

ĐIỀU KHIỂN CÂN BẰNG CON LẮC NGƯỢC SỬ DỤNG THUẬT TOÁN PD MỜ

Nguyễn Văn Khanh¹, Nguyễn Ngô Phong và Đặng Hải Đăng²

¹ Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

² Lớp Cơ điện tử K35 – TC0959A1, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

Thông tin chung:

Ngày nhận: 12/06/2013

Ngày chấp nhận: 24/12/2013

Title:

Real time controlling of inverted pendulum by fuzzy pd controller

Từ khóa:

Con lắc ngược, bộ điều khiển PD mờ, bộ điều khiển PID, hệ thống thực

Keywords:

Inverted pendulum, Fuzzy PD Controller, PID Controller, real system

ABSTRACT

The article presents a method to control an inverted pendulum in real time using a Fuzzy PD controller (Fuzzy Proportional-Derivative controller) which combines two PD controllers and two Fuzzy controllers. The PD controllers play the role of improving the system's response. The Fuzzy controllers are used mainly to stabilize the inverted pendulum at the predetermined position. In addition, a classical PID controller (Proportional-Integral-Derivative controller) is also designed and implemented to compare the performance of the proposed controller. Experiments of stabilizing the inverted pendulum show that the Fuzzy PD controller produces better response than the PID controller. The inverted pendulum can be stabilized at the predetermined position using the Fuzzy PD controller. The inverted pendulum; however, fluctuates around the set point using the classical PID control algorithm. A graphical user interface was also developed to supervise the system during operation.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp điều khiển thời gian thực cho hệ thống con lắc ngược với bộ điều khiển Fuzzy PD (Fuzzy Proportional-Derivative Controller). Cấu trúc điều khiển thông minh Fuzzy PD được tổ chức dưới dạng hai bộ điều khiển PD có nhiệm vụ cải thiện đáp ứng của hệ thống và hai bộ điều khiển Fuzzy giữ vai trò chính trong việc điều khiển con lắc cân bằng xung quanh một vị trí xác định. Ngoài ra, giải thuật điều khiển kinh điển PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) cũng được xây dựng và áp dụng vào mô hình thật nhằm có được sự đánh giá về chất lượng điều khiển hệ thống với hai bộ điều khiển khác nhau. Kết quả thực nghiệm trên mô hình cho thấy, đáp ứng của hệ thống với bộ điều khiển Fuzzy PD cho kết quả tốt hơn bộ điều khiển PID. Với giải thuật điều khiển thông minh, con lắc có khả năng được điều khiển cân bằng tại một vị trí xác định trong khi đó hệ con lắc bị dao động quanh điểm đặt với giải thuật điều khiển kinh điển. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng phát triển một hệ giao diện giúp giám sát hệ thống trong quá trình hoạt động.

1 GIỚI THIỆU

Hệ thống con lắc ngược là hệ thống phức tạp, không ổn định, có tính phi tuyến cao (Y. Liu, Z. Chen, D. Xue, X. Xu, 2009; L.B. Prasad, H.O.

Gupta, B. Tyagi, 2011). Việc điều khiển giữ con lắc cân bằng tại một vị trí xác định là vấn đề kinh điển trong lĩnh vực điều khiển tự động (Y. Liu, Z. Chen, D. Xue, X. Xu, 2009; B. Xiao, C. Xu, L. Xu, 2009). Bên cạnh đó, nếu hệ thống được chế tạo với

độ chính xác và tin cậy cao thì đây là mô hình lý tưởng để thực hiện các thí nghiệm với các giải thuật điều khiển cũng như nhận dạng hệ thống.

