

## Giải thuật PD dựa trên mô hình kết hợp logic mờ Sugeno nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot song song Delta

Đình Xuân Minh, Phạm Văn Hùng\*, Nguyễn Nam Khánh,  
Mai Thế Thắng, Hà Minh Quân, Hà Việt Anh

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam.

\*Email: phamvanhung@hau.edu.vn

Nhận bài: 26/9/2023; Hoàn thiện: 15/11/2023; Chấp nhận đăng: 12/12/2023; Xuất bản: 25/02/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.93.2024.38-46>

### TÓM TẮT

*Nghiên cứu nhằm cải tiến thuật toán PD dựa trên mô hình bằng cách sử dụng logic mờ Sugeno chỉnh định trực tuyến các giá trị tham số của bộ điều khiển, nâng cao chất lượng bám quỹ đạo và khả năng bền vững với nhiễu cho robot song song Delta. Nghiên cứu sử dụng công cụ mô phỏng Matlab&Simulink để kiểm nghiệm tính tin cậy của bộ điều khiển trên quỹ đạo đặt hình số tám. Các kết quả mô phỏng cho thấy, hiệu suất điều khiển tốt khi có thể kiểm soát chuyển động của robot song song Delta 3-DOF đi theo quỹ đạo mong muốn và ổn định với thời gian xác lập nhanh, ngay cả khi hệ thống chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài không biết trước.*

**Từ khoá:** Delta 3-DOF; Điều khiển PD dựa trên mô hình; Logic mờ Sugeno; Điều khiển bám quỹ đạo.

### 1. GIỚI THIỆU

Robot Delta 3-DOF (Degrees of freedom), là một dạng robot song song 3 bậc tự do, có độ cứng vững cao, có ưu điểm về độ linh hoạt và tốc độ, giá thành và độ chính xác [1, 2] đã trở nên phổ biến hiện nay và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như y tế, giáo dục, đặc biệt trong công nghiệp. Nhờ vậy, Delta 3-DOF đang thu hút được nhiều sự quan tâm từ các nhà nghiên cứu đặc biệt trong lĩnh vực điều khiển, cơ khí và robot.

Hiện nay, đã có nhiều công bố trong việc điều khiển quỹ đạo chuyển động của robot Delta như sử dụng bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative) kinh điển được đề cập trong [9], các phương pháp điều khiển thích nghi được trình bày trong [2-4, 6], tối ưu hóa [5] hay phương pháp điều khiển PD dựa trên mô hình [1]. Bên cạnh đó, đối với lĩnh vực điều khiển robot công nghiệp nói chung, một số phương pháp điều khiển nâng cao khác như điều khiển dự báo MPC (Model Predictive Control) [10, 13], điều khiển trượt và mờ [15], học tăng cường [11], học sâu [12] hay học tăng cường sâu [14] cũng được áp dụng.

Phương pháp PID kinh điển [9] ưu điểm ở khả năng tính toán đơn giản và linh hoạt, tuy nhiên, việc hiệu chỉnh các tham số trong bộ điều khiển tương đối phức tạp đặc biệt với đối tượng phi tuyến robot Delta. Do đó, nghiên cứu [2] đã đề xuất sử dụng logic mờ Mamdani trong việc hiệu chỉnh tự động tham số bộ điều khiển, qua đó nâng cao chất lượng kiểm soát quỹ đạo hệ thống. Một cách tiếp cận khác sử dụng bộ điều khiển PD dựa trên mô hình [1], cho phép robot Delta di chuyển nhanh và chính xác để đạt được quỹ đạo mong muốn. Tuy nhiên, khi chịu ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài không biết trước hệ thống sẽ mất ổn định. Bên cạnh đó, các tham số trong [1] chỉ được hiệu chỉnh thủ công. Các phương pháp dựa trên tối ưu hóa như GA [5], MPC [10, 13] cho phép tối ưu hóa hàm mục tiêu nhằm đạt được hiệu suất tối ưu của hệ thống, tuy nhiên đòi hỏi khối lượng tính toán lớn. Các nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển không phụ thuộc vào mô hình mà dựa trên kỹ thuật học máy trong [11-12, 14] có thể tự động điều chỉnh, cải thiện chất lượng điều khiển cho robot theo thời gian và tìm ra các chiến lược kiểm soát tối ưu một cách tự động. Tuy nhiên, các phương pháp này có thể đòi hỏi một lượng lớn dữ liệu để huấn luyện, làm cho chúng phức tạp hơn để thực hiện và điều chỉnh so với các phương pháp điều khiển thông thường. Cách tiếp cận điều khiển thích nghi khác [3, 4, 6, 15] sử dụng mạng mờ với khả năng học trực tuyến, cho phép ước lượng

các thành phần phi tuyến chưa biết của mô hình [16], nhằm nâng cao hiệu suất điều khiển. Tuy nhiên, các phương pháp này lại yêu cầu sự am hiểu sâu về kiến trúc mạng.

