

BÙ VÙNG CHẾT CHO ROBOT ỨNG DỤNG LOGIC MỜ

DEAD-ZONE COMPENSATION FOR ROBOT USING FUZZY LOGIC

Vũ Thị Yến¹, Phạm Văn Cường^{1,*},
Trần Kim Thành¹, Nguyễn Đăng Toàn¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.144>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một bộ điều khiển trượt thích nghi điều khiển cho robot ứng dụng logic mờ bù vùng chết. Robot là một đối tượng phi tuyến nhiều đầu vào đầu ra, bất định về mô hình và trong quá trình làm việc luôn xuất hiện vùng chết. Vùng chết trong các cơ cấu chấp hành và truyền động là một yếu tố phi tuyến giảm độ chính xác cũng như ảnh hưởng đến khả năng ổn định của hệ thống điều khiển robot. Nếu vùng chết không được xử lý, nó sẽ gây ra sai lệch, làm giảm chất lượng bám. Để giải quyết ảnh hưởng của vùng chết đến chất lượng của hệ thống điều khiển, phương pháp bù vùng chết dựa trên logic mờ được đưa ra giúp cải thiện hiệu suất làm việc và đảm bảo sự ổn định của hệ thống. Bộ bù mờ được thiết kế để ước lượng trực tuyến đặc tính vùng chết bất định và tích hợp vào vòng điều khiển nhằm giảm ảnh hưởng tính phi tuyến mà không cần mô hình chính xác. Luật điều khiển online được đưa ra dựa trên thuyết ổn định Lyapunov. Để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng trên robot 2 bậc tự do và so sánh kết quả giữa hai trường hợp không bù vùng chết và khi bù vùng chết. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển bù vùng chết giúp cải thiện đáng kể khả năng bám và tăng tính bền vững cho hệ thống so với phương pháp điều khiển không bù vùng chết.

Từ khóa: Bù vùng chết, điều khiển trượt, logic mờ, robot.

ABSTRACT

This paper proposes an adaptive sliding-mode controller for robots using fuzzy logic-based dead-zone compensation. The robot is a MIMO system with model uncertainties, and dead zones frequently occur during operation. Dead zones (DZ) in actuators and drive mechanisms are a nonlinear factor that reduces accuracy and affects the stability of the robot control system. If not properly handled, dead zones can cause steady-state errors and degrade tracking performance. To mitigate the influence of dead zones on control quality, a fuzzy logic-based dead-zone compensation method is developed to improve system performance and ensure stability. The fuzzy compensator is designed to estimate the unknown DZ characteristics online and is integrated into the control loop to reduce nonlinear effects without requiring an exact model. The online control law is derived based on Lyapunov stability theory. To verify the effectiveness of the proposed controller, simulations are carried out on a two-degree-of-freedom (2-DOF) robot, comparing results with and without dead-zone compensation. The simulation results demonstrate that the proposed fuzzy dead-zone compensation controller significantly improves tracking accuracy and enhances system robustness compared to control methods without compensator.

Keywords: Dead-zone compensation, sliding-mode control, fuzzy logic, robot.

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: cuongpv0610@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/02/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, robot được ứng dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực như sản xuất chế tạo, thăm dò không gian, y học và các dây truyền sản xuất tiên tiến [1]. Để đảm bảo năng suất và an toàn trong khi hoạt động, yêu cầu quan trọng

đặt ra cho robot phải đảm bảo được khả năng bám quỹ đạo với độ chuẩn xác cao và luôn giữ cho hệ thống độ ổn. Tuy nhiên, một trong những yếu tố phi tuyến ảnh hưởng đến các chỉ tiêu chất lượng điều khiển của hệ thống là hiện tượng vùng chết DZ trong các cơ cấu chấp hành và

truyền động. Vùng chết xuất hiện do độ rơ cơ khí, ma sát tĩnh hoặc vùng chết điện trong bộ khuếch đại servo [2]. Nếu không được bù phù hợp, vùng chết có thể dẫn đến sai lệch tĩnh, dao động, giảm độ chính xác và thậm chí gây mất ổn định cho hệ thống. Để khắc phục ảnh hưởng của vùng chết đã có nhiều nghiên cứu đã được đưa ra như điều khiển bền vững, điều khiển thích nghi, bù ngược đặc tính vùng chết, mạng nơ ron,... [3-13]. Các bộ điều khiển thích nghi có thể điều chỉnh tham số để giảm sai lệch nhưng thường giả định đặc tính vùng chết là khả vi và có thể xấp xỉ chính xác [3]. Các phương pháp bù ngược yêu cầu biết trước tham số vùng chết, điều này khó thực hiện được trong thực tế [6]. Các phương pháp dựa trên mạng nơ-ron có khả năng xấp xỉ phi tuyến nhưng thường đi kèm với quá trình huấn luyện phức tạp và chi phí tính toán cao [13]. Trong thực tế, đặc tính vùng chết thường không xác định chính xác, thường thay đổi theo điều kiện vận hành và thời gian, khiến các phương pháp thuần mô hình trở nên kém hiệu quả.

