

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT HỆ PHI TUYẾN DÙNG MÔ HÌNH MỜ

Nguyễn Hoàng Dũng¹

ABSTRACT

The paper presents a sliding mode controller using Takagi-Sugeno fuzzy model. Robot with one DOF (Degree of freedom) is used to examine the control algorithm. The method can control the position of the robot arm tracking on desired set-point signal even through disturbance is added. Almost the real plants are often affected by many noisy resources from the working environment. A normal feedback controller is difficult to maintain the stability of the system. In contrast, sliding mode controller can effectively direct both linear and nonlinear plants with adding noise. However the controller make chattering phenomenon around sliding surface. Therefore a proposed solution will combine the sliding mode controller with Takagi-Sugeno fuzzy model for decreasing the above problem. And the fuzzy model is used to replace for sign function of sliding control law. The practical results were tested with simulink software of Matlab. Basing on the results, sliding mode controller using fuzzy model indefectibly controls the nonlinear system.

Keywords: Sliding mode control, variable structure system control, fuzzy logic system, Takagi-Sugeno model, nonlinear systems

Title: Sliding mode controller using fuzzy model for nonlinear system

TÓM TẮT

Bài báo đề cập đến phương pháp điều khiển trượt sử dụng mô hình mờ Takagi-Sugeno. Hệ tay máy một bậc tự do là đối tượng được dùng để kiểm chứng giải thuật điều khiển. Với giải thuật này, vị trí hệ tay máy được điều khiển bám theo tín hiệu đặt mong muốn trong trường hợp có nhiễu. Phần lớn các đối tượng trong thực tế không tránh khỏi ảnh hưởng của nhiễu từ môi trường xung quanh. Đối với các bộ điều khiển hồi tiếp thông thường khó có thể đáp ứng được. Ngược lại, bộ điều khiển trượt có thể điều khiển tốt đối tượng tuyến tính và phi tuyến kể cả trường hợp có nhiễu. Tuy nhiên bộ điều khiển này gây ra hiện tượng dao động quanh mặt trượt. Do đó, giải pháp được đề nghị là kết hợp giữa bộ điều khiển trượt với mô hình mờ Takagi-Sugeno để giảm hiện tượng nêu trên. Trong đó, mô hình mờ được dùng để thay thế hàm sign trong luật điều khiển trượt. Kết quả được kiểm chứng thông qua chương trình mô phỏng trên Matlab. Từ thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển trượt mờ có thể điều khiển tốt hệ phi tuyến.

Từ khóa: Điều khiển trượt, điều khiển hệ có cấu trúc thay đổi, hệ logic mờ, mô hình Takagi-Sugeno, hệ phi tuyến

1 GIỚI THIỆU

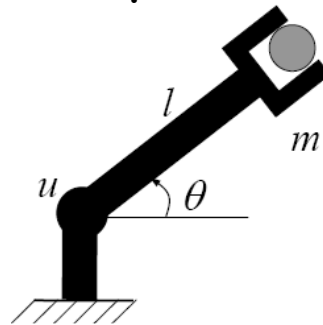
Hệ tay máy một bậc tự do được mô tả trong hình 1. Moment $u(t)$ tác động lên trục quay của tay máy để giữ cho nó hợp với phương thẳng đứng một góc $-\pi/2 \leq \theta(t) \leq \pi/2$. Nếu không có lực tác dụng lên trục quay, góc hợp bởi tay máy và phương thẳng đứng luôn là 0^0 . Giả sử tay máy chỉ gấp vật nặng m sau một

¹ Bộ Môn Tự Động Hóa, Khoa Công Nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

khoảng thời gian nhất định. Dựa vào công thức Euler-Lagrange, phương trình động học của hệ tay máy một bậc tự do được xây dựng trong (2.1). Phương trình này cho thấy, hệ tay máy là hệ phi tuyến SISO (Single-input single-output) với ngõ vào là $u(t)$ và ngõ ra là $\theta(t)$. Vấn đề đặt ra là làm sao thiết kế được luật điều khiển trượt $u(t)$ để cho $\theta(t)$ bám theo tín hiệu đặt mong muốn $r(t)$. Các thông số của đối tượng được cho trong bảng 1.

