

Điều khiển thích nghi bền vững cho một lớp phi tuyến affine bất định

Robust adaptive control for a class of uncertain affine nonlinear systems

Ngô Trí Nam Cường^{1,2,*}

¹Viện Kỹ thuật điện và Tự động hóa

²Trường Đại học Công nghiệp Vinh

*Corresponding author Email:ncuong792000@gmail.com

Abstract

This paper presents the control synthesis method for a class of uncertain affine nonlinear systems based on adaptive and robust control techniques. The result is an identification law for the uncertain components, and a robust controller is constructed based on sliding mode control. The research results are simulated in Matlab Simulink with specific examples to demonstrate the correctness of the method. Moreover, the control system proposed in this paper operates stably and achieves high control quality under uncertain conditions of plants. These research results can be applied to the design and development of control systems for appropriate control targets in practical applications.

Keywords: uncertain affine nonlinear systems, adaptive and robust control, identification control

Các từ viết tắt

SISO	single input – single output
RBF	radial Basis Fuction
SMC	sliding mode control
AD	adaptive control
P, Q	matrix
F, G, x	vector
MGR	multigradient recursive

Tóm tắt

Bài báo trình bày một phương pháp tổng hợp bộ điều khiển cho một lớp phi tuyến affine bất định dựa trên kỹ thuật điều khiển thích nghi và điều khiển bền vững. Kết quả thu được là luật nhận dạng các thành phần bất định, và bộ điều khiển bền vững được xây dựng trên cơ sở điều khiển trượt. Các kết quả nghiên cứu đều được mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink bằng ví dụ cụ thể nhằm minh chứng tính đúng đắn của phương pháp. Cùng với đó, hệ thống điều khiển do bài báo đề xuất hoạt động ổn định, có chất lượng điều khiển cao trong điều kiện bất định của đối tượng điều khiển. Các kết quả nghiên cứu này có thể áp dụng vào việc thiết kế, chế tạo hệ thống điều khiển cho đối tượng điều khiển phù hợp trong thực tế.

1. Đặt vấn đề

Nghiên cứu, thiết kế hệ thống điều khiển có khả năng hoạt động ổn định và hiệu quả cho lớp hệ phi tuyến affine bất định luôn là vấn đề khó và thời sự. Việc nghiên cứu tổng hợp hệ thống điều khiển cho các hệ affine bất định không chỉ có ý nghĩa về mặt lý thuyết mà còn có ứng dụng thực tiễn quan trọng. Trong thực tế kỹ thuật ta gặp nhiều đối tượng không mô hình hóa được dưới dạng phương trình vi phân, hoặc quá trình mô hình hóa gặp nhiều khó khăn. Các lớp đối tượng dạng này tuy không có được mô hình toán học tường minh, nhưng chúng ta biết được các mối quan hệ logic về chức năng của các thành phần trong hệ thống. Đối với lớp đối tượng nói trên có nhiều phương pháp khác nhau để tổng hợp bộ điều khiển, trong đó phương pháp điều khiển thích nghi bền vững có nhiều ưu điểm [1]-[4] các công trình này sử dụng mạng nơ ron với luật học được xây dựng dựa trên các phương pháp tối ưu hóa bằng phương pháp hạ gradient. Tuy nhiên, phương pháp