Những năm gần đây, điều khiển mờ là một giải pháp hiệu quả để xử lý các hệ phi tuyến có mô hình bất định mà không cần phải xác định chính xác mô hình toán học của đối tượng điều khiển [14-17]. Thông qua luật hợp thành, bộ điều khiển mờ sẽ linh hoạt xấp xỉ các hàm phi tuyến bất định và thích ứng với sự thay đổi của hệ thống điều khiển [18]. Nhờ đặc tính này, điều khiển mờ phù hợp sử dụng để bù vùng chết trong hệ thống robot, nơi các đặc tính cơ cấu có thể thay đổi do mài mòn hoặc nhiễu bên ngoài tác động trong quá trình hệ làm việc.

Dựa vào những phân tích ở trên, bài báo này thiết kế một bộ điều khiển bù vùng chết sử dụng logic mờ cho tay máy robot. Bộ bù mờ được tích hợp vào bộ điều khiển nhằm ước lượng và bù đặc tính vùng chết bất định, từ đó nâng cao hiệu suất bám, giảm sai lệch tĩnh và tăng tính bền vững của hệ thống trước các bất định mô hình và nhiễu bên ngoài. Hiệu suất làm việc của bộ điều khiển đề xuất được kiểm chứng qua kết quả mô phỏng trên robot 2 bậc tự do. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả và ưu thế của bộ điều khiển có bù vùng chết so với bộ điều khiển không bù vùng chết.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Động lực học của robot

Phương trình toán học của robot n- link được biểu diễn như sau [19]:

$$M_{CDZ}(\xi)\ddot{\xi} + V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})\dot{\xi} + F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) + G_{CDZ}(\xi) = \tau - \tau_{CDZ0} \quad (1)$$

Ở đây, vector $\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_n] \in R^{n \times 1}$ biểu diễn vị trí của các khớp robot. Vector $\dot{\xi} = [\dot{\xi}_1 \ \dot{\xi}_2 \ \dots \ \dot{\xi}_n] \in R^{n \times 1}$ biểu diễn vận tốc các khớp và vector $\ddot{\xi} = [\ddot{\xi}_1 \ \ddot{\xi}_2 \ \dots \ \ddot{\xi}_n] \in R^{n \times 1}$ là gia tốc góc của các khớp robot. Ma trận $M_{CDZ}(\xi) \in R^{n \times n}$ biểu diễn thành phần quán tính, ma trận $V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) \in R^{n \times n}$ mô tả thành phần ly tâm và Coriolis. Vector $F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) \in R^{n \times 1}$ biểu diễn thành phần ma sát. $G_{CDZ}(\xi) \in R^{n \times 1}$ là vector trọng lượng. Vector $\tau_{CDZ0} \in R^{n \times 1}$ biểu diễn thành phần nhiễu và Vector $\tau \in R^{n \times 1}$ mô tả mô men điều khiển hoặc lực điều khiển các khớp robot.

Để có thể tiến hành thiết kế bộ điều khiển cho robot, cần đảm bảo rằng phương trình (1) phải thỏa mãn các tính chất sau đây:

Tính chất 1: $M_{CDZ}(\xi)$ phải là một ma trận đối xứng và xác định dương.

$$a_1 \|x\|^2 \leq x^T M_{CDZ}(\xi) x \leq a_2 \|x\|^2, \forall x \in R^n \quad (2)$$

trong đó $a_1, a_2 > 0$

Tính chất 2: $\dot{M}_{CDZ}(\xi) - 2V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})$ là một ma trận đối xứng với mọi x .

$$x^T [\dot{M}_{CDZ}(\xi) - 2V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})] x = 0 \quad (3)$$

Tính chất 3: Các vector $V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})\dot{\xi}, F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}), G_{CDZ}(\xi)$ thỏa mãn:

$$\|V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})\dot{\xi}\| \leq V_k \|\dot{\xi}\|^2; \quad (4)$$

$$\|F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi})\| \leq F_k; \|G_{CDZ}(\xi)\| \leq G_k$$

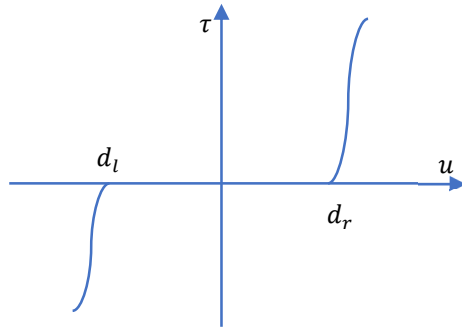
Với $V_k, F_k, G_k > 0$

Tính chất 4: Vector nhiễu $\tau_{CDZ0} \in R^{n \times 1}$ được giới hạn

$$\|\tau_{CDZ0}\| \leq \tau_k, \tau_k > 0 \quad (5)$$

Trên giả thiết của tài liệu [12], hàm của vùng chết được mô tả như hình 1 và được định nghĩa như sau:

$$\tau = D(u) = \begin{cases} u + d_r, & \text{for } u < -d_l \\ 0 & \text{for } -d_l \leq u \leq d_r \\ u - d_r, & \text{for } u > d_r \end{cases} \quad (6)$$



Hình 1. Mô hình vùng chết

Ở đây, u là tín hiệu trước khi đi vào vùng chết, τ là tín hiệu điều khiển sau khi bù vùng chết và $d = [d_r \ d_l]^T$, $d_r > 0, d_l > 0$.