Dương Hoài Nghĩa, 2007 đã đưa ra phương pháp điều khiển trượt cơ bản cho hệ phi tuyến. Phương pháp này có thể điều khiển tốt đối tượng trong trường hợp có nhiễu can thiệp. Tuy nhiên, khi hệ thống hoạt động gần mặt trượt sẽ gây ra hiện tượng dao động (chattering). (Jinzhu Peng *et al.*, 2006) sử dụng mạng nơron; (N. Manamanni *et al.*, 2003), (H. F. Ho *et al.*, 2001) và (Lê Thị Kim Loan, 2005) sử dụng mô hình mờ để giảm thiểu hiện tượng dao động này. (F. Qiao *et al.*, 2003) kết hợp luật điều khiển cân bằng (equalvalent law) và luật điều khiển chuyển đổi (switching law) để thiết kế luật điều khiển trượt. Luật điều khiển chuyển đổi đưa hệ thống tiến về mặt trượt. Sau đó luật điều khiển cân bằng giữ cho hệ thống duy trì trên mặt trượt. Bài báo này dựa trên (F. Qiao *et al.*, 2003) để xây dựng luật điều khiển trượt và kết hợp với mô hình mờ Takagi-Sugeno nhằm giảm hiện tượng dao động quanh mặt trượt.

2 ĐẶC TÍNH ĐỘNG HỌC CỦA HỆ TAY MÁY MỘT BẬC TỰ DO



Hình 1: Mô hình tay máy một bậc tự do (Huỳnh Thái Hoàng, 2006)

Phương trình động học của hệ tay máy một bậc tự do được thiết kế như (2.1).

$$(J + ml^2)\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + (ml + Ml_c)g \sin(\theta(t)) = u(t) \tag{2.1}$$

Đặt $x_1 = \theta(t)$ và $x_2 = \dot{\theta}(t)$

Phương trình (2.1) có thể biểu diễn dưới dạng phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{u - Bx_2 - (ml + Ml_c)g \sin(x_1)}{J + ml^2} \end{cases} \tag{2.2}$$

Và ngõ ra $y = \theta(t) = x_1$.

Bảng 1: Các thông số động học của hệ tay máy

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
J	Moment quán tính của cánh tay	0.05	Kg.m ²
M	Khối lượng của cánh tay	1	Kg
m	Khối lượng vật nặng	0.1	Kg
l	Chiều dài cánh tay	0.4	m
l _c	Khoảng cách từ trọng tâm cánh tay đến trục quay	0.15	m
B	Hệ số ma sát nhớt	0.2	Kg.m ² /s
g	Gia tốc trọng trường	9.81	m/s ²

3 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT MỜ

3.1 Thiết kế điều khiển trượt bám

Do (2.2) là hệ bậc 2 nên hàm trượt được thiết kế như (3.1).

$$s = \dot{e} + \frac{1}{\tau}e \tag{3.1}$$

Trong đó: $e=y-r$ (3.2)

Với r là tín hiệu mong muốn và y là tín hiệu ngõ ra.

Khi hàm trượt $s=0$, nghiệm của phương trình (3.1) có dạng $e = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. Do đó

khi $t \rightarrow \infty, e \rightarrow 0$. Với τ được xem là thời hằng của hàm trượt. τ càng lớn, hệ thống càng chậm tiến về mặt trượt và ngược lại.

Thay (3.2) vào (3.1), hàm trượt được viết lại:

$$s = x_2 - \dot{r} + \frac{1}{\tau}(x_1 - r) \tag{3.3}$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, chọn một hàm xác định dương $V = \frac{1}{2}s^2$ (3.4)

Từ (3.4) suy ra $\dot{V} = s.\dot{s}$

Để \dot{V} xác định âm, chọn $\dot{s} = -k.sign(s)$. Thay $\dot{s} = -k.sign(s)$ vào \dot{V} sẽ cho hàm:

$$\dot{V} = -s.k.sign(s), \text{ với } k \text{ là hằng số dương chọn trước.}$$

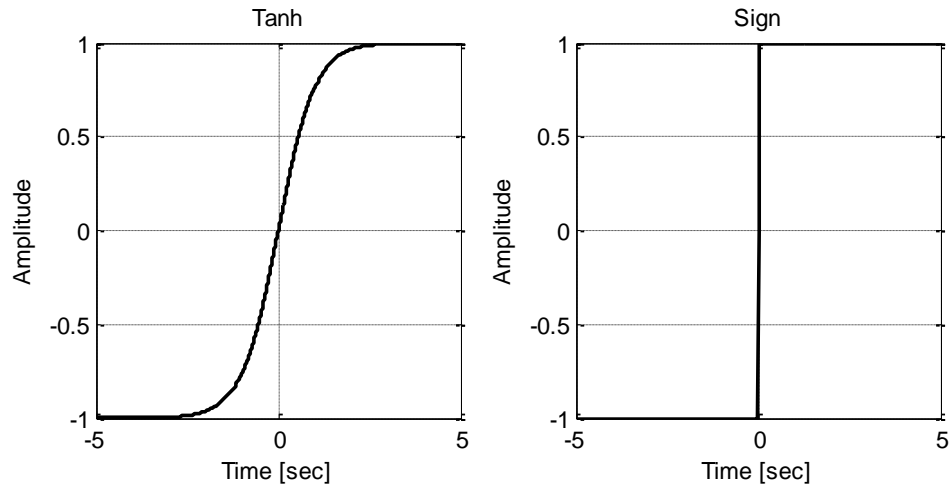
Nhận xét: nếu $s>0$ thì $\dot{V} < 0$. Nếu $s<0$ thì $\dot{V} < 0$. Nếu $s=0$ thì $\dot{V} = 0$.

Từ nhận xét trên cho thấy, hệ thống sẽ ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

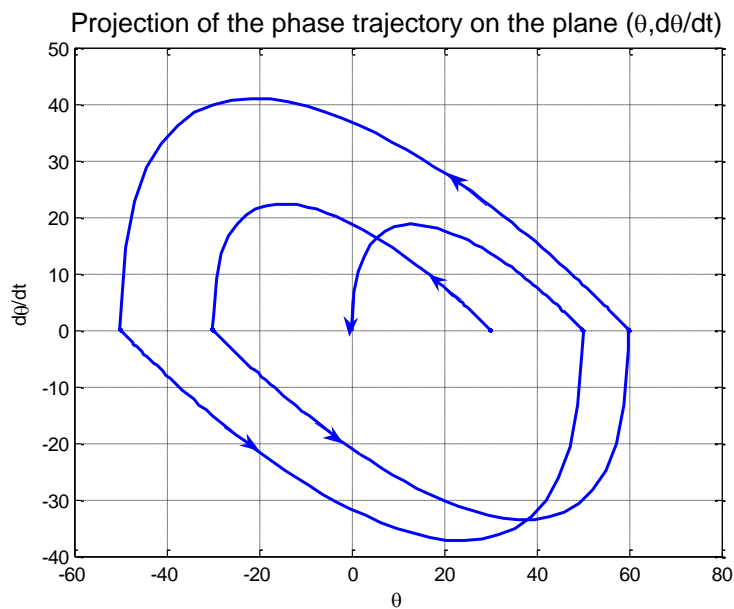
Từ (2.2), (3.3) luật điều khiển trượt u được thiết kế như (3.5).

$$u = B.x_2 + (ml + Ml_c)g \sin(x_1) + \left[J + ml^2 \right] \left[\ddot{r} + \frac{1}{\tau}(\dot{r} - x_2) - k.sign(s) \right] \tag{3.5}$$

Vì hàm sign thay đổi một cách đột ngột tại thời điểm giao hoán (xem Hình 2) nên rất dễ gây ra hiện tượng dao động hoặc độ lợi điều khiển rất lớn. Trong bài báo này, giải pháp được đề nghị là thay hàm sign bằng hàm tanh (Duy Ky Nguyen, 1998). Hàm tanh có độ dốc trơn hơn và tránh được độ lợi điều khiển tiến đến vô cùng. Do đó $\dot{s} = -k.sign(s)$ được thay bằng $\dot{s} = -k.tanh(s)$



Hình 2: Hàm Tanh và hàm sign



Hình 3: Quỹ đạo pha của hệ tay máy

Hình 3 mô tả quỹ đạo pha của hệ tay máy dùng bộ điều khiển trượt. Quỹ đạo bắt đầu tại tọa độ (30,0). Sau một khoảng thời gian nhất định, quỹ đạo pha quay về gốc tọa độ. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển trượt đã đưa biến trạng thái tiến về điểm cân bằng (0,0).