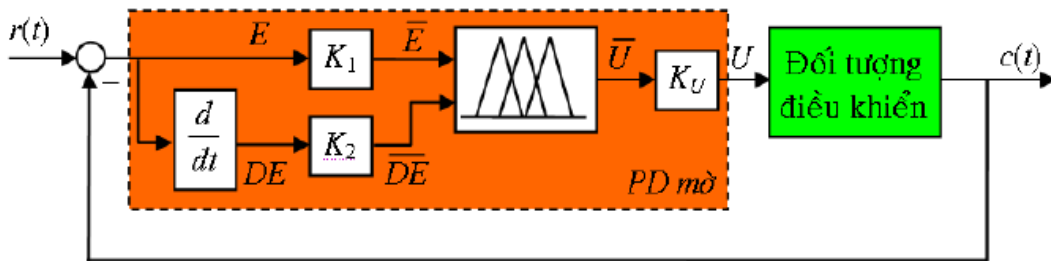
Hiện nay, rất nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng các thuật toán điều khiển khác nhau để điều khiển cân bằng hệ thống con lắc ngược như thuật toán PID, điều khiển tối ưu LQR, điều khiển trượt, và điều khiển Logic mờ (Fuzzy), đã thu được một số thành công đáng kể. Với việc thiết kế hai bộ điều khiển PID riêng biệt (M. Hamza, Zaka-ur-Rehman, Q.Zahid, F. Tahir, Z. Khalid, 2011) đã cho khả năng điều khiển được cân bằng con lắc ngược, tuy nhiên con lắc còn bị dao động dẫn đến vị trí của xe cũng không ổn định. Thông qua việc sử dụng giải thuật điều khiển tối ưu LQR (M. Hamza, Zaka-ur-Rehman, Q.Zahid, F. Tahir, Z. Khalid, 2011), hệ con lắc ngược bị dao động rất mạnh, vị trí xe gần như không thể điều khiển quanh điểm đặt. Ngoài các giải thuật kinh điển kể trên, một số nghiên cứu đã áp dụng các giải thuật điều khiển thông minh (Y. Liu, Z. Chen, D. Xue, X. Xu, 2009; M. Hamza, Zaka-ur-Rehman, Q.Zahid, F. Tahir, Z. Khalid, 2011) vào việc điều khiển thời gian thực hệ con lắc ngược, và đã thu được những kết quả đáng kể. Các thông số đáp ứng của hệ thống với giải thuật mờ tốt hơn so với các giải thuật điều khiển kinh điển khi con lắc không còn bị dao động và vị trí xe được giữ ổn định. Với các bộ điều khiển mờ trong các nghiên cứu trên đã khắc phục được vấn đề đòi hỏi

về sự chính xác của các thông số trong mô hình toán (C.M. Lin, Y.J. Mon, 2005; Y. Lin, G.A; 1995) gặp phải trong việc xây dựng các bộ điều khiển với giải thuật PID hay LQR. Tuy nhiên, các bộ điều khiển mờ trên đơn thuần là các bộ điều khiển tĩnh nên việc tinh chỉnh đáp ứng của hệ thống sẽ gặp nhiều khó khăn, thông qua việc kết hợp bộ điều khiển PD và bộ điều khiển mờ sẽ giúp chúng ta xử lý được vấn đề này.

Bài báo mô tả phương pháp tinh chỉnh đáp ứng của hệ thống với giải thuật mờ bằng bộ điều khiển PD. Bộ điều khiển mờ giữ vai trò là bộ điều khiển chính, tạo tín hiệu điều khiển đối tượng và bộ điều khiển PD đóng vai trò là bộ tiền xử lý, xử lý các tín hiệu ngõ vào vào các khoảng điều khiển tốt nhất của bộ điều khiển mờ. Hiệu quả của bộ điều khiển PD mờ đã được kiểm chứng thông qua các thực nghiệm được tiến hành trên mô hình cơ khí được nhóm tác giả thực hiện.

2 PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP

Bộ điều khiển PD mờ trong nghiên cứu này được xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink, phiên bản 2012a và công cụ logic mờ (The MathWorks, Inc, 2012). Bộ điều khiển được kiểm nghiệm trên hệ thời gian thực sẽ được trình bày trong phần kết quả thực nghiệm, với cấu trúc điều khiển được thiết lập như Hình 1 và 2.

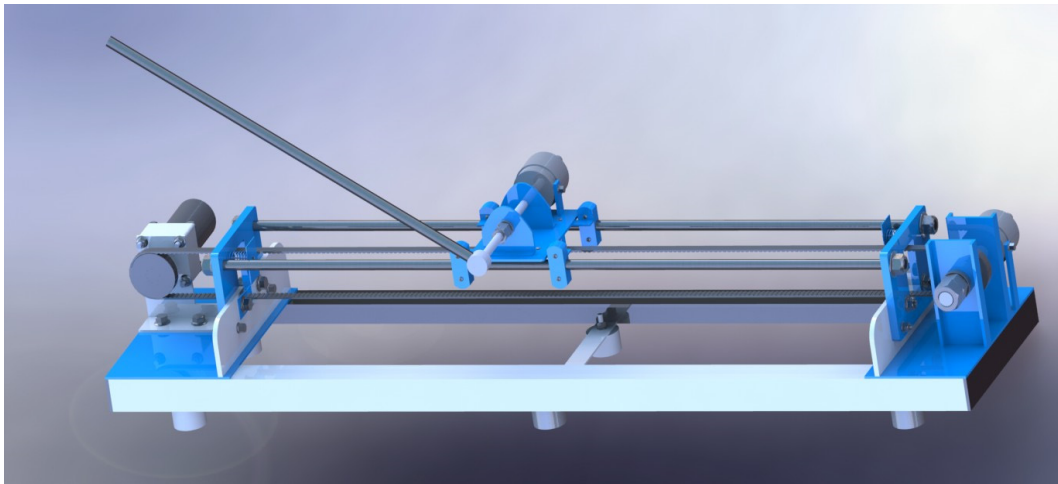


Hình 1: Mô hình tổng quát của hệ thống điều khiển với thuật toán PD mờ

2.1 Mô hình toán học của hệ thống con lắc ngược

Mô hình hệ thống con lắc ngược gồm hai phần: xe goong và con lắc. Con lắc không ổn định, nó luôn ngã xuống trừ khi có lực tác động thích hợp

