

ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT TẦNG CHO SPOTDOG ROBOT

FUZZY HIERARCHICAL SLIDING CONTROLLER FOR QUADRUPEL ROBOT WITH FAULT

Nguyễn Văn Trường^{1,*}, Hoàng Tiến Dũng¹, Dương Đại Nhân¹,
Phạm Thu Hà¹, Trần Quốc Bảo¹, Nguyễn Minh Sơn¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.064>

TÓM TẮT

Nghiên cứu duy trì sự ổn định cho Spotdog robot là vấn đề khó và phức tạp do tính chất phi tuyến của hệ, đòi hỏi phải nghiên cứu để hiểu rõ và đề xuất các giải pháp điều khiển hiệu quả. Trong bài báo này, bộ điều khiển mờ trượt tầng được phát triển cho SpotDog robot dưới tác động của nhiễu, trong đó tham số của bộ điều khiển trượt tầng được thích nghi dựa trên bộ điều khiển mờ. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất cho kết quả tốt hơn so với bộ điều khiển trượt, khắc phục được hiện tượng chattering và ổn định hệ thống khi bị nhiễu.

Từ khóa: Spotdog robot, điều khiển mờ, trượt tầng, nhiễu.

ABSTRACT

The paper presents the research on concentrating stability for Spotdog robot as a difficult and complex problem due to the nonlinear of the system, requiring research to understand and propose effective control solutions. In this paper, a fuzzy hierarchical sliding controll is developed for Spotdog robot under the influence of fault, in which the hierarchical sliding controller's parameter set is adapted based on the fuzzy controller. Simulation results show that the proposed controller gives better results than the sliding mode controller, overcoming the chattering and stabilizing the system when disturbed.

Keywords: Spotdog robot, Fuzzy logic control, HSMC, faults.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenvantruong@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/01/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 11/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

1. GIỚI THIỆU

Spotdog là một hệ robot có khả năng di chuyển bằng bốn chân trên nhiều địa hình khác nhau [1-4]. Điểm đặc biệt của SpotDog là khả năng di chuyển trong mọi hướng, ngay cả trong môi trường hạn chế không gian, nhờ vào thiết kế đặc biệt và hệ thống điều khiển phức tạp. Để đạt được sự linh hoạt này, SpotDog sử dụng các thông số

trạng thái như vị trí, vận tốc, góc nghiêng và tốc độ góc để tính toán và điều chỉnh các tín hiệu điều khiển. Tuy nhiên, với tính chất phi tuyến và độ phức tạp cao của hệ thống này, việc điều khiển SpotDog yêu cầu những thuật toán điều khiển thông minh để đảm bảo tính ổn định và hiệu suất vận hành.

Để điều khiển cân bằng cho SpotDog, ta có thể sử dụng một số phương pháp như điều khiển proportional integral derivative (PID). Trong các nghiên cứu [5, 6], bộ điều khiển PID đã được sử dụng để duy trì sự cân bằng của các robot tự cân bằng, dựa trên nguyên lý của một con lắc ngược. Mặc dù bộ điều khiển PID có ưu điểm về cấu trúc đơn giản và dễ triển khai, nhưng khả năng đáp ứng phi tuyến và tính thích nghi của nó trước các điều kiện môi trường nhiễu còn hạn chế.

Điều khiển mờ (Fuzzy Logic Controller) là một trong những giải pháp điều khiển thông minh cho các hệ thống phi tuyến như SpotDog. Nghiên cứu của Nguyen [7] đã chứng minh hiệu suất của bộ điều khiển fuzzy qua các thử nghiệm, với dữ liệu đo lường và điều khiển được thực hiện từ xa. M. Goharimanesh và các đồng nghiệp [8] đã sử dụng bộ điều khiển fuzzy cho hệ thống robot để đảm bảo sự cân bằng. Bộ điều khiển fuzzy thích ứng [9, 10] cho phép điều chỉnh các quy tắc theo các phương pháp khác nhau, tuy nhiên, việc triển khai thực tế gặp khó khăn do khối lượng tính toán lớn và khó thiết lập quy tắc.

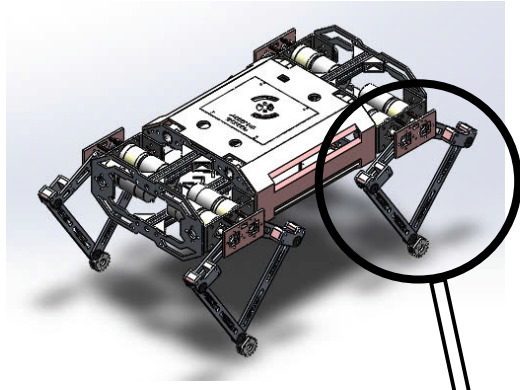
Để giải quyết những hạn chế của các phương pháp trên, bộ điều khiển mờ trượt tầng (Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control (FHS MC)) đã được đề xuất cho hệ thống SpotDog robot. FHS MC có cấu trúc đơn giản, thời gian đáp ứng nhanh và dễ thực hiện, đồng thời có khả năng chống nhiễu và sự cố. Phương pháp mô phỏng đã được sử dụng để đánh giá hiệu quả của FHS MC, cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ ổn định và hiệu suất cũng như khả năng xử lý các hệ thống phi tuyến và không cần mô hình toán học chính xác. Điều này rất phù hợp với

SpotDog, một hệ thống robot di động có nhiều yếu tố phi tuyến khi di chuyển trên các địa hình phức tạp.

