhiều nghiên cứu, áp dụng mạng nơ - ron trong hệ thống điều khiển trượt, với mục đích là tìm ra các luật điều khiển không phụ thuộc vào các giới hạn của hệ thống, cũng như hạn chế hiện tượng chattering [2-7].

Bài báo này giới thiệu một bộ điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ ron với luật cập nhật đơn giản, nhằm giải quyết bài toán chattering. Phương pháp điều khiển đề nghị không đòi hỏi phải nhận dạng trực tuyến các hàm phi tuyến trong mô hình của đối tượng. Bài báo gồm có 5 mục. Mục 2 trình bày phương pháp điều khiển trượt SMC áp dụng cho các hệ phi tuyến bất định. Mục 3 giới thiệu bộ điều khiển đề nghị ANSMC. Mục 4 trình bày một số mô phỏng. Mục 5 trình bày các kết luận.

II. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT (SMC)

2.1 Mô tả toán học đối tượng điều khiển

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

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u + d \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.1)$$

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 thiết $1/g(x)$, $f(x)$, và d là các hàm bị chặn. Bài toán điều khiển được đặt ra là : xác định tín hiệu điều khiển u sao cho tín hiệu ra y bám theo tín hiệu đặt r .

2.2 Mặt trượt

Định nghĩa tín hiệu sai lệch :

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

và hàm S :

$$S = e^{(n-1)} + c_{n-1}e^{(n-2)} + \dots + c_2\dot{e} + c_1e \quad (2.3)$$

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 $e \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Phương trình $S = 0$ xác định một mặt cong trong không gian n chiều, gọi là mặt trượt (sliding surface).

Vấn đề đặt ra là : xác định luật điều khiển u để đưa các quỹ đạo pha của hệ thống về mặt trượt và duy trì trên đó một cách bền vững đối với các biến động của $f(x)$, $g(x)$ và d.

2.3 Luật điều khiển cho hệ bất định

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

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{e}^{(n)} + c_{n-1}\dot{e}^{(n-1)} + \dots + c_2\ddot{e} + c_1\dot{e} \\ &= f(x) + c_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + c_2\ddot{e} + c_1\dot{e} + d - r^{(n)} + g(x)u \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\text{Định nghĩa :} \quad V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.5)$$

Ta có :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} = S(f(x) - r^{(n)} + c_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + c_2\ddot{e} + c_1\dot{e} + d) + g(x)Su \\ &\leq |S| |g(x)| |\delta(x) + g(x)Su| \end{aligned} \quad (2.6)$$

Với :

$$\delta(x) = \left| \frac{1}{g(x)} (f(x) - r^{(n)} + c_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + c_2\ddot{e} + c_1\dot{e} + d) \right| \quad (2.7)$$

Để $S \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, chọn u sao cho $\dot{V} < 0$ với $\forall S \neq 0$, và $\dot{V} = 0$ khi $S = 0$.

Từ 2.6 suy ra luật điều khiển :

$$u = -\beta \cdot \text{sign}(g(x) \cdot S) \quad (2.8)$$

$$\text{với} \quad \beta = \delta(x) + \beta_0, \quad \beta_0 > 0 \quad (2.9)$$

Có thể chọn β bằng một hằng số $k > \sup(\delta(x))$. Khi đó :

$$u = -k \cdot \text{sign}(g(x)) \cdot \text{sign}(S) \quad (2.10)$$

Nhận xét : (2.10) cho thấy luật điều khiển chỉ phụ thuộc vào chặn trên của δ , dấu của $g(x)$ và mặt trượt S. Tín hiệu điều khiển không liên tục tại thời điểm quỹ đạo pha đi qua mặt trượt $S = 0$.

III. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI DÙNG MẠNG NƠ - RÔN (ANSMC)

3.1 Hệ thống điều khiển ANSMC

Xét một mạng nơ - rôn dùng làm bộ điều khiển ANSMC dạng truyền thẳng q lớp có phương trình biểu diễn tổng quát :

$$u = f_N = N(E, W) \quad (3.1)$$

Trong đó E là vectơ ngõ vào, W là bộ vector trọng số của mạng. Tất cả các trọng số của mạng được khởi tạo với giá trị ban đầu là không. Các giá trị này sẽ được cập nhật trực tuyến theo lý thuyết điều khiển trượt, sao cho $S \rightarrow 0$, khi $t \rightarrow \infty$.