vào hệ. Bài toán đặt ra là điều khiển con lắc cân bằng tại một vị trí xác định. Vì vậy, cần phải thiết kế một bộ điều khiển thích hợp để giữ con lắc ổn định. Mô hình hệ con lắc ngược do nhóm thi công được trình bày trong Hình 3.

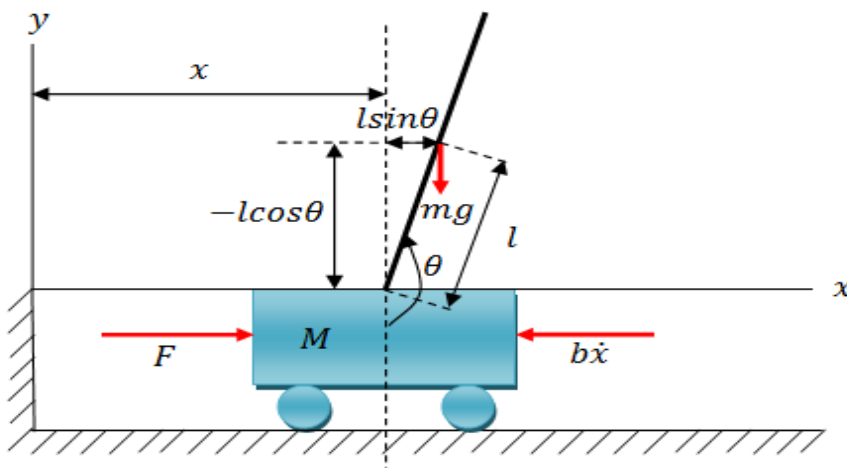


Hình 2: Mô hình con lắc ngược

Hệ phương trình mô tả đặc tính động phi tuyến của hệ thống con lắc được mô tả bởi hệ phương trình (Chen Wei Ji, Fang Lei & Lei Kang Kim, 1997) (1). Tuy nhiên, bộ điều khiển mờ được nhóm tác giả đề xuất được thiết kế dựa vào kinh nghiệm

về hệ thống, không sử dụng hệ phương trình động học (1). Tính ổn định của hệ thống thiết kế bằng bộ điều khiển mờ được đánh giá bằng kết quả thực nghiệm thông qua phương pháp thử sai ở mục 3:

$$\begin{cases} \ddot{x}(M + m) + b\dot{x} - ml(\sin\theta)\dot{\theta}^2 + ml(\cos\theta)\ddot{\theta} = F \\ \ddot{\theta}(I + ml^2) + mgl\sin\theta = -m\ddot{x}(\cos\theta)l \end{cases} \quad (1)$$



Hình 3: Mô hình toán hệ con lắc ngược

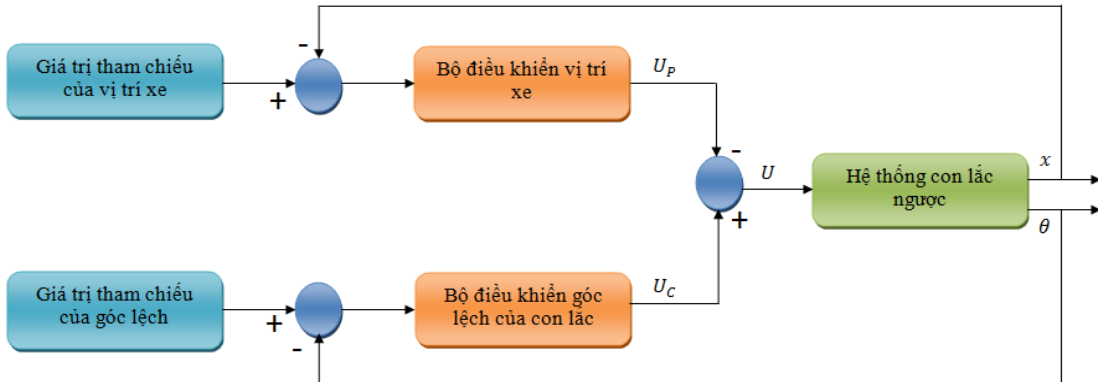
Bảng 1: Các thông số của đối tượng điều khiển