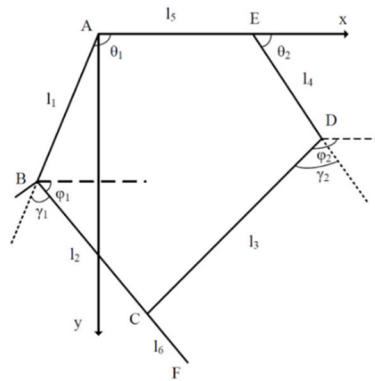
2. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA SPOTDOG

2.1. Động học SpotDog robot

SpotDog là robot bốn chân, cơ cấu chân được cấu tạo từ năm thanh được trình bày như hình 1(a). Chân của robot được điều khiển bằng động cơ được gắn trên thân.



(a) Cấu trúc của SpotDog



(b) Cấu trúc một chân

Hình 1. Mô hình SpotDog

Mỗi chân có thể được mô hình hóa như cơ cấu năm thanh trong hình 1(b). Gốc tọa độ được đặt tại điểm A. Hướng dương của trục x chỉ vào trung tâm của cơ thể robot theo phương ngang. Hướng dương của trục y chỉ vào bàn chân theo phương thẳng đứng. Các điểm B, C, D biểu thị các khớp thụ động di chuyển cùng với các khớp động. Điểm F đặt tại tâm của bàn chân - mục tiêu điều khiển. Dựa trên các đặc điểm được hiển thị trong hình 1(b), tọa độ x_F và y_F của điểm F có thể được tính toán.

$$\begin{cases} x_F = l_1 \cos \theta_1 + (l_2 + l_6) \cos \varphi_1 \\ y_F = l_1 \sin \theta_1 + (l_2 + l_6) \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_F = l_5 + l_4 \cos \theta_2 + l_3 \cos \varphi_2 + l_6 \cos \varphi_1 \\ y_F = l_4 \sin \theta_2 + l_3 \sin \varphi_2 + l_6 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (2)$$

Từ (1), (2) suy ra:

$$(l_2 + l_6)^2 + 2l_1 \cos \theta_1 x_F + 2l_1 \sin \theta_1 y_F - l_1^2 - x_F^2 - y_F^2 = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_F^2 + y_F^2 - 2(l_5 + l_6 \cos \varphi_1)x_F + 2l_5 l_6 \cos \varphi_1 \\ - 2l_6 y_F \sin \varphi_1 + l_4^2 l_5^2 l_6^2 - l_3^2 \\ + 2(l_4 l_5 - l_4 x_F + l_4 l_6 \cos \varphi_1) \cos \theta_2 \\ + 2(l_4 l_6 \sin \varphi_1 - l_4 y_F) \sin \theta_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó:

A, B, C, D, E, F: Các điểm khớp trong cơ cấu chân.

θ_1, θ_2 : Các góc khớp chính được điều khiển để thay đổi vị trí của chân.

φ_1, φ_2 : Góc của chân dưới tại các khớp với mặt đất.

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$: Chiều dài các đoạn thanh nối trong cơ cấu chân.

x, y : Hệ tọa độ biểu diễn vị trí của chân robot so với cơ thể robot hoặc mặt đất.

Suy ra:

$$\tan \frac{\theta_1}{2} = \frac{U + \sqrt{U^2 + V^2 - W^2}}{V - W} \quad (5)$$

$$\tan \frac{\theta_2}{2} = \frac{u + \sqrt{u^2 + v^2 - w^2}}{v - w} \quad (6)$$

Trong đó:

$$U = 2l_1 y_F, V = 2l_1 x_F, W = (l_2 + l_6)^2 - l_1^2 - x_F^2 - y_F^2.$$

$$u = 2(l_4 l_6 \sin \varphi_1 - l_4 y_F), v = 2(l_4 l_5 - l_4 x_F + l_4 l_6 \cos \varphi_1),$$

$$\begin{aligned} w = x_F^2 + y_F^2 - 2(l_5 + l_6 \cos \varphi_1)x_F + 2l_5 l_6 \cos \varphi_1 \\ - 2l_6 \sin \varphi_1 y_F - l_3^2 + l_4^2 + l_5^2 + l_6^2 \end{aligned}$$

Khi đó φ_1 được tính như sau:

$$\varphi_1 = \arccos \frac{l_1^2 + (l_2 + l_6)^2 - l_{AF}^2}{2l_1(l_2 + l_6)} + \theta_1 - \pi \quad (7)$$

Trong đó: l_{AF} là độ dài đoạn AF, θ_1 được xác định ở phương trình (5).