3.2 Luật cập nhật thích nghi

Từ (2-5), điều kiện để $S \rightarrow 0$, khi $t \rightarrow \infty$ là :

$$\dot{V} = S \cdot \dot{S} < 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Hay} \quad S \cdot \frac{\partial S}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial w} \dot{w} < 0 \quad (3.3)$$

Từ (2-4) suy ra :

$$S = \int_0^t (f(x) + c_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + c_2\ddot{e} + c_1\dot{e} + d - r^{(n)} + g(x)u) dt + S(0) \quad (3.4)$$

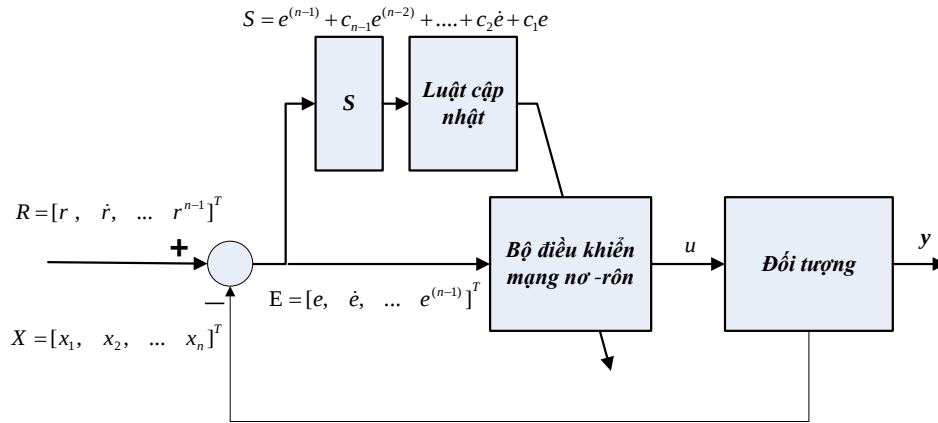
$$\text{Hay} \quad \frac{\partial S}{\partial u} = \int_0^t g(x) dt \triangleq h(x) \quad (3.5)$$

(3-3) sẽ thỏa mãn nếu :

$$\dot{w} = -\alpha \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial w} \right)^T \quad (3.6)$$

Trong đó α là hằng số dương. Rời rạc hóa (3-6) với chu kỳ lấy mẫu là T ta có :

$$\frac{w(k+1) - w(k)}{T} = -\alpha \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial w} \right)^T \quad (3.7)$$



Hình 1. Hệ thống điều khiển ANSMC.

Đặt $\Delta w = w(k+1) - w(k)$, ta có :

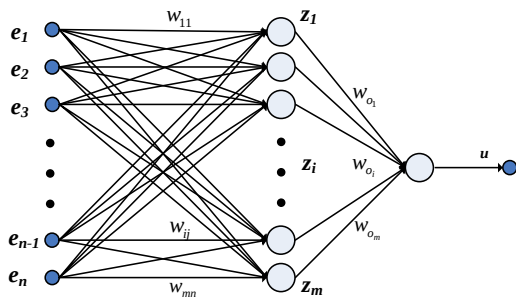
$$\Delta w = -\mu \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial w} \right)^T \quad (3.8)$$

Với $\mu = \alpha.T$

Nhận xét : (3.8) cho thấy luật cập nhật trọng số chỉ phụ thuộc dấu của $h(x)$ và dấu của mặt trượt S .

3.3 Bộ điều khiển ANSMC

Xét mạng truyền thẳng một lớp ẩn có cấu trúc như hình 2. Gọi n là số tín hiệu ở lớp vào, m là số nơ nơ ở lớp ẩn, hàm tác động lớp ẩn là hàm sigmoid lưỡng cực, hàm tác động lớp ra là hàm tuyến tính, $E = [e_1 \ e_3 \ \dots \ e_n]^T$ là vector ngõ vào, $Z = [z_1 \ z_3 \ \dots \ z_m]^T$ là vector ngõ ra lớp ẩn, u là ngõ ra mạng, $w_o = [w_{o1} \ w_{o2} \ \dots \ w_{om}]^T$ là vector trọng số của nơ nơ ở lớp ra, $w_i = [w_{i1} \ w_{i2} \ \dots \ w_{om}]^T$ là vector trọng số của nơ nơ thứ i ở lớp ẩn.



Hình 2. Cấu trúc của mạng nơ - rôn một lớp ẩn dùng làm bộ điều khiển ANSMC.