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
M	Khối lượng xe goong	1.6
m	Khối lượng con lắc	0.27
l	Khoảng cách từ tâm con lắc đến điểm góc	0.25
I	Momen quán tính của con lắc	0.0034
θ	Góc lệch giữa con lắc và phương thẳng đứng	-
F	Lực tác động vào hệ	-
g	Gia tốc trọng trường	9.81

2.2 Bộ điều khiển mờ

Hệ thống con lắc ngược là một ví dụ điển hình của hệ thống dạng under-actuated, trong đó : số lượng cơ cấu chấp hành (xe goong) nhỏ hơn số bậc tự do của hệ thống (chuyển động của xe goong và chuyển động quay của con lắc). Vì vậy, để có thể điều khiển cân bằng con lắc đồng thời cả vị trí xe, ta cần thiết kế hai bộ điều khiển riêng biệt (C.W. Tao, J.S. Taur, C.M. Wang, 2008; Mohan Akole & Barjeev Tyagi, 2008; Nidhi Patel, M.J. Nigam,

2013). Tuy nhiên, chúng ta chỉ có một điện áp điều khiển chung cho cả hai đối tượng này. Vì vậy, điện áp điều khiển góc lệch con lắc U_p và điện áp điều khiển vị trí xe U_c phải được kết hợp chung thành một điện áp điều khiển U cho cả hệ thống. Thực tế thấy rằng, nếu ta cấp một điện áp để xe dịch chuyển về phía trái sẽ làm con lắc ngã về phía ngược lại. Điều này chứng minh điện áp điều khiển hai đối tượng này sẽ trái dấu trên cùng một quy chiếu. Thông qua mối quan hệ này, ta xây dựng được sơ đồ điều khiển cho hệ thống như Hình 5.

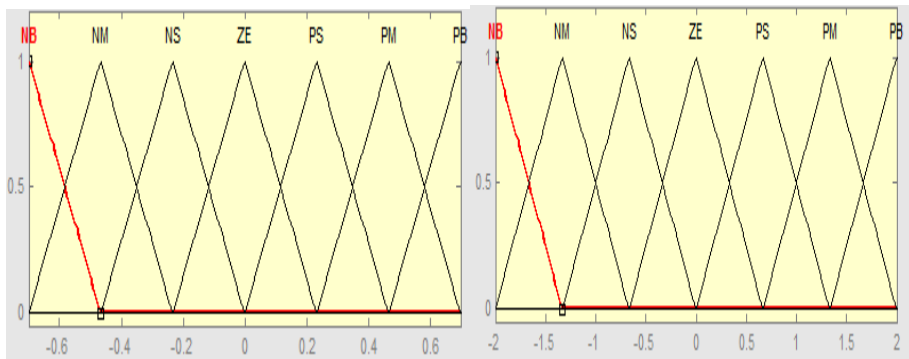


Hình 4: Sơ đồ điều khiển hệ con lắc ngược

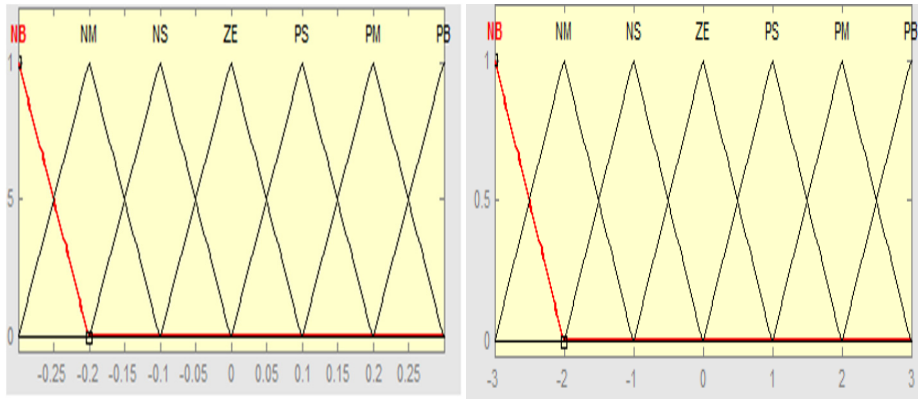
Với cả hai bộ điều khiển mờ, ngõ vào thứ nhất là e , được mờ hoá bởi 7 tập $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ và ngõ vào thứ hai là \dot{e} cũng được mờ hoá bởi 7 tập $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$. Ngõ ra của bộ điều khiển mờ là U được mờ hoá bởi 7 tập $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$. Các tập mờ của ngõ vào, ngõ ra được ký hiệu như sau: NB là Negative Big, NM là Negative Medium, NS là

Negative Small, ZE là Zero, PS là Positive Small, PM là Positive Medium, PB là Positive Big.