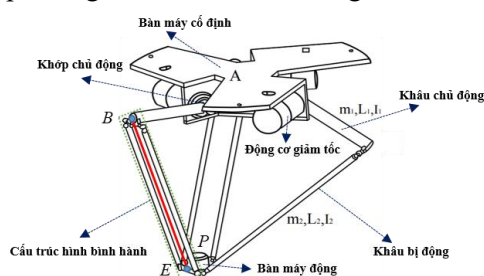
Từ những phân tích trên, nhóm nghiên cứu đề xuất phương pháp điều khiển thích nghi sử dụng kỹ thuật PD dựa trên mô hình [1] kết hợp logic mờ Sugeno [7] chỉnh định trực tuyến các giá trị tham số của bộ điều khiển, nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho robot song song Delta. Qua đó, cải tiến trực tiếp nghiên cứu [1] trong việc tự điều chỉnh tham số và khả năng ổn định của hệ thống, thời gian xác lập nhanh ngay cả khi chịu ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài chưa biết trước. Bên cạnh đó, khác với kỹ thuật cũng dựa trên logic mờ trong [2], nghiên cứu này sử dụng mô hình mờ Sugeno là một sự cải tiến của mô hình mờ Mamdani. Ngoài ra, phương pháp này có khối lượng tính toán ít hơn so với GA [5], MPC [10, 13] và không phụ thuộc dữ liệu, phức tạp như các phương pháp dựa trên học máy [11-12, 14] và mạng nơ ron [3, 4, 6, 15].

Phần còn lại của nghiên cứu có cấu trúc như sau: Nội dung 2 trình bày về cơ sở lý thuyết và phương pháp đề xuất, nội dung 3 là các kết quả và thảo luận. Cuối cùng, nội dung 4 nêu lên kết luận và các hướng phát triển.

## 2. GIẢI THUẬT PD KẾT HỢP LOGIC MỜ CHO ROBOT DELATA

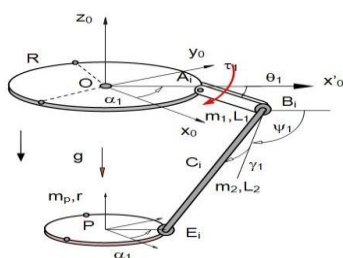
### 2.1. Mô tả hệ thống robot song song Delta

Mô hình toán học của Delta 3-DOF đã được trình bày chi tiết trong các nghiên cứu [1-5]. Cấu tạo của robot được thể hiện trên hình 1 và hình 2 bao gồm: bàn máy cố định A, bàn máy động P, ba khâu chủ động  $A_i B_i (i=1,2,3)$  và ba khâu bị động  $B_i E_i (i=1,2,3)$  với mỗi khâu là một cấu trúc hình bình hành. Đối với mô hình này, khâu  $B_i E_i$  đã được mô hình hóa bằng thanh cứng có độ dài tương ứng với khối lượng tập chung ở hai đầu nhằm đơn giản hóa mô hình.



Hình 1. Mô hình robot song song Delta 3 bậc tự do (Delta 3-DOF).

Thanh cứng  $B_i E_i$  có chiều dài  $L_2$  với hai đầu thanh cứng  $B_i$  và  $E_i$ , mỗi điểm có khối lượng  $m_b$ . Mô hình động lực học được thể hiện trên hình 2 bao gồm 4 vật rắn, trong đó: khâu  $A_i B_i$  chuyển động quay quanh các trục vuông góc với mặt phẳng  $O A_i B_i$  tại  $A_i B_i$  có khối lượng  $m_1$ , chiều dài  $L_1$ , 3 chất điểm tại  $B_i$  có khối lượng  $m_b = 0.5m_2$  và bàn máy động P có khối lượng  $m_p + 3m_b$ . Trong đó,  $m_p$  là khối lượng của khâu thao tác. Trên các khâu  $A_i B_i$  đặt các lực mô men phát động  $\tau_i (i=1,2,3)$  tương ứng.



Hình 2. Mô hình động lực học robot song song Delta công nghiệp [1, 2].

Tiến hành đặt  $\mathbf{s}_a = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$  là véc tơ đại diện cho tọa độ của các khớp chủ động, và  $\mathbf{s}_p = [x_p \ y_p \ z_p]^T$  là véc tơ tọa độ tâm bàn máy động  $P$ , véc tơ trạng thái được chọn để thiết lập phương trình chuyển động của robot song song Delta được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{s} = [\mathbf{s}_a^T \ \mathbf{s}_p^T]^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_p \ y_p \ z_p]^T \quad (1)$$

Bên cạnh đó, theo các nghiên cứu [1-5] hệ phương trình liên kết hình học cho các chân của robot song song Delta được thiết lập như sau:

$$\begin{aligned} f_1 &= L_2^2 - (\cos \alpha_1 (R-r) + L_1 \cos \alpha_1 \cos \theta_1 - x_p)^2 - (\sin \alpha_1 (R-r) + L_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 - y_p)^2 \\ &\quad - (L_1 \sin \theta_1 + z_p)^2 = 0 \\ f_2 &= L_2^2 - (\cos \alpha_2 (R-r) + L_1 \cos \alpha_2 \cos \theta_2 - x_p)^2 - (\sin \alpha_2 (R-r) + L_1 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 - y_p)^2 \\ &\quad - (L_1 \sin \theta_2 + z_p)^2 = 0 \\ f_3 &= L_2^2 - (\cos \alpha_3 (R-r) + L_1 \cos \alpha_3 \cos \theta_3 - x_p)^2 - (\sin \alpha_3 (R-r) + L_1 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 - y_p)^2 \\ &\quad - (L_1 \sin \theta_3 + z_p)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.2. Phương trình động lực học của robot song song Delta