3.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt dựa vào mô hình mờ Takagi-Sugeno

Cho hệ phi tuyến được viết dưới dạng tổng quát như (3.6)

$$\ddot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \tag{3.6}$$

$$y(t) = x(t) \tag{3.7}$$

Trong đó $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ là biến trạng thái

$u(t)$ là tín hiệu ngõ vào

$y(t)$ là tín hiệu ngõ ra

$f(x(t))$ và $g(x(t))$ là hai hàm phi tuyến

Mục tiêu của bài toán là thiết kế tín hiệu $u(t)$ để điều khiển đối tượng có ngõ ra bám theo tín hiệu mong muốn cho trước $r(t)$ với sai số bé nhất hoặc dao động lân cận zero.

Dựa trên (F. Qiao *et al.*, 2003), luật điều khiển được thiết lập:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) \tag{3.8}$$

Trong đó: $u_{eq}(t)$ là luật điều khiển cân bằng được dùng để duy trì hệ thống trên mặt trượt.

$u_s(t)$ là luật điều khiển chuyển đổi được dùng để đưa hệ thống quay về mặt trượt.

với $u_{eq}(t)$ và $u_s(t)$ được thiết kế lần lượt như (3.9) và (3.10)

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\hat{g}} \left[-\hat{f}(x(t),t) + \ddot{r}(t) - \lambda e \right] \tag{3.9}$$

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\hat{g}} \left[\beta(F(x(t),t) + \eta) + (\beta - 1)u_{eq}(t) \right] \tag{3.10}$$

Trong đó: $\hat{f}(x(t),t)$ là hàm ước lượng của $f(x(t),t)$

$F(x(t),t)$ là hàm giới hạn lỗi ước lượng của $f(x(t),t)$

λ là hằng số dương

$\hat{g} = \sqrt{g_0 \cdot g_1}$ là độ lợi ước lượng điều khiển

$\beta = \sqrt{\frac{g_1}{g_0}}$ là độ lợi biên

g_0, g_1 là các hằng số dương được chọn thỏa $0 < g_0 < g(x(t),t) < g_1$

$\dot{s} \cdot \text{sign}(s) \leq -\eta$ được gọi là điều kiện tiếp cận mặt trượt (với η là hằng số dương).

Dựa trên (F. Qiao *et al.*, 2003), luật điều khiển trượt mờ được định nghĩa như (3.11).

$$u(t) = \begin{cases} u^-(t), & \text{khi } s(t) < 0 \\ u^+(t), & \text{khi } s(t) > 0 \end{cases} \tag{3.11}$$

Trong đó : $u^-(t) = u_{eq}(t) + \frac{k}{\hat{g}} \left[\beta(F(x(t),t) + \eta) + (\beta - 1)u_{eq}(t) \right]$

$u^+(t) = u_{eq}(t) - \frac{k}{\hat{g}} \left[\beta(F(x(t),t) + \eta) + (\beta - 1)u_{eq}(t) \right]$, (với $k \geq 1$)

Dựa vào mô hình mờ Takagi-Sugeno, luật điều khiển được thiết lập như sau:

R¹: Nếu s(t) là âm, $u^1(t)=u^-(t)$

R²: Nếu s(t) là dương, $u^2(t)=u^+(t)$

Luật điều khiển u(t) được giải mờ bằng phương pháp trọng tâm.

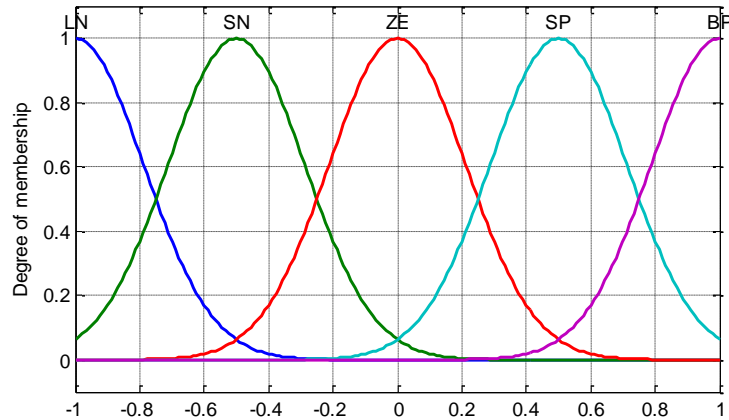
$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(s(t))u^i(t)}{\sum_{i=1}^n w_i(s(t))}, \text{ (với n là số luật mờ)} \tag{3.12}$$

Trong đó $w_i(s(t)) = \prod_{j=1}^q A_{ij}(s(t))$, với $A_{ij}(s(t))$ là hàm liên thuộc của s(t) trong tập mờ

A_{ij} và $w_i(s(t))$ là hàm trọng số.

