

Phương pháp điều khiển chế độ trượt phân cấp - mờ thích nghi mới cho một lớp các hệ thống Under - Actuated SIMO

A novel adaptive fuzzy hierarchical sliding mode control method for a class of Under - Actuated SIMO system

Trần Thị Diệp*, Dương Thị Hoa, Nguyễn Thị Sim

*Email: phuongdiep222@hnu.edu.com

Trường Đại học Sao Đỏ

Ngày nhận bài: 28/01/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 02/6/2021

Ngày chấp nhận đăng: 30/6/2021

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, một sự kết hợp giữa điều khiển chế độ trượt phân cấp và điều khiển mờ thích nghi cho một lớp các hệ thống robot under - actuated một đầu vào nhiều đầu ra (SIMO) được đề xuất. Trong sơ đồ điều khiển này, bằng cách sử dụng phương pháp điều khiển trượt phân cấp, một luật điều khiển trượt được tạo ra để làm cho mọi hệ thống con ổn định cùng một lúc. Tuy nhiên, bộ điều khiển này gây ra hiện tượng dao động quanh mặt trượt. Hơn nữa, các tham số chưa biết của hệ thống gây ra bởi tính phi tuyến của cơ cấu chấp hành và nhiễu bên ngoài. Do đó, giải pháp được đề nghị là kết hợp giữa bộ điều khiển trượt phân cấp với quy tắc điều khiển mờ thích nghi để loại bỏ hiện tượng dao động và nhiễu loạn bên ngoài. Các tham số chưa biết của hệ thống được ước lượng và suy luận bởi hệ thống logic mờ thích nghi đề xuất. Từ thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển chế độ trượt phân cấp mờ thích nghi có thể điều khiển tốt cho một lớp các hệ thống kích thích yếu. Xe con lắc ngược 2D và cầu trục 2D là hai hệ thống kích thích yếu điển hình, được sử dụng để xác minh tính khả thi của phương pháp điều khiển đề xuất.

Từ khóa: Điều khiển thích nghi; điều khiển chế độ trượt; điều khiển mờ; hệ thống một đầu vào nhiều đầu ra; hệ thống under - actuated.

Abstract

In this study, a combination of hierarchical sliding mode control and adaptive fuzzy control for a class of single input multiple output (SIMO) under-actuated robotic systems is proposed. In this control scheme, by using hierarchical sliding control method, a sliding control law is generated to make every subsystem stable at the same time. However, this controller causes oscillation around the sliding surface. Furthermore, the unknown system parameters are caused by the nonlinearity of the actuator and the external noise. Therefore, the proposed solution is to combine the hierarchical sliding controller with the adaptive fuzzy control rule to eliminate oscillations and external disturbances. The unknown parameters of the system are estimated and inferred by the proposed adaptive fuzzy logic system. The experimental results show that the adaptive fuzzy hierarchical sliding mode controller can control well for a class of SIMO under-actuated system. 2D inverted pendulum cart and 2D crane are two typical weak excitation systems, used to verify the feasibility of the proposed control method.

Keywords: Daptive control; sliding mode control; fuzzy logic; single input multiple output systems; under-actuated systems.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống kích thích yếu được đặc trưng bởi thực tế là chúng có ít bộ truyền động hơn mức độ tự do được điều khiển [1]. Có nhiều hệ thống kích thích yếu trong các ứng dụng thực tế như đã đề cập trong [2], robot

không gian bay tự do, robot dưới nước, robot đi bộ... Đôi khi, các thuật toán điều khiển cho các hệ thống kích thích yếu có thể được sử dụng để khôi phục lại một phần các chức năng của hệ thống bị hỏng. Bằng thuật toán điều khiển kích thích yếu thích hợp được trình bày trong [3-4], cánh tay robot vẫn có thể cung cấp một phần chức năng. Do đó, việc phát triển các thuật toán điều khiển cho các hệ thống kích thích yếu

Người phản biện: 1. PGS. TS. Trần Vệ Quốc
2. GS. TSKH. Thân Ngọc Hoàn

là rất quan trọng. Phương trình toán học của chúng thường bao gồm các thành phần phi tuyến cao và các khớp nối, làm cho các thiết kế điều khiển của chúng trở nên khó khăn [5].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào một lớp các hệ thống SIMO kích thích yếu. Lớp này khá lớn, bao gồm các hệ thống con lắc ngược song song hoặc xoay, Pendubot, TORA... Các hệ thống như vậy thường được sử dụng để nghiên cứu các phương pháp điều khiển khác nhau và là công cụ giảng dạy trong các trường đại học trên thế giới. Có rất nhiều phương pháp điều khiển được đưa ra, bao gồm điều khiển dựa trên năng lượng, điều khiển tựa thụ động, điều khiển lai, điều khiển thông minh... đã được đề cập trong các tài liệu [6-10]. Hầu hết các bài báo đều đề xuất luật điều khiển cho một hệ thống cụ thể. Trong thực tế, một biểu thức không gian trạng thái tổng quát có thể mô tả cho một loạt các hệ thống SIMO kích thích yếu. Do đó trong bài báo này, tác giả đã nghiên cứu, thiết kế một luật điều khiển tổng quát cho loạt các hệ thống SIMO kích thích yếu.