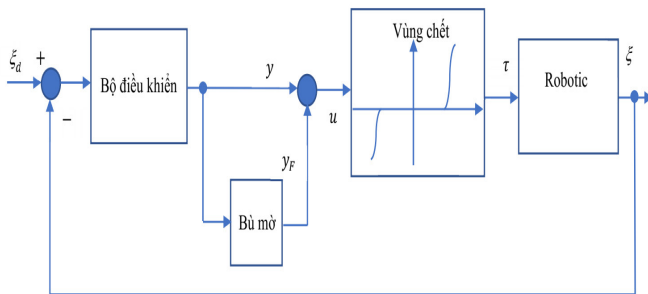
Công thức (6) được viết lại như sau:

$$\tau = f_{dz}(u) = u - sat(u) \quad (7)$$

Ở đây, $sat(u)$ là hàm bão hòa của vùng chết và được biểu diễn như sau:

$$sat(u) = \begin{cases} -d_l, & u < -d_l \\ u, & -d_l \leq u \leq d_r \\ d_r, & u > d_r \end{cases} \quad (8)$$

Cấu trúc hệ thống điều khiển bù vùng chết được thiết kế như hình 2.



Hình 2. Hệ thống điều khiển bù vùng chết cho robot

Ở đây, y là tín hiệu điều khiển, y_F là tín hiệu đầu ra của bộ bù mờ, u tín hiệu điều khiển cho robot sau khi bù vùng chết, τ tín hiệu điều khiển sau khi bù vùng chết.

2.2. Điều khiển mờ

Cấu trúc một bộ điều khiển mờ có 3 phần: Khối mờ hóa tín hiệu đầu vào, khối luật hợp thành và khối giải mờ. Cấu trúc luật điều khiển của bộ điều khiển mờ thường có dạng IF-THEN như sau:

R^l : IF x_1 là F_1^l và x_2 là F_2^l và ... và x_n là F_n^l , THEN y là G^l , $l = 1, 2, \dots, N$

Ở đây đầu vào bộ điều khiển mờ là $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ và y là đầu ra của bộ điều khiển mờ. F_i^l, G^l được liên kết với

các hàm liên thuộc tương ứng $\mu_{F_i^l}(x_i)$ và $\mu_{G^l}(y)$. N là số luật hợp thành

Bộ điều khiển mờ có đầu ra được tính toán theo công thức như sau:

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^N \sigma_l \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^N \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)} \quad (9)$$

trong đó, $\delta_l = \max_{y \in R} \mu_{G^l}(y)$ và $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]^T$

Hàm cơ sở mờ được lựa chọn như sau:

$$W_l = \frac{\prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^N \prod_i \mu_{F_i^l}(x_i)} \quad (10)$$

Trong đó, $W = [W_1(x), W_2(x), \dots, W_N(x)]^T$

Ta có thể viết lại công thức (10) như sau:

$$y(x) = \delta^T W(x) \quad (11)$$

Giá trị ước lượng của $y(x)$ là $\hat{y}(x)$ và được mô tả như:

$$\hat{y}(x) = \hat{\delta}^T W(x) \quad (12)$$

δ có giá trị ước lượng là $\hat{\delta}$ và $\tilde{\delta} = \hat{\delta} - \delta$

2.3. Bù mờ vùng chết

Theo đặc tính phi tuyến của vùng chết, quy tắc bù vùng chết được thiết kế như sau:

If y dương, then $u = y + \hat{d}_r$

If y âm, then $u = y - \hat{d}_l$

Ở đây, $\hat{d} = [\hat{d}_r \ \hat{d}_l]^T$ là giá trị ước lượng của vùng

chết $d = [d_r \ d_l]^T$

Hàm liên thuộc được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} X_r(y) = \begin{cases} 0 & y < 0 \\ 1 & y \geq 0 \end{cases} \\ X_l(y) = \begin{cases} 1 & y < 0 \\ 0 & y \geq 0 \end{cases} \end{cases}$$

Do đó, tín hiệu điều khiển sau khi có bộ bù mờ là:

$$u = y + y_F \quad (13)$$

Ở đây, y_F được xác định theo luật mờ sau:

If $(y \in X_r(y))$, then $(y_F = \hat{d}_r)$

If $(y \in X_l(y))$, then $(y_F = -\hat{d}_l)$

Theo phương pháp giải mờ, đầu ra bộ điều khiển mờ được tính toán như sau:

$$y_F = \frac{\hat{d}_r X_r(y) - \hat{d}_l X_l(y)}{X_r(y) + X_l(y)} \quad (14)$$

Từ $X_r(y) + X_l(y) = 1$ thì $y_F = \hat{d}^T X(y)$

Công thức (13) được viết lại như sau:

$$u = y + \hat{d}^T X(y) \quad (15)$$

$$\text{Trong đó, } X(y) = \begin{bmatrix} X_r(y) \\ X_l(y) \end{bmatrix}$$

Theo công thức (7) và (13), ta có:

$$\begin{aligned} \tau &= f_{dz}(u) = y + y_F - \text{sat}(y + y_F) \\ &= y + \hat{d}^T X(y) + \left[d^T X(y) - \text{sat}(y + \hat{d}^T X(y)) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Nếu bù mờ, tín hiệu điều khiển sau vùng chết là:

$$\tau = y - \tilde{d}^T X(y) + \tilde{d}^T u \quad (17)$$

Ở đây, sai lệch ước lượng vùng chết là $\tilde{d} = d - \hat{d}$ và thành phần sai lệch mô hình được giới hạn $\|u\| \leq 1$.

3. THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH TÍNH ỔN ĐỊNH CỦA HỆ THỐNG

Sai lệch bám và luật thích nghi được mô tả như sau:

$$e(t) = \xi_d - \xi \quad (18)$$

$$r = \dot{e} + \lambda e \quad (19)$$

Ở đây, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ là ma trận khuếch đại hằng số dương.

Đạo hàm bậc nhất theo thời gian biểu thức (18) và thay vào công thức (19) ta có:

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_d + \lambda e - r$$

Ta có:

$$\begin{aligned} M_{CDZ}(\xi) \dot{r} &= M_{CDZ}(\xi) (\ddot{e} + \lambda \dot{e}) = M_{CDZ}(\xi) (\ddot{\xi}_d - \ddot{\xi} + \lambda \dot{e}) \\ &= M_{CDZ}(\xi) \ddot{\xi}_d - M_{CDZ}(\xi) \ddot{\xi} + M_{CDZ}(\xi) \lambda \dot{e} \end{aligned} \quad (20)$$

Sử dụng công thức (1), biểu thức (20) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} M_{CDZ}(\xi) \dot{r} &= M_{CDZ}(\xi) (\ddot{\xi}_d + \lambda \dot{e}) + V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) \dot{\xi} \\ &\quad + F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) + G_{CDZ}(\xi) - \tau + \tau_{CDZ0} \\ &= M_{CDZ}(\xi) (\ddot{\xi}_d + \lambda \dot{e}) + V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) (\dot{\xi}_d + \lambda e - r) \\ &\quad + F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) + G_{CDZ}(\xi) - \tau + \tau_{CDZ0} \end{aligned}$$

$$M_{CDZ}(\xi) \dot{r} = -V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) r + f - \tau + \tau_{CDZ0} \quad (21)$$

Ở đây,

$$\begin{aligned} f(x) &= M_{CDZ}(\xi) (\ddot{\xi}_d + \lambda \dot{e}) + V_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) (\dot{\xi}_d + \lambda e) \\ &\quad + F_{CDZ}(\xi, \dot{\xi}) + G_{CDZ}(\xi) \end{aligned}$$

biểu diễn thành phần phi tuyến

Luật điều trước khi bù vùng chết được thiết kế như sau:

$$y = \hat{f} + k_r r + k_i \int_0^t r dt + \tau_{smc} \quad (22)$$

Trong đó, $\hat{f}$ là ước lượng của f , τ_{smc} là bộ điều khiển trượt và được định nghĩa như sau:

$$\tau_{smc} = (f_M + \tau_M) \frac{r}{\|r\|} \quad (23)$$

Luật thích nghi của bộ điều khiển mờ bù vùng chết được tính toán theo công thức như sau:

$$\dot{\hat{D}} = \Xi X(y) r^T - k_{CDZ} \Xi \hat{D} \|r\| \quad (24)$$

Trong đó, $k_{CDZ} > 0$ và Ξ là ma trận xác định dương

Mô hình toán học của robot được đưa ra trong công thức (1), bộ điều khiển được thiết kế như công thức (22), luật cập nhật online được lựa chọn trong công thức (24) và bộ điều khiển trượt được định nghĩa như công thức (23) có thể đảm bảo tất cả các tín hiệu trong hệ thống đều bị chặn.

Hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$\begin{aligned} L(t) &= \frac{1}{2} r^T M_{CDZ}(\xi) r + \frac{1}{2} \left(\int_0^t r dt \right)^T k_i \left(\int_0^t r dt \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{D}^T \Xi^{-1} \tilde{D}) \end{aligned} \quad (25)$$

Đạo hàm bậc nhất hàm Lyapunov theo thời gian:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= r^T M_{CDZ} \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}_{CDZ} r \\ &\quad + r^T k_i \int_0^t r dt + \text{tr}(\tilde{D}^T \Xi^{-1} \dot{\tilde{D}}) \end{aligned} \quad (26)$$

Áp dụng tính chất 2 và công thức (21), ta có:

$$\dot{L}(t) = r^T (f - \tau + \tau_{CDZ0}) + \text{tr}(\tilde{D}^T \Xi^{-1} \dot{\tilde{D}}) \quad (27)$$

Thay (17), (22) vào công thức (27), ta có:

$$\dot{L}(t) = -r^T k_r r + r^T \begin{pmatrix} \tilde{f} - \tau_{smc} + \tilde{D}^T X(y) \\ -\tilde{D}^T u + \tau_{CDZ0} \end{pmatrix} + tr(\tilde{D}^T \Xi^{-1} \dot{\tilde{D}}) \quad (28)$$