Mô hình động lực học của robot Delta dựa thiết lập dựa trên phương trình Euler-Lagrange, theo nghiên cứu [1-5] phương trình được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{g}(\mathbf{s}) + \Phi_s^T(\mathbf{s})\boldsymbol{\lambda} &= \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{f}(\mathbf{s}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó:  $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là véc tơ nhân tử Lagrange,  $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  là véc tơ trạng thái của hệ thống,  $\mathbf{M}(\mathbf{s}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  là ma trận khối lượng suy rộng đối xứng xác định dương,  $\mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  là ma trận quán tính ly tâm và Coriolis,  $\mathbf{g}(\mathbf{s}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  là véc tơ tổng hợp của thành phần trọng trường và mô men trọng trường.  $\Phi_s(\mathbf{s}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{s}} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$  là ma trận Jaccobi của các phương trình liên kết trong (2),  $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_a \ \Theta_{3 \times 1}]^T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  là véc tơ tín hiệu điều khiển. Trong đó, hai véc tơ  $\boldsymbol{\tau}_a = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$  là moment lực sinh ra bởi ba động cơ gắn với ba khớp robot,  $\Theta_{3 \times 1} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là véc tơ chứa toàn phần tử không. Ngoài ra, kí hiệu  $\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$  là véc tơ biểu diễn phương trình liên kết hình học của Robot Delta và  $I_{ly}$  là mô men quán tính. Theo nghiên cứu [1-5], các thành phần trong phương trình động lực học (3) có giá trị như sau:

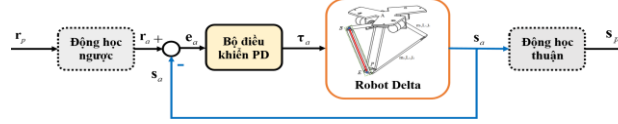
$$\mathbf{M}(\mathbf{s}) = \text{diag} \left( I_{ly} + m_b L_1^2, I_{ly} + m_b L_1^2, I_{ly} + m_b L_1^2, m_p + 3m_b, m_p + 3m_b, m_p + 3m_b \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) = \Theta_{6 \times 6}, \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T \quad (5)$$

$$\Phi_s(\mathbf{s}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial z_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial z_p} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} -g L_1 \left( \frac{m_1}{2} + m_b \right) \cos \theta_1, -g L_1 \left( \frac{m_1}{2} + m_b \right) \cos \theta_2, \\ -g L_1 \left( \frac{m_1}{2} + m_b \right) \cos \theta_3, 0, 0, (m_p + 3m_b) g \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

### 2.3. Bộ điều khiển PD dựa trên mô hình cho robot song song Delta

Phương pháp thiết kế bộ điều khiển PD cho robot Delta đã được nghiên cứu tại [1] với sơ đồ cấu trúc được thể hiện trên hình 3 và được chúng tôi trình bày ngắn gọn như sau:



Hình 3. Cấu trúc bộ điều khiển PD dựa trên mô hình cho robot song song Delta.

Nhiệm vụ của bài toán điều khiển robot Delta là điều khiển chuyển động của bàn máy động  $P$  bám theo một quỹ đạo cho trước, tức là làm cho  $\mathbf{s}_p = [x_p, y_p, z_p]^T$  tiến tới vị trí đặt  $\mathbf{r}_p = [x_d, y_d, z_d]^T$ , bằng cách tác động tín hiệu điều khiển  $\boldsymbol{\tau}_a$ , được tính toán bởi bộ điều khiển PD lên hệ thống Robot Delta. Tín hiệu ra của bộ điều khiển PD được tính toán như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_a = \bar{\mathbf{M}}(\ddot{\mathbf{r}}_a + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_a) + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{s}}_a + \bar{\mathbf{g}} \quad (7)$$

Trong đó:  $\mathbf{r}_a = [\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}]^T$  là giá trị mong muốn của ba góc khớp,  $\mathbf{r}_p = [x_d, y_d, z_d]^T$  là quỹ đạo đặt của tâm bàn máy động  $P$ ,  $\mathbf{e}_a = \mathbf{r}_a - \mathbf{s}_a$  là sai lệch điều khiển đối với ba góc khớp,  $\mathbf{K}_p$  và  $\mathbf{K}_D$  là các ma trận tham số. Bên cạnh đó, các giá trị véc tơ trong (7) như sau:  $\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{s}) \mathbf{R}$ ,  $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{R}^T (\mathbf{M}(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{R}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \mathbf{R})$  và  $\bar{\mathbf{g}} = \mathbf{R}^T \mathbf{g}(\mathbf{s})$  với  $\mathbf{R} = [\mathbf{I}_3 \quad -\boldsymbol{\Phi}_p^{-1} \boldsymbol{\Phi}_a]^T$ . Ngoài ra,  $\boldsymbol{\Phi}_a$  là ma trận Jaccobi ứng với  $\mathbf{s}_a$ ,  $\boldsymbol{\Phi}_p$  là ma trận Jaccobi ứng với  $\mathbf{s}_p$  và  $\mathbf{I}_3$  là ma trận đơn vị kích thước  $3 \times 3$ .