2.2. Động lực học SpotDog robot

Phương trình động lực học cho chân của spotdog robot được xác định như sau:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \xi = \tau(t) \quad (8)$$

Trong đó, $q = [q_1 \ q_2]^T$, $\dot{q} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2]^T$ với $q_1 = \theta_1$ và $q_2 = \theta_2$, $D(q)$ biểu diễn ma trận quán tính, $C(q, \dot{q})$ là ma trận Coriolis, $g(q)$ là vector trọng lực của momen điều khiển, ξ là nhiễu của hệ thống.

Ta có phương trình trạng thái không gian hệ thống:

$$\dot{X} = f(X) + G(X)\tau \quad (9)$$

Trong đó:

$$X = \begin{bmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ -D^{-1}(q)(C(q, \dot{q})\dot{q} + G_1(q))_1 \\ \dot{q}_2 \\ -D^{-1}(q)(C(q, \dot{q})\dot{q} + G_1(q))_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$G(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -D^{-1}(q) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -D^{-1}(q) \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT TẮNG CHO SPOTDOG ROBOT

Cấu trúc mặt trượt tầng được biểu diễn như hình 2. Mặt trượt cấp 1 của hệ thống SpotDog được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} s_{x1} = \lambda_{x1}e_{x1} + \dot{e}_{x1} \\ s_{x2} = \lambda_{x2}e_{x2} + \dot{e}_{x2} \end{cases} \quad (14)$$

Với $e_{x1} = q_{1r} - q_1$, $e_{x2} = q_{2r} - q_2$, q_{1r} và q_{2r} lần lượt là giá trị mong muốn của góc q_1 và q_2 , λ_{x1} và λ_{x2} là tham số điều chỉnh tốc độ hội tụ với $\lambda_{x1}, \lambda_{x2} > 0$.

$$\begin{cases} s_{x1} = \lambda_{x1}(q_{1r} - q_1) + (\dot{q}_{1r} - \dot{q}_1) \\ s_{x2} = \lambda_{x2}(q_{2r} - q_2) + (\dot{q}_{2r} - \dot{q}_2) \end{cases} \quad (15)$$

Đặt $\dot{s}_{x1} = 0$ và $\dot{s}_{x2} = 0$, luật điều khiển tương đương của hai hệ thống con có thể đạt được là:

$$\begin{cases} \tau_{xht1} = -G_1^{-1}(q)[\lambda_{x1}\dot{q}_{1r} + f_1(q, \dot{q})] \\ \tau_{xht2} = -G_2^{-1}(q)[\lambda_{x2}\dot{q}_{2r} + f_2(q, \dot{q})] \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó, $G_1(q)$ và $G_2(q)$ được tính theo công thức (13).

Luật SMC phân cấp được suy luận như sau: Các mặt trượt lớp đầu tiên được định nghĩa là $S_{x1} = s_{x1}$. Đối với lớp mặt trượt đầu tiên, luật SMC và hàm Lyapunov [11, 12] được xác định là:

$$\tau_{x1} = \tau_{xht1} + \tau_{xct1} \quad (17)$$

$$V_{x1}(t) = \frac{1}{2}S_{x1}^2 \quad (18)$$

Trong đó, τ_{xct1} là phần điều khiển chuyển tiếp của lớp đầu tiên SMC.

Đạo hàm $V_{x1}(t)$ theo thời gian t :

$$\dot{V}_{x1}(t) = -k_{x1}S_{x1}^2 - S_{x1}\eta_{x1}\text{sign}(S_{x1}) \quad (19)$$

Trong đó, k_{x1} và η_{x1} là các hằng số dương. Luật SMC lớp đầu tiên có thể được suy ra như sau:

$$\tau_{x1} = \tau_{xht1} + -G_2^{-1}(q)\dot{S}_{x1} \quad (20)$$

Mặt trượt lớp thứ hai được xây dựng như sau:

$$S_{x2} = \zeta_x S_{x1} + s_{x2} \quad (21)$$

Trong đó, ζ_x là tham số điều chỉnh độ trượt.

Đối với mặt trượt lớp thứ hai, luật SMC và hàm Lyapunov được định nghĩa là:

$$\tau_2 = \tau_1 + \tau_{xht2} + \tau_{xct2} \quad (22)$$

$$V_{x2}(t) = \frac{1}{2}S_{x2}^2 \quad (23)$$

Trong đó, τ_{xct2} là phần điều khiển chuyển tiếp của lớp thứ hai.

