

## TUNING THE PID CONTROLLER BY FUZZY INFERENCE SYSTEM APPLIED TO 3-DOF DELTA ROBOT

Le Minh Thanh<sup>1</sup>, Nguyen Chien Thang<sup>1</sup>, Nguyen Chi Ngon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Vinh Long University of Technology and Education

<sup>2</sup>Can Tho University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 24/11/2021	Three degrees of freedom (3DoF) Delta robot is a parallel robot that has a fairly wide range of uses in industries like 3D printing, welding robots, etc... The robot has attracted many researchers to develop control methods for tracking its trajectories, in which PID controller is a suitable choice for controlling the Delta robot because of its low design and experimental costs. However, arm parameters such as weight, joints, and friction can change and affect to the operation of the whole system, where the fixed-PID controller may be no longer maintaining traction control. Therefore, this paper presents the analysis, comparison, and evaluation of a fuzzy self-tuning algorithm for the classical PID controller to get better performance of the closed-loop control system. Simulation results in MATLAB/Simulink demonstrate the effectiveness of the control algorithm with a settling time of 0.658 (s) and an overshoot of about 3.75%.
Revised: 20/01/2022	
Published: 11/02/2022	
<b>KEYWORDS</b>	
PID	
FUZZY-PID	
Delta robot	
Reference trajectory	
Closed-loop control	

## CHỈNH ĐỊNH BỘ ĐIỀU KHIỂN PID BẰNG HỆ MỜ ÁP DỤNG CHO ROBOT DELTA BA BẬC TỰ DO

Lê Minh Thành<sup>1</sup>, Nguyễn Chiến Thắng<sup>1</sup>, Nguyễn Chí Ngôn<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>2</sup>Trường Đại học Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 24/11/2021	Robot Delta ba bậc tự do là loại robot song song có phạm vi sử dụng khá rộng trong các ngành công nghiệp như in 3D, robot hàn, robot gấp thuốc trong các nhà máy sản xuất thuốc tây,... Vì vậy, để điều khiển bám quỹ đạo của robot Delta có rất nhiều phương pháp điều khiển, trong đó bộ điều khiển PID là một chọn lựa phù hợp cho điều khiển robot Delta vì chi phí thiết kế và thực nghiệm thấp. Tuy nhiên, các tham số của cánh tay như trọng lượng, khớp và ma sát có thể thay đổi và ảnh hưởng đến hoạt động của cả hệ, mà ở đó bộ điều khiển PID không còn duy trì điều khiển bám theo quỹ đạo. Vì vậy, bài báo này đưa ra phân tích, so sánh và đánh giá giải thuật điều khiển tự chỉnh định FUZZY-PID cho bộ điều khiển PID kinh điển để có được hiệu suất tốt hơn của hệ điều khiển vòng kín. Các kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink chứng minh hiệu quả của giải thuật điều khiển với thời gian xác lập 0,658 (s) và độ quá điều chỉnh nhỏ 3,75 %.
Ngày hoàn thiện: 20/01/2022	
Ngày đăng: 11/02/2022	
<b>TỪ KHÓA</b>	
PID	
FUZZY-PID	
Robot Delta	
Quỹ đạo tham chiếu	
Điều khiển vòng kín	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5290>

\* Corresponding author. Email: ncngon@ctu.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Điều khiển robot song song là một chủ đề mà nhiều nhà nghiên cứu vẫn đang phát triển. Với cơ chế linh hoạt lợi thế về tốc độ, lực và độ chính xác, robot Delta trở nên phổ biến và được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp [1]. Robot song song bắt đầu vào năm 1939, khi Pollard xây dựng một robot điều khiển vị trí của một khẩu súng phun [2]. Trong bối cảnh này, các robot khác có cùng một kiến trúc đã được thực hiện. Chẳng hạn, trong [3] các tác giả đã phân tích cơ cấu và không gian làm việc, từ đó tính toán động học của robot. Trong [4], các tác giả đã xây dựng cấu trúc cơ khí, từ đó thiết lập bộ điều khiển cho robot Delta. Dựa trên mô hình robot này, các kiến trúc mới được thực hiện theo các đặc tính cần thiết trong một trường công nghiệp. Điển hình là một robot với độ chính xác cao, có khả năng xác định và di chuyển các đối tượng theo màu sắc của sản phẩm [5]. Robot Delta được ứng dụng phổ biến trong các dây chuyền sản xuất hiện đại, tự động đòi hỏi môi trường làm việc sạch sẽ.