Trong những năm gần đây phương pháp điều khiển trượt /SMC/ đã được sử dụng rộng rãi cho vấn đề thiết kế điều khiển của hệ thống phi tuyến SIMO kích thích yếu. SMC là một cách tiếp cận hiệu quả đối với vấn đề duy trì sự ổn định và hiệu suất thích hợp của hệ thống điều khiển với mô hình chính xác [11-17]. Đặc điểm cốt lõi của phương pháp điều khiển trượt là khả năng đảm bảo tính bền vững và ổn định cho hệ thống điều khiển tuy nhiên một khó khăn chính trong việc thiết kế bộ điều khiển trượt là tất cả các thông số giới hạn trên và giới hạn dưới của các của các thông số không xác định phải được xác định trước khi thiết kế bộ điều khiển. Do đó đối với các hệ thống điều khiển có nhiều tham số không xác định thì việc thiết kế hệ thống điều khiển trượt trở nên phức tạp. Để giải quyết khó khăn này, các bộ điều khiển thông minh trên cơ sở của logic mờ được đưa ra [18-23]. Cụ thể hơn, các tác giả trong [20] đã đề xuất một phương pháp điều khiển mờ thích nghi cho một con lắc đảo ngược có bánh xe. Tương tự như vậy, tác giả trong [19] đã khai thác phép xấp xỉ logic mờ để giải quyết tham số không chắc chắn trong một bộ điều khiển tay máy di động kích thích yếu. Trong phạm vi của hệ thống SIMO, công trình [21] đã sử dụng luật mờ tự thiết lập để tính toán ma trận trọng số sau đó được sử dụng để tối ưu hóa hàm trọng số trong một bộ điều khiển tối ưu. Các tác giả trong [23] cũng đã xem xét việc thiết kế một bộ điều khiển backstepping mờ thích ứng cho một robot kích thích yếu. Tuy nhiên, trong tất cả các bộ điều khiển được thiết kế dựa trên cơ sở của logic mờ, các luật điều khiển được xây dựng dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế do đó với những kinh nghiệm đó nhiều khi không đủ và khó để xây dựng luật điều khiển phù hợp.

Để khắc phục nhược điểm trên, trong bài báo này tác giả nghiên cứu về bộ điều khiển chế độ trượt phân cấp mờ thích nghi AFHSMC cho một loạt các hệ thống SIMO kích thích yếu. Bằng việc kế thừa các thuận lợi của bộ điều khiển trượt phân cấp HSMC và bộ điều khiển logic mờ. Ưu điểm, của bộ điều khiển HSMC đó là khả năng bền vững và ổn định. Ưu điểm, của bộ điều khiển logic mờ là khả năng xấp xỉ ước lượng các tham số chưa biết một cách chính xác, do đó khi áp dụng bộ điều khiển này vào điều khiển hệ xe con lắc ngược 2D và cần trục 2D thì hiệu quả bám, độ vọt lố đã được cải thiện.

2. SƠ ĐỒ ĐIỀU KHIỂN CHẾ ĐỘ TRƯỢT PHÂN CẤP MỜ THÍCH NGHI

2.1. Thiết kế bộ điều khiển

Xét mô hình điển hình của một loại hệ thống SIMO under-actuated như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_1(X) + g_1(X)u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= f_2(X) + g_2(X)u \end{aligned} \quad (1)$$

Các sai số giữa các phản hồi của hệ thống và các tham chiếu mong muốn là:

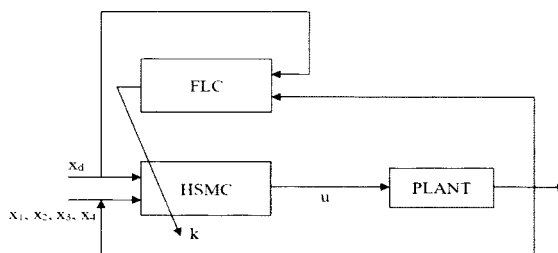
$$e(t) = \begin{bmatrix} x_1 - x_d \\ x_3 - \varphi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_d \\ x_3 - 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó:

x_d là vị trí mong muốn.