Đạo hàm $V_{x2}(t)$ theo thời gian t ta có:

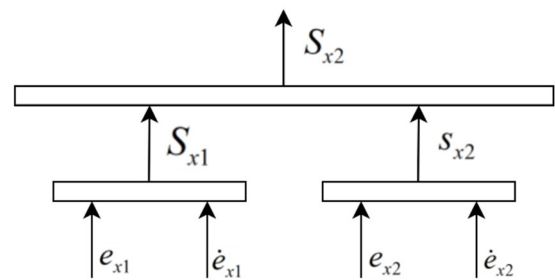
$$\dot{V}_{x2}(t) = -k_{x2}S_{x2}^2 - S_{x2}\eta_{x2}\text{sign}(S_{x2}) \quad (24)$$

Trong đó, k_{x2} và η_{x2} là các hằng số dương. Tín hiệu điều khiển của bộ HSMC cho động cơ thứ nhất được suy ra như sau:

$$\tau_{x2} = \frac{c_x G_1(q)\tau_{xht1} + G_2(q)\tau_{xht2} - k_{x2}S_{x2} - \eta_{x2}\text{sign}(S_{x2})}{c_x G_1(q) + G_2(q)} \quad (25)$$

Tương tự, tín hiệu điều khiển cho động cơ thứ 2 có thể được biểu diễn như sau:

$$\tau_{y2} = \frac{c_y G_1(q)\tau_{yht1} + G_2(q)\tau_{yht2} - k_{y2}S_{y2} - \eta_{y2}\text{sign}(S_{y2})}{c_y G_1(q) + G_2(q)} \quad (26)$$



Hình 2. Cấu trúc mặt trượt tầng

Tính ổn định của hệ thống được chứng minh như sau: Phương trình Lyapunov lớp thứ i được chọn có dạng:

$$V_{xi}(t) = \frac{1}{2}S_{xi}^2 \quad (27)$$

Đạo hàm $V_{xi}(t)$ theo thời gian t ta có:

$$V_{xi} = S_i \dot{S}_i = S_i (-k_i S_i - \eta_i \text{sign}(S_i)) = -k_i S_i^2 - S_i \eta_i \text{sign}(S_i) \quad (28)$$

Tích phân hai vế ta được:

$$\int_0^t \dot{V}_{xi} d\tau = \int_0^t (-\eta_{xi} |S_{xi}| - k_{xi} S_{xi}^2) d\tau \quad (29)$$

Ta có:

$$V_{xi}(0) = V_{xi}(t) + \int_0^t (\eta_{xi} |S_{xi}| + k_{xi} S_{xi}^2) d\tau \geq \int_0^t (\eta_{xi} |S_{xi}| + k_{xi} S_{xi}^2) d\tau \quad (30)$$

Vì vậy:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^t (\eta_{xi} |S_{xi}| + k_{xi} S_{xi}^2) d\tau \leq V_{xi}(0) < \infty \quad (31)$$

Theo bổ đề Barbalat có tồn tại $\lim_{x \rightarrow \infty} (\eta_{xi} |S_{xi}| + k_{xi} S_{xi}^2) d\tau \leq V_{xi}(0) < \infty$, có thể suy ra rằng nếu $t \rightarrow \infty$ thì $\eta_{xi} |S_{xi}| + k_{xi} S_{xi}^2 \rightarrow 0$. Điều này có nghĩa là giới hạn $\lim_{x \rightarrow \infty} S_{xi} = 0$. Vậy ta có mặt trượt S thứ i ổn định tiệm cận.

Để tối ưu hóa và tăng cường khả năng thích nghi của bộ điều khiển HSMC, một bộ điều khiển mờ được tích hợp nhằm điều chỉnh các tham số của HSMC một cách linh hoạt. Việc sử dụng bộ điều khiển mờ cho phép thích nghi với các biến động của hệ thống và môi trường, đảm bảo hiệu suất điều khiển cao hơn mà vẫn giữ được các ưu điểm của HSMC, đặc biệt là khả năng ổn định tiệm cận và chống nhiễu. Sơ đồ bộ điều khiển FHSMC được biểu diễn như hình 3 với đầu vào là vị trí đặt q_{1r}, q_{2r} cung cấp tín hiệu cho bộ điều khiển HSMC thông qua tính toán để đưa ra tín hiệu điều khiển cho từng khớp chân. Bộ điều khiển mờ được đưa vào cấu trúc điều khiển cung cấp các giá trị $\{\lambda_{x1}, \lambda_{x2}, c_x, \eta_{x2}, k_{x2}, \lambda_{y1}, \lambda_{y2}, c_y, \eta_{y2}, k_{y2}\}$ cho bộ điều khiển HSMC, dựa theo điều kiện hiện tại của sai số e_x và e_y .

Ngõ vào của bộ điều khiển fuzzy là e_x và e_y , được mờ hoá bởi 3 tập {NB, ZE, PB}. Trong đó NB là Negative Big, ZE là Zero, PB là Positive Big. Hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ vào được sử dụng là hàm Gauss:

$$\sigma_{y^i}(x) = \exp\left(-\frac{(c_i - x)^2}{2\lambda_i^2}\right) \quad (32)$$

Trong đó, c_i và λ_i là hoành độ tâm và độ rộng của tập mờ y_i tương ứng.