Áp dụng luật cập nhật (3-8) và triển khai luật chain, ứng với các trọng số cho nơ nơ ở lớp ra, ta có :

$$w_o(k+1) = w_o(k) - \mu \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial w_o} \right)^T \quad (3.9)$$

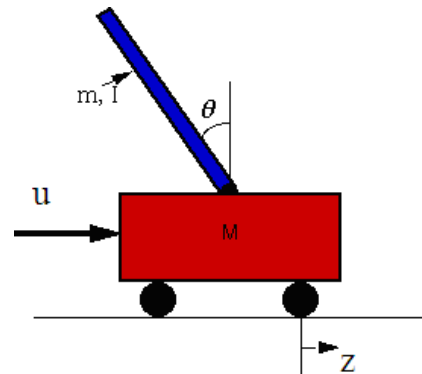
$$= w_o(k) - \mu \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot Z$$

Tương tự như trên, luật cập nhật cho các trọng số của các nơ nơ ở lớp ẩn:

$$w_i(k+1) = w_i(k) - \mu \cdot \text{sign}(h) \cdot \text{sign}(S) \cdot \frac{1}{2} \cdot w_{oi}(1 - z_i^2) \cdot E \quad (3.10)$$

IV. MÔ PHỎNG

Phần này giới thiệu các kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển SMC và ANSMC cho đối tượng là con lắc ngược trên xe. Mục đích điều khiển là giữ thăng bằng cho con lắc ở vị trí ngược $\theta = 0$ (hình 3).



Hình 3. Mô hình con lắc ngược trên xe.

Các thông số của đối tượng điều khiển như sau: khối lượng xe $M = 2 \text{ kg}$, khối lượng của con lắc $m = 0.1 \text{ kg}$, và chiều dài cánh tay đòn $l = 0.5 \text{ m}$. Gọi z là khoảng cách vị trí xe so với gốc tọa độ, θ là góc con lắc so với phương thẳng đứng, u là lực tác động lên xe con lắc. Hệ phương trình động học cho xe con lắc được mô tả như sau.

$$(M + m)\ddot{z} + m l \ddot{\theta} = u \quad (4.1)$$

$$m \ddot{z} + m l \ddot{\theta} = m l \theta \quad (4.2)$$

Rút gọn và biểu diễn dưới dạng phương trình biến trạng thái :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a.x_1 + b.u = 20.58.x_1 - u \end{cases} \quad (4.3)$$

Trong đó:

$$a = (M + m).g / M.l, \quad b = -1 / M.l, \quad x_1 = \theta.$$

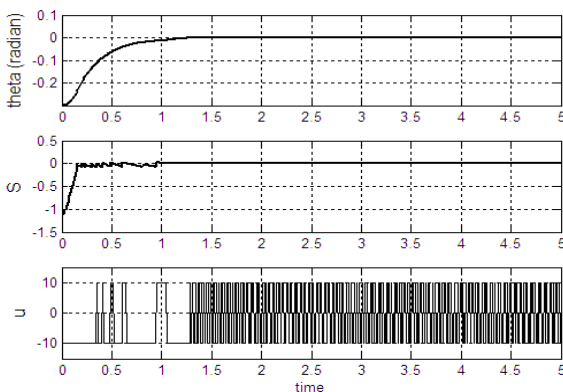
Mô phỏng dùng điều khiển SMC

$$\text{Chọn :} \quad S = c.x_1 + x_2 = 4.x_1 + x_2 \quad (4.5)$$

Luật điều khiển trượt :

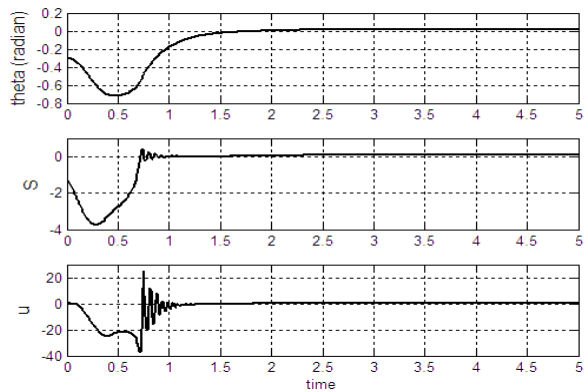
$$u = -k.\text{sign}(b).\text{sign}(S) = k.\text{sign}(S) \quad (4.6)$$

Mô phỏng với góc lệch ban đầu $\theta = -0.3 \text{ rad}$ và hệ số $k = 10$. Ta được kết quả ở hình 4. Ta thấy hiện tượng chattering thể hiện rất rõ ở đáp ứng $u(t)$.

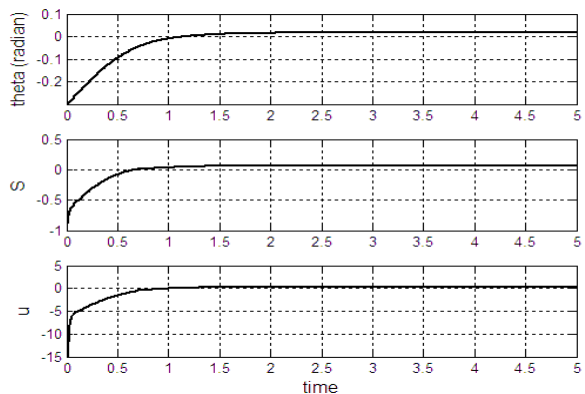


Hình 4. Kết quả mô phỏng dùng điều khiển SMC.