Nhân  $\mathbf{R}^T$  vào 2 vế của phương trình (3) ta thu được:

$$\mathbf{R}^T (\mathbf{M}(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{g}(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\Phi}_s^T(\mathbf{s}) \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{R}^T \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_a \quad (8)$$

Từ hệ (2), kết hợp với ma trận  $\boldsymbol{\Phi}_p$  không suy biến ta có  $\dot{\mathbf{s}}_p = -\boldsymbol{\Phi}_p^{-1} \boldsymbol{\Phi}_a \dot{\mathbf{s}}_a$ . Như vậy, suy ra:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{R} \dot{\mathbf{s}}_a \quad \text{và} \quad \ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{R} \ddot{\mathbf{s}}_a + \dot{\mathbf{R}} \dot{\mathbf{s}}_a \quad (9)$$

Thay (9) vào (8), kết hợp  $\mathbf{R}^T \boldsymbol{\Phi}_s^T = \mathbf{0}$  ta thu được:

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{s}) \mathbf{R} \ddot{\mathbf{s}}_a + \mathbf{R}^T (\mathbf{M}(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{R}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \mathbf{R}) \dot{\mathbf{s}}_a + \mathbf{R}^T \mathbf{g}(\mathbf{s}) = \boldsymbol{\tau}_a \quad (10)$$

Thay phương trình (7) vào phương trình (10), ta có:

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{s}}_a + \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{s}}_a + \bar{\mathbf{g}} = \bar{\mathbf{M}} (\ddot{\mathbf{r}}_a + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_a) + \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{s}}_a + \bar{\mathbf{g}} \quad (11)$$

Vì ma trận  $\mathbf{M}(\mathbf{s})$  là đối xứng, xác định dương nên ma trận  $\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{s}) \mathbf{R}$  cũng đối xứng và xác định dương. Do đó,  $\bar{\mathbf{M}}$  khả nghịch và từ (11) suy ra:

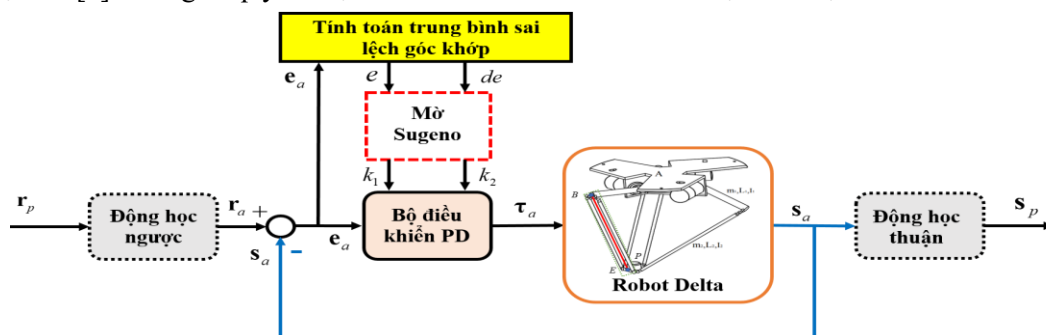
$$\ddot{\mathbf{e}}_a = -\mathbf{K}_p \mathbf{e}_a - \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_a \quad (12)$$

Trong đó:  $\mathbf{K}_p$  và  $\mathbf{K}_D$  được chọn sao cho thỏa mãn ma trận  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ -\mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_D \end{bmatrix}$  là Hurwitz. Khi đó, sai số góc khớp  $\mathbf{e}_a$  sẽ tiến về giá trị không sau một khoảng thời gian hữu hạn và tính ổn định trong quá trình vận hành của robot Delta sẽ được đảm bảo.

### 2.4. Đề xuất giải thuật PD dựa trên mô hình kết hợp logic mờ Sugeno cho robot Delta

Trong luật (7), các tham số  $\mathbf{K}_p$  và  $\mathbf{K}_D$  được tìm dựa trên phương pháp thử sai thỏa mãn  $\mathbf{H}$  là Hurwitz, nên chất lượng sẽ bị ảnh hưởng trực tiếp thông qua việc lựa chọn bộ tham số này. Do đó,