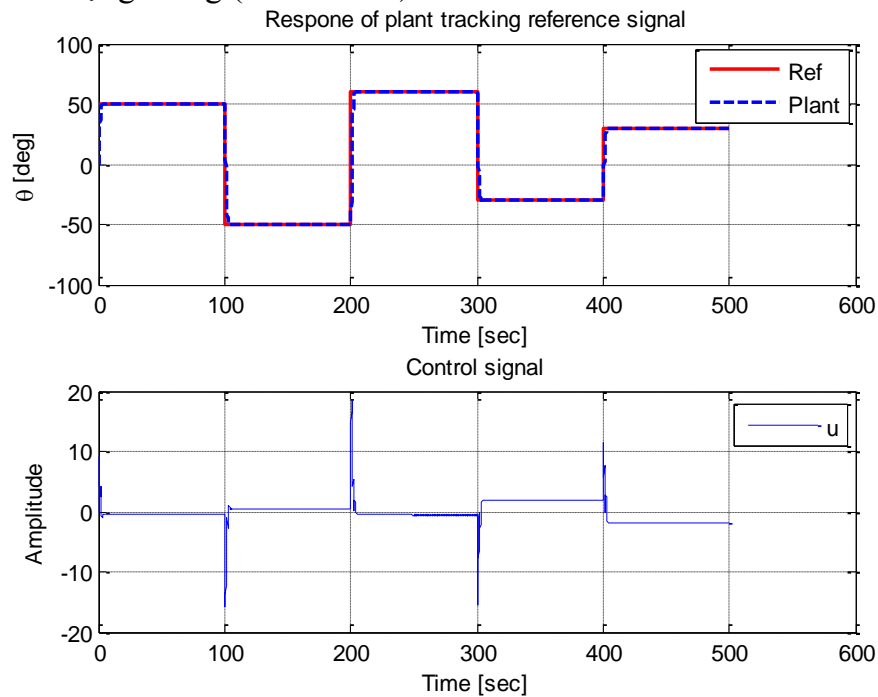
Trong bài báo này, 5 tập mờ được chọn để mờ hóa hàm trượt s(t) (xem hình 4). Số tập mờ được chọn theo kinh nghiệm và thử sai. Các biến mờ được định nghĩa như sau:

LN: Large Negative (âm lớn); SN: Small Negative (âm nhỏ); ZE: Zero (không); SP: Small Positive (dương nhỏ); BP: Big Positive (dương lớn).