Mô phỏng dùng điều khiển ANSMC.



Hình 5. Phiên điều khiển đầu tiên của ANSMC.

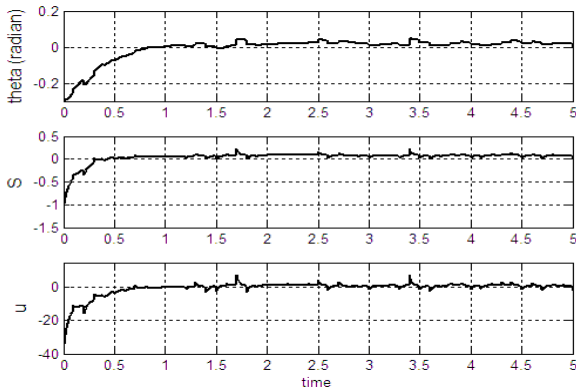


Hình 6. Phiên điều khiển thứ hai của ANSMC.

Dùng bộ điều khiển ANSMC với mạng nơ - ron được sử dụng là mạng một lớp ẩn, với hai ngõ vào (e và $\dot{e}$), lớp ẩn có 6 nơ ron với hàm tác động là hàm sigmoid lưỡng cực. Lớp ra có một nơ ron với hàm tích hợp tuyến tính và hàm tác động tuyến tính. Hệ số học được chọn là 0.05 cho phiên điều khiển đầu, và 0.01 cho các phiên điều khiển sau, thời gian lấy mẫu là 0.01s. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở hình 5 (phiên điều khiển đầu tiên) và hình 6 (phiên điều khiển thứ hai). Ta thấy hiện tượng chattering đã được khắc phục (không còn tồn tại ở đáp ứng của u). Mặt khác, chất lượng của phiên điều khiển thứ 2 được cải thiện rất rõ so với phiên đầu tiên.

Thực hiện mô phỏng trong trường hợp thông số mô hình xe con lắc thay đổi và trong điều kiện có nhiễu. Cụ thể là thay $M = 5 \text{ kg}$, $m = 0.5 \text{ kg}$, $l = 0.3 \text{ m}$, và dưới tác động của nhiễu trắng ở ngõ ra. Kết quả mô phỏng ở hình 7 cho thấy

hệ thống bền vững với sai số mô hình và với nhiễu.



Hình 7. Tính bền vững với sai số mô hình và nhiễu.

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đã giới thiệu một phương pháp điều khiển trượt thích nghi dùng mạng nơ - ron. Lý thuyết và kết quả mô phỏng đã cho thấy bộ điều khiển ANSMC đã khắc phục được nhược điểm cơ bản của điều khiển trượt đó là hiện tượng chattering. Luật cập nhật cho bộ điều khiển ANSMC đơn giản, và không cần phải nhận dạng online hàm $f(x)$ như trong các bộ điều khiển NSMC [2], [3], [4], [6], [7]. Luật điều khiển ANSMC được hình thành trong quá trình điều khiển, và có tính kế thừa : phiên điều khiển sau có chất lượng tốt hơn phiên điều khiển trước. Luật cập nhật ANSMC đơn giản, và có thể mở rộng cho các loại cấu trúc mạng khác như mạng RBF, hoặc nơ - ron mờ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vadim Utkin et al; Sliding Mode Control in Electromechanical Systems; Taylor & Francis, 1999.
2. Hiroshi Morioka et al; Neural Network Based Chattering Free Sliding Mode Control; Proceedings of SICE Annual Conference, 1995.
3. A. Sabanovit et al; Neural Network Application in Sliding Mode Control Systems; IEEE Workshop on Variable Structure Systems, 1996.
4. M.O. Efe, O. Kaynak, X. Yu and B. M. Wilamowski; Sliding Mode Control of Nonlinear Systems Using Gaussian Radial Basis Function Neural Networks; Int. Joint Conf. On Neural Networks (IJCNN'01), 2001.
5. Chun-Hsien Tsai, Hung-Yuan Chung; Neuro-Sliding Mode Control With Its Applications to Seesaw Systems; IEEE Transaction on Neural Networks, Vol. 15, No.1, 2004.
6. Tri V.M. Nguyen, et al; Sliding Mode Neural Controller for Nonlinear Systems with Higher Order and Uncertainties; Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004.
7. Juzhu Peng et al; A Neural Network Sliding Mode Controller with Application to Robotic Manipulator; Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006.

Địa chỉ liên hệ: - Dương Hoài Nghĩa - Tel: 0918.416.425, Email : dhnghia@hcmut.edu.vn
 - Nguyễn Đức Minh - Tel: 0909.125.585, Email: ducminhhd@yahoo.com.vn
 Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Bách khoa Tp Hồ Chí Minh