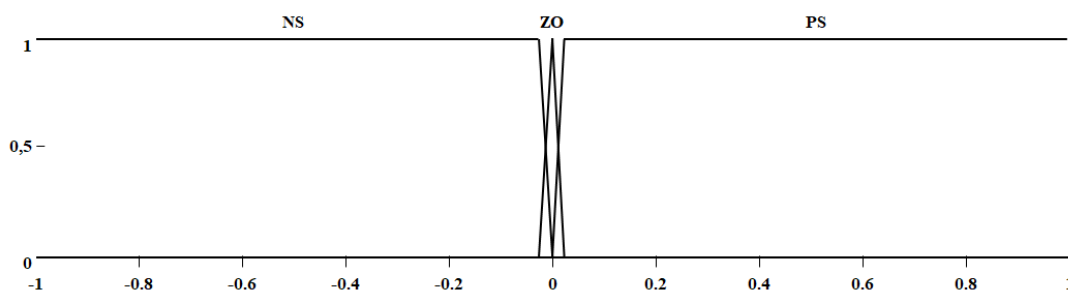
chiến lược điều khiển PD dựa trên mô hình kết hợp logic mờ Sugeno (PD-FS) được chúng tôi nghiên cứu nhằm chỉnh định trực tuyến các giá trị tham số  $\mathbf{K}_p$  và  $\mathbf{K}_d$  trong (7) xuyên suốt quá trình vận hành của hệ thống. Hơn nữa, với việc chỉnh định tham số trực tuyến, sẽ giúp hệ thống đảm bảo tính ổn định khi chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài tác động lên mô men khớp, điều mà giải thuật PD [1] chưa giải quyết được. Sơ đồ cấu trúc của PD-FS được thể hiện trên hình 4.



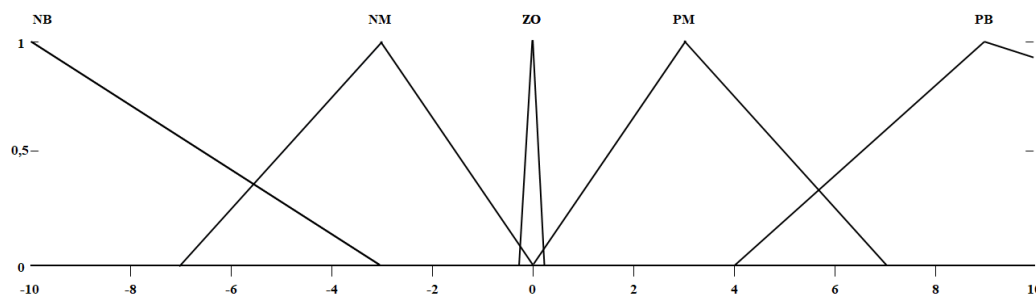
Hình 4. Cấu trúc giải thuật PD dựa trên mô hình kết hợp logic mờ Sugeno.

Hệ suy diễn cho mô hình mờ Sugeno được sử dụng với hai đầu vào bao gồm trung bình sai lệch góc khớp  $e = \sum_{k=1}^3 e_{\theta_k} / 3$ , trong đó,  $e_{\theta_k}$  là sai lệch bám góc khớp thứ  $k$ , và đạo hàm  $de$  của nó, hai đầu ra gồm  $k_1, k_2$  với  $\mathbf{K}_p = k_1 \mathbf{I}_3, \mathbf{K}_d = k_2 \mathbf{I}_3$ . Bên cạnh đó, các khoảng giá trị của biến ngôn ngữ, biến vật lý và các dạng hàm liên thuộc được xây dựng dựa trên kinh nghiệm.

Các tập mờ cho biến ngôn ngữ đầu vào  $e$  và  $de$  được biểu diễn ở hình 5 và hình 6 với  $e = \{ \text{âm ít, zero, dương ít} \} = \{ \text{NS, ZO, PS} \}$ ,  $de = \{ \text{âm nhiều, âm vừa, zero, dương vừa, dương nhiều} \} = \{ \text{NB, NM, ZO, PM, PB} \}$ . Hai giá trị đầu ra  $k_1 = \{ \text{trung bình, lớn, rất lớn} \} = \{ \text{M, B, VB} \} = \{ 1800, 1900, 6000 \}$ ,  $k_2 = \{ \text{trung bình, lớn, rất lớn} \} = \{ \text{M, B, VB} \} = \{ 135, 180, 280 \}$  và chi tiết các luật hợp thành thể hiện trong bảng 1.



Hình 5. Tập mờ cho biến ngôn ngữ đầu vào  $e$ .



Hình 6. Tập mờ cho biến ngôn ngữ đầu vào  $de$ .

Bảng 1. Chi tiết các luật hợp thành.

$k_1, k_2$		$e$		
		NS	ZO	PS
$de$	NB	M, VB	VB, B	B, M
	NM	VB, B	VB, B	VB, B
	ZO	VB, B	M, M	VB, B
	PM	M, M	VB, B	VB, B
	PB	M, VB	VB, B	M, M

Luật hợp thành trên được xây dựng dựa trên hai yếu tố, gồm kinh nghiệm thực tế với robot Delta và sự hiểu biết về tác động của các tham số PID lên hiệu suất điều khiển [2, 8]. Khi xem xét một trường hợp cụ thể  $(e, de) = (ZO, ZO)$ , chúng tôi đã quan sát thấy sự tiệm cận của sai lệch góc khớp trung bình  $e$  và đạo hàm  $de$  của nó đến giá trị 0, xu hướng biến động lúc này giảm đáng kể. Khi đó, việc chỉnh tham số  $K_p$  và  $K_D$  đạt giá trị (M,M) sẽ đảm bảo hiệu suất điều khiển và tính ổn định của hệ thống. Tương tự với các trường hợp khác của  $(e, de)$ .

