

CÂN BẰNG HỆ CON NÊM NGƯỢC DÙNG PHƯƠNG PHÁP LQR VÀ ĐIỀU KHIỂN MỜ

BALANCING CONTROL OF INVERTED WEDGE SYSTEM BY USING LQR AND FUZZY LOGIC METHODS

Nguyễn Thanh Tần¹

Đặng Hữu Phúc²

Dương Minh Hùng³

Tóm tắt

Trong bài viết, chúng tôi đã sử dụng hai phương pháp điều khiển trên hệ con nêm ngược là phương pháp LQR (Linear Quadratic Regulator) và phương pháp điều khiển mờ. Kết quả mô phỏng cho thấy cả hai phương pháp điều khiển trên đều có khả năng cân bằng ổn định hệ con nêm ngược. Bên cạnh đó, chúng tôi đã xây dựng thành công mô hình thực nghiệm hệ con nêm ngược thông qua giao tiếp máy tính giữa phần mềm Matlab với card DSP TMS320F28335. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp điều khiển mờ hoàn toàn có thể điều khiển cân bằng hệ con nêm ngược theo phương thẳng đứng. Giá trị góc nghiêng và vị trí vật nặng thu được luôn dao động xung quanh vị trí cân bằng mong muốn.

Từ khóa: Cân bằng, con nêm ngược, điều khiển mờ, điều khiển LQR.

1. Mở đầu

Ngày nay, có rất nhiều phương pháp được sử dụng để điều khiển hệ phi tuyến như phương pháp tuyến tính hóa, điều khiển trượt, điều khiển dùng mạng thần kinh nhân tạo, điều khiển mờ, điều khiển thích nghi hoặc các thuật toán tối ưu bầy đàn, giải thuật di truyền... Việc lựa chọn một phương pháp điều khiển phù hợp với đối tượng phi tuyến nhất định nào đó đòi hỏi nhiều thời gian và thực nghiệm lâu dài.

Xuất phát từ ý tưởng áp dụng các phương pháp điều khiển hiện đại vào điều khiển đối tượng thật trong thực tế và việc tiếp cận được một số tài liệu về hệ con nêm ngược - là một hệ thống phi tuyến, được ứng dụng trong cân bằng mô hình chiếc tàu trong lĩnh vực hàng hải - đã thúc đẩy chúng tôi thực hiện đề tài này. Hệ thống dùng trọng lực của vật nặng thông qua lực kéo của motor để cân bằng

Abstract

In this paper, the author uses two control algorithms on the inverted wedge: LQR control method and Fuzzy Control method. The simulation results show that the both methods are able to balance the steady inverted wedge. Besides that, the author has built the experimental inverted wedge model successfully through computer communication between the Matlab software and DSP TMS320F28335 card. The experimental results show that fuzzy control method can completely control the balance of inverted wedge by vertical way. The obtained results of the values of angle and position loads fluctuated around the desired equilibrium position.

Keywords: Balance, inverted wedge, fuzzy control, Linear Quadratic Regulator.

trọng tâm của toàn hệ thống con nêm. Vì hệ con nêm ngược có tính chất phi tuyến rất phức tạp nên rất khó xác định mô hình toán học một cách chính xác, đồng thời các thông số hệ thống phải có độ chính xác tuyệt đối và phải đáp ứng nhanh. Tuy nhiên, vấn đề là cần phải thiết kế một bộ điều khiển phù hợp để điều khiển hệ thống cân bằng và đây cũng là mục đích chính của đề tài.

Đề tài “Thiết kế, thi công điều khiển mờ hệ con nêm ngược” (Đặng Hữu Phúc 2012) đã sử dụng phương pháp điều khiển trượt-mờ-PID để cân bằng hệ con nêm ngược. Mô hình được thực hiện bằng cách cân bằng hệ thống dựa vào sức nặng của con chạy trên mặt phẳng trượt. Kết quả mô phỏng đạt được cân bằng ổn định với góc nghiêng lớn đến $\pm\pi/2$, thời gian đáp ứng khoảng 2.5s.