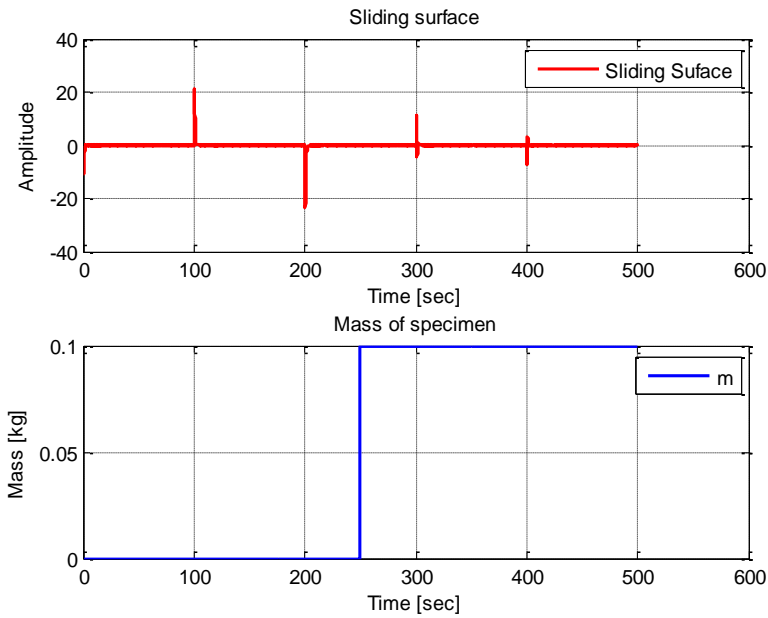


Hình 4: Tập mờ của mặt trượt

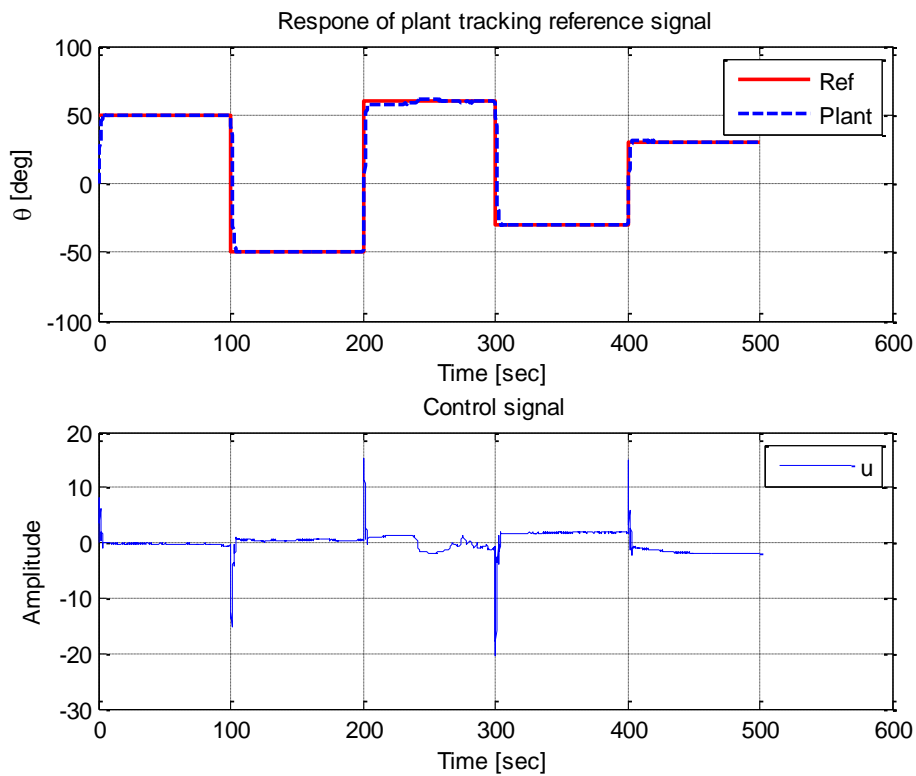
Ban đầu tay máy chưa gặp vật nặng. Tại thời điểm $t=130s$, tay máy gặp một vật nặng có khối lượng $0.1kg$ (xem hình 6).



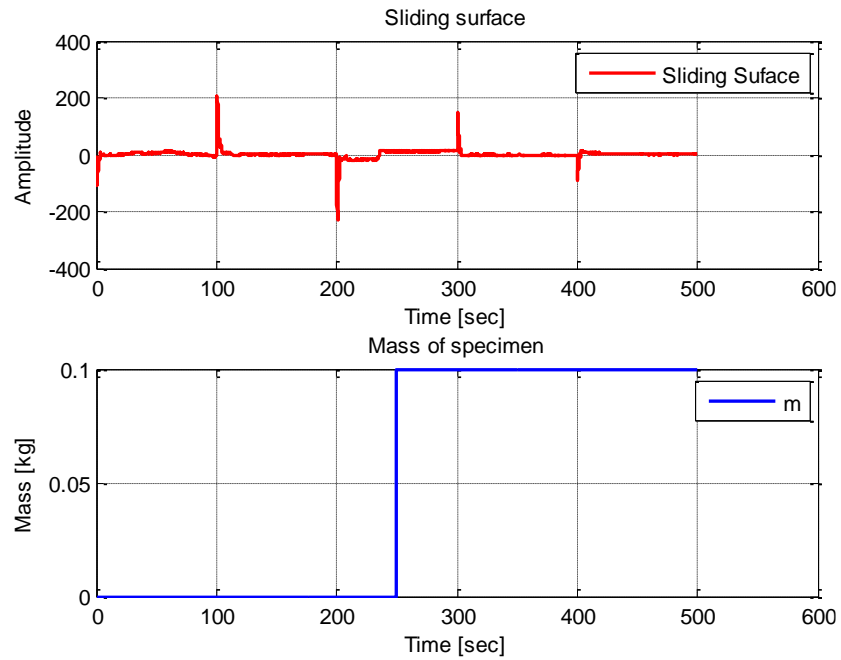
Hình 5: Vị trí cánh tay máy bám theo tín hiệu tham chiếu và luật điều khiển