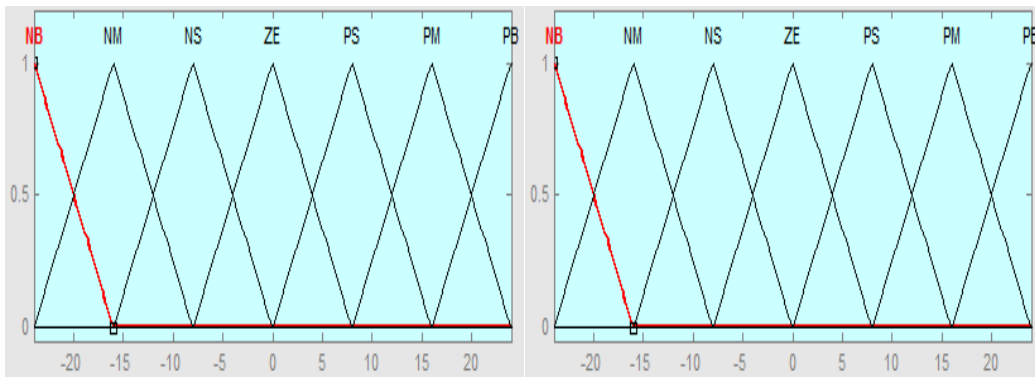
Miền xác định cho của các biến ngõ vào và ngõ ra của bộ điều khiển mờ được xác định tùy thuộc vào từng đối tượng cụ thể. Trong nghiên cứu này, với mô hình cơ khí do nhóm tác giả thiết kế, miền xác định của hệ mờ được thể hiện ở Hình 6,7,8.



Hình 5: Ngõ vào e và \dot{e} bộ điều khiển vị trí xe



Hình 6: Ngõ vào e và \dot{e} bộ điều khiển vị góc lệch con lắc



Hình 7: Ngõ ra U của hai bộ điều khiển

Từ cơ sở tri thức về đặc tính động học của hệ con lắc ngược, luật điều khiển của hai bộ điều

khiển mờ được thiết kế dựa trên thực nghiệm và cho trong Bảng 2.

Bảng 2: Luật điều khiển

		\dot{e}						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZE
	NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	PM
	NS	NB	NB	NB	NM	ZE	PM	PB
	ZE	NB	NB	NM	ZE	PM	PB	PB
	PS	NB	NM	ZE	PM	PB	PB	PB
	PM	NM	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
	PB	ZE	PM	PB	PB	PB	PB	PB

2.3 Tinh chỉnh PD bộ điều khiển mờ

Bộ điều khiển PD được đưa vào cấu trúc điều khiển Hình 1, nhằm mục tiêu cung cấp cấp giá trị $\{e, \dot{e}\}$ đã được tinh chỉnh cho bộ điều khiển PD, nhằm cải thiện đáp ứng của hệ thống tốt nhất có thể. Phương pháp xác định thông số bộ điều khiển PD được nhóm áp dụng đó là phương pháp thử sai thông qua ảnh hưởng của các thông số độ lợi được thể hiện ở Bảng 3 (Kanagaraj *et al.*, 2008).

Bảng 3: Ảnh hưởng của việc tăng các thông số độ lợi của bộ điều khiển PD

Độ lợi	Thời gian tăng	Độ vọt lố	Thời gian xác lập	Sai số xác lập
K_P	Giảm	Tăng	Thay đổi ít	Giảm
K_D	Thay đổi ít	Giảm	Giảm	Thay đổi ít

2.4 Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID trong cấu trúc điều khiển ở Hình 2 và sơ đồ điều khiển ở hình 5, được xây dựng bằng phương pháp thử sai thông qua việc tinh chỉnh các thông số dựa trên đáp ứng thực tế của hệ thống. Các thông số độ lợi K_P, K_I, K_D ảnh hưởng đến thời gian tăng, độ vọt lố và thời gian xác lập của đáp ứng được cho trong Bảng 4 (Kanagaraj *et al.*, 2008). Các thông tin này được xem là cơ sở tri thức để xác định cải thiện hiệu quả điều khiển của giải thuật.

Bảng 4: Ảnh hưởng của việc tăng các thông số độ lợi của bộ điều khiển PID

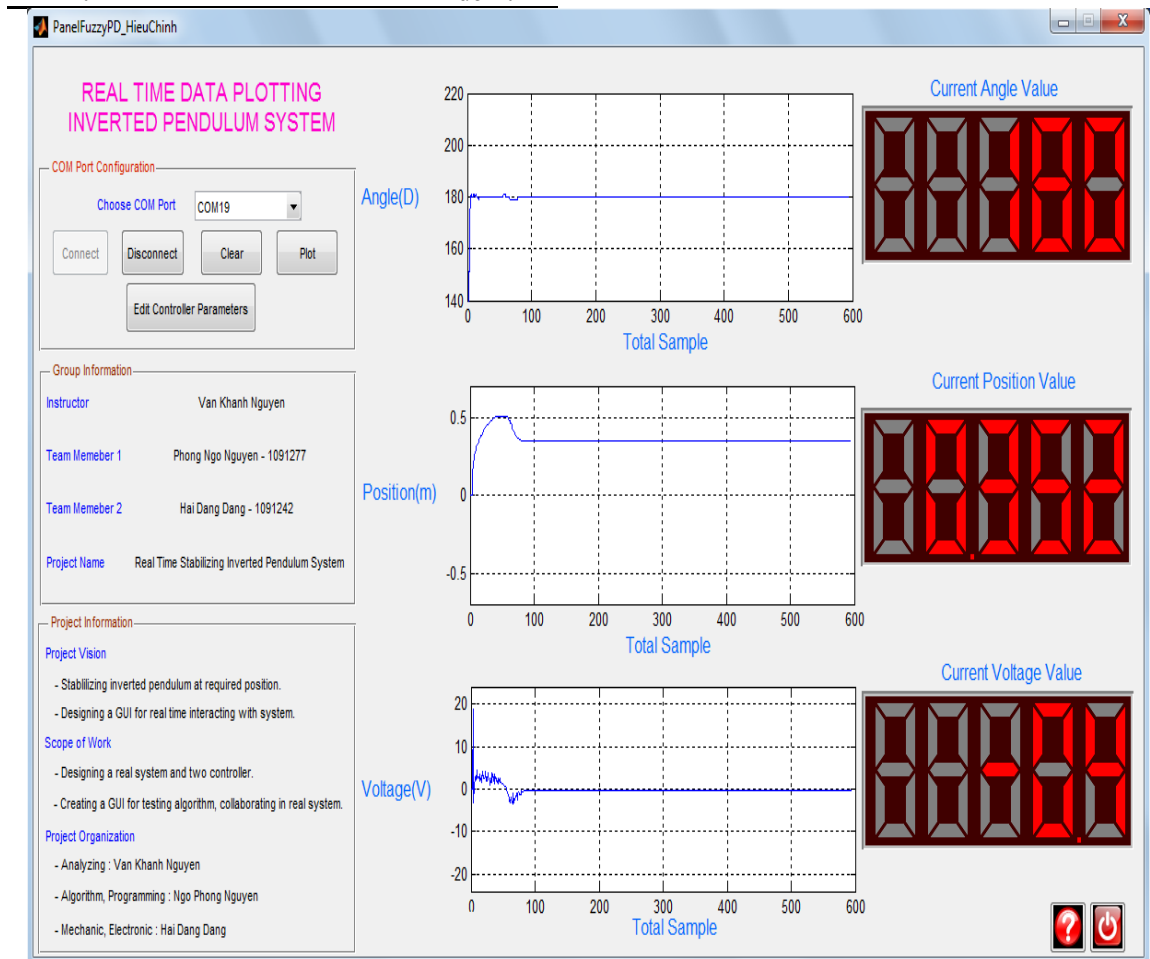
Độ lợi	Thời gian tăng	Độ vọt lố	Thời gian xác lập	Sai số xác lập
K_P	Giảm	Tăng	Thay đổi ít	Giảm
K_I	Giảm	Tăng	Tăng	Triệt tiêu
K_D	Thay đổi ít	Giảm	Giảm	Thay đổi ít

3 KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

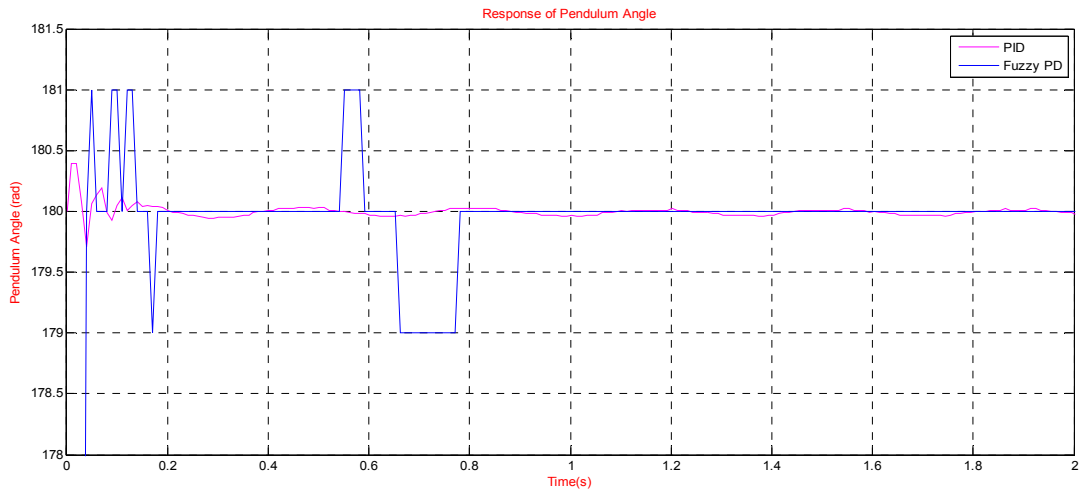
Thông qua thư viện hỗ trợ cho việc lập trình nhúng với vi điều khiển C2000 trong môi trường Matlab – Simulink, thực hiện quá trình điều khiển thời gian thực cho mô hình cơ khí, ta thu được đáp ứng ở các Hình 10, 11, 12). Để thuận lợi cho việc giám sát quá trình vận hành của hệ thống cũng như thu thập số liệu đánh giá chất lượng điều khiển của giải thuật, hệ giao diện người dùng cũng đã được nhóm tác giả phát triển như Hình 9.

Bảng 5: Chất lượng điều khiển góc lệch của hai giải thuật

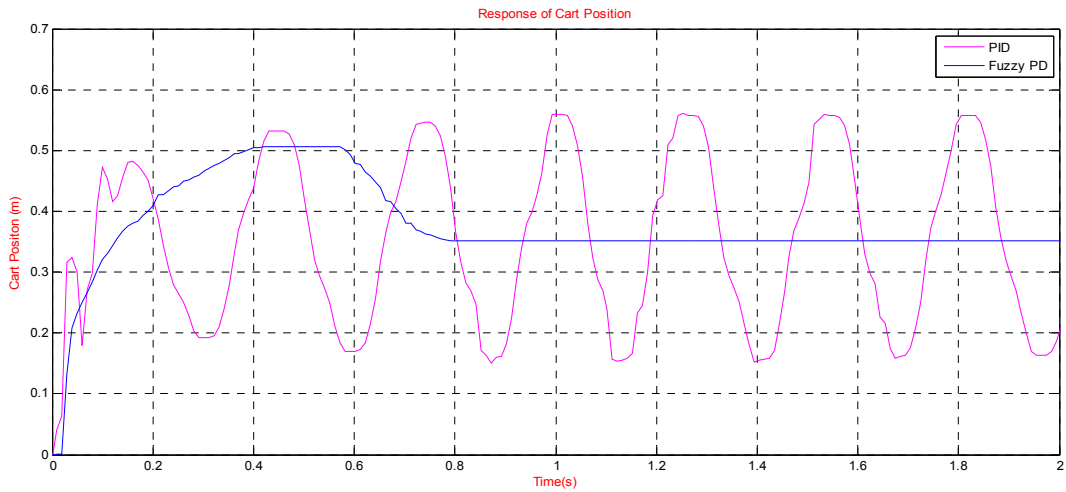
Tiêu chuẩn	Fuzzy PD	PID
Thời gian tăng	0.0652s	Hệ bị dao động
Thời gian xác lập	0.18s	với sai lệch nằm trong khoảng
Sai số xác lập	0	[-0.11;0.11] (rad) so với vị trí cân bằng.
Độ vọt lố	0.556%	



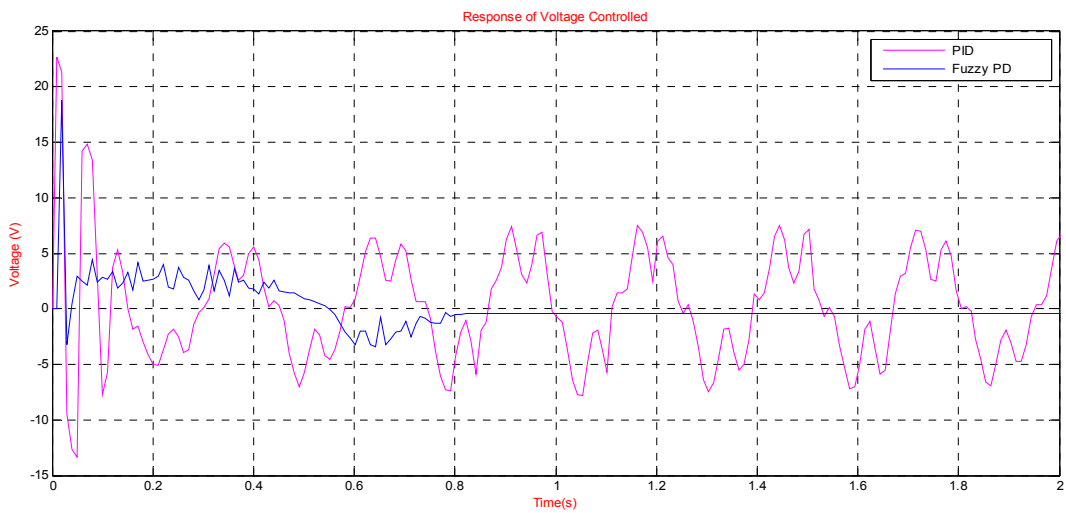
Hình 8: Giao diện giám sát hệ thống



Hình 9: Đáp ứng góc lệch



Hình 10: Đáp ứng vị trí xe



Hình 11: Đáp ứng điện áp điều khiển

Bảng 6: Chất lượng điều khiển vị trí xe của hai giải thuật

Tiêu chuẩn	Fuzzy PD	PID
Thời gian tăng	0.363s	Hệ bị dao động
Thời gian xác lập	3.945s	trong khoảng [0.22;0.57] (m)
Sai số xác lập	0.004	so với vị trí đặt
Độ vọt lố	44.57%	0.35 (m).

Với yêu cầu đặt ra điều khiển con lắc cân bằng tại vị trí cách vị trí ban đầu 0.35 m, kết quả thực nghiệm trên mô hình thật đã chứng minh rằng bộ điều khiển Fuzzy PD được đề xuất trong nghiên cứu cho kết quả điều khiển rất tốt - Với thời gian tăng và thời gian xác lập có giá trị lần lượt là 0.0652 s và 0.18 s; sai số xác lập được triệt tiêu; độ vọt lố là 0.556% cho việc điều khiển cân bằng con lắc; đối với việc điều khiển vị trí xe cho sai số rất nhỏ 0.004(m) so với vị trí đặt. Các thông số về chất lượng điều khiển ở bảng 5,6 cho thấy rằng hệ con lắc ngược hoàn toàn có khả năng điều khiển cân bằng tại vị trí xác định thông qua bộ điều khiển PD mờ, còn với bộ điều khiển PID hệ bị dao động trong khoảng quanh vị trí đặt.

4 KẾT LUẬN

Bài báo mô tả phương pháp xây dựng giải thuật PD mờ điều khiển cân bằng con lắc ngược tại một vị trí xác định. Ưu điểm của phương pháp này là thiết kế rất đơn giản mà không cần quan tâm đến mô hình toán học cũng như cấu trúc của đối tượng điều khiển. Chất lượng đáp ứng của hệ thống được tinh chỉnh thông qua bộ điều khiển PD được xác định bằng phương pháp thử sai. Kết quả kiểm nghiệm trên mô hình thực tế cho thấy bộ điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu này tỏ ra hiệu quả. Ngoài ra bộ điều khiển còn đáp ứng được yêu cầu về thời gian thực, cũng như sự ổn định trước tác động nhiễu vào hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tao, J.S. Taur, C.M. Wang, U.S. Chen. Fuzzy Hierarchical Swing-up and Sliding C.W. Ji, F. Lei, L.K. Kin. Fuzzy Logic Controller for an Inverted Pendulum System. *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*. Beijing, Oct 28-31, 1997, pp 185 – 189.

2. C.W. Position Controller for the Inverted Pendulum – Cart System. National Ilan University, National Chung – Hsing University, Taiwan, 2008.
3. L.B. Prasad, H.O. Gupta, B. Tyagi. Intelligent Control of Non Linear Inverted Pendulum Dynamical System with Disturbance Input using Fuzzy Logic Systems. *International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*, 2011, pp.136-141.
4. M. Akole, B. Tyagi. Design of Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Model of Inverted Pendulum – Cart System. *XXXII National System Conferences*, December 17-19, 2008, pp750 – 755.
5. N. Patel, M.J. Nigam. Design of Fuzzy PD Controller for Inverted Pendulum in Real Time. *Proceedings of ICAdIC, ASIC 174*, 2013, pp. 995 – 962.
6. Y. Liu, Z. Chen, D. Xue, X. Xu. Real Time Controlling of Inverted Pendulum by Fuzzy Logic. *IEEE International Conference on Automation and Logictics*. Shenyang, Aug 2009, pp.1180-1183.
7. B. Xiao, C. Xu, L.Xu. System Model and Controller Design of an Inverted Pendulum. *International Conference on Industrial and Information System*, pp. 356 – 359, 2009.
8. M. Hamza, Zaka-ur-Rehman, Q.Zahid, F. Tahir, Z. Khalid. Real-Time Control of an Inverted Pendulum: A Comparative Study. *IEEE International Conference on Frontiers of Information Technology*, pp. 183 – 188, 2011.
9. C.M. Lin, Y.J. Mon. Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding-mode controller. *IEEE Transactions. Control Systems 13*, pp. 593–598, 2005.
10. Y. Lin, G.A. Cunningham. A new approach to fuzzy neural system modeling. *IEEE Transactions. Fuzzy Systems*, pp.190–198, 1995.
11. The MathWorks, Inc., 2009. Fuzzy Logic Toolbox User’s Guide.