Trong trường hợp của con lắc ngược và cần trục. x_d là vị trí mong muốn của xe. $\varphi_d = 0$ là góc quay mong muốn. Trong đó, các đạo hàm của sai số có thể được suy ra từ (1) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= f_1(X) + g_1(X)u - \ddot{x}_d \\ \dot{e}_3 &= e_4 \\ \dot{e}_4 &= f_2(X) + g_2(X)u \end{aligned} \quad (3)$$



Hình 1. Sơ đồ điều khiển chế độ trượt phân cấp mờ thích nghi, trong đó FLC và SMC lần lượt là đại diện cho bộ điều khiển logic mờ và bộ điều khiển chế độ trượt

$$s_1 = c_1 e_1 + e_2 \quad (4)$$

$$s_2 = c_2 e_3 + e_4 \quad (5)$$

Với c_1 và c_2 là các hằng số dương. Sau đó, bề mặt trượt cấp hai cho các hệ thống SIMO under-actuated được tính toán bởi:

$$S = \lambda_1 s_1 + \beta_1 s_2 \quad (6)$$

Ở đây:

λ_1 và β_1 cũng là các tham số dương. Cần lưu ý rằng để đảm bảo mặt trượt cấp hai hội tụ về 0, sơ đồ HSMC dự kiến bao gồm hai luật riêng biệt [23]. Nói cách khác, chúng tôi sử dụng luật điều khiển chuyển mạch để điều khiển các trạng thái của hệ thống điều khiển hướng tới một mặt trượt cụ thể. Sau đó, chúng tôi sử dụng một luật điều khiển tương đương để duy trì sự xuất hiện của các trạng thái trên mặt trượt. Do đó, sơ đồ điều khiển hiệu quả cho một hệ thống SIMO under-actuated được xây dựng như sau:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (7)$$

Trong đó:

u_{eq} và u_{sw} tương ứng là luật điều khiển chuyển mạch và điều khiển tương đương. Hơn nữa, để đảm bảo tính ổn định của hệ thống SIMO under-actuated theo sơ đồ điều khiển được đề xuất, một hàm Lyapunov được xét:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (8)$$

Đạo hàm của mặt trượt cấp hai được xác định như sau:

$$\frac{dV}{dt} = S \dot{S} \quad (9)$$

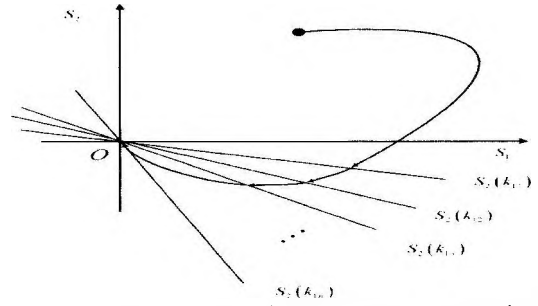
Hoặc

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= S \dot{S} = S(\lambda_1 \dot{s}_1 + \beta_1 \dot{s}_2) \\ &= S[\lambda_1(c_1 x_2 + f_1 + g_1 u) + \beta_1(c_2 x_4 + f_2 + g_2 u)] \\ &= S \left[\begin{array}{l} \lambda_1(c_1 x_2 + f_1 + g_1(u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2})) \\ + \beta_1(c_2 x_4 + f_2 + g_2(u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2})) \end{array} \right] \\ &= S \left[\begin{array}{l} \lambda_1(c_1 x_2 + f_1 + g_1 u_{eq1}) + \beta_1(c_2 x_4 + f_2 + g_2 u_{eq2}) \\ + u_{sw2}(\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) + u_{sw1}(\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) \\ + \lambda_1 g_1 u_{eq2} + \beta_1 g_2 u_{eq1} + kS + \eta sat(S) - (kS + \eta sgn(S)) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Với $sat(\cdot)$ và $sgn(\cdot)$ lần lượt là hàm bão hòa và hàm dấu, k là tham số để loại bỏ hiện tượng chattering

$$u_{eq} = u_{eq1} + u_{eq2}, u_{sw} = u_{sw1} + u_{sw2}.$$

Cần lưu ý rằng độ ổn định của mặt trượt S được đảm bảo nếu:



Hình 2. Sự hội tụ của các biến trạng thái S với k biến thiên

$$\begin{cases} u_{eq1} = \frac{-(c_1 x_2 + f_1)}{g_1} \\ u_{eq2} = \frac{-(c_2 x_4 + f_2)}{g_2} \\ u_{sw2} = -u_{sw1} - \frac{\lambda_1 g_1 u_{eq1} + \beta_1 g_2 u_{eq2}}{\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2} - \frac{k \cdot S + \eta \cdot sgn(S)}{\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2} \end{cases} \quad (11)$$