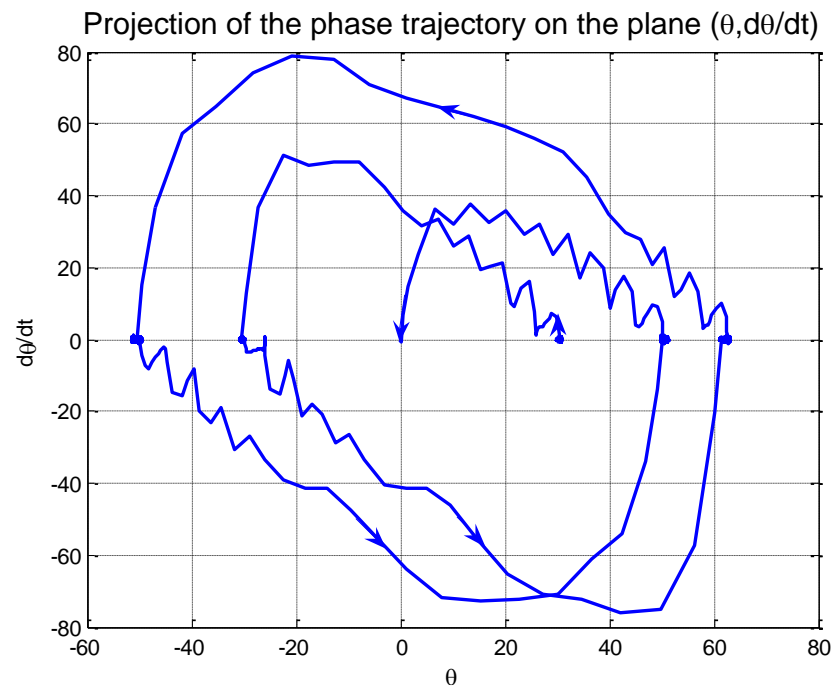
Hình 6: Mặt trượt và khối lượng của vật nặng



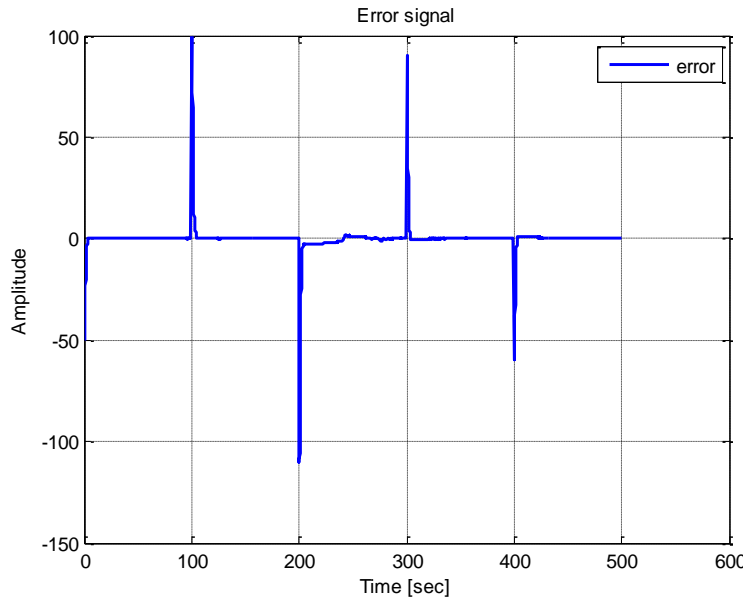
Hình 7: Vị trí cánh tay máy bám theo tín hiệu tham chiếu với bộ điều khiển trượt mờ trong trường hợp có nhiễu với mean là zero và phương sai 0.01



Hình 8: Mặt trượt và khối lượng vật nặng trong trường hợp có nhiễu với mean là zero và phương sai là 0.01



Hình 9: Quỹ đạo pha của hệ tay máy trong trường hợp có nhiễu



Hình 10: Tín hiệu sai số trong bộ điều khiển trượt mờ

Hình 5 là kết quả mô phỏng sử dụng bộ điều khiển trượt với hàm $\text{sign}(s)$ được thay bằng hàm $\text{tanh}(s)$. Với cách làm này, mặt trượt tiến về zero; đáp ứng của đối tượng bám theo tín hiệu mong muốn, không có vọt lố và triệt tiêu được sai số xác lập.