hạ gradient không đảm bảo tìm ra cực tiểu toàn cục của hàm sai số, chỉ ở mức cực tiểu địa phương, đây là hạn chế của phương pháp. Nhiều phương pháp điều khiển, được công bố trong các tài liệu [5]-[11] cho thấy rằng mạng nơ ron nhân tạo đóng vai trò quan trọng trong việc xấp xỉ hàm các hàm phi tuyến của hệ thống phức tạp. Việc sử dụng mạng nơ ron để xấp xỉ các hàm phi tuyến bất định trong lớp hệ affine bất định có nhiều triển vọng. Trong công trình [12] đã đề xuất luật nhận dạng hàm phi tuyến bất định sử dụng mạng nơ ron RBF. Tuy vậy, thuật toán nhận dạng còn phức tạp, khó thực hiện trong kỹ thuật, luật cập nhật trọng số của mạng nơ ron phụ thuộc vào biến sai số hệ thống Z, mặt khác biến Z luôn thay đổi, đặc biệt là hệ thống bám, do đó quá trình nhận dạng luôn xảy ra. Điều này gây nhiều bất lợi cho hệ thống, trong nhiều trường hợp gây mất ổn định, mặt khác trong công trình này chưa tính đến hàm bất định trong kênh điều khiển. Công trình [13] sử dụng mạng nơ ron RBF để xấp xỉ các thành phần bất định, trong tài liệu này đề xuất một phương pháp học tăng cường đệ quy đa gradient (MGR), sử dụng các gradient hiện tại và gradient quá khứ. Phương pháp MGR loại bỏ được vấn đề tối ưu cục bộ. Khác với các công trình trên, trong bài báo này đề xuất một phương pháp tổng hợp bộ điều khiển cho một lớp hệ phi tuyến bất định. Bộ điều khiển có khả năng duy trì tính ổn định và có chất lượng điều khiển cao trong điều kiện bất định. Phương pháp điều khiển do bài báo đề xuất có thể áp dụng vào nhiều hệ thống thực tế, như robot công nghiệp, máy bay không người lái, giao thông vận tải, năng lượng và các đối tượng điều khiển phù hợp khác.

2. Đặt bài toán

Lớp phi tuyến affine bất định được mô tả bởi hệ phương trình:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 & x_2 \\ \dot{x}_2 & x_3 \\ & \vdots \\ \dot{x}_n & = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u \\ y & = x_1 \end{cases}, \quad (1)$$

trong đó: lớp (1) là điều khiển được; $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ là vector trạng thái đo được; $u \in \mathbb{R}$ là đầu vào điều khiển; $f(\mathbf{x}) \neq 0$, $g(\mathbf{x}) \neq 0$ là các hàm trơn bất định và bị chặn.

Đề tổng hợp bộ điều khiển cho lớp phi tuyến bất định SISO (1) bài báo tiến hành giải quyết hai vấn đề chính.

Vấn đề thứ nhất: Xây dựng luật nhận dạng thích nghi các hàm phi tuyến bất định $f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$.

Vấn đề thứ hai: Tổng hợp bộ điều khiển bền vững cho hệ (1) dựa trên các kết quả nhận dạng các thành phần bất định bằng phương pháp điều khiển trượt.

Không mất tính tổng quát, ta thực hiện một số phép biến đổi toán học, nhằm giúp việc tổng hợp hệ thống điều khiển thuận lợi hơn. Từ (1) có thể viết lại $f(\mathbf{x})$ thành:

$$f(\mathbf{x}) = -\sum_{i=1}^n a_i x_i + f^*(\mathbf{x}), \quad (2)$$

trong đó $f^*(\mathbf{x})$ là thành phần chưa biết; $a_i, i = \overline{1, n}$ được chọn sao cho đa thức $s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1$ là Hurwitz. Nếu bằng cách nào đó xác định được $f^*(\mathbf{x})$ thì ta hoàn toàn xác định được $f(\mathbf{x})$ ở (2), vì các $a_i, i = \overline{1, n}$ đã biết. Từ (2) viết lại (1) dưới dạng:

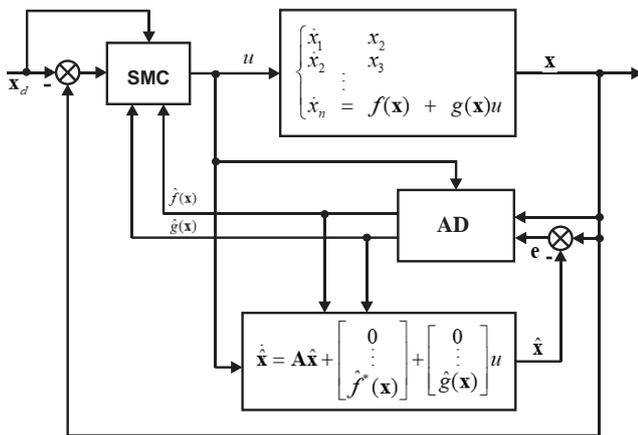
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dots - a_n x_n + f^*(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u \end{cases}, \quad (3)$$

tiếp tục viết lại (3) ta có:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ f^*(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ g(\mathbf{x}) \end{bmatrix} u. \quad (4)$$