### 3. CÁC KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Nội dung này, kiểm chứng chất lượng điều khiển của FD-FS do chúng tôi đề xuất trong việc kiểm soát quỹ đạo chuyển động của robot Delta. Chất lượng bộ điều khiển FD-FS được so sánh với giải thuật PD ở tài liệu [1] trên quỹ đạo đặt hình số 8, trong hai kịch bản 5.1 và 5.2. Các kịch bản này được mô tả như sau:

- **Kịch bản 1:** Đây là kịch bản đơn giản nhất, khi các thông số mô hình động lực học của hệ thống được xác định chính xác. Bên cạnh đó, không có nhiễu ngoài tác động vào mô men khớp.
- **Kịch bản 2:** Trong bài báo này để thử khả năng kháng nhiễu của bộ điều khiển chúng tôi mô phỏng hệ thống bị ảnh hưởng của nhiễu ngoài có giá trị 3 (N) tác động vào mô men khớp trong suốt 0.5 (s) đầu khi hệ thống hoạt động (hình 8).
- **Kịch bản 3:** Đây là kịch bản khó khăn nhất, khi hệ thống phải chịu tác động của nhiễu không biết trước, có giá trị thay đổi ngẫu nhiên trong dải từ 1.5 (N) tới 6 (N) tác động vào mô men khớp trong suốt quá trình hệ thống hoạt động, kể từ khi thay đổi quỹ đạo đặt sang hình số 8 (hình 10).

Để đảm bảo tính khách quan trong việc đánh giá và thuận lợi cho việc đối sánh kết quả, thông số mô được lấy từ [1] bao gồm:

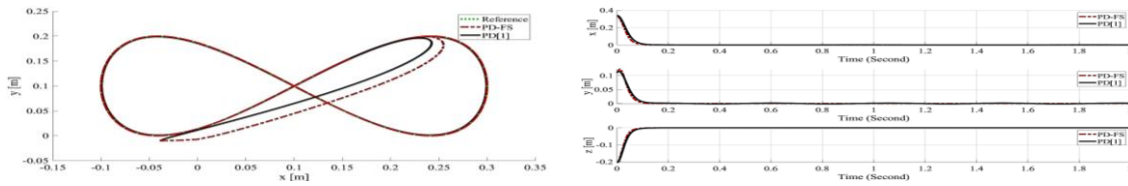
$$\alpha_1 = 0(rad), \alpha_2 = 2\pi / 3(rad), \alpha_3 = 4\pi / 3(rad), g = 9.81(m / s^2), m_1 = 0.42(kg), m_b = 0.1(kg), m_p = 0.75(kg), R = 0.266(m), r = 0.04(m), L_1 = 0.3(m), L_2 = 0.8(m), K_p = 256I_3, K_D = 32I_3$$

Phương trình quỹ đạo hình số tám cho bởi:

$$x_d = 0.1 + 0.2 \cos(2t); y_d = 0.1 + 0.2 \cos(2t) \sin(2t); z_d = -0.7$$

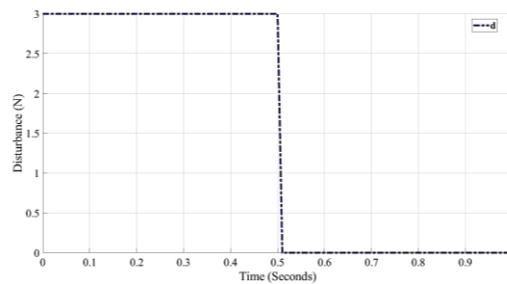
#### 3.1. Kịch bản 1: Mô hình hệ thống không có nhiễu ngoài tác động vào mô men khớp

Trong trường hợp này, cả hai giải thuật PD-FS và PD đều cho chất lượng điều khiển rất tốt. Từ kết quả trên hình 7 có thể thấy hiệu suất của PD-FS và PD gần như tương đương, điều này chứng tỏ khả năng suy luận tốt của logic mờ Sugeno trong việc chỉnh định tham số bộ điều khiển. Bên cạnh đó, quỹ đạo chuyển động mong muốn của robot Delta nhanh chóng đạt được, sai số xác lập hội tụ về 0 và ổn định sau thời gian rất ngắn chỉ khoảng 0.15 (s). Thuật toán PD-FS có thời gian ổn định ngắn hơn và cũng dao động nhỏ hơn khi ở trạng thái ổn định so với thuật toán PD.