Tuy nhiên, việc thiết kế và kiểm soát quỹ đạo của robot trên mô hình thực là vấn đề luôn được quan tâm. Các nhà nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot này như chỉnh định bộ điều khiển mờ bằng giải thuật bầy đàn PSO [6]. Trong [7], các tác giả cũng đã thiết kế bộ điều khiển mờ để điều khiển bám quỹ đạo của robot Delta. Tuy nhiên, việc thiết kế các bộ điều khiển bám quỹ đạo robot Delta trên mô hình thực vẫn còn khá hạn chế các nghiên cứu được thực hiện. Vì vậy, bài báo này đưa ra phân tích, so sánh và đánh giá các giải thuật điều khiển tự động chỉnh định FUZZY-PID nhằm mục đích tìm ra các giá trị  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  tối ưu để tiến hành so sánh với bộ điều khiển PID kinh điển [8], [9] để có được hiệu suất tốt hơn của hệ thống vòng kín, đồng thời các phương pháp nghiên cứu được thực nghiệm bằng phần mềm MATLAB/Simulink và thực nghiệm bộ điều khiển PID trên mô hình robot Delta thực điều khiển góc quay của ba động cơ AC Servo Motor Three-Phase 200V.

Bài báo được tổ chức gồm 5 phần, như sau: Giới thiệu được trình bày ở phần 1, phần 2 trình bày mô hình động lực học và mô hình điều khiển của robot Delta, chỉnh định bộ điều khiển PID bằng hệ mờ được trình bày ở phần 3, phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng và thực nghiệm, kết luận là phần 5.

## 2. Mô hình động lực học và mô hình điều khiển robot Delta

### 2.1. Xây dựng mô hình động lực học của robot

#### 2.1.1. Mô hình của robot Delta

Tác giả đã nghiên cứu, thiết kế bản vẽ [10] và mô phỏng chuyển động của robot Delta trong solid works được trình bày trong video [11], đồng thời sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử để thiết lập phương trình chuyển động của robot Delta được trình bày trong Hình 1.



**Hình 1.** Bản vẽ robot Delta: (a) bản vẽ kỹ thuật robot Delta và (b) mô hình động lực học robot Delta

Trong mô hình này, khâu  $B_iD_i$  được mô hình hóa thành hai chất điểm đặt tại  $B_i$  và  $D_i$ , mỗi chất điểm có khối lượng  $m_b$  và được nối với nhau bằng thanh cứng, không trọng lượng. Như vậy, mô hình động lực học của mô hình này bao gồm 4 vật rắn, trong đó các khâu  $A_iB_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) chuyển động quay quanh các trục vuông góc với mặt phẳng  $OA_iB_i$  tại  $A_iB_i$  có khối lượng  $m_1$  (khối lượng

cánh tay đòn trên) và 3 chất điểm đặt tại các điểm  $B_i$  có khối lượng  $m_b = m_2 / 2$  và vật rắn còn lại là bàn máy chuyển động (bao gồm ba chất điểm gắn tại  $D_i$ ) chuyển động tịnh tiến có khối lượng  $(m_p + 3m_b)$ . Trong đó,  $m_p$  là khối lượng của khâu thao tác chuyển động có tâm  $P$ . Trên các khâu  $A_i B_i$  đặt các lực phát động  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) như Hình 1 thành lập mô hình động lực học của robot tác giả sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử để thiết lập phương trình chuyển động. Tọa độ suy rộng được chọn để thiết lập phương trình chuyển động của robot Delta như (1):

$$q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_p \ y_p \ z_p] \quad (1)$$