Như vậy, bài báo đã chuyển hệ phi tuyến bất định (1) thành hệ phi tuyến bất định (4). Hệ phi tuyến (4) được sử dụng để xác định các thành phần bất định, với $f^*(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ chưa biết cần phải nhận dạng, từ kết quả nhận dạng này được sử dụng để tổng hợp bộ điều khiển cho hệ bất định (1).

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển bài báo đề xuất được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc rút gọn hệ thống điều khiển thích nghi bền vững lớp phi tuyến affine (1)

3. Xây dựng luật nhận dạng thích nghi các hàm phi tuyến bất định

Mô hình nhận dạng các thành phần bất định có phương trình:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \hat{f}^*(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \hat{g}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} u, \quad (5)$$

trong đó $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n]^T$ là vector trạng thái của mô hình;

$\hat{f}^*(\mathbf{x}), \hat{g}(\mathbf{x})$ là các thành phần nhận dạng của $f^*(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$.

Từ phương trình (4) và (5) ta có phương trình sai lệch:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{f}^*(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{g}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} u, \quad (6)$$

với $\mathbf{e}, \tilde{f}^*(\mathbf{x}), \tilde{g}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}, \quad (7)$$

$$\tilde{f}^*(\mathbf{x}) = f^*(\mathbf{x}) - \hat{f}^*(\mathbf{x}), \quad (8)$$

$$\tilde{g}(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}) - \hat{g}(\mathbf{x}). \quad (9)$$

Quá trình nhận dạng sẽ hội tụ nếu:

$\hat{f}^*(\mathbf{x}) \rightarrow f^*(\mathbf{x}), \hat{g}(\mathbf{x}) \rightarrow g(\mathbf{x}), \mathbf{e} \rightarrow 0$. Tiếp đến ta biểu diễn $f^*(\mathbf{x}), \hat{f}^*(\mathbf{x}), g(\mathbf{x}), \hat{g}(\mathbf{x})$ bằng các mạng nơ ron RBF.

Biểu diễn hàm $f^*(\mathbf{x})$ thông qua hàm cơ sở $\phi_i(\mathbf{x})$ với trọng số lý tưởng w_i :

$$f^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m w_i \phi_i(\mathbf{x}) + \varepsilon^f, \quad (10)$$

$w_i = \text{const}, i = \overline{1, m}$ với m là số lượng hàm cơ sở, ε^f là sai số xấp xỉ, hàm cơ sở được chọn như sau:

$$\phi_i(\mathbf{x}) = \exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|^2 / 2\sigma_i). \quad (11)$$

Thành phần đánh giá $\hat{f}^*(\mathbf{x})$ của hàm $f^*(\mathbf{x})$ biểu diễn thông qua hàm cơ sở (11) với trọng số hiệu chỉnh \hat{w}_i :

$$\hat{f}^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^m \hat{w}_i \phi_i(\mathbf{x}). \quad (12)$$

Tiếp tục biểu diễn hàm $g(\mathbf{x})$ thông qua hàm cơ sở (11) với trọng số lý tưởng v_i :

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^l v_i \phi_i(\mathbf{x}) + \varepsilon^g, \quad (13)$$

$v_i = \text{const}, i = \overline{1, l}$ với l là số lượng hàm cơ sở, ε^g là sai số xấp xỉ.