Ta có

$$\frac{dV}{dt} = S \dot{S} = -(kS^2 + \eta S sgn(S)) \leq 0 \quad (12)$$

Do vậy, tín hiệu điều khiển cho hệ thống SIMO under-actuated được tổng hợp như sau:

$$\begin{aligned} u &= u_{eq1} + u_{sw1} + u_{eq2} + u_{sw2} \\ &= \frac{\lambda_1 f_1(X) + \beta_1 f_2(X) + \lambda_1 c_1 x_2 + \beta_1 c_2 x_4 + kS + \eta sgn(S)}{\lambda_1 g_1(X) + \beta_1 g_2(X)} \end{aligned}$$

Để giảm hiện tượng dao động, một hàm bão hòa được đề xuất để thay thế hàm sign:

$$sat(S) = \begin{cases} sgn(S) & \text{if } |S| > 1 \\ S & \text{if } |S| \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

Do đó, tín hiệu điều khiển trong (12) có thể được viết lại bởi:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\lambda_1 f_1(X) + \beta_1 f_2(X) + \lambda_1 c_1 e_2 + \beta_1 c_2 e_4}{\lambda_1 g_1(X) + \beta_1 g_2(X)} \\ &+ \frac{-\lambda_1 \ddot{x}_d + kS + \eta sat(S)}{\lambda_1 g_1(X) + \beta_1 g_2(X)} \end{aligned} \quad (14)$$

2.2. Luật thích nghi

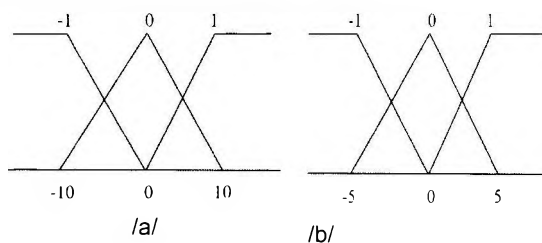
Có thể thấy trong phân tích ở mục 2.1 rằng nếu cả hai thông số λ_1 và β_1 trong (6) được giữ nguyên không đổi thì sẽ gây ra dao động trong hệ thống điều khiển. Để giải quyết vấn đề, trong bài báo tác giả đã đề xuất điều khiển thích nghi các tham số theo thời gian bằng cách sử dụng hệ thống mờ. Để đơn giản bộ điều khiển, chúng tôi xác định:

$$\beta_1 = k \lambda_1$$

Do đó, cho phép hệ thống logic mờ tính toán một tham số thay vì hai tham số tại một thời điểm cụ thể. Nhận thấy rằng hệ số k có thể được xác định trước. Ngoài

ra, thay đổi k dẫn đến sự thay đổi của các mặt trượt. Và nếu k được chọn đúng, các trạng thái của hệ thống điều khiển di chuyển trên các mặt trượt về hội tụ về 0 như được minh họa trong Hình 2. Phương pháp đề xuất giảm đáng kể hiện tượng dao động trong các hệ thống SIMO under-actuated.

Mô hình điều khiển mờ vòng kín cho một lớp hệ thống SIMO under-actuated được minh họa trong Hình 1. Bây giờ chúng ta nghiên cứu cách xây dựng các hàm liên thuộc và luật cơ sở cho hai hệ thống điển hình bao gồm hệ xe con lắc ngược và cần trục. Các hàm liên thuộc cho các tham số đầu vào của hệ thống xe con lắc ngược 2D và cần trục 2D, trong đó mỗi tham số đầu vào có một tập mờ ba tam giác được minh họa trong Hình 3a và 3b, tương ứng. Về mặt toán học, các tập mờ được trình bày bởi $[-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2]$.



Hình 3. Tập hợp mờ các tham số đầu vào cho (a) hệ thống xe con lắc ngược 2D và (b) cần trục thẳng đứng 2D

Tương ứng với $[C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5] = [3 \ 2.5 \ 2 \ 2.5 \ 3]$

Cho hệ thống xe con lắc ngược 2D và cần trục 2D. Quan trọng hơn, luật cơ sở cũng được xây dựng và tóm tắt trong Bảng 1.