Nhóm tác giả Jeng-Hann Li, Tzuu-Hseng S. Li, Ting-Han Ou, July đã nghiên cứu đề tài “Design and Implementation of Fuzzy Sliding-Mode Controller for a Wedge Balancing System”

¹ Thạc sĩ, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh

² Thạc sĩ, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh

³ Thạc sĩ, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh

(2003). Đề tài sử dụng phương pháp điều khiển mờ - trượt để cân bằng hệ con nêm ngược. Mô hình sử dụng vật nặng di chuyển trên mặt phẳng ngang và dùng dây đai kéo vật nặng. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống cân bằng ổn định với thời gian xác lập khoảng 7s.

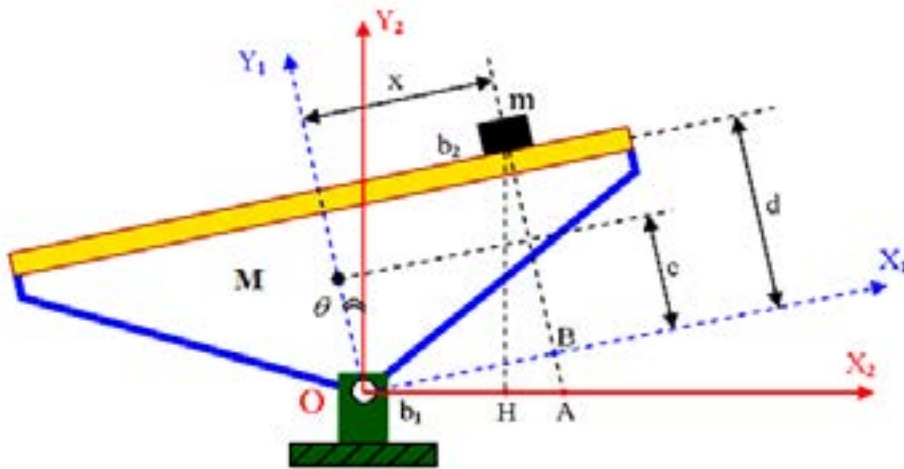
Năm 2002, đề tài “Genetic Adaptive Control for an Inverted Wedge: Experiments and Comparative Analyses” do các tác giả Moore M.L, Musacchio J.T, Passino K.M nghiên cứu. Hệ thống sử dụng dây xích nằm ở trung tâm để kéo vật nặng di chuyển trên mặt phẳng ngang. Giải thuật điều khiển đã nghiên cứu trong đề tài là giải thuật di truyền. Kết quả cho thấy hệ thống cân bằng ổn định trong khoảng thời gian 3s và độ dao động góc nghiêng

lớn nhất là 50% so với trạng thái cài đặt ban đầu.

Đề tài “Balancing Control of Sliding Inverted Wedge System: classical-method-based compensation” do các tác giả Shing-Jen Wu, Cheng-Tao Wu, Yung-Yi Chiou, Chin-Teng Lin, Yi-Nung Chung nghiên cứu vào năm 2006 sử dụng hệ thống dây đai kéo hai vật nặng ở hai cạnh của hệ con nêm ngược giúp hệ thống cân bằng. Phương pháp điều khiển chính của đề tài là thiết kế bộ điều khiển tối ưu tuyến tính dạng toàn phương LQR và điều khiển trượt cho kết quả hệ thống cân bằng ổn định trong 2,5s với góc nghiêng nhỏ.

2. Nội dung

2.1. Mô hình hóa hệ con nêm ngược:



Hình 1: Mô hình hệ con nêm ngược (Đặng Hữu Phúc 2012)

Bảng 1: Bảng thông số mô hình con nêm ngược

Ký hiệu	Giá trị đo	Thông số hệ thống
M	2,8 kg	Khối lượng hệ con nêm
m	0,65 kg	Khối lượng vật nặng
c	0,06 m	Khoảng cách giữa trục quay và trọng tâm con nêm
d	0,12 m	Khoảng cách giữa trục quay và mặt trượt
b ₁	0,25 N/m/s	Hệ số ma sát ở trục quay
b ₂	10 N/m/s	Hệ số ma sát ở mặt trượt
g	9,81 m/s ²	Gia tốc trọng trường
K _m	5 Nm/A	Hệ số cảm ứng của động cơ DC
U	24VDC	Điện áp cấp cho động cơ DC