Biểu diễn $\hat{g}(\mathbf{x})$ thông qua hàm cơ sở (11) với trọng số hiệu chỉnh \hat{v}_i :

$$\hat{g}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^l \hat{v}_i \phi_i(\mathbf{x}). \quad (14)$$

Từ (6) ÷ (10) và (12) ÷ (14) ta thấy quá trình nhận dạng là quá trình chỉnh định trọng số hiệu chỉnh so với trọng số lý tưởng sao cho các sai lệch trọng số tiến về không:

$$\tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i \rightarrow 0; \quad (15)$$

$$\tilde{v}_i = v_i - \hat{v}_i \rightarrow 0; \quad (16)$$

và khi đó $\tilde{f}^*(\mathbf{x}) \rightarrow 0, \tilde{g}(\mathbf{x}) \rightarrow 0, \mathbf{e} \rightarrow 0$ vì \mathbf{A} là ma trận

Hurwitz điều đó tương đương với phương trình (6) ổn định. Thuật toán nhận dạng các hàm bất định $f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ được bài báo đề xuất ở định lý:

Định lý: Các hàm tron bất định $f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ của (1) được xác định bằng các biểu thức sau:

$$f(\mathbf{x}) \square \hat{f}(\mathbf{x}) = -\sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=0}^m \hat{w}_i \phi_i(\mathbf{x}) \quad (17)$$

luật cập nhật trọng số \hat{w}_i :

$$\dot{\hat{w}}_i = \mathbf{P}_n \mathbf{e} \phi_i(\mathbf{x}); \quad (18)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \square \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^l \hat{v}_i \phi_i(\mathbf{x}), \quad (19)$$

luật cập nhật trọng số \hat{v}_i :

$$\dot{\hat{v}}_i = u \mathbf{P}_n \mathbf{e} \phi_i(\mathbf{x}); \quad (20)$$

với miền hội tụ của thuật toán nhận dạng:

$$\|\mathbf{e}\| > \frac{2\|\mathbf{P}_n\|(\varepsilon^f + \varepsilon^g)}{r_{\min}(\mathbf{Q})};$$

trong đó: \mathbf{e} là vector sai lệch trạng thái giữa lớp affine (1) và mô hình nhận dạng (5); các hệ số chọn $a_i, i = \overline{1, n}$ thỏa mãn đa thức $s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1$ là Hurwitz; \mathbf{P}_n là hàng thứ n của ma trận xác định dương \mathbf{P} ; $\varepsilon^f, \varepsilon^g$ là sai số xấp xỉ của mạng nơ ron RBF; $r_{\min}(\mathbf{Q})$ là giá trị riêng của $\mathbf{Q} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A})$.

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov (6) dưới dạng:

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \sum_{i=0}^m \tilde{w}_i^2 + \sum_{i=0}^l \tilde{v}_i^2, \quad (21)$$

với \mathbf{P} là ma trận đối xứng xác định dương kích thước $n \times n$.

Lấy đạo hàm hai vế (21) ta được:

$$\dot{V} = \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{P}} \mathbf{e} + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i + 2 \sum_{i=0}^l \dot{\tilde{v}}_i \tilde{v}_i, \quad (22)$$

thay (6) vào (22) ta có:

$$\dot{V} = \left[\mathbf{e}^T \mathbf{A}^T + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{f}^s(\mathbf{x}) \end{bmatrix}^T + u \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{g}(\mathbf{x}) \end{bmatrix}^T \right] \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{f}^s(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \tilde{g}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \right] + 2 \sum_{i=0}^m \dot{\tilde{w}}_i \tilde{w}_i + 2 \sum_{i=0}^l \dot{\tilde{v}}_i \tilde{v}_i, \quad (23)$$

từ các biểu thức (8), (9), (15), (16) và thay (10), (12), (13), (14) vào biểu thức (22):

$$\dot{V} = \left[\mathbf{e}^T \mathbf{A}^T + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n (w_i - \hat{w}_i) \phi_i(\mathbf{x}) \end{bmatrix}^T + u \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^l (v_i - \hat{v}_i) \phi_i(\mathbf{x}) \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varepsilon^f + \varepsilon^g \end{bmatrix}^T \right] \mathbf{P} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \left[\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n (w_i - \hat{w}_i) \phi_i(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^l (v_i - \hat{v}_i) \phi_i(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varepsilon^f + \varepsilon^g \end{bmatrix} \right] + 2 \sum_{i=0}^m (\dot{\tilde{w}}_i - \dot{\hat{w}}_i)(w_i - \hat{w}_i) + 2 \sum_{i=0}^l (\dot{\tilde{v}}_i - \dot{\hat{v}}_i)(v_i - \hat{v}_i). \quad (24)$$