Ta có: $\tilde{D} = D - \hat{D} \rightarrow \dot{\tilde{D}} = -\dot{\hat{D}}$

Có thể viết lại công thức (28) như sau:

$$\dot{L}(t) = -r^T k_r r + r^T \begin{pmatrix} \tilde{f} - \tau_{smc} + \tilde{D}^T X(y) \\ -\tilde{D}^T u + \tau_{CDZ0} \end{pmatrix} - tr(\tilde{D}^T \Xi^{-1} \dot{\tilde{D}}) \quad (29)$$

Thay công thức (23), (24) vào (29), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= -r^T k_r r + r^T \left(\tilde{f} - (f_M + \tau_M) \frac{r}{\|r\|} + \tau_{CDZ0} \right) \\ &\quad + tr \tilde{D}^T \left(-ur^T + k_{CDZ} (D - \tilde{D}) \|r\| \right) \\ \dot{L}(t) &\leq -r^T k_r r + \sqrt{n} \|\tilde{D}\| \|r\| \\ &\quad + k_{CDZ} D_M \|\tilde{D}\| \|r\| - k_{CDZ} \|\tilde{D}\|^2 \|r\| \end{aligned} \quad (30)$$

Trong đó, $\|u\| \leq \sqrt{n}$

$$\dot{L}(t) \leq -\|r\| \left[k_r \|r\| - b \|\tilde{D}\| + k_{CDZ} \|\tilde{D}\|^2 \right] \quad (31)$$

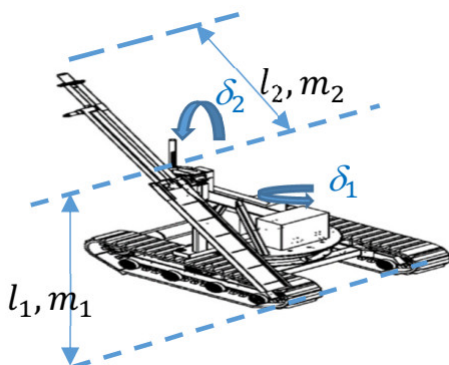
Ở đây, $b = \sqrt{n} + k_{CDZ} D_M$, để $\dot{L}(t) \leq 0$ cần thỏa mãn điều kiện sau:

$$-b \|\tilde{D}\| + k_{CDZ} \|\tilde{D}\|^2 \geq 0 \quad (32)$$

Do đó, kết quả hội tụ của vùng chết là:

$$\|\tilde{D}\| \geq \frac{b}{k_{CDZ}} \quad (33)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG



Hình 3. Robot 2 bậc tự do

Trong phần này, cấu trúc của robot 2 bậc tự do được mô tả như hình 3.

Các tham số của robot như sau:

$$\begin{aligned} M_{CDZ} &= \begin{bmatrix} M_{CDZ11} & M_{CDZ12} \\ M_{CDZ21} & M_{CDZ22} \end{bmatrix}; V_{CDZ} = \begin{bmatrix} V_{CDZ11} & V_{CDZ12} \\ V_{CDZ21} & V_{CDZ22} \end{bmatrix}; \\ G_{CDZ} &= \begin{bmatrix} G_{CDZ1} \\ G_{CDZ2} \end{bmatrix}; F_{CDZ} = \begin{bmatrix} F_{CDZ1} \\ F_{CDZ2} \end{bmatrix}; \tau_{CDZ0} = \begin{bmatrix} \tau_{CDZ01} \\ \tau_{CDZ02} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ở đây

$$\begin{aligned} M_{CDZ11} &= (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(\xi_2); \\ M_{CDZ12} &= M_{CDZ21} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\xi_2); \\ M_{CDZ22} &= m_2 l_2^2; V_{CDZ11} = -m_2 l_1 l_2 \sin(\xi_2) \dot{\xi}_2; \\ V_{CDZ12} &= -m_2 l_1 l_2 \sin(\xi_2) (\dot{\xi}_1 + \dot{\xi}_2); \\ V_{CDZ21} &= m_2 l_1 l_2 \sin(\xi_2) \dot{\xi}_1; V_{CDZ22} = 0; \\ G_{CDZ1} &= (m_1 + m_2) g l_1 \cos(\xi_2) + m_2 g l_2 \cos(\xi_2) (\xi_1 + \xi_2); \\ G_{CDZ2} &= m_2 g l_2 \cos(\xi_2) (\xi_2 + \xi_2); \\ \tau_{CDZ0} &= \begin{bmatrix} \tau_{CDZ01} \\ \tau_{CDZ02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \sin(20t) \\ 0.5 \sin(20t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