### 2.1.2. Xây dựng phương trình động lực học của robot Delta

Để xây dựng mô hình động lực học của robot Delta 3-DOF, tác giả tham khảo trong các tài liệu [12]-[14] bao gồm các phương trình chuyển động của robot Delta là hệ phương trình vi phân – đại số được trình bày từ (2) đến (10).

$$(I_{I_y} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_1 = g L_1 \left( \frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_1 + \tau_1 - 2\lambda_1 L_1 (\sin \theta_1 (R-r) - \cos \alpha_1 \sin \theta_1 x_p - \sin \alpha_1 \sin \theta_1 y_p - \cos \theta_1 z_p) \quad (2)$$

$$(I_{I_y} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_2 = g L_1 \left( \frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_2 + \tau_2 - 2\lambda_2 L_1 (\sin \theta_2 (R-r) - \cos \alpha_2 \sin \theta_2 x_p - \sin \alpha_2 \sin \theta_2 y_p - \cos \theta_2 z_p) \quad (3)$$

$$(I_{I_y} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_3 = g L_1 \left( \frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_3 + \tau_3 - 2\lambda_3 L_1 (\sin \theta_3 (R-r) - \cos \alpha_3 \sin \theta_3 x_p - \sin \alpha_3 \sin \theta_3 y_p - \cos \theta_3 z_p) \quad (4)$$

$$(m_p + 3m_b) \ddot{x}_p = -2\lambda_1 (\cos \alpha_1 (R-r) + L_1 \cos \alpha_1 \cos \theta_1 - x_p) - 2\lambda_2 (\cos \alpha_2 (R-r) + L_1 \cos \alpha_2 \cos \theta_2 - x_p) - 2\lambda_3 (\cos \alpha_3 (R-r) + L_1 \cos \alpha_3 \cos \theta_3 - x_p) \quad (5)$$

$$(m_p + 3m_b) \ddot{y}_p = -2\lambda_1 (\sin \alpha_1 (R-r) + L_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 - y_p) - 2\lambda_2 (\sin \alpha_2 (R-r) + L_1 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 - y_p) - 2\lambda_3 (\sin \alpha_3 (R-r) + L_1 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 - y_p) \quad (6)$$

$$(m_p + 3m_b) \ddot{z}_p = -(3m_b + m_p)g + 2\lambda_1 (z_p + L_1 \sin \theta_1) + 2\lambda_2 (z_p + L_1 \sin \theta_2) + 2\lambda_3 (z_p + L_1 \sin \theta_3) \quad (7)$$

$$L_2^2 - (\cos \alpha_1 (R-r) + L_1 \cos \alpha_1 \cos \theta_1 - x_p)^2 - (\sin \alpha_1 (R-r) + L_1 \sin \alpha_1 \cos \theta_1 - y_p)^2 - (L_1 \sin \theta_1 + z_p)^2 = 0 \quad (8)$$

$$L_2^2 - (\cos \alpha_2 (R-r) + L_1 \cos \alpha_2 \cos \theta_2 - x_p)^2 - (\sin \alpha_2 (R-r) + L_1 \sin \alpha_2 \cos \theta_2 - y_p)^2 - (L_1 \sin \theta_2 + z_p)^2 = 0 \quad (9)$$

$$L_2^2 - (\cos \alpha_3 (R-r) + L_1 \cos \alpha_3 \cos \theta_3 - x_p)^2 - (\sin \alpha_3 (R-r) + L_1 \sin \alpha_3 \cos \theta_3 - y_p)^2 - (L_1 \sin \theta_3 + z_p)^2 = 0 \quad (10)$$

Các phương trình từ (2) đến (10) được viết lại dưới dạng ma trận như (11):

$$\begin{aligned} M(s) \ddot{s} + g(s) + \Phi_s^T(s) \lambda &= \tau \\ f(s) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó :  $I_{1y} = I_{2y} = I_{3y} = I_{I_y}$  là ten-xơ quán tính của 3 tay trên,  $m_b$  là khối lượng gắn với các khâu  $B_i, D_i, (i = 1, 2, 3)$ ,  $m_p$  là khối lượng bàn máy động,  $m_1$  là khối lượng đặt tại điểm  $A_i (i = 1, 2, 3)$ .