Tiếp tục biến đổi (24) chú ý ma trận \mathbf{P} đối xứng ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} + 2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} (\varepsilon^f + \varepsilon^g) + 2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} \sum_{i=0}^n (w_i - \hat{w}_i) \phi_i(\mathbf{x}) + \\ &+ 2u \mathbf{P}_n \mathbf{e} \sum_{i=0}^l (v_i - \hat{v}_i) \phi_i(\mathbf{x}) + 2 \sum_{i=0}^m (\dot{\tilde{w}}_i - \dot{\hat{w}}_i)(w_i - \hat{w}_i) + \\ &+ 2 \sum_{i=0}^l (\dot{\tilde{v}}_i - \dot{\hat{v}}_i)(v_i - \hat{v}_i) \end{aligned} \quad (25)$$

\mathbf{P}_n là hàng thứ n của ma trận \mathbf{P} . Từ biểu thức (25) ta rút điều kiện để $\dot{V} < 0$:

$$2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} \sum_{i=0}^n (w_i - \hat{w}_i) \phi_i(\mathbf{x}) + 2 \sum_{i=0}^m (\dot{\tilde{w}}_i - \dot{\hat{w}}_i)(w_i - \hat{w}_i) = 0; \quad (26)$$

$$2u \mathbf{P}_n \mathbf{e} \sum_{i=0}^l (v_i - \hat{v}_i) \phi_i(\mathbf{x}) + 2 \sum_{i=0}^l (\dot{\tilde{v}}_i - \dot{\hat{v}}_i)(v_i - \hat{v}_i) = 0; \quad (27)$$

$$\mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{e} + 2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} (\varepsilon^f + \varepsilon^g) < 0. \quad (28)$$

Từ các biểu thức của định lý và chú ý w_i, v_i là các trọng số lý tưởng do vậy $\dot{w}_i = 0, \dot{v}_i = 0$, thay (18) vào (26) và thay (20) vào (27) ta thấy (26) và (27) hoàn toàn thỏa mãn.

Quay lại với bất phương trình (28) vì \mathbf{A} là ma trận Hurwitz, \mathbf{P} là ma trận đối xứng xác định dương ta có:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}, \quad (29)$$

thay (29) vào (28) ta được:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + 2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} (\varepsilon^f + \varepsilon^g) < 0. \quad (30)$$

Biến đổi vế trái (30) ta có:

$$\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + 2 \mathbf{P}_n \mathbf{e} (\varepsilon^f + \varepsilon^g) < -r_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{e}\|^2 + 2 \|\mathbf{P}_n\| \|\mathbf{e}\| (\varepsilon^f + \varepsilon^g) < 0 \quad (31)$$

với $r_{\min}(\mathbf{Q})$ là giá trị riêng nhỏ nhất của ma trận \mathbf{Q} .

Từ (31) ta có điều kiện để $\dot{V} < 0$:

$$\|\mathbf{e}\| > \frac{2 \|\mathbf{P}_n\| (\varepsilon^f + \varepsilon^g)}{r_{\min}(\mathbf{Q})} \quad (32)$$

Nếu thỏa mãn (32) thì (6) ổn định, có nghĩa là thuật toán nhận dạng hội tụ trong miền (32). Miền ổn định (32) là toàn bộ không gian trạng thái \mathbf{e} , chỉ trừ vùng lân cận gốc tọa độ với bán kính vùng này phụ thuộc vào sai số xấp xỉ mạng nơ ron RBF $\varepsilon^f, \varepsilon^g$. Mặt khác, mạng nơ ron RBF có khả năng xấp xỉ nhỏ bao nhiêu tùy ý nên có thể bỏ qua. Do vậy, miền ổn định của thuật toán nhận dạng là toàn bộ không gian trạng thái chỉ trừ gốc tọa độ với bán kính vùng này gần bằng không.