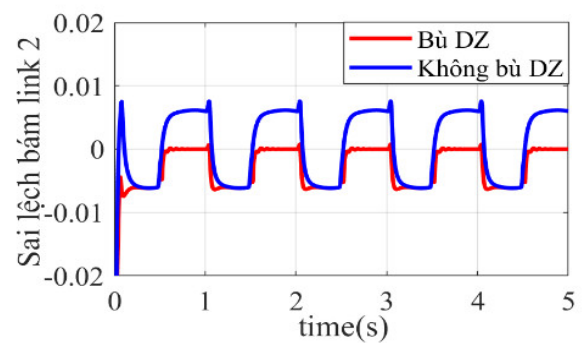
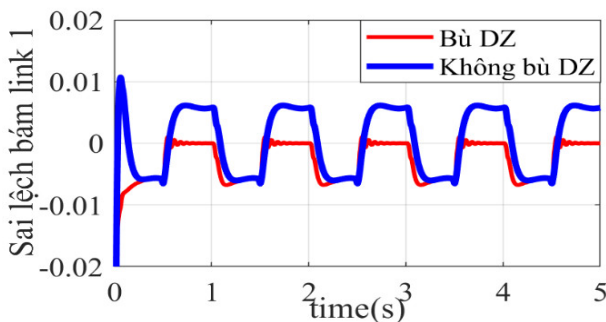
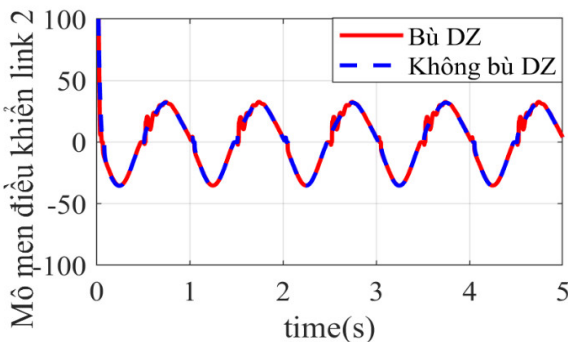
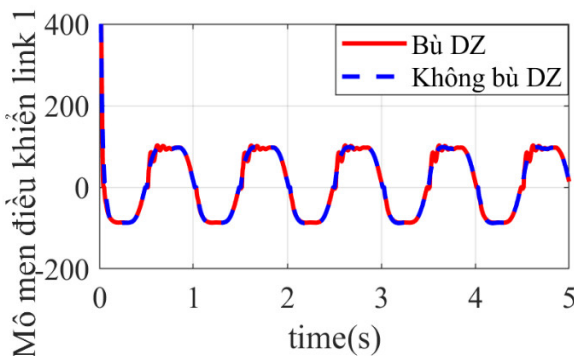
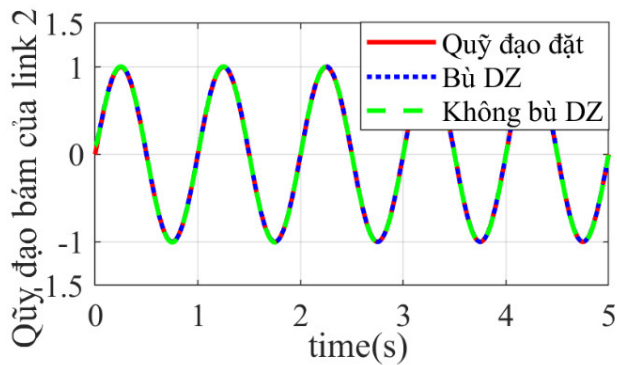
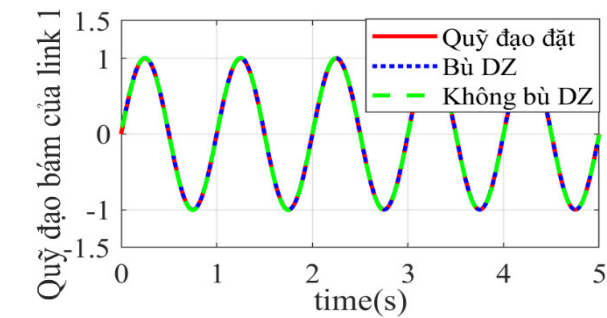
Trong đó, khối lượng của thanh 1 là m_1 , khối lượng của thanh 2 là m_2 . Chiều dài của thanh 1 là l_1 và chiều dài của thanh 2 là l_2 . $g = 9,8(m/s^2)$ là gia tốc trọng trường. Các tham số của robot lần lượt là $l_1 = 1m$, $l_2 = 0,85m$, $m_1 = 0,6kg$, $m_2 = 0,6kg$. Vector $\xi = [\xi_1 \quad \xi_2]^T$ mô tả vị trí của thanh 1 và thanh 2. Quỹ đạo đặt cho thanh 1 và thanh 2 được chọn như sau: $\xi_d = [\xi_{d1} \quad \xi_{d2}]^T = [\sin(2\pi t) \quad \sin(2\pi t)]^T$. Vị trí và vận tốc ban đầu của thanh 1 và thanh 2 lần lượt là: $\xi_0 = [\xi_{01} \quad \xi_{02}]^T = [0, 0, 0, 0]^T (rad)$, $\dot{\xi}_0 = [\dot{\xi}_{01} \quad \dot{\xi}_{02}]^T = [0, 0, 0, 0]^T (rad/s)$.