Các biến trạng thái được định nghĩa trong mô hình:

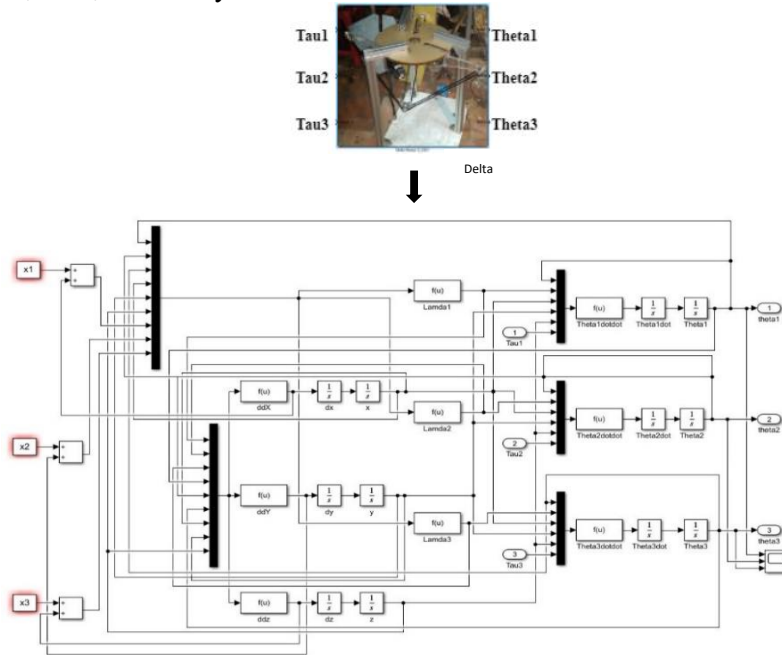
$$s = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_p \ y_p \ z_p]^T \quad (12)$$

Các biến ngõ vào và ngõ ra được định nghĩa như (13):

$$u = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 \end{bmatrix}^T$$

$$y = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \end{bmatrix}$$
(13)

Từ hệ phương trình chuyển động của robot Delta 3-DOF (2) đến (10) tác giả đã xây dựng được mô hình động lực học chuyển động của robot trong MATLAB/Simulink và kết cấu cơ khí mô hình robot thực được trình bày như Hình 2.

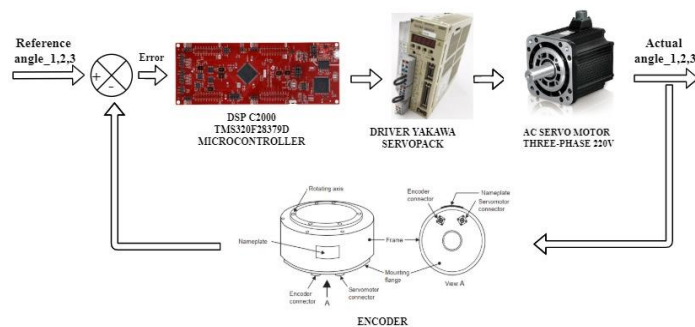


**Hình 2.** Mô hình động lực học chuyển động của robot Delta 3 - DOF xây dựng trong MATLAB/Simulink và kết cấu cơ khí mô hình robot thực mà tác giả chế tạo phiên bản 2

## 2.2. Mô hình điều khiển robot Delta

Chuyển động mỗi khớp của robot Delta là chuyển động quay được điều khiển bởi một động cơ riêng, do có 3 khớp quay nên sẽ có 3 động cơ điều khiển đồng thời.