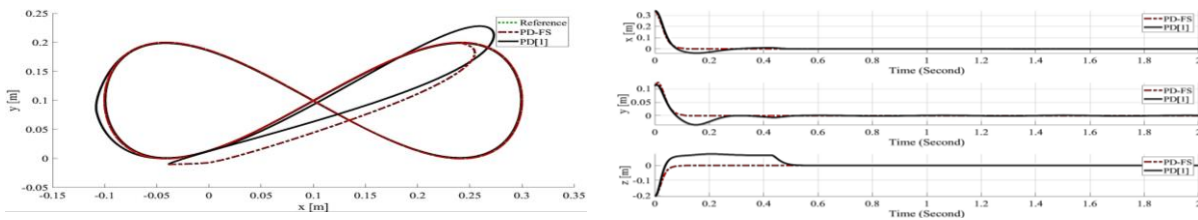


Hình 7. Đáp ứng quỹ đạo hình số 8 và sai lệch bám vị trí của hệ thống khi không có nhiễu.

### 3.2. Kịch bản 2: mô hình hệ thống bị nhiễu ngoài tác động vào mô men khớp



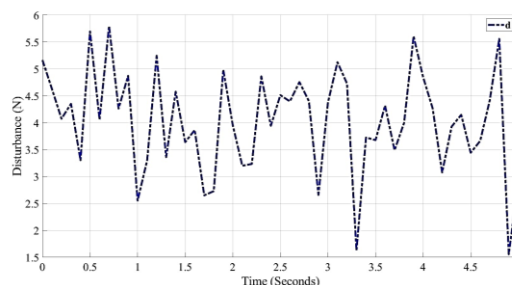
Hình 8. Nhiễu ngoài không biết trước tác động vào mô men khớp.



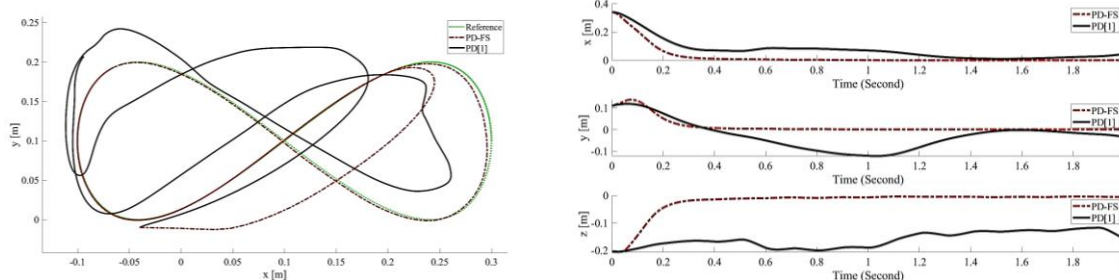
Hình 9. Đáp ứng quỹ đạo hình số 8 và sai lệch bám vị trí của hệ thống khi có nhiễu.

Từ kết quả mô phỏng trên hình 9 có thể thấy mặc dù hệ thống đã chịu ảnh hưởng của ngoại lực nhưng thuật toán PD-FS vẫn mang lại chất lượng điều khiển khá tốt và gần như không có sự thay đổi về hiệu suất so kết quả ở 3.1, khi vẫn điều khiển robot Delta nhanh chóng đạt được quỹ đạo chuyển động mong muốn với sai số xác lập hội tụ về 0, và ổn định sau thời gian rất ngắn chỉ khoảng 0.15 (s). Trái lại, PD cho chất lượng điều khiển không tốt, cho đến khi kết thúc tác động nhiễu (sau 0.5s) thì mới đưa robot về vị trí mong muốn với 1 chút dao động (không đáng kể) ở đầu ra thứ 2. Từ đó, ta thấy rằng thuật toán PD-FS đề xuất có thể cải tiến chất lượng điều khiển robot Delta trong trường hợp không có hay có nhiễu tác động. Ngoài ra, với thuật toán PD-FS hai giá trị  $K_P$  và  $K_D$  còn được cập nhật tự động thông qua suy luận của logic mờ Sugeno.

### 3.3. Kịch bản 3: Mô hình hệ thống bị nhiễu ngoài thay đổi ngẫu nhiên tác động vào mô men khớp trong suốt quá trình hoạt động của hệ thống



Hình 10. Nhiễu ngoài có giá trị thay đổi ngẫu nhiên tác động vào mô men khớp.



**Hình 11.** Đáp ứng quỹ đạo hình số 8 và sai lệch bám vị trí của hệ thống khi có nhiễu ngẫu nhiên.

Kết quả mô phỏng trên hình 11 càng khẳng định rõ ưu điểm của thuật toán PD-FS mà nhóm tác giả đề xuất, khi giải thuật vẫn cho chất lượng điều khiển khá tốt và ổn định khi kiểm soát quỹ đạo bàn máy động của robot Delta. Trong toàn bộ thời gian hoạt động của hệ thống, giải thuật PD-FS vẫn đảm bảo cho robot Delta nhanh chóng đạt được quỹ đạo chuyển động mong muốn, với sai số xác lập hội tụ về 0, và ổn định sau thời gian ngắn chỉ khoảng 0.3 (s), trong trường hợp chịu ảnh hưởng bởi nhiễu ngoài dạng ngẫu nhiên được minh họa trên hình 10. Trái lại, trong trường hợp này phương pháp PD cho chất lượng điều khiển không tốt, khi không có khả năng điều khiển robot bám theo quỹ đạo đặt.