Miền xác định của các biến ngõ vào của bộ điều khiển fuzzy là:

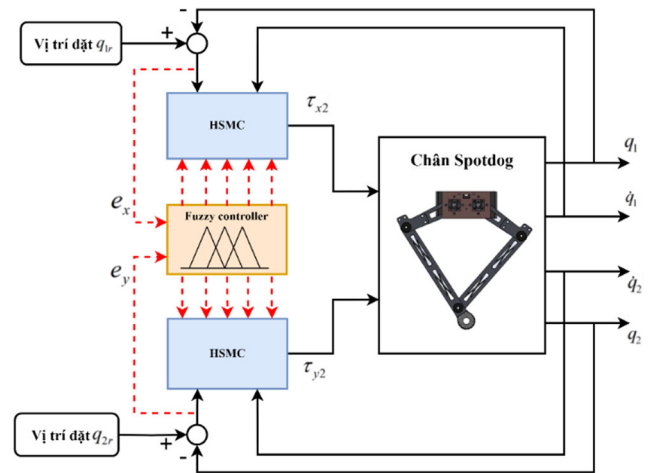
$$\begin{aligned} e_1 &\in [e_{1\min}, e_{1\max}] \\ e_2 &\in [e_{2\min}, e_{2\max}] \end{aligned} \quad (33)$$

Các ngõ ra mờ được mờ hoá bằng tập {LOW, MED, HIG}. Trong đó LOW là Low, MED là Medium, HIG là High.

Bảng luật của bộ điều khiển fuzzy được trình bày như bảng 1. Hàm liên thuộc của các tập mờ ngõ ra được sử dụng dạng tam giác:

$$\sigma_{y^i}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x < \beta \\ \frac{x - \delta}{\beta - \delta} & \beta \leq x \leq \delta \\ 0 & x \geq \delta \end{cases} \quad (34)$$

Với α, β, δ là hoành độ 3 đỉnh của tập mờ.



Hình 3. Sơ đồ bộ điều khiển FHSMC

Ta có luật của bộ điều khiển fuzzy như sau:

$$\text{If } e_x = \text{NB and } e_y = \text{PB THEN } c_{x1} = \text{LOW}, \dots, k_{y2} = \text{HIGH} \quad (35)$$

Cơ chế suy diễn mờ được chọn là MAX-MIN và giải mờ theo nguyên lý trung bình của phương pháp cực đại, ta có:

$$\{\lambda_{x1}, \lambda_{x2}, c_x, \eta_{x2}, k_{x2}, \lambda_{y1}, \lambda_{y2}, c_y, \eta_{y2}, k_{y2}\} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \sigma_{y^i}}{\sum_{i=1}^R \sigma_{y^i}} \quad (36)$$

Với b_i là hoành độ điểm trung bình xác định bởi luật thứ i trong R luật tác động tại thời điểm xem xét.

Bảng 1. Bảng luật của bộ điều khiển Fuzzy

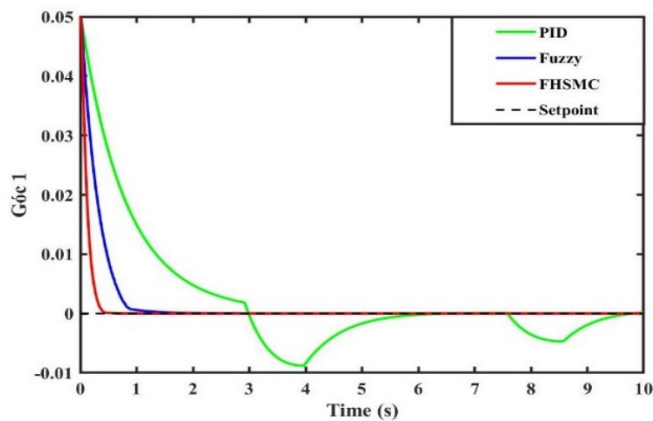
		λ_{x1}	λ_{x2}	c_x	η_{x2}	k_{x2}	λ_{y1}	λ_{y2}	c_y	η_{y2}	k_{y2}
e_x	NB	LOW	HIGH	LOW	LOW	HIGH	LOW	HIGH	LOW	LOW	HIGH
	ZE	MED	MED	MED	MED	MED	MED	MED	MED	MED	MED
	PB	HIGH	LOW	LOW	HIGH	MED	HIGH	LOW	LOW	HIGH	MED

4. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

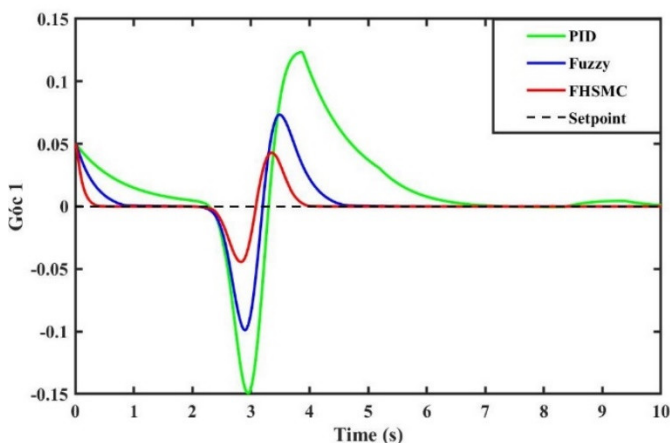
Các thông số động học của hệ thống chân SpotDog là $l_1 = l_4 = 0,1\text{m}$; $l_2 = l_3 = 0,2\text{m}$; $l_5 = 0,05\text{m}$; $l_6 = 0,02\text{m}$;

$m = 0,1\text{kg}$; $M = 3\text{kg}$; $\xi = 0,25\pi\text{rad}$; $g = 9,8\text{m/s}^2$. Thông số khởi tạo của bộ điều khiển FHSMC là $\lambda_{x1} = 0,6$; $\lambda_{x2} = 0,5$; $\varsigma_x = 0,2$; $\eta_{x2} = 6$; $k_{x2} = 10$; $\lambda_{y1} = 0,65$; $\lambda_{y2} = 0,4$; $\varsigma_y = 0,2$; $\eta_{y2} = 5$; $k_{y2} = 10$.

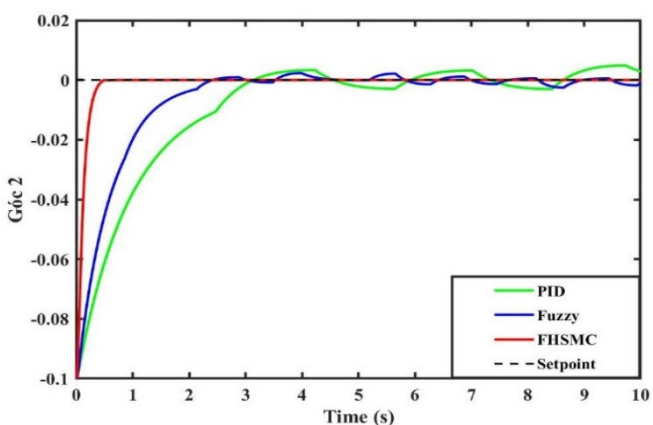
Để cho thấy hiệu suất đã được cải thiện, bộ điều khiển đề xuất được so sánh với bộ điều khiển PID và Fuzzy trong các trường hợp không chịu nhiễu và chịu nhiễu fault với giá trị là $\xi(t) = 0,25\pi$, $t \in [3, 4]\text{s}$.



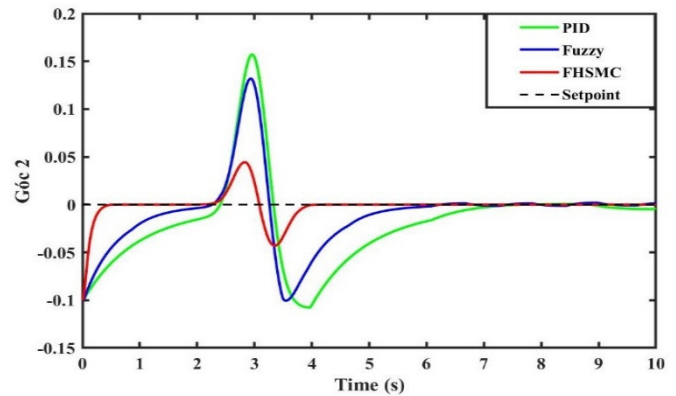
(a)



(b)



(c)



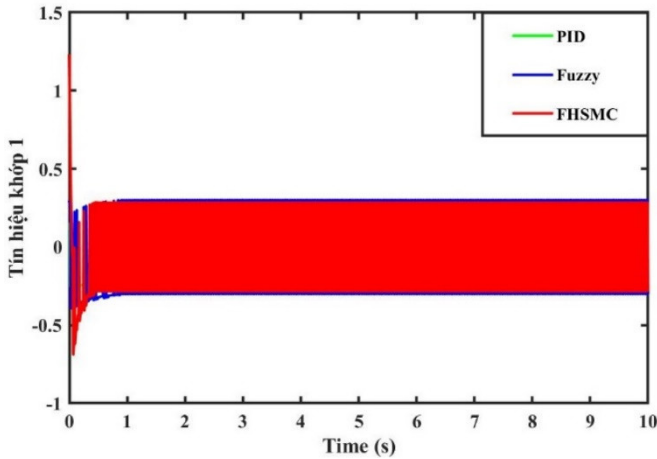
(d)

Hình 4. Sai số điều khiển: (a) Sai số góc q_1 trường hợp không nhiễu; (b) Sai số góc q_1 trường hợp có nhiễu; (c) Sai số góc q_2 trường hợp không nhiễu; (d) Sai số góc q_2 trường hợp có nhiễu