Nhóm tác giả thực hiện mô phỏng hệ thống trong hai trường hợp:

Trường hợp 1: Khi hệ thống không có nhiễu tác động. Thông số của bộ điều khiển được lựa chọn như sau:

Tham số của vùng chết được lựa chọn như sau: $d_l = -15; d_r = 15; h_r(u) = u - d_r; h_l(u) = u + d_l$

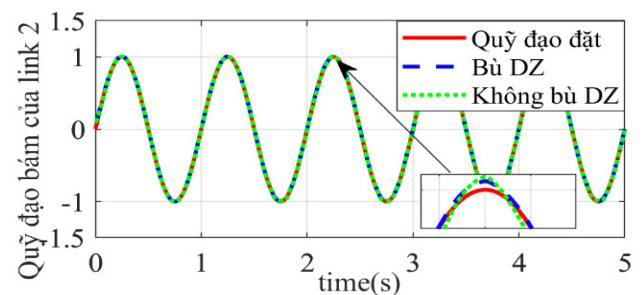
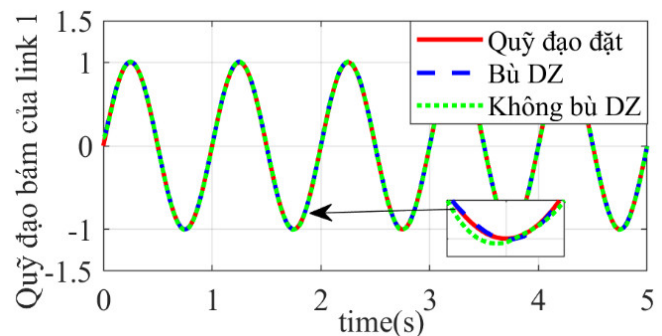
Hệ số $k_r = \text{diag}(500, 500)$, $k_i = \text{diag}(1, 1)$. Kết quả mô phỏng quỹ đạo bám, mô men điều khiển và sai lệch bám của robot thu được trong hình 4.

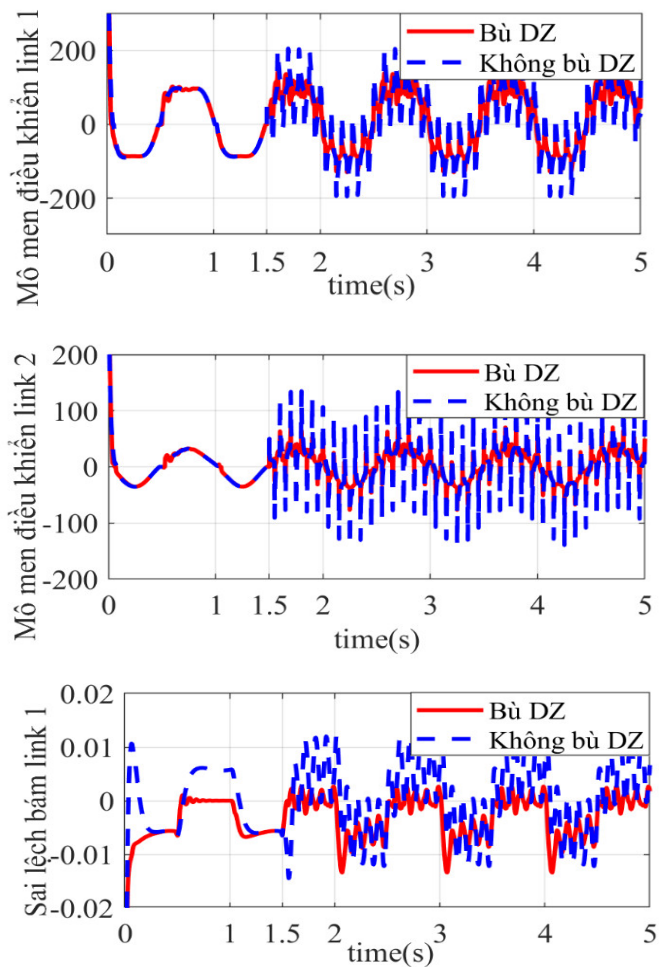


Hình 4. Kết quả mô phỏng quỹ đạo bám vị trí, mô men điều khiển và sai lệch bám của robot có bù và không bù DZ

Trường hợp 2: Hệ thống có nhiễu là xung vuông với biên độ 20 và tần số 10Hz đột ngột tác động từ bên ngoài sau khi robot làm việc được 1,5s. Thông số được lựa chọn như trong trường hợp 1. Kết quả mô phỏng thu được trong hình 5.

Mô phỏng bộ điều khiển thích nghi cho robot 2 bậc tự do và so sánh khi robot được bù vùng chết bằng bộ điều khiển mờ và khi không bù vùng chết. Từ kết quả mô phỏng trong 2 trường hợp khi không có nhiễu bên ngoài tác động và khi có nhiễu đột ngột tác động (hình 4, 5) và kết quả so sánh giá trị sai lệch bình phương trung bình tổng bảng 1, chúng ta thấy rằng bộ điều khiển bù vùng chết (Bù DZ) và bộ điều khiển không bù vùng chết (Không bù DZ) đều giúp hệ thống ổn định và hội tụ. Tuy nhiên khi bộ điều khiển có bù vùng chết robot bám tốt hơn và hội tụ nhanh hơn so với trường hợp không bù vùng chết. Hơn thế nữa khi thiết kế bộ bù vùng chết cũng giúp cho hệ thống kháng nhiễu tốt hơn.