Áp dụng phương pháp Euler – Lagrange ta có:
L=K-P

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = T_i \quad (1)$$

Trong đó:

K: tổng động năng; P: tổng thế năng

T: môment; q: biến trạng thái

Đối với hệ thống con nêm ngược, ta có q₁=θ; q₂=x

Ta xác định được phương trình phi tuyến hệ con nêm ngược (theo Đặng Hữu Phúc 2012) như sau:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{(-b_1\dot{\theta} - 2mx\dot{\theta} - b_2\dot{x} + mdx(\dot{\theta})^2 - mgxcos(\theta) + Mgcsin(\theta))}{(Mc^2 + mx^2)} + \left(\frac{2d}{(Mc^2 + mx^2)}\right)F \\ \ddot{x} = \frac{(-b_1d\dot{\theta} - 2mx\dot{\theta} - b_2d^2\dot{x} + md^2x(\dot{\theta})^2 - mgdxcos(\theta) + Mgdc sin(\theta))}{(Mc^2 + mx^2)} - \frac{b_2\dot{x}}{m} + x(\dot{\theta})^2 - gsin(\theta) + \left(\frac{2d^2}{(Mc^2 + mx^2)} + \frac{1}{m}\right)F \end{cases} \quad (2)$$

Từ (2) và tuyến tính hóa tại điểm cân bằng ($\theta_0 \approx 0; \dot{\theta}_0 \approx 0; x_0 \approx 0; \dot{x}_0 \approx 0$), ta suy ra phương trình tuyến tính hoá hệ thống (với $F=Km.U$ là môment của vật nặng)(Đặng Hữu Phúc 2012):

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{g}{c}\right) & \left(\frac{-b_1}{Mc^2}\right) & \left(\frac{-mg}{Mc^2}\right) & \left(\frac{-b_2d}{Mc^2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{gd}{c} - g\right) & \left(\frac{-b_1d}{Mc^2}\right) & \left(\frac{-mgd}{Mc^2}\right) & \left(-\left(\frac{b_2d^2}{Mc^2} + \frac{b_2}{m}\right)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m \left(\frac{2d}{Mc^2}\right) \\ 0 \\ K_m \left(\frac{2d^2}{Mc^2} + \frac{1}{m}\right) \end{bmatrix} U \quad (3)$$

2.2. Xây dựng mô hình điều khiển hệ con nôm ngược

2.2.1. Điều khiển LQR (Linear Quadratic Regulator) (Nguyễn Thị Phương Hà 2012)

LQR là thuật toán điều khiển được xây dựng dựa trên cơ sở nguyên lý phản hồi trạng thái. Bộ điều khiển nhận tín hiệu vào là trạng thái của hệ thống và tín hiệu mẫu sau đó tính toán và chuyển thành tín hiệu điều khiển cho quá trình.

Xét hệ thống có tác động ngoài ($u \neq 0$): $\dot{x} = Ax + Bu$ (4)

Chúng ta cần tìm ma trận K của vector điều khiển tối ưu: $u(t) = -Kx(t)$ thỏa mãn chỉ tiêu chất lượng J đạt giá trị cực tiểu:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (5)$$

Trong đó, Q là ma trận xác định dương (hoặc bán xác định dương), R là ma trận xác định dương.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 196.2 & -6.67 & -784.8 & -720 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 13.734 & -0.8 & -94.176 & -161.4 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 160 \\ 0 \\ 27.533 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = 10$$

Khi đó ma trận tối ưu K có giá trị là: $K = [7.28980.6229-20.4478-2.5252]$

Ma trận K tối ưu được xác định từ phương trình Riccati có dạng:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (6)$$

Như vậy, luật điều khiển tối ưu cho bài toán điều khiển tối ưu dạng toàn phương với chỉ tiêu chất lượng là phương trình tuyến tính và có dạng:

$$u(t) = -Kx(t) = R^{-1}B^T Px(t) \quad (7)$$

Ma trận P khi đó phải thỏa mãn phương trình Riccati:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = \dot{P} \quad (8)$$