Hình 7 mô tả kết quả mô phỏng dùng bộ điều khiển trượt mờ trong trường hợp không có nhiễu. Mô hình Takagi-Sugeno được dùng để thay thế hàm $\text{sign}(s)$ trong bộ điều khiển trượt. Kết quả cho thấy, mặt trượt xác lập tại lân cận zero và biên độ dao động không đáng kể; đáp ứng của bộ điều khiển trượt mờ không có hiện tượng dao động. Tóm lại, đáp ứng của bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển trượt mờ là tương đương.

Hình 8 là kết quả mô phỏng sử dụng bộ điều khiển trượt mờ trong trường hợp có nhiễu ngẫu nhiên can thiệp vào (với trung bình bằng zero và phương sai là 0.01). Kết quả thực nghiệm cho thấy, đáp ứng của đối tượng vẫn bám theo tín hiệu mong muốn, không có vọt lố và sai số xác lập bằng zero kể cả khi hệ thống có nhiễu và thông số mô hình thay đổi (xem hình 10).

Khi có nhiễu và thông số mô hình thay đổi, quỹ đạo pha của hệ thống có dạng hình 9. Kết quả này cho thấy rằng bộ điều khiển trượt mờ đã đưa được các biến trạng thái về điểm cân bằng tại gốc tọa độ.

4 KẾT LUẬN

Bộ điều khiển trượt mờ đã chứng tỏ được tính ổn định ngay cả khi hệ thống có nhiễu và thông số của mô hình thay đổi.

Bằng cách sử dụng mô hình mờ Takagi-Sugeno thay thế hàm $\text{sign}(s)$ trong bộ điều khiển trượt đã tạo ra được bộ điều khiển trượt mờ. Trong đó bộ điều khiển được chia ra hai thành phần: bộ điều khiển chuyển đổi để đưa hệ thống tiến về mặt trượt và bộ điều khiển cân bằng để duy trì hệ thống trên mặt trượt. Bộ điều khiển này đã điều khiển tốt đối tượng phi tuyến. Đáp ứng của đối tượng bám theo tín hiệu mong muốn, không có hiện tượng dao động, không có vọt lố và triệt tiêu được sai số xác lập.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Duy Ky Nguyen, 1998. Sliding-mode control: Advance design techniques. Thesis for doctor of philosophy, University of Technology, Australia, P3.6-3.8.
- Dương Hoài Nghĩa, 2007. Điều khiển phi tuyến. Chương 4: Các phương pháp điều khiển phi tuyến. Trường Đại học Bách Khoa TP HCM, trang 99-108.
- F.Qiao, Q.M.Zhu, A.Winfield and C.Melhuish, 2003. Design of Takagi-Sugeno fuzzy model based sliding mode controllers for nonlinear system. Proceedings of the 2nd postgraduate student conference in CEMS, UWE, Bristol, England, P1-7.
- H.F.Ho, Y.K.Wong and A.B.Rad, 2001. Adaptive fuzzy sliding mode control design: Lyapunov approach. The Hong Kong Polytechnic University, pp1-6.
- Huỳnh Thái Hoàng, 2006. Hệ thống điều khiển thông minh; Trường Đại học Quốc Gia TP HCM, lần 1, trang 196-199.
- Jin Zhu Peng, Yaonan Wang, Wei Sun and Yan Liu, 2006. A neural network sliding mode controller with application to Robotic manipulator. Proceeding of the 6th world congress on intelligent control and automation, Dalian, China, pp2101-2105.
- Lê Thị Kim Loan, 2005. Điều khiển trượt mờ, ứng dụng điều khiển nâng vật từ trường. Luận văn thạc sĩ ngành tự động hóa. Trường Đại học Bách Khoa, trang 22-48.
- N.Manamanni, A. HamZaoui and N.Essounbouli, 2003. Sliding mode control with adaptive fuzzy approximator for MIMO uncertain system, Journal of System and Control Engineering, pp1-6.