Nhóm tác giả đang thực nghiệm điều khiển chuyển động khớp quay của robot Delta sử dụng ba động cơ AC Servo Motor Three-Phase 200V [15] được trình bày trong Hình 3.



**Hình 3.** Sơ đồ khối mô hình điều khiển động cơ AC Servo Motor Three-Phase 200V của robot Delta

Quỹ đạo tham chiếu được xây dựng từ khối động học ngược [14] để tạo ra các góc tham chiếu 1, 2, 3 đưa vào vi điều khiển DSPC2000 (trong DSPC2000 sẽ nạp bộ điều khiển đã thiết kế tối ưu và truyền thông online với máy tính thông qua giao thức UART Communication), ngõ ra của

DSPC2000 là dạng xung PWM đưa vào Driver YAKAWA Servopack, ngõ ra của Driver Servopack là điện áp  $U_{AC}$  điều khiển động cơ chuyển động khớp quay của cánh tay robot thông qua động cơ AC Servo Motor Three-Phase 200V (tốc độ và chiều quay của động cơ thay đổi nhanh hay chậm phụ thuộc vào độ rộng xung ngõ ra của DSPC2000), ngõ ra của động cơ đưa hồi ngược về bộ tổng để cho ra sai số lỗi error giữa góc tham chiếu và góc thực tế trả về bộ điều khiển DSPC2000 thông qua hai Encoder A và Encoder B để xác định vị trí và chiều quay thuận nghịch của động cơ.

### 3. Chỉnh định bộ điều khiển PID bằng hệ mờ

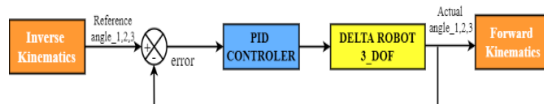
#### 3.1. Bộ điều khiển PID

Thuật toán điều khiển đầu tiên được áp dụng cho các bộ điều khiển chân dẫn động robot Delta là thuật toán điều khiển vi tích phân tỷ lệ PID lý tưởng xác định bởi [9] và được trình bày công thức (14).

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int e(t) dt \quad (14)$$

Trong đó,  $u$  là tín hiệu điều khiển và  $e$  là sai lệch điều khiển. Tín hiệu điều khiển là tổng của 3 thành phần: tỉ lệ, vi phân và tích phân.

Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PID được xác định bởi (14), là chọn lựa bộ ba giá trị  $\{K_p, K_d, K_i\}$  thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng điều khiển được trình bày trong sơ đồ điều khiển Hình 4.



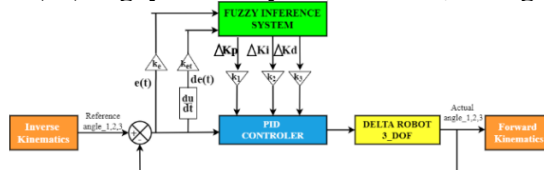
Hình 4. Sơ đồ điều khiển dùng PID

Trong sơ đồ điều khiển có khối động học ngược [14] để chuyển đổi từ vị trí tham chiếu  $[x_{1ref}, y_{1ref}, z_{1ref}]$  sang các góc tham chiếu  $[\theta_{1ref}, \theta_{2ref}, \theta_{3ref}]$  ngõ ra của robot Delta có khối động học thuận [14] để chuyển đổi các góc thực  $[\theta_{1act}, \theta_{2act}, \theta_{3act}]$  sang vị trí thực tại tâm P của tấm chuyển động  $[x_{p\_act}, y_{p\_act}, z_{p\_act}]$ .

Theo phương pháp Z-N và phương pháp auto-tuning trong quá trình mô phỏng, bộ thông số thuật toán điều khiển PID được tác giả chọn những thông số của bộ điều khiển PID trong công trình Luận án Tiến sĩ của tác giả Nguyễn Đình Dũng đã công bố trên cùng mô hình robot [16] để điều khiển bám quỹ đạo robot và so sánh các kết quả đạt được của thuật toán điều khiển PID so với bộ điều khiển FUZZY-PID.