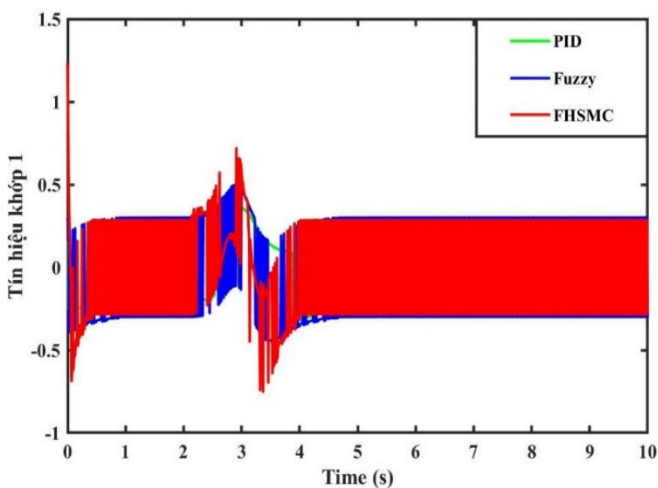
Kết quả đánh giá sai số điều khiển được thể hiện trong hình 4. Cho thấy rằng bộ điều khiển FHSMC có hiệu suất vượt trội so với PID và Fuzzy trong cả hai trường hợp có và không có nhiễu. Khi không có nhiễu, FHSMC đạt được thời gian đáp ứng nhanh nhất, hội tụ nhanh về giá trị mong muốn mà không có quá điều chỉnh lớn, trong khi Fuzzy có hiệu suất tốt hơn PID nhưng vẫn tồn tại sai số nhỏ trong trạng thái ổn định. Ngược lại, PID có dao động lớn, thời gian ổn định lâu và sai số ban đầu cao. Khi có nhiễu, FHSMC vẫn duy trì được độ ổn định tốt nhất với dao động thấp và thời gian hội tụ nhanh, trong khi Fuzzy bị ảnh hưởng bởi nhiễu nhưng vẫn hoạt động tốt hơn PID. Bên cạnh đó, PID thể hiện sự kém hiệu quả nhất khi có nhiễu, với dao động mạnh và thời gian ổn định kéo dài. Như vậy, FHSMC là lựa chọn tối ưu nếu yêu cầu về độ chính xác và khả năng chống nhiễu cao, trong khi PID có hiệu suất thấp hơn đáng kể và dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu. Hình 5 thể hiện tín hiệu điều khiển cho 2 góc, cho thấy bộ điều khiển FHSMC có chất lượng điều khiển tốt. Trong trường hợp không có nhiễu, FHSMC duy trì tín hiệu điều khiển ổn định hơn so với PID và Fuzzy, với biên độ dao động nhỏ hơn. Khi có nhiễu, PID và Fuzzy thể hiện sự dao động mạnh hơn, trong khi FHSMC vẫn duy trì độ ổn định cao hơn, cho thấy khả năng chống nhiễu tốt hơn. Nhìn chung, FHSMC mang lại chất lượng điều khiển tốt nhất, đặc biệt trong môi trường có nhiễu, giúp hệ thống vận hành ổn định và hiệu quả hơn.

Để đánh giá chất lượng điều khiển, phương pháp căn bậc hai bình phương (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE) được sử dụng và trình bày trong bảng 2. Khi so sánh kết quả mô phỏng của ba bộ điều khiển, có thể thấy hệ thống được đề xuất thể hiện hiệu suất vượt trội. Điều

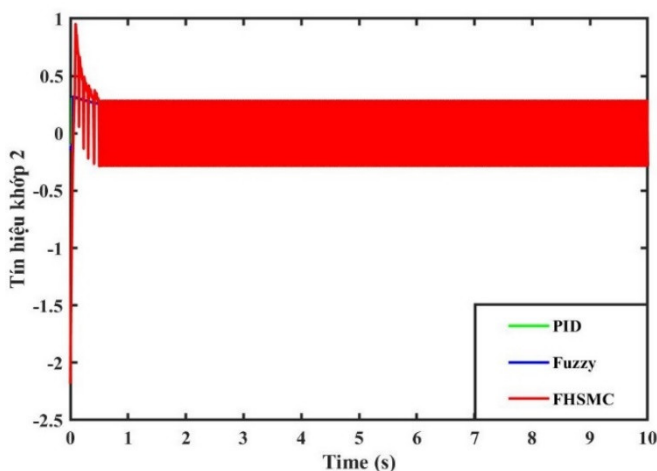
này được chứng minh bằng các giá trị loại lỗi thấp hơn và thời gian chịu nhiễu kéo dài. Như vậy, FHSMC được chứng minh là giải pháp điều khiển hiệu quả hơn về tốc độ đáp ứng và khả năng chống chịu nhiễu.