Định lý được chứng minh.

Ở mục này bài báo đã đề xuất và chứng minh định lý về nhận dạng các hàm bất định của lớp phi tuyến affine (1). Các kết quả nhận dạng được sử dụng để tổng hợp bộ điều khiển được trình bày trong phần tiếp theo sau đây.

4. Tổng hợp bộ điều khiển bền vững

Bộ điều khiển bền vững được tổng hợp trên cơ sở điều khiển trượt. Thay thế biểu thức nhận dạng $\hat{f}(\mathbf{x}), \hat{g}(\mathbf{x})$ của định lý vào (1) ta được:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \hat{f}(\mathbf{x}) + \hat{g}(\mathbf{x})u \end{cases}. \quad (33)$$

Viết lại (33) dưới dạng:

$$\dot{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x})u, \quad (34)$$

trong đó: $\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) = [x_2, x_3, \dots, \hat{f}(\mathbf{x})]^T, \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x}) = [0, \dots, \hat{g}(\mathbf{x})]^T$.

Véc tơ sai lệch giữ vector trạng thái của đối tượng và vector trạng thái mong muốn:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_d \text{ là vector trạng thái mong muốn.} \quad (35)$$

Chọn mặt trượt:

$$s = \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (36)$$

$\mathbf{C} = [c_n, c_{n-1}, \dots, c_1]$ là tham số mặt trượt được chọn sao cho đa thức $s^n + c_n s^{n-1} + \dots + c_2 s + c_1$ là Hurwitz.

Đối với mặt trượt (36) chọn hàm Lyapunov:

$$V_1 = 0.5 s^2. \quad (37)$$

Đạo hàm hai vế của (37) ta được:

$$\dot{V}_1 = s \dot{s}. \quad (38)$$

Thay (36) vào (38) ta có:

$$\dot{V}_1 = sC\tilde{\mathbf{x}} = sC(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d), \quad (39)$$

Tiếp tục thay (34) vào (39) :

$$\dot{V}_1 = s(C\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) + C\hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x})u - C\dot{\mathbf{x}}_d), \quad (40)$$

Để tồn tại chế độ trượt trên mặt trượt s đòi hỏi thỏa mãn điều kiện $\dot{V}_1 < 0$, do vậy từ (40) ta có:

$$(C\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) + C\hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x})u - C\dot{\mathbf{x}}_d) = -k \operatorname{sgn}(s), \quad (41)$$

với k là hệ số dương nhỏ.

Từ (41) ta có luật điều khiển bền vững trên cơ sở điều khiển trượt của (1):

$$u = [C\hat{\mathbf{G}}(\mathbf{x})]^{-1} (-C\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) + C\dot{\mathbf{x}}_d - k \operatorname{sgn}(s)), \quad (42)$$

để giảm hiệu ứng chattering ta thay hàm $\operatorname{sgn}(s) \approx s/|s| + \alpha$, α là hệ số dương nhỏ.

Trong phần này, trên cơ sở các kết quả nhận dạng được đề xuất ở định lý, bài báo đã tổng hợp được bộ điều khiển thích nghi bền vững (42) cho lớp affine (1). Luật nhận dạng và luật điều khiển do bài báo đề xuất đơn giản, dễ dàng thể hiện kỹ thuật, và có thể áp dụng vào tổng hợp bộ điều khiển cho lớp rất rộng các đối tượng phù hợp trong thực tế.