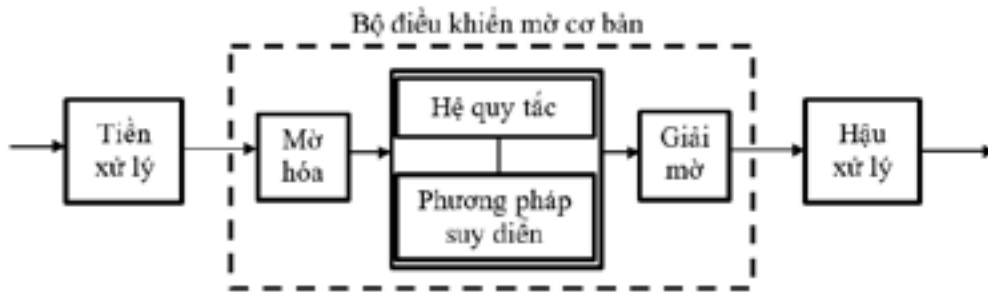
Khi P không thay đổi theo thời gian $\dot{P} = 0$, ta có phương trình đại số Riccati:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (9)$$

Xét tại điểm làm việc xác lập của hệ con nôm ngược đã được tuyến tính hóa ($x=0, \dot{x} = 0, \theta=0, \dot{\theta} = 0$ và $u=0$), dựa vào phần mềm Matlab ta tìm được các ma trận trạng thái A, B và chọn ma trận Q, R sao cho hàm mục tiêu J đạt giá trị cực tiểu và thỏa mãn phương trình Riccati như sau:

2.2.2. Bộ điều khiển mờ

Cấu trúc một bộ điều khiển mờ cơ bản:

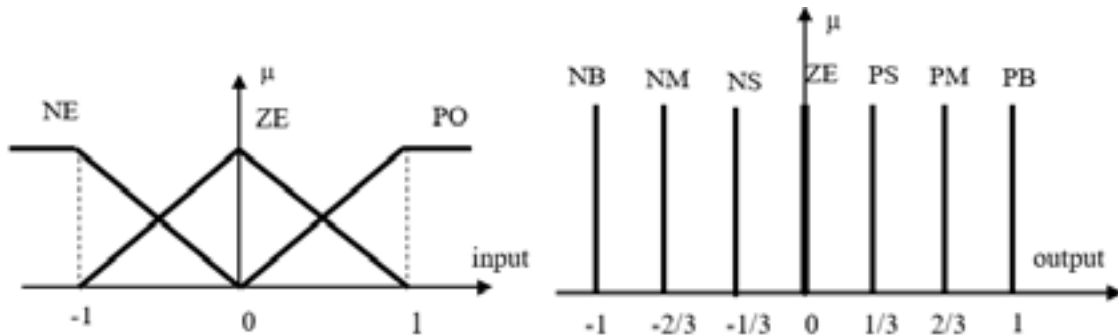


Hình 2: Cấu trúc bộ điều khiển mờ

Đối với hệ con nôm ngược, ta thiết kế bộ điều khiển có 4 biến vào: sai số vị trí góc, vi phân của sai số vị trí góc, sai số vị trí vật nặng, vi phân sai số vị trí vật nặng và 1 ngõ ra áp điều khiển cho động cơ.

Luật mờ được xây dựng dựa trên kinh nghiệm và hoạt động của hệ con nôm ngược. Ta chọn số tập mờ ngõ vào là 3 để có số luật mờ vừa phải là $3^4=81$ luật và số tập mờ ngõ ra là 7. Các biến ngôn ngữ và hàm liên thuộc ngõ vào/ra như Hình 3.

Vị trí góc lệch $\theta(t)$: [- $\pi/2, \pi/2$] (rad)	Vận tốc vật nặng $\dot{x}(t)$: [-1, 1] (m/s)
Vận tốc góc $\dot{\theta}(t)$: [-1, 1] (rad/s)	Điện áp cấp cho động cơ DC: [-24, +24] (VDC)
Vị trí vật nặng $x(t)$: [-0.5, 0.5] (m)	



Hình 3: Các biến ngôn ngữ và hàm liên thuộc ngõ vào/ra bộ điều khiển mờ

Ta xây dựng các luật điều khiển mờ theo:

- Phương pháp suy diễn mờ MAX – MIN.
- Phương pháp giải mờ tổng có trọng số.