Hình 5. Kết quả mô phỏng quỹ đạo bám vị trí, mô men điều khiển và sai lệch bám của robot có bù DZ và không bù DZ, khi có thêm nhiễu bên ngoài tác động

Bảng 1. So sánh hiệu suất của bộ điều khiển trong hai trường hợp có bộ bù và khi không có bộ bù mờ

NMSE ($\times 10^{-4}$)	Trường hợp 1		Trường hợp 2	
	Link 1	Link 2	Link 1	Link 2
Bù DZ	2.8611	2.9091	1.864	2.3307
Không bù DZ	3.1084	3.1755	2.4255	4.135

5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất bộ điều khiển bù vùng chết cho robot trên cơ sở của logic mờ để đảm bảo khả năng bám và cải thiện chất lượng làm việc của hệ thống. Trong thiết kế này, vùng chết được ước lượng bằng bộ điều khiển mờ. Ngoài ra các luật ước lượng được xác định dựa trên thuyết ổn định Lyapunov. Do đó, bộ điều khiển đề xuất đảm bảo độ ổn định, bền vững và hiệu quả bám của robot ngay cả khi có nhiễu đột ngột tác động vào hệ thống từ bên ngoài. Các kết quả mô phỏng trên robot 2 bậc tự do đã chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Công nghiệp Hà Nội, theo hợp đồng nghiên cứu số 14-2025-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*. Prentice-Hall, 1989.
- [2]. M. Tomizuka, "Zero phase error tracking algorithm for digital control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 109, 1, 65-68, 1987.
- [3]. C. C. Hang, K. S. Narendra, "Adaptive control of systems with unknown dead-zone," *IEEE Trans. Autom. Control*, 29, 4, 354-358, 1984.
- [4]. X. Wang, C. Su, H. Hong, "Robust adaptive control of a class of nonlinear system with unknown dead-zone," *Automatica*, 40, 3, 407-413, 2004.
- [5]. J. Gao, H. Yang, Z. Xu, K. Shi, S. He, "Adaptive finite-time fuzzy control for switched nonlinear systems with dead-zone inputs," *Journal of the Franklin Institute*, 362, 2025.
- [6]. S. S. Ge, C. Wang, "Adaptive neural control of uncertain nonlinear systems with dead-zone," *IEEE Trans. Automat. Control*, 48, 6, 1027-1032, 2003.
- [7]. Y. Peng, S. Xu, "Adaptive tracking control for a class of stochastic nonlinear systems with full state constraints in dead zone," *Applied Mathematics and computation*, 452, 2023.
- [8]. D.H. Vu, S. Huang, T.D. Tran, T.Y. Vu, V.C. Pham, "A Robust Adaptive Control using Fuzzy Neural Network for Robot Manipulators with Dead-Zone," *International journal of computers communications & control*, 14, 5, 692-710, 2019.
- [9]. H.D. Wang, Y.X. Zhai, U.H. Shah, M. Karloub, M. Li, "Adaptive fuzzy control of underwater vehicle manipulator system with dead-zone band input nonlinearities via fuzzy performance and disturbance observers," *Ocean Engineering*, 277, 2023.
- [10]. C. Chan-Zheng, P. Borja J.M.A. Scherpen, "Dead-zone compensation via passivity-based control for a class of mechanical systems," *IFAC-PapersOnline*, 56, 01, 319-324, 2023.
- [11]. L.V. Truong, S.D. Huang, V.T. Yen, P.V. Cuong, "Adaptive Trajectory Neural Network Tracking Control for Industrial Robot Manipulators with Deadzone Robust Compensator," *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 1-12, 2020
- [12]. Lewis F.L., Tim K., Wang L.Z., Li Z.X., "Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy control system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 7(6), 731-742, 1999.
- [13]. T. P. Leung, K. T. Cheung, "Neural network based adaptive dead-zone compensation," *Control Engineering Practice*, 10, 4, 435-443, 2002.

- [14]. J. Zhou, E. Liu, X. Tian, Z. Li, "Adaptive Fuzzy Backstepping Control Based on Dynamic Surface Control for Uncertain Robotic Manipulator," in *IEEE Access*, 10, 23333-23341, 2022.
- [15]. J. Su, H. K. Lam, J. Liu, J. Yu, "Fuzzy Observer-Based Command Filtered Adaptive Control of Flexible Joint Robots with Time-Varying Output Constraints," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 71, 9, 4251-4255, 2024.
- [16]. W. Chang, Y. Li, S. Tong, "Adaptive Fuzzy Backstepping Tracking Control for Flexible Robotic Manipulator," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8, 12, 1923-1930, 2021.
- [17]. S. Xu, B. He, "Robust Adaptive Fuzzy Fault Tolerant Control of Robot Manipulators with Unknown Parameters," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31, 9, 3081-3092, 2023.
- [18]. H. Ying, *Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications*. IEEE Press, 2000.
- [19]. Vũ Thị Yến, Bùi Văn Huy, Phùng Thị Vân, "Thiết kế bộ điều khiển bền vững thích nghi trên cơ sở mạng nơ ron điều khiển cho robot công nghiệp," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 18(11), 21-26, 2020.

AUTHORS INFORMATION

Vu Thi Yen, Pham Van Cuong,
Tran Kim Thanh, Nguyen Dang Toan
Hanoi University of Industry, Vietnam