#### 3.2. Bộ điều khiển tự điều chỉnh FUZZY – PID

Điều khiển PID tự điều chỉnh mờ dựa trên điều khiển PID kinh điển và sử dụng các quy tắc suy luận mờ để làm cho các tham số PID tự chỉnh định dựa trên sai lệch  $E(t)$  và đạo hàm  $De(t)$ . Mục đích chính của giải thuật này chính là tìm ra các giá trị  $K_p, K_d, K_i$  tối ưu thỏa mãn mô hình toán của bộ điều khiển PID (14). Nguyên tắc này được minh họa trong Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ điều khiển dùng thuật toán FUZZY-PID

Trên hình 5, các biến đầu vào của bộ điều khiển mờ là sai lệch  $E(t)$  giữa vị trí quỹ đạo mong muốn và vị trí quỹ đạo thực tế và đạo hàm  $De(t)$ . Trong khi đầu ra của hệ thống điều khiển mờ chính là các tham số chỉnh định cho PID tương ứng với  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ . Đồng thời  $K_e, K_{et}, k_1, k_2, k_3$  là các hệ số tiền xử lý và hậu xử lý cho bộ điều khiển FUZZY-PID để thuận tiện cho việc thiết kế và chỉnh định. Ngõ ra của bộ điều khiển PID cũng chính là ngõ ra của bộ điều khiển FUZZY-PID. Các tham số cuối cùng của FUZZY-PID được tính theo công thức dựa vào tài liệu tham khảo [17] như sau:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \cdot k_1 \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \cdot k_2 \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \cdot k_3 \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó:  $K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}$ : giá trị ban đầu của bộ điều khiển PID,  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ : giá trị đầu ra của bộ điều khiển FUZZY,  $K_p, K_i, K_d$ : tham số chỉnh định mong muốn cuối cùng.

Việc xây dựng các hàm liên thuộc, các khoảng giá trị của biến vật lý và biến ngôn ngữ dựa trên kinh nghiệm chỉnh định tham khảo [18] như sau:

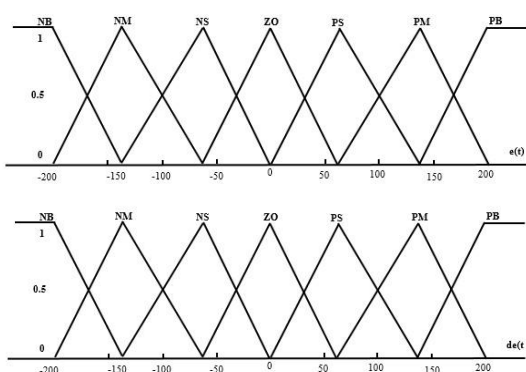
$E(t) = \{\text{âm nhiều, âm vừa, âm ít, zero, dương ít, dương vừa, dương nhiều}\}$

$E(t) = \{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$

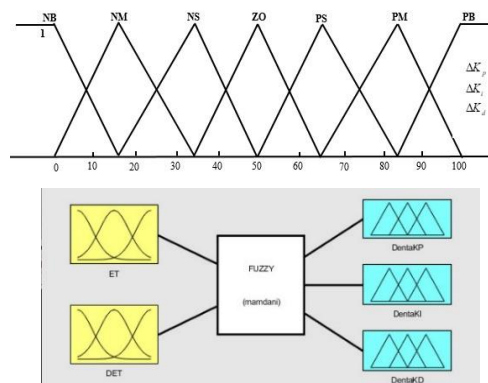
$De(t) = \{\text{âm nhiều, âm vừa, âm ít, zero, dương ít, dương vừa, dương nhiều}\}$