5. Mô phỏng và kiểm chứng kết quả

Giả sử hệ phi tuyến affine (1) bất định có phương trình:

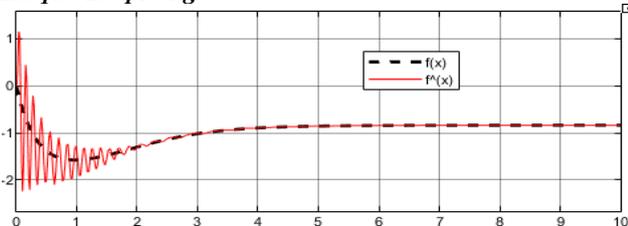
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -0.01 - \sin(x_1^2) - 3x_2 + (1.83 - x_1)u \end{cases}; \quad (43)$$

$$f(\mathbf{x}) = -0.01 - \sin(x_1^2) - 3x_2; \quad (44)$$

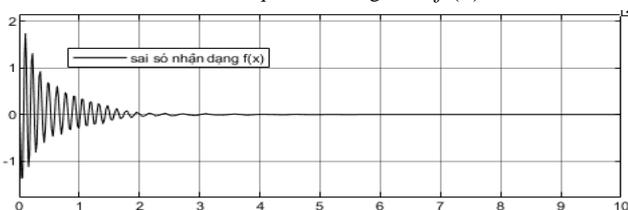
$$g(\mathbf{x}) = (1.83 - x_1); \quad (45)$$

Sử dụng các thuật toán nhận dạng (17),(18),(19) và (20) của định lý, bộ điều khiển (42). Tiến hành mô phỏng trên phần mềm matlab simulink.

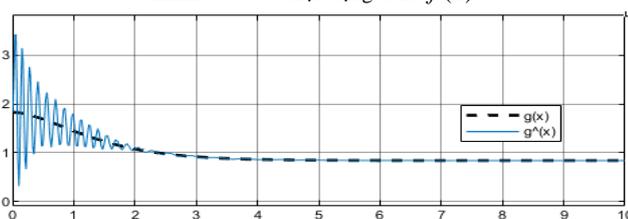
Kết quả mô phỏng:



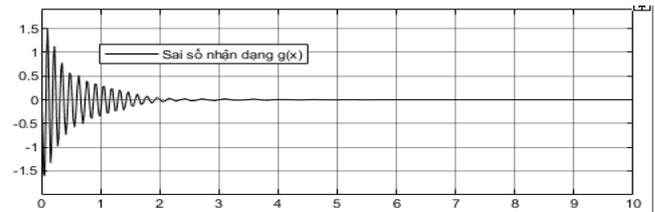
Hình 2. Kết quả nhận dạng hàm $f(\mathbf{x})$



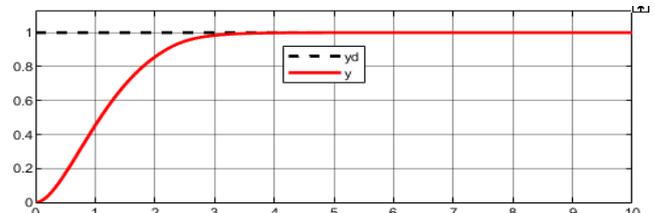
Hình 3. Sai số nhận dạng hàm $f(\mathbf{x})$



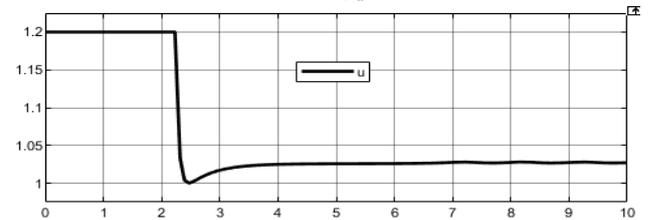
Hình 4. Kết quả nhận dạng hàm $g(\mathbf{x})$



Hình 5. Sai số nhận dạng hàm $g(\mathbf{x})$



Hình 6. Kết quả tín hiệu đầu ra của hệ thống bám tín hiệu đặt mong muốn y_d



Hình 7. Tín hiệu điều khiển u

Hình 2, Hình 4 cho thấy các hàm phi bất định $f(\mathbf{x})$, $g(\mathbf{x})$ hoàn toàn được nhận dạng, theo đúng thuật toán bài báo đề xuất, với độ chính xác cao, sai số nhận dạng thể hiện ở Hình 3 và Hình 5 tiệm cận không. Hình 6, khẳng định chất lượng điều khiển được đảm bảo, tín hiệu đầu ra của hệ thống bám chặt tín hiệu đặt mong muốn, cùng với đó tín hiệu điều khiển ở Hình 7 thể hiện hiện tượng chattering được giảm thiểu. Kết quả mô phỏng đúng như giải thích.