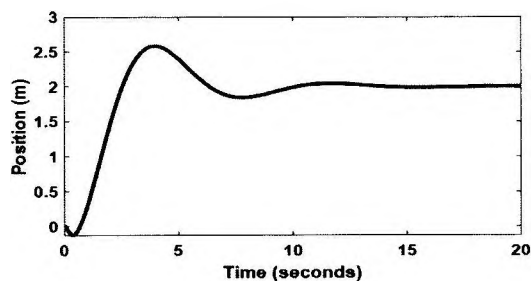
$[C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5] = [10 \ 9.25 \ 7.5 \ 9.25 \ 10]$

Bảng 1. Suy luận mờ cho bộ điều khiển chế độ trượt phân cấp thích nghi

λ_1	e_1			
		-1	0	1
e_1	1	0	-1	-2
	0	1	0	-1
	-1	2	1	0

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ KẾT LUẬN

Để chứng minh tính hiệu quả của phương pháp tiếp cận



a)

được đề xuất của chúng tôi, bộ điều khiển chế độ trượt phân cấp mờ thích nghi /AFHSMC/, trong điều khiển một lớp hệ thống robot SIMO under - actuated, chúng tôi đã tiến hành các thí nghiệm trong môi trường mô phỏng tổng hợp cho hai hệ thống robot SIMO under-actuated điển hình bao gồm hệ xe con lắc ngược 2D và cần trục 2D. Thông qua kết quả được trình bày ở phần 3. Có thể nhận thấy rằng hiệu suất điều khiển của xe trong hệ thống xe con lắc và xe trong cần trục trên cao đạt được các vị trí mong muốn.

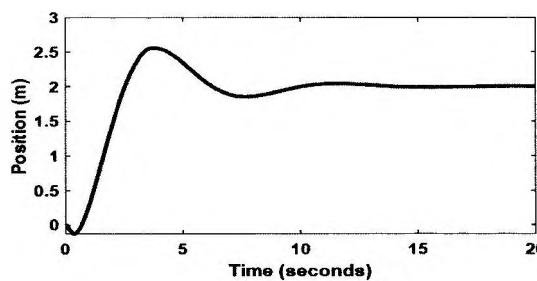
3.1. Hệ thống xe con lắc ngược 2D

Trong các thí nghiệm của xe lắc ngược 2D [25], chúng ta thấy rằng các thông số của hệ thống được trình bày trong [25] đã biết trước. Các thông số đó được tóm tắt trong Bảng 2.

Bảng 2. Các thông số của hệ thống xe con lắc ngược 2D

Thông số	Giá trị
m_0	1 (kg)
m	0,1 (kg)
l_c	1 (m)
C_1	1
C_2	5
k	5
h	10
g	9,81 (m/s ²)

Hơn nữa, để chứng minh tính bền vững của hệ thống điều khiển vòng kín do nhiễu bên ngoài, trong các mô phỏng, chúng tôi đã tác động nhiễu lên hệ thống 2(N) sau thời gian hoạt động 3(s). Kết quả mô phỏng trong các thí nghiệm có sự tồn tại và không có sự tồn tại của nhiễu bên ngoài được minh họa trong Hình 4, trong đó Hình 4a, 4c và 4e là kết quả thu được là không xét đến nhiễu bên ngoài. Còn các Hình 4b, 4d và 4f cho thấy kết quả thu được khi hệ thống đã bị ảnh hưởng bởi nhiễu loạn bên ngoài. Có thể thấy rõ ràng trong cả hai trường hợp, xe đã đạt đến vị trí mong muốn là 2(m) và góc quay hội tụ đáng kể về điều kiện lý tưởng là 0(rad) sau 10(s). Tức là, sự ổn định của hệ thống xe con lắc ngược được đảm bảo với bất kể điều kiện bên ngoài trong môi trường nhiễu loạn.

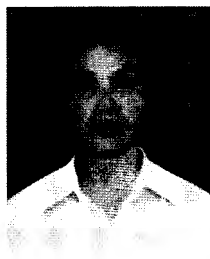


b)



Dương Thị Hoa

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2007: Tốt nghiệp Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, chuyên ngành Kỹ thuật điện.
- + Năm 2011: Tốt nghiệp thạc sĩ ngành Sư phạm kỹ thuật điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- + Từ năm 2008 đến nay: Giảng khoa Điện, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Điện thoại: 0983 105 189.
- Email: hoa105189@gmail.com.vn.



Nguyễn Thị Sim

- Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu):
- + Năm 2006: Tốt nghiệp Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội chuyên ngành Điện khí hóa xí nghiệp mỏ và dầu khí.
- + Năm 2011: Tốt nghiệp thạc sĩ ngành Đo lường và Các hệ thống điều khiển, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- + Từ năm 2006 đến nay: Giảng khoa Điện, Trường Đại học Sao Đỏ.
- Điện thoại: 0986 108 248.
- Email: ntsim1982@gmail.com.vn.