Giả sử, ta có các giá trị đầu vào bộ điều khiển mờ như sau:

Input=[$x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}$]= [-0,5 0,4 -0,2 -0,2] dựa vào bảng luật mờ cho hệ Tagaki – Sugeno ta xác định được các luật mờ ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị điều khiển ngõ ra như sau:

$$R_{10} = \text{If } x=NE \text{ and } \dot{x} =ZE \text{ and } \theta =NE \text{ and } \dot{\theta} =NE \text{ Then } U_{10} =NM$$

$$R_{49} = \text{If } x=ZE \text{ and } \dot{x} =PO \text{ and } \theta =ZE \text{ and } \dot{\theta} =ZE \text{ Then } U_{49} =NS$$

Tương ứng với các giá trị Input đã cho ta xác định các giá trị rõ như sau:

$$LX_{NE}(x)=0,4 \text{ và } LX_{ZE}(\dot{x})=0,65 \text{ và } LX_{NE}(\theta)=0,1 \text{ và } LX_{NE}(\dot{\theta})=0,1 \text{ và } U_{10} = -0,667$$

$$LX_{NE}(x)=0,6 \text{ và } LX_{ZE}(\dot{x})=0,35 \text{ và } LX_{NE}(\theta)=0,8 \text{ và } LX_{NE}(\dot{\theta})=0,8 \text{ và } U_{49} = -0,333$$

Trong đó, LX là các vùng mờ được mô tả theo Tagaki – Sugeno.

Tiếp theo, sử dụng phương pháp suy diễn mờ

MAX – MIN, ta tìm được:

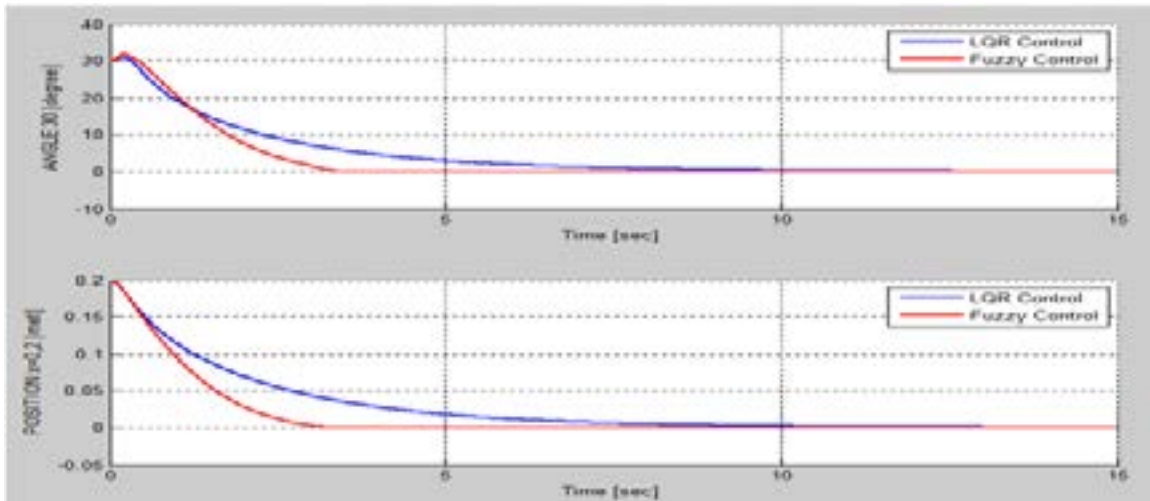
$\text{Min}(0,4; 0,65; 0,1; 0,1)=0,1$ và $\text{Min}(0,6; 0,35; 0,8; 0,8)=0,35$

Giải mờ theo phương pháp tổng trọng số trung bình, ta xác định được:

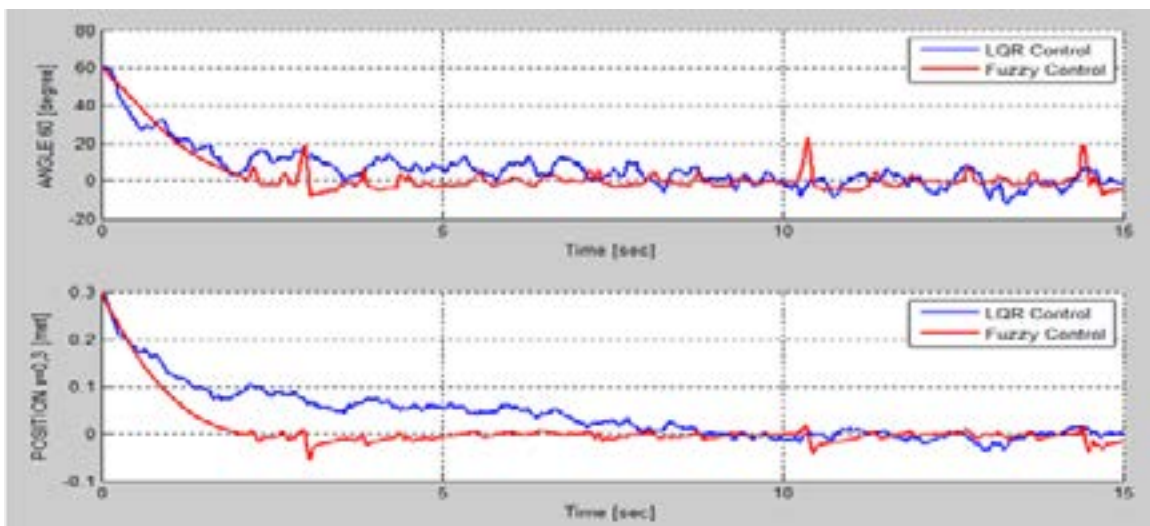
$$U = \frac{0,1 \cdot (-0,667) + 0,35 \cdot (-0,333)}{0,1 + 0,35} = -0,4072$$

2.3. Kết quả mô phỏng

Sau đây là kết quả mô phỏng dùng phần mềm Matlab cho hai thuật toán đã nghiên cứu trong đề tài là bộ điều khiển LQR và điều khiển mờ áp dụng cho hệ con nê ngược.



Hình 4: Kết quả mô phỏng với góc $\theta=30^\circ$, $x=0,2m$



Hình 5: Kết quả mô phỏng với góc $\theta=60^\circ$, $x=0,3m$ và có nhiễu tác động

* Nhận xét:

Kết quả so sánh cho thấy cả hai bộ điều khiển đều có khả năng điều khiển cân bằng hệ con nê ngược. Trong đó, phương pháp điều khiển mờ cho kết quả là tốt nhất, hệ thống cân bằng, ổn định, có khả năng điều khiển góc nghiêng ban đầu lớn, thời gian xác lập ngắn.