6. Kết luận

Bài báo tổng hợp được luật điều khiển thích nghi bền vững cho một lớp đối tượng phi tuyến affine (1) bất định, đã đề xuất và chứng minh định lý về luật nhận dạng các hàm bất định. Từ kết quả nhận dạng bài báo đã tổng hợp được luật điều khiển bền vững trên cơ sở điều khiển trượt. Hệ thống điều khiển do bài báo đề xuất đơn giản, do đó dễ dàng thể hiện kỹ thuật, cùng với đó hệ có chất lượng điều khiển cao. Kết quả mô phỏng một lần nữa đã minh chứng tính đúng đắn và hiệu quả của phương pháp của bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. M. Sanner and J. -J. E. Slotine, "Gaussian networks for direct adaptive control," in IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 3, no. 6, pp. 837-863, Nov. 1992, <https://doi.org/10.1109/72.165588>
- [2] G. Feng and C. K. Chak, "Robot tracking in task space using neural networks," Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'94), Orlando, FL, USA, 1994, pp. 2854-2858 vol.5, <https://doi.org/10.1109/ICNN.1994.374684>
- [3] Man Zhihong, X. H. Yu, K. Eshraghian and M. Palaniswami, "A robust adaptive sliding mode tracking control using an RBF neural network for robotic manipulators," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 2403-2408 vol.5, <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.487738>
- [4] Man Zhihong, M. Palaniswami, A robust tracking control scheme for rigid robotic manipulators with uncertain dynamics, Computers &

- Electrical Engineering, vol. 21, no. 3, 1995, pp. 211-220, [https://doi.org/10.1016/0045-7906\(94\)00021-8](https://doi.org/10.1016/0045-7906(94)00021-8).
- [5] Khanna, T. (1990). *Foundations of neural networks*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- [6] Nürnberger, G. (1989). *Approximation by spline functions* (Vol. 1). Berlin: Springer.
- [7] Tianping Chen and Hong Chen, "Approximation capability to functions of several variables, nonlinear functionals, and operators by radial basis function neural networks," in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 6, no. 4, pp. 904-910, July 1995, <https://doi.org/10.1109/72.392252>
- [8] V. Cherkassky, D. Gehring and F. Mulier, "Comparison of adaptive methods for function estimation from samples," in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 969-984, July 1996, <https://doi.org/10.1109/72.508939>
- [9] Ken-Ichi Funahashi, On the approximate realization of continuous mappings by neural networks, *Neural Networks*, vol. 2, no. 3, 1989, pp. 183-192, [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90003-8)
- [10] B. Xu, Z. Shi, C. Yang and F. Sun, "Composite Neural Dynamic Surface Control of a Class of Uncertain Nonlinear Systems in Strict-Feedback Form," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 44, no. 12, pp. 2626-2634, Dec. 2014, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2014.2311824>
- [11] B. Xu, C. Yang and Z. Shi, "Reinforcement Learning Output Feedback NN Control Using Deterministic Learning Technique," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 635-641, March 2014, <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2013.2292704>
- [12] S.N. Huang, K.K. Tan, T.H. Lee, A combined PID/adaptive controller for a class of nonlinear systems, *Automatica*, vol. 37, no. 4, 2001, pp. 611-618, [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(00\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(00)00195-3)
- [13] W. Bai, Q. Zhou, T. Li and H. Li, "Adaptive Reinforcement Learning Neural Network Control for Uncertain Nonlinear System With Input Saturation," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 8, pp. 3433-3443, Aug. 2020, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2019.2921057>