#### 4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Nghiên cứu đã cải tiến thuật toán PD dựa trên mô hình bằng cách sử dụng logic mờ Sugeno chỉnh định trực tuyến các giá trị tham số của bộ điều khiển, nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho robot Delta. Thuật toán được đề xuất đảm bảo tính ổn định và bền vững của robot khi chịu tác động của nhiễu và đã được kiểm chứng qua công cụ mô phỏng Matlab&Simulink trên quỹ đạo đặt hình số tám. Các kết quả mô phỏng cho thấy, hiệu suất của bộ điều khiển rất tốt khi có thể kiểm soát chuyển động của robot song song Delta 3-DOF đi theo quỹ đạo mong muốn và ổn định với thời gian xác lập nhanh ngay cả khi hệ thống chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài không biết trước. Sự đơn giản và tin cậy của phương pháp điều khiển do nhóm tác giả đề xuất đã tạo nền tảng cho việc thiết kế, chế tạo và kiểm soát quỹ đạo chuyển động thực tế cho robot Delta. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ tập trung áp dụng thuật toán vào một mô hình thực tế. Đồng thời, chúng tôi sẽ tiếp tục nghiên cứu phát triển các giải thuật điều khiển thông minh khác.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, đề tài mã số 32\_2022\_RD\_HD\_DHCN.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Đình Dũng, “Động lực học ngược và điều khiển chuyển động của robot song song delta không gian”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật cơ khí và cơ kỹ thuật, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, tr. 78-79, (2018).
- [2]. Lê Minh Thành et al, “Chỉnh định bộ điều khiển pid bằng hệ mờ áp dụng cho robot delta ba bậc tự do”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên (2022).
- [3]. Le Minh Thanh et al , “Evaluating the Quality of Intelligent Controllers for 3-DOF Delta Robot Control”, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (2021).
- [4]. Le Minh Thanh et al , “Delta Robot Control Using Single Neuron PID Algorithms Based on Recurrent Fuzzy Neural Network Identifiers”, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (2020).
- [5]. Le Minh Thanh et al , “Optimization of PID controller by genetic algorithm experiment on delta robot”, Measurement, Control, and Automation (2022).
- [6]. Aguilar-Mejia et al, “Adaptive control of 3-DOF Delta parallel robot”, In 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (2019).

- [7]. Sugeno M, “*Industrial applications of fuzzy control*”, Elsevier Science Inc (1985).
- [8]. R. Tipsuwanporn et al, “*Fuzzy Logic PID controller based on FPGA for process control*”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 2, pp. 1495-1500, (2004).
- [9]. Castañeda et al, “*Robust trajectory tracking of a delta robot through adaptive active disturbance rejection control*”, IEEE Transactions on control systems technology, 23(4), 1387-1398 (2014).
- [10]. A. Zubizarreta et al, “*Robust Model Based Predictive Control for Trajectory Tracking of Parallel Robots*”, In book: *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications* (2014).
- [11]. Y. Hu et al, “*Reinforcement Learning Tracking Control for Robotic Manipulator With Kernel-Based Dynamic Model*”, in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (2020).
- [12]. Xi Chen et al, “*Industrial Robot Control with Object Recognition based on Deep Learning*”, Procedia CIRP, Volume 76, Pages 149-154, ISSN 2212-8271, (2018).
- [13]. Tobias Gold et al, “*Model Predictive Interaction Control for Industrial Robots*”, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 2, Pages 9891-9898, ISSN 2405-8963, (2020).
- [14]. Rongrong Liu et al, “*Deep Reinforcement Learning for the Control of Robotic Manipulation: A Focussed Mini-Review*”, Robotics 10(22):1-13, (2021).
- [15]. Yen, V.T., Nan, W.Y. & Van Cuong, P, “*Recurrent fuzzy wavelet neural networks based on robust adaptive sliding mode control for industrial robot manipulators*”, Neural Comput & Applic (2019).
- [16]. Dang, Son Tung, et al. “*Adaptive Backstepping Hierarchical Sliding Mode Control for 3-Wheeled Mobile Robots Based on RBF Neural Networks.*” Electronics 12.11: 2345, (2023).

#### ABSTRACT

##### **PD algorithm combined with Sugeno fuzzy logic improves trajectory tracking control quality for Delta parallel robot**

*The research aims to improve the model-based PD algorithm by using Sugeno fuzzy logic to adjust the parameter values of the controller online, improving the trajectory tracking quality and robustness to noise for the Delta parallel robot. The study uses Matlab and Simulink simulation tools to validate the reliability of the controller on an eight-shaped trajectory. The simulation results show that the control performance is very good when it is possible to control the motion of the Delta 3-DOF parallel robot follow the desired trajectory and maintain stability with a fast settling time even when the system is affected by unknown external disturbances.*

**Keywords:** Delta 3-DOF; Model-based PD controller; Sugeno fuzzy logic; Trajectory tracking control.