2.4. Kết quả thực nghiệm cân bằng hệ con nê ngược dùng bộ điều khiển mờ

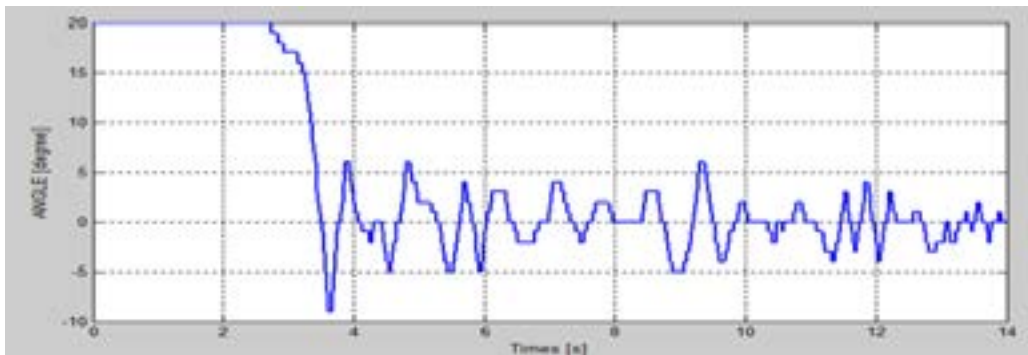


Hình 6: Mô hình con nệm ngược đã thi công

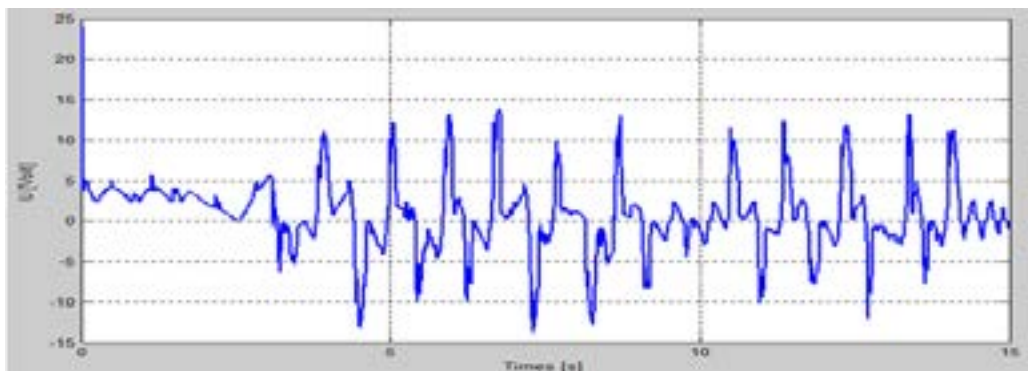
- 1: Thanh trượt và ổ bi trượt
- 2: Thanh ray
- 3: Động cơ 24VDC

- 4: Encoder đo vị trí vật nặng (loại E6B2-CWZ6C 500P/R, điện áp từ 5-24VDC, Omron)
- 5: Hộp tỉ số truyền động bánh răng
- 6: Encoder đo vị trí góc quay (loại E6B2-CWZ6C 1000P/R, điện áp từ 5-24VDC, Omron)

Sau đây là kết quả thực nghiệm cho hệ thống điều khiển mờ: con nệm ngược tự cân bằng đã thi công sử dụng bộ



Hình 7: Đáp ứng giá trị góc nghiêng con nệm thực nghiệm



Hình 8: Đáp ứng giá trị điện áp điều khiển động cơ DC thực nghiệm

3. Kết luận

Trong nội dung đề tài này, chúng tôi đã áp dụng hai phương pháp điều khiển khác nhau để điều khiển đối tượng con nôm ngược tự cân bằng là điều khiển tối ưu LQR và phương pháp điều khiển mờ. Các kết quả đạt được như sau:

- Phương pháp LQR cho tín hiệu điều khiển khá tốt, góc nghiêng lớn, độ vọt lố thấp, tuy nhiên thời gian xác lập là tương đối lớn (5s).
- Phương pháp điều khiển mờ cho kết quả điều

khiển tốt nhất, con nôm có thể giữ cân bằng với góc nghiêng $\theta = [-\pi/2; \pi/2]$, hệ thống ổn định và thời gian xác lập ngắn phù hợp với yêu cầu cân bằng của hệ thống.

- Đồng thời, tác giả đã thiết kế và điều khiển thành công mô hình thực nghiệm hệ con nôm ngược tự cân bằng, thông qua hệ thống giao tiếp thời gian thực sử dụng card DSP TMS320F28335. Kết quả thực nghiệm cho thấy giá trị góc nghiêng và vị trí vật nặng luôn dao động xung quanh vị trí cân bằng.

Tài liệu tham khảo

Đài, Hi liệu tham khảo đã thiết kế và điều khiển thành công mô hình thực n, *T liệu tham khảo đã thiết kế và điều khiển*, s liệu tham khảo đã thiết kế và đ

Jeng-Hann Li, Tzue-Hseng S. Li, Ting-Han Ou. July 2003. “Design and Implementation of Fuzzy Sliding-Mode Controller for a Wedge Balancing System”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Volume 37 Issue 3, pp. 285-306.

Moore M.L., Musacchio J.T., Passino K.M. 2002. “Genetic Adaptive Control for an Inverted Wedge: Experiments and Comparative Analyses”, *IEEE - American Control Conference*, Proceedings of the 1999 (vol 1), pp. 400 – 404.

Nguyễn, Thị Phương Hà. 2012. *Lý thuyết điều khiển hiện đại*, NXB Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh, trang 163 – 165.

Shinq-Jen Wu, Cheng-Tao Wu, Yung-Yi chiou, Chin-Teng Lin, Yi-Nung Chung .2006. “Balancing Control of Sliding Inverted-Wedge System: classical-method-based compensation”, *IEEE International Conference on SMC 06*, pp. 1349 – 1354.