$De(t) = \{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$

Các tập mờ cho các hệ số đầu vào  $E(t)$  và  $De(t)$  được trình bày trong Hình 6, ngõ ra các hệ số  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  và cấu trúc của bộ điều khiển mờ được tác giả sử dụng mô hình Mamdani đã minh họa trong Hình 7. Bảng 1 mô tả chi tiết các luật hợp thành mờ hệ số  $E(t)$ ,  $De(t)$  và  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$



Hình 6. Tập mờ cho biến vào  $E(t)$  và  $De(t)$



Hình 7. Ngõ ra các hệ số  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  và cấu trúc bộ điều khiển mờ

Bảng 1. Chi tiết các luật hợp thành mờ hệ số  $e(t)$ ,  $de(t)$  và  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

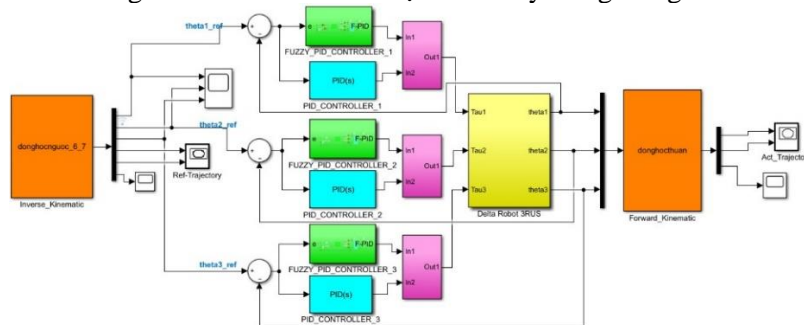
$\Delta K_p / \Delta K_d /$		$E(t)$						
$\Delta K_i$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$De(t)$	NB	PB/PS/NB	PS/PS/NB	NB/PM/NM	NM/PM/NM	NB/ZO/NS	NM/ZO/ZO	PS/ZO/ZO
	NM	PB/PS/NB	PB/PB/NB	NB/PM/NM	NM/PS/NS	NM/ZO/NS	NS/ZO/ZO	ZO/NS/ZO
	NS	ZO/PM/NB	NS/PM/NM	NM/PM/NS	NM/ZO/NS	NS/NS/ZO	NS/NS/PS	ZO/NS/PS
	ZO	ZO/PM/NB	NS/PM/NB	NS/PS/NS	NS/NS/ZO	NS/NM/PS	NS/NM/PM	ZO/NM/PM
	PS	ZO/PS/NM	ZO/PS/NM	ZO/ZO/ZO	ZO/NS/PS	ZO/NM/PS	ZO/NM/PM	ZO/NM/PB
	PM	PB/PS/NS	NS/ZO/NS	PS/NS/PS	PS/NM/PS	PS/NM/PM	PS/NM/PB	PB/NB/PB
	PB	PB/ZO/ZO	PM/ZO/ZO	PM/NM/PS	PM/NM/PM	PS/NB/PM	PS/NB/PB	PB/NB/PB



Nguyên tắc chung để tìm ra các giá trị  $K_p, K_i, K_d$  mong muốn là bắt đầu với các giá trị  $K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}$  theo [16], sau đó dựa vào đáp ứng và thay đổi dần. Ảnh hưởng của các tham số PID tác động lên chất lượng điều khiển [19] là cơ sở để xây dựng luật mờ. Để rút ngắn thời gian, ta cần chọn tín hiệu điều khiển mạnh, do vậy chọn:  $K_p$  lớn,  $K_D$  nhỏ và  $K_i$  lớn; để tránh vọt lố lớn khi đáp ứng gần đạt đến giá trị tham khảo, chọn  $K_p$  nhỏ,  $K_D$  lớn và  $K_i$  nhỏ.

#### 4. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Mô hình bộ điều khiển FUZZY-PID được xây dựng trong MATLAB/Simulink để so sánh đánh giá chất lượng của hai bộ điều khiển trên cùng một mô hình robot Delta được trình bày trong Hình 8 và các thông số của robot Delta được trình bày trong Bảng 2.



Hình 8. Bộ điều khiển FUZZY-PID xây dựng trong MATLAB/Simulink

Bảng 2. Các thông số của robot Delta

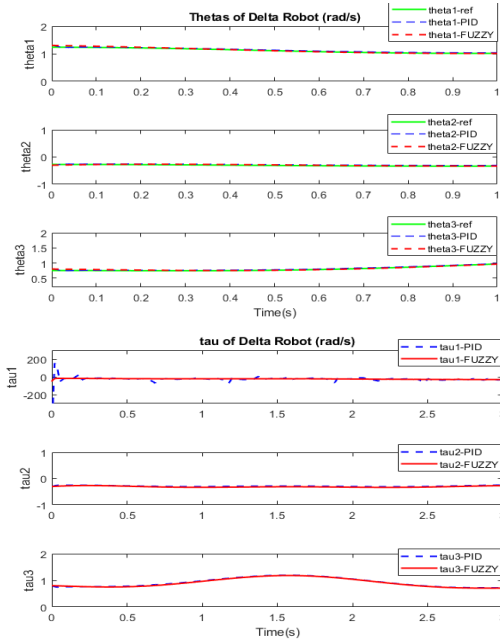
Ký hiệu	$A_1/A_2/A_3$	$m_{1_1}$ $= m_{1_2}$ $= m_{1_3}$	$m_{2_1} = m_{2_2}$ $= m_{2_3}$ $= 2m_b$	$m_p$	f/e	R/r	$L_1/L_2$	$I_{(i=1,2,3)y}$ $= I_y$	$[x_{0P}, y_{0P}, z_{0P}]$	g
Đơn vị	$0 / \frac{2\pi}{3} / \frac{4\pi}{3} \text{ rad / s}$	0,42 kg	0,1 kg	0,75 kg	481/2,5mm	200/30 mm	0,3/0,8m	0,084 kg.m <sup>2</sup>	[0,31, -0,36, -0,69]	9,81 m/s <sup>2</sup>
Ý nghĩa	Góc lệch tay 1/2/3 so với trục Ox tâm cố định	Khối lượng của 3 chân trên	Khối lượng của 3 chân dưới	Khối lượng tâm chuyển động	Chiều dài tam giác đều đĩa nền trên/dưới	Bán kính tâm nền cố định/chuyển động	Chiều dài chân trên/dưới	Ten xoắn quán tính 3 tay trên	Vị trí ban đầu của tâm chuyển động	Gia tốc trọng trường

Trong nghiên cứu này, các tham số của 3 bộ điều khiển PID được chọn theo công trình nghiên cứu của tác giả Nguyễn Đình Dũng đã công bố trong [16], để so sánh với bộ điều khiển mờ mà nhóm nghiên cứu đề xuất, trên cùng một mô hình robot Delta với bộ thông số PID cụ thể như sau:  $K_P = \text{diag} (800,800,800)$ ,  $K_D = \text{diag} (100,100,100)$ ,  $K_I = \text{diag} (150,150,150)$ .

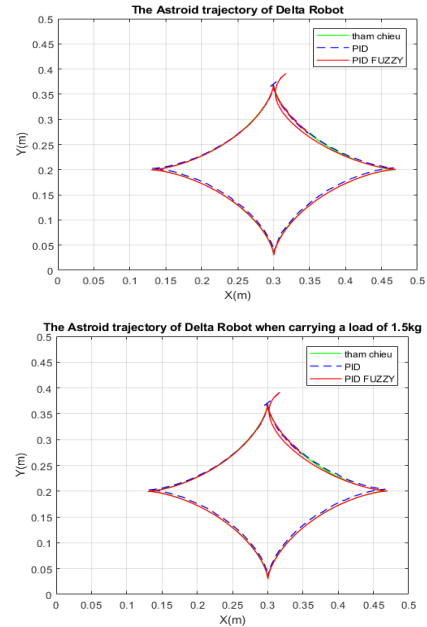
Các tham số của