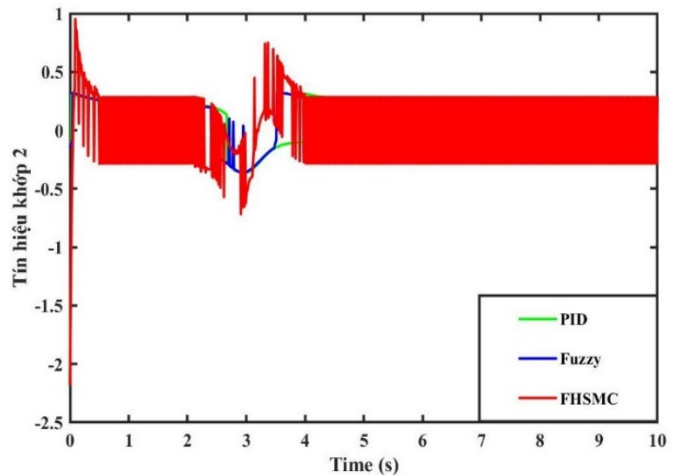
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 5. Tín hiệu điều khiển: (a) Cho q_1 trường hợp không nhiễu; (b) Cho q_1 trường hợp có nhiễu; (c) Cho q_2 trường hợp không nhiễu; (d) Cho q_2 trường hợp có nhiễu

Bảng 2. So sánh lỗi giữa bộ điều khiển PID, Fuzzy và FHSMC trường hợp không nhiễu

	RMSE q_1	RMSE q_2	MAE q_1	MAE q_2
PID	0,7203	0,3014	0,3193	0,1092
Fuzzy	0,2957	0,5329	0,0922	0,2317
FHSMC	0,2325	0,4053	0,0568	0,1948

5. KẾT LUẬN

Bài báo này thiết kế bộ điều khiển FHSMC cho hệ thống SpotDog. Bộ điều khiển FHSMC giúp nâng cao tốc độ hội tụ của hệ thống và đảm bảo tính ổn định của hệ thống. Qua các kết quả mô phỏng, phương pháp này đã chứng minh rằng kỹ thuật đề xuất trên có hiệu suất được cải thiện vượt trội so với bộ điều khiển PID và Fuzzy thông thường. Trong các nghiên cứu tiếp theo, các phương pháp điều khiển thông minh khác tiếp tục áp dụng để cải thiện hiệu suất của bộ điều khiển FHSMC, mở ra hướng đi mới cho các ứng dụng điều khiển hiện đại.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội thông qua nhiệm vụ khoa học và công nghệ mã số 44-2024-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Moses Jeremy, Geoffrey Ford, "See Spot save lives: fear, humanitarianism, and war in the development of robot quadrupeds," *Digital War*, 2.1-3: 64, 2021.

- [2]. Biswal Priyaranjan, Prases K. Mohanty, "Development of quadruped walking robots: A review," *Ain Shams Engineering Journal*, 12.2: 2017-2031, 2021.
- [3]. Taheri Hamid, Nasser Mozayani, "A study on quadruped mobile robots," *Mechanism and Machine Theory*, 190: 105448, 2023.
- [4]. Fan, Yanan, et al. "A Review of Quadruped Robots: Structure, Control, and Autonomous Motion," *Advanced Intelligent Systems* (2024): 2300783.
- [5]. Nguyen Van-Truong, et al., "Robust adaptive nonlinear PID controller using radial basis function neural network for ballbots with external force," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 61: 101914, 2025.
- [6]. Nguyen Van-Truong, et al., "Adaptive Nonlinear PD Controller of Two-Wheeled Self-Balancing Robot with External Force," *Computers, Materials & Continua*, 81.2, 2024.
- [7]. Nguyen Van-Truong, et al., "Design and Experiment of Interval Type-2 Fuzzy Hierarchical Sliding-Mode Control for Pendubot With Uncertainties," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024.
- [8]. Goharimanesh Masoud, Ali Mehrkish, Farrokh Janabi-Sharifi, "A fuzzy reinforcement learning approach for continuum robot control," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 100.3: 809-826, 2020.
- [9]. Nguyen Van-Truong, et al., "Finite-time adaptive fuzzy tracking control design for parallel manipulators with unbounded uncertainties," *International Journal of Fuzzy Systems*, 21: 545-555, 2019.
- [10]. Nguyen Van-Truong, et al., "Novel adaptive fuzzy control for pendubot with actuator faults and uncertainties: Design and experiments," *Results in Engineering*, 24: 102916, 2024.
- [11]. Dass Anuli, Smriti Srivastava, Rajesh Kumar, "A novel Lyapunov-stability-based recurrent-fuzzy system for the Identification and adaptive control of nonlinear systems," *Applied Soft Computing*, 137: 110161, 2023.
- [12]. Mondié Sabine, Alexey Egorov, Marco A. Gomez, "Lyapunov stability tests for linear time-delay systems," *Annual Reviews in Control*, 54: 68-80, 2022.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Truong, Hoang Tien Dzung, Duong Dai Nhan,
Pham Thu Ha, Tran Quoc Bao, Nguyen Minh Son**

Hanoi University of Industry, Vietnam