

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ LOẠI 2 ĐA LỚP CHO ĐỐI TƯỢNG PHI TUYẾN

Nguyễn Khắc Hoàng¹, Phạm Hồng Phong^{2*}

¹Trường Đại học Văn Hiến, 613 Âu Cơ, Phường Tân Phú, TP.HCM

²Trường Đại học Lương Thế Vinh, Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, Tỉnh Ninh Bình

* Tác giả liên hệ: phamhongphong@ltvu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 02/7/2025
Ngày hoàn thiện: 20/8/2025
Ngày chấp nhận: 29/8/2025
Ngày đăng: 05/9/2025

TỪ KHÓA

Logic mờ;
Logic mờ loại 2;
Hệ thống phi tuyến;
Điều khiển thích nghi;
Hàm thành viên Wavelet.

TÓM TẮT

Bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 là một phương pháp điều khiển có tính ứng dụng cao trong các hệ thống điều khiển tự động. Với sự phát triển nhanh chóng của các công nghệ thông tin và trí tuệ nhân tạo, bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống động cơ, robot và các hệ thống phi tuyến khác. Tuy nhiên, còn nhiều thách thức và vấn đề cần giải quyết để nâng cao hiệu quả và độ chính xác của bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2. Do đó, nghiên cứu này đề xuất cấu trúc đa lớp cho bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 và áp dụng hàm thành viên Wavelet. Cấu trúc đa lớp này, với hàm thành viên dần trải ở mỗi lớp sẽ giúp bao phủ tốt đầu vào và giảm bớt luật mờ so với cấu trúc mờ loại 2 đơn lớp thông thường và qua đó giúp tăng đáng kể độ chính xác và hiệu suất của hệ thống.

DESIGNING A MULTILAYER TYPE 2 FUZZY CONTROLLER FOR NONLINEAR SYSTEMS

Hoang Nguyen Khac¹, Phong Pham Hong^{2*}

¹University Van Hien, 613 Au Co Street, Ho Chi Minh City, Viet Nam

²University Luong The Vinh, 613 Cau Dong Street, Ninh Binh Province, Viet Nam

*Corresponding Author: phamhongphong@ltvu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: Jul 02nd, 2025
Revised: Aug 20th, 2025
Accepted: Aug 29th, 2025
Published: Sep 05th, 2025

KEYWORDS

Fuzzy
Type-2 fuzzy
Nonlinear systems
Adaptive control
Wavelet membership functions.

ABSTRACT

The type-2 fuzzy adaptive controller is a control method with high applicability in automatic control systems. With the rapid development of information technology and artificial intelligence, Type-2 fuzzy adaptive controllers are widely used in motor systems, robots, and other non-linear systems. However, there are still many challenges and issues to be addressed to enhance the efficiency and accuracy of Type-2 fuzzy adaptive controllers. Therefore, this study proposes a multi-layer structure for Type-2 fuzzy controllers and applies the Wavelet membership function. This multi-layer structure, with spread membership functions at each layer, will effectively cover the input space and reduce the number of fuzzy rules compared to conventional single-layer Type-2 fuzzy structures, thereby significantly improving the accuracy and performance of the system.

1. Giới Thiệu

Trong những năm gần đây hệ thống logic mờ loại 2 đã thu hút được nhiều nhà nghiên cứu trong các lĩnh vực khác nhau như: điều khiển, xử lý ảnh, nhận dạng hệ thống, dự đoán và phân loại,... [1-5]. Logic mờ nguyên bản còn được gọi là mờ loại 1 (T1FLS) được đưa ra đầu tiên bởi giáo sư Zadeh vào năm 1965 [6]. Ngay sau đó T1FLS đã được ứng dụng rộng rãi do tính linh hoạt, trực quan, và đơn giản trong tính toán [7]. Tuy nhiên vì T1FLS sử dụng tập rõ trong hàm thành viên nên nó được cho là không đạt được hiệu suất tối ưu với các hệ thống có sự không chắc chắn đến từ nhiều bên trong hoặc bên ngoài của hệ thống [8]. Do đó, giáo sư Zadeh đã giới thiệu tập mờ loại 2 (T2FLS) vào năm 1975, T2FLS được cho là xử lý hiệu quả hơn đối với các đối tượng có sự không chắc chắn trong hệ thống [9].

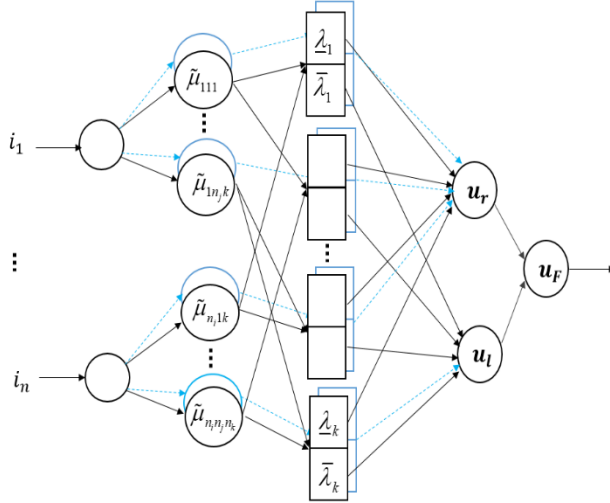
Nghiên cứu này đề xuất cấu trúc đa lớp cho mạng T2FLS (MT2FLS). Đối với cấu trúc T2FLS thông thường chỉ bao gồm 1 lớp hàm thành viên đầu vào. MT2FLS được thiết kế với các hàm thành viên rải đều trên các lớp, do đó sẽ bao phủ đầu vào được tốt hơn và số luật mờ cũng được giảm đi đáng kể so với T2FLS nguyên bản. So với bộ điều khiển T1FLS, việc sử dụng MT2FLS mang lại nhiều lợi ích như xử lý tốt hơn các bất định, tăng cường tính linh hoạt và độ mạnh mẽ, cải thiện hiệu suất điều khiển, và khả năng học hỏi, thích nghi tốt hơn. Do đó, MT2FLS là lựa chọn ưu việt hơn trong các tình huống đòi hỏi độ chính xác và ổn định cao trong điều khiển hệ thống. Bộ điều khiển mờ loại 2 (T2FC) vẫn còn khá mới ở nước ta, số lượng các nghiên cứu về bộ điều khiển này hiện nay rất ít, và thường chỉ dừng lại ở mức độ áp dụng toolbox. Nghiên cứu về tối ưu bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 kết hợp hàm thành viên Wavelet như được đề xuất trong đề tài này là hoàn toàn mới ở Việt Nam. Một số nghiên cứu liên quan trong lĩnh vực này ở nước ta bao gồm: Nghiên cứu của Bùi Thị Thu Hoài và cộng sự (2017) trình bày phương pháp nâng cao chất lượng ảnh sử dụng logic mờ loại 2. Mục tiêu của đề tài trên là cải thiện độ tương phản của hình ảnh ở mức thích hợp để nâng cao chất lượng ảnh đầu ra [10]. Nghiên cứu của Phan Văn Dư và cộng sự (2019) trình bày một bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 áp dụng cho robot 5 bậc tự do. Bộ điều khiển được đề xuất điều chỉnh các tham số của bộ điều khiển PID dựa trên một hệ thống mờ loại 2 để cải thiện chất lượng điều khiển cho các đối tượng phi tuyến mạnh, có độ không chắc chắn động và bất định lớn [11]. Nghiên cứu của Phạm Thị Hương Sen và đồng nghiệp (2021) giới thiệu thuật toán điều khiển mờ loại 2 kết hợp với điều khiển thích nghi cho xe tự hành để xử lý ma sát trượt và nhiễu ngoài. Bộ điều khiển được kiểm chứng bằng mô phỏng số trên Matlab-Simulink, và kết quả mô phỏng cho thấy hệ ổn định và có chất lượng bám tốt ngay cả khi tồn tại ma sát trượt và nhiễu không biết trước [12]. Tình hình nghiên cứu ngoài nước, trong thập kỷ gần đây, nghiên cứu về bộ điều khiển mờ loại 2 đã có những phát triển đáng kể và đa dạng. Công nghệ này đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu và các chuyên gia trong lĩnh vực điều khiển tự động, trí tuệ nhân tạo và hệ thống điều khiển phi tuyến tính. Dưới đây là một số nghiên cứu đáng chú ý về bộ điều khiển mờ loại 2 ngoài nước: Nghiên cứu của Amjad J Humaidi cùng cộng sự (2021) trình bày thiết kế bộ tối ưu thông số điều khiển logic mờ loại 2 ứng dụng cho việc điều khiển quỹ đạo của robot song song. Thuật toán Social Spider Optimization (SSO) đã

được đề xuất được đề xuất như một công cụ hữu ích để điều chỉnh các tham số của bộ điều khiển [13]. Nghiên cứu của Radu-Emil Precup (2021) tập trung vào việc tối ưu hóa bộ điều khiển mờ loại 2 cho các hệ thống servo phi tuyến bằng thuật toán Slime Mold. Các bộ điều khiển PI tuyến tính được điều chỉnh thông qua phương pháp tối ưu đối xứng mờ rộng, sử dụng tham số điều chỉnh mờ để tạo ra các bộ điều khiển mờ loại 2, với kết quả thử nghiệm cho thấy tính hiệu quả của phương pháp so với các thuật toán khác [14]. Nghiên cứu của Felizardo Cuevas cùng cộng sự (2022) trình bày ứng dụng của một biến thể của thuật toán lấy cảm hứng sinh học tối ưu hóa mùi cá mập (VSSO) trong thiết kế tối ưu của bộ điều khiển mờ loại 2. Bộ điều khiển được tối ưu hóa được thử nghiệm với khả năng điều hướng của rô-bốt di động tự hành trong một môi trường không xác định và luôn thay đổi. Việc áp dụng thuật toán VSSO trong bộ điều khiển mờ loại 2 thể hiện hiệu suất tốt hơn nhờ khả năng xử lý mức độ không chắc chắn cao hơn [15].

Tuy đã có nhiều nghiên cứu trong lĩnh vực tối ưu cho bộ điều khiển mờ loại 2 sử dụng các thuật toán hỗ trợ khác nhau [16], nhưng vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết để đạt được hiệu quả tối ưu tốt nhất cho bộ điều khiển mờ loại 2. Các thách thức này có thể bao gồm tính toán phức tạp trong các hệ thống phức tạp, tối ưu hóa đa mục tiêu, cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống, Do đó, để tiếp tục nghiên cứu và phát triển các phương pháp tối ưu hóa tham số cho bộ điều khiển mờ loại 2 là rất cần thiết và có ý nghĩa cao.

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là tối ưu hóa bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2 bằng cấu trúc đa lớp và hàm thành viên Wavelet nhằm nâng cao hiệu quả và độ chính xác của hệ thống điều khiển con lắc ngược. Nghiên cứu và phát triển hệ thống điều khiển cho cân bằng con lắc ngược dựa trên thuật toán mờ loại 2 không chỉ là một thách thức hứa hẹn mà còn là sứ mệnh quan trọng để đưa ra những giải pháp hiệu quả cho các vấn đề phức tạp trong thế giới thực. Con lắc ngược được xem xét như một thành phần chính trong các hệ thống điều khiển tự động và robot. Sự cân bằng của nó yêu cầu một hệ thống điều khiển không chỉ phức tạp mà còn linh hoạt, có khả năng đối mặt với sự không chắc chắn và biến động của môi trường. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh tính hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất trong việc điều khiển cân bằng con lắc ngược.

2. Cấu Trúc Bộ Điều Khiển MT2FLS



Hình 1. Cấu trúc bộ điều khiển MT2FLS.

Cấu trúc của bộ điều khiển MT2FLS được trình bày như trong hình 1. Về cơ bản cấu trúc của MT2FLS có thể chia thành 5 không gian: không gian đầu vào, không gian hàm thành viên, không gian kích hoạt mờ, không gian trọng số, và không gian đầu ra. Chức năng và hoạt động của từng không gian được mô tả như sau:

- a) Không gian đầu vào: không gian này được thiết kế để tích lũy dữ liệu đầu vào thành một vectơ, được biểu diễn dưới dạng:

$$\mathbf{I} = [i_1, i_2, \dots, i_{n_i}]^T \in \mathbb{R}^{n_i} \quad (1)$$

- b) Không gian hàm thành viên: không gian này được chia thành n_j lớp, mỗi lớp có n_k khối, mỗi khối chứa hàm thành viên Wavelet loại 2 (W2MF), mỗi W2MF được biểu diễn bằng hàm thành viên Wavelet trên và dưới như hình 2 và được tính toán bởi công thức sau:

$$\underline{\mu}_{ijk} = -\underline{F}_{ijk} \exp(-\underline{F}_{ijk}^2 / 2) \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_{ijk} = -\bar{F}_{ijk} \exp(-\bar{F}_{ijk}^2 / 2) \quad (3)$$

Trong đó $\bar{F}_{ijk}$ và $\underline{F}_{ijk}$ được cho bởi:

$$\underline{F}_{ijk} = \frac{(i_i - m_{ijk})}{\sigma_{ijk}} \quad (4)$$

$$\bar{F}_{ijk} = \frac{(i_i - m_{ijk})}{\bar{\sigma}_{ijk}} \quad (5)$$

- c) Không gian kích hoạt mờ: Trong không gian này, các giá trị kích hoạt mờ được tính toán bằng cách sử dụng thao tác t-norm.

$$\underline{\lambda}_k = \prod_{i=1}^{n_i} \underline{\mu}_{ijk} \quad (6)$$

$$\bar{\lambda}_k = \prod_{i=1}^{n_i} \bar{\mu}_{ijk} \quad (7)$$

- d) Không gian trọng số: Mỗi nút trong không gian này đóng vai trò như một trọng số kết nối liên kết lớp kích hoạt mờ với lớp đầu ra.

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{n_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{11} & \cdots & \mathbf{w}_{1n_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_{n_j1} & \cdots & \mathbf{w}_{n_jn_k} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_j n_k} \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{w}}_1 \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{w}}_{n_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{w}}_{11} & \cdots & \bar{\mathbf{w}}_{1n_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\mathbf{w}}_{n_j1} & \cdots & \bar{\mathbf{w}}_{n_jn_k} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_j n_k} \quad (9)$$

- e) Không gian đầu ra: Trong không gian này, mỗi nút tham gia vào một tính toán liên quan đến lớp kích hoạt mờ và không gian trọng số kết nối thông qua công thức giải mờ sau:

$$u_{T2FNN} = \frac{u_i + u_r}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{k=1}^{n_k} \underline{\lambda}_k \underline{w}_k}{\sum_{k=1}^{n_k} \underline{\lambda}_k} + \frac{\sum_{k=1}^{n_k} \bar{\lambda}_k \bar{w}_k}{\sum_{k=1}^{n_k} \bar{\lambda}_k} \right] \quad (10)$$

3. Thiết Kế Luật Thích Nghi Cho MT2FLS

Đầu tiên hàm mất mát Lyapunov được định nghĩa bởi $E(t) = \frac{1}{2}(e(t))^2$. Tiếp theo, sử dụng kỹ thuật giảm độ dốc cùng với quy tắc dây chuyền, chúng tôi xây dựng các phương trình cập nhật cho bộ điều khiển MT2FLS như sau:

$$\begin{aligned} \bar{w}_{jk}(t+1) &= \bar{w}_{jk}(t) - \eta_w \frac{\partial E(t)}{\partial \bar{w}_{jk}} \\ &= \bar{w}_{jk}(t) - \eta_w \left[\frac{\partial E(t)}{\partial u_{MT2FLS}} \frac{\partial u_{MT2FLS}}{\partial \bar{w}_{jk}} \frac{\partial \bar{u}_{MT2FLS}}{\partial \bar{w}_{jk}} \right] \\ &= \bar{w}_{jk}(t) - \frac{1}{2} \eta_w e(t) \frac{\bar{\lambda}_k}{\sum_{k=1}^{n_k} \bar{\lambda}_k} \end{aligned} \quad (11)$$

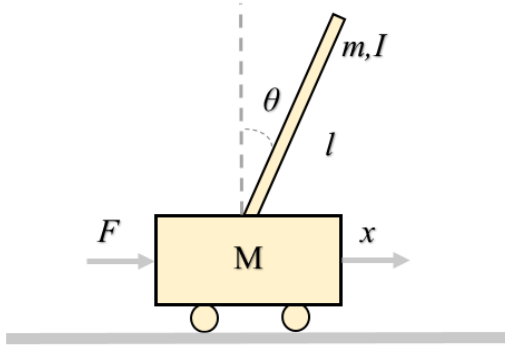
$$\begin{aligned} \underline{w}_{jk}(t+1) &= \underline{w}_{jk}(t) - \eta_w \frac{\partial E(t)}{\partial \underline{w}_{jk}} \\ &= \underline{w}_{jk}(t) - \eta_w \left[\frac{\partial E(t)}{\partial u_{MT2FLS}} \frac{\partial u_{MT2FLS}}{\partial \underline{w}_{jk}} \frac{\partial \underline{u}_{MT2FLS}}{\partial \underline{w}_{jk}} \right] \\ &= \underline{w}_{jk}(t) - \frac{1}{2} \eta_w e(t) \frac{\underline{\lambda}_k}{\sum_{k=1}^{n_k} \underline{\lambda}_k} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m_{ijk}(t+1) &= m_{ijk}(t) - \eta_m \frac{\partial E(t)}{\partial m_{ijk}} \\ &= m_{ijk}(t) - \eta_m \left[\frac{1}{2} \frac{\partial E(t)}{\partial u_{MT2FLS}} \left(\frac{\partial u_{MT2FLS}}{\partial \underline{\mu}_{ijk}} \frac{\partial \underline{\mu}_{ijk}}{\partial m_{ijk}} + \frac{\partial \bar{u}_{MT2FLS}}{\partial \bar{\mu}_{ijk}} \frac{\partial \bar{\mu}_{ijk}}{\partial m_{ijk}} \right) \right] \\ &= m_{ij}(t) - \frac{1}{2} \eta_m e(t) \left(\frac{w_k - \underline{u}_l}{\sum_{k=1}^{n_k} \underline{\lambda}_k} \right) \left(\underline{\lambda}_k \frac{(1 - F_{ijk}^2)}{(i_i - m_{ijk})} + \bar{\lambda}_k \frac{(1 - \bar{F}_{ijk}^2)}{(i_i - m_{ijk})} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

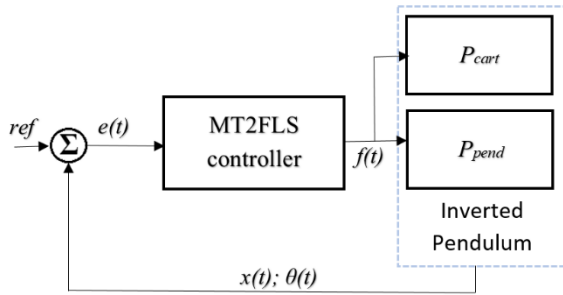
$$\begin{aligned} \sigma_{ijk}(t+1) &= \sigma_{ijk}(t) - \eta_\sigma \frac{\partial E(t)}{\partial \sigma_{ijk}} \\ &= \sigma_{ijk}(t) - \eta_\sigma \left[\frac{1}{2} \frac{\partial E(t)}{\partial u_{MT2FLS}} \frac{\partial u_{MT2FLS}}{\partial \underline{\mu}_{ijk}} \frac{\partial \underline{\mu}_{ijk}}{\partial \sigma_{ijk}} \right] \\ &= \sigma_{ijk}(t) - \frac{1}{2} \eta_\sigma e(t) \left(\frac{w_k - u_l}{\sum_{k=1}^{n_k} \underline{\lambda}_k} \right) \frac{(1 - F_{ijk}^2)}{(i_i - m_{ijk})} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ijk}(t+1) &= \bar{\sigma}_{ijk}(t) - \eta_\sigma \frac{\partial E(t)}{\partial \bar{\sigma}_{ijk}} \\ &= \bar{\sigma}_{ijk}(t) - \eta_\sigma \left[\frac{1}{2} \frac{\partial E(t)}{\partial \bar{u}_{MT2FLS}} \frac{\partial \bar{u}_{MT2FLS}}{\partial \bar{\mu}_{ijk}} \frac{\partial \bar{\mu}_{ijk}}{\partial \bar{\sigma}_{ijk}} \right] \\ &= \bar{\sigma}_{ij}(t) - \frac{1}{2} \eta_\sigma e(t) \left(\frac{\bar{w}_k - u_r}{\sum_{k=1}^{n_k} \bar{\lambda}_k} \right) \frac{(1 - \bar{F}_{ijk}^2)}{(i_i - m_{ijk})} \end{aligned} \quad (15)$$

4. Kết Quả Mô Phỏng



Hình 2. Mô hình vật lý hệ con lắc ngược.



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển con lắc ngược.

Mô hình vật lý của con lắc ngược được sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày ở Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển con lắc ngược sử dụng bộ điều khiển đề xuất MT2FLS được trình bày ở Hình 3. Các phương trình động học mô tả hệ con lắc ngược được biểu diễn như sau: [17]

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}(F - N - b\dot{x} + d) \quad (16)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I}(-Rl \cos \theta - Ql \sin \theta) \quad (17)$$

trong đó:

$$R = m(\ddot{x} - l\dot{\theta}^2 \sin \theta + l\ddot{\theta} \cos \theta);$$

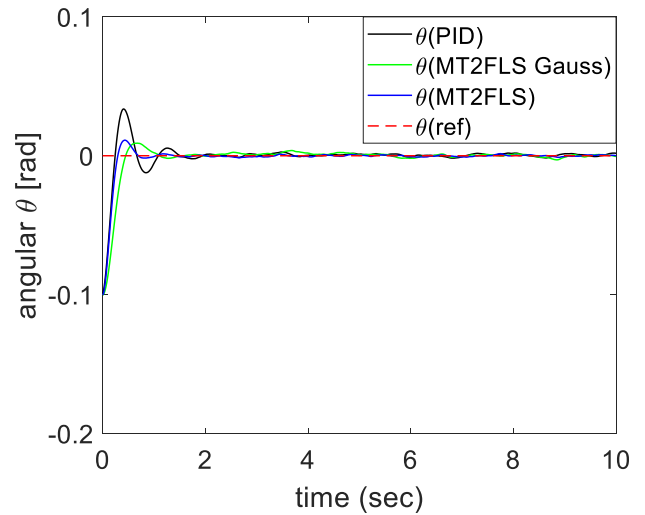
$$Q = m(l\dot{\theta}^2 \cos \theta + l\ddot{\theta} \sin \theta + g)$$

Trong đó M và m lần lượt là khối lượng của xe và khối lượng của con lắc; b và l lần lượt là hệ số ma sát của xe và chiều dài của con lắc; I và F lần lượt là mô men quán tính khối lượng của con lắc và lực tác dụng lên xe; x và θ lần lượt là tọa độ vị trí và góc con lắc so với phương thẳng đứng; d là nhiễu tác động lên con lắc.

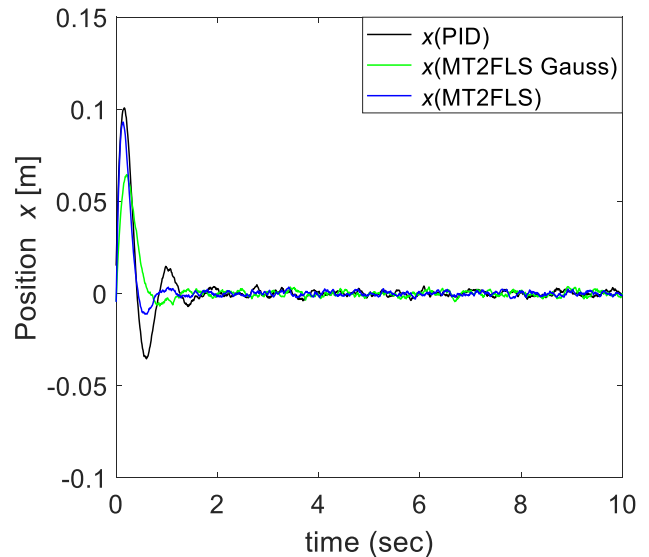
Mục tiêu chính của hệ thống điều khiển là đảm bảo điều khiển chính xác quỹ đạo tham chiếu của con lắc ngược. Trong chế độ điều khiển cân bằng, quỹ đạo tham chiếu được đặt là 0 . Thông số của con lắc được chọn là: $M=0,5\text{kg}$; $m=0,05\text{kg}$; $l=0,5\text{m}$; $b=0,1\text{N/m/s}$; $I=0,006\text{kg/m}^2$; $g=9,8$; góc ban đầu của con lắc được thiết lập là $\theta = 0,1 \text{ rad}$. Hiệu quả của bộ điều khiển MT2FLS được so sánh với bộ điều khiển adaptive PID (APID) được thiết kế ở [18]. Thông số khởi tạo của bộ điều khiển APID được chọn như sau: $Kp_a = 100$, $Ki_a = 0,5$, $Kd_a = 20$, $Kp_p = 50$, $Ki_p = 0,5$, $Kd_p = 10$. Thông số của bộ điều khiển đề xuất MT2FLS được chọn là: $n_i = 2$; $n_j = 2$; $n_k = 3$; $m_{11k} = m_{21k} [-0,3 \ 0 \ 0,3]$; $m_{12k} = m_{22k} [-0,5 \ 0 \ 0,5]$; $\sigma_{ijk} = 0,3$. Các vector trọng số

$\underline{w}$ và $\bar{w}$ được khởi tạo ngẫu nhiên và sẽ được cập nhật giá trị phù hợp dựa vào công thức (11) và (12). Nhiễu tác động lên con lắc được chọn là $d = (0,9 * \text{rand} - 0,45)$.

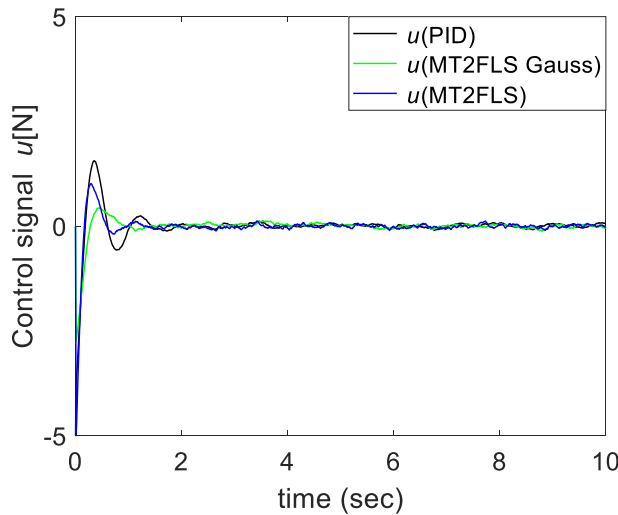
Các kết quả mô phỏng được trình bày trong hình 4-8 đã chứng minh sự hiệu quả của hệ thống điều khiển đề xuất MT2FLS trong việc đưa con lắc nhanh chóng đến vị trí cân bằng. Hình 4 minh họa sự phản ứng của con lắc theo quỹ đạo góc, trong khi Hình 5 trình bày cách hệ thống điều khiển giữ vị trí của con lắc. Hình 6 thể hiện tín hiệu điều khiển tác động vào con lắc. Hình 7 thể hiện sự quan sát sai số trong việc theo dõi góc của con lắc. Nhiễu tác động lên con lắc có thể quan sát trên Hình 8. Đánh giá hiệu suất của bộ thống điều khiển MT2FLS với hàm thành viên Wavelet được tiến hành so sánh với bộ điều khiển PID truyền thống và bộ điều khiển MT2FLS dùng hàm Gaussian thông thường. Kết quả cho thấy sai số Root Mean Square Error (RMSE) lần lượt là 0,018, 0,135 và 0,012 đối với PID, MT2FLS Gaussian và MT2FLS Wavelet. Điều này cho thấy hệ thống điều khiển MT2FLS với hàm thành viên Wavelet không chỉ đáp ứng nhanh hơn mà còn có sai số nhỏ hơn.



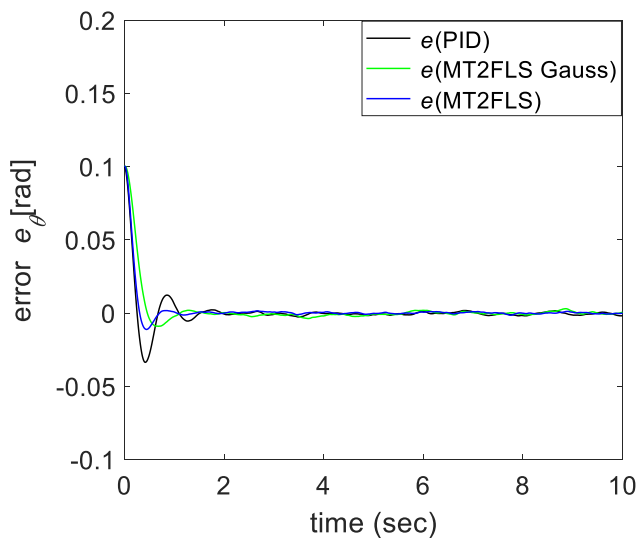
Hình 4. Đáp ứng góc lệch của con lắc ngược.



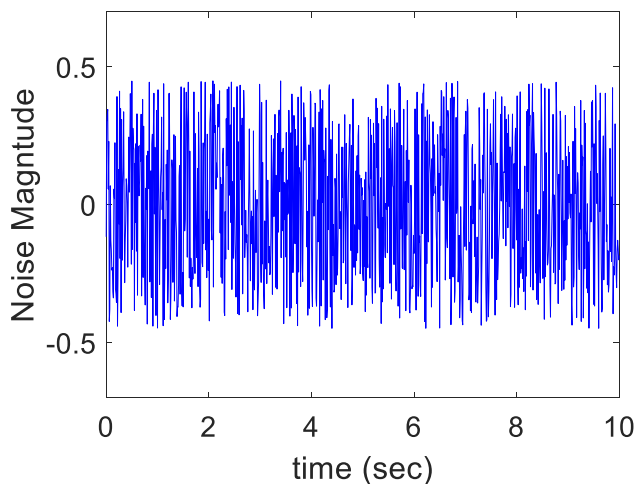
Hình 5. Đáp ứng vị trí của con lắc ngược.



Hình 6. Tín hiệu điều khiển tác động lên con lắc ngược.



Hình 7. Sai số góc lệch của con lắc ngược.



Hình 8. Nhiễu tác động lên con lắc ngược.

5. Kết Luận

Trong phạm vi nghiên cứu này, nhóm tác giả đã thành công áp dụng bộ điều khiển mờ loại 2 với cấu trúc đa lớp và hàm thành viên Wavelet để điều khiển hệ thống con lắc ngược. Phương pháp này đã cải thiện khả năng học và tính linh hoạt của hệ thống logic mờ loại 2. Sự tích hợp của cấu trúc đa lớp trong bộ điều khiển mờ loại 2 đã tăng cường khả năng thích ứng và hiệu suất của hệ thống. Các luật điều khiển thích ứng, dựa trên phương pháp hạ độ dốc đã được đề xuất để cập nhật động các tham số mạng, đảm bảo tối ưu hóa liên tục của bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng tập trung vào việc kiểm soát theo dõi quỹ đạo trong hệ thống con lắc đã chứng minh tính hiệu quả và khả năng áp dụng thực tế của phương pháp MT2FLS đề xuất.

6. Tài Liệu Tham Khảo

- [1] C.-M. Lin, V.-H. La, and T.-L. Le, "DC-DC converters design using a type-2 wavelet fuzzy cerebellar model articulation controller," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 7, pp. 2217-2229, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3755-z>
- [2] E. Bernal, M. L. Lagunes, O. Castillo, J. Soria, and F. Valdez, "Optimization of type-2 fuzzy logic controller design using the GSO and FA algorithms," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 42-57, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-00976-w>
- [3] K. Badri Narayanan and M. Sreeksumar, "Diagnosing of risk state in subsystems of CNC turning center using interval type-2 fuzzy logic system with semi elliptic membership functions," *International Journal of Fuzzy Systems*, pp. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40815-021-01172-0>
- [4] Y. Yang, Y. Niu, and Z. Zhang, "Dynamic event-triggered sliding mode control for interval type-2 fuzzy systems with fading channels," *ISA transactions*, vol. 110, pp. 53-62, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.035>
- [5] Y. Karabacak, A. Yaşar, and İ. Sarıtaş, "Regenerative Braking Control of Brushless DC Motors with Type 2 Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Fuzzy Systems*, pp. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40815-023-01555-5>
- [6] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets. Inf. Control," 1965. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [7] S. Farajdadian and S. H. Hosseini, "Design of an optimal fuzzy controller to obtain maximum power in solar power generation system," *Solar Energy*, vol. 182, pp. 161-178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.051>
- [8] O. Castillo, L. Amador-Angulo, J. R. Castro, and M. J. I. S. Garcia-Valdez, "A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems," vol. 354, pp. 257-274, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.026>
- [9] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I," *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)

- [10] Bùi Thị Thu Hoài, Ngô Thị Kiều Hằng, Vũ Thị Thành Vinh, "Nâng cao chất lượng ảnh sử dụng logic mờ loại hai", *Tạp chí khoa học - đại học Hà Tĩnh*, số 14, trang 21-34, 2018.
<https://sti.vista.gov.vn/tw/Lists/TaiLieuKHCN/Attachments/269719/CVv394S142018021.pdf>
- [11] P. V. Dư, N. H. L. Lê Văn Chương, H. S. Phương, T. H. Cường, and Đ. V. Nam, "Xây dựng giải pháp điều khiển thích nghi mờ loại 2 cho đối tượng robot 5 bậc tự do," *Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự*, số 60, tháng 4, 2019.
<https://science.vinhuni.edu.vn/science/article.aspx?l=0&bb=254295&hs=2450>
- [12] S. P. T. Huang, "Điều khiển bám quỹ đạo cho xe tự hành sử dụng bộ điều khiển thích nghi mờ loại 2," *Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự*, số 72, tháng 4, 2021.
<https://online.jmst.info/index.php/jmst/article/view/70>
- [13] A. J. Humaidi, H. T. Najem, A. Q. Al-Dujaili, D. A. Pereira, I. K. Ibraheem, and A. T. Azar, "Social spider optimization algorithm for tuning parameters in PD-like Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller applied to a parallel robot," *Measurement and Control*, vol. 54, no. 3-4, pp. 303-323, 2021.
<https://doi.org/10.1177/0020294021997483>
- [14] R.-E. Precup, R.-C. David, R.-C. Roman, A.-I. Szedlak-Stinean, and E. M. Petriu, "Optimal tuning of interval type-2 fuzzy controllers for nonlinear servo systems using Slime Mould Algorithm," *International Journal of Systems Science*, vol. 54, no. 15, pp. 2941-2956, 2023.
<https://doi.org/10.1080/00207721.2021.1927236>
- [15] F. Cuevas, O. Castillo, and P. Cortes, "Optimal setting of membership functions for interval type-2 fuzzy tracking controllers using a shark smell metaheuristic algorithm," *International Journal of Fuzzy Systems*, pp. 1-24, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40815-021-01136-4>
- [16] T.-T. Xu and J.-D. Qin, "A new representation method for type-2 fuzzy sets and its application to multiple criteria decision making," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1171-1190, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s40815-022-01432-7>
- [17] M. Waszak and R. Łangowski, "An automatic self-tuning control system design for an inverted pendulum," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26726-26738, 2020. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2971788>
- [18] Lin, Chih-Min, Ming-Hung Lin, and Chun-Wen Chen. "SoPC-based adaptive PID control system design for magnetic levitation system." *IEEE Systems journal*, vol 5, no. 2, pp. 278-287, 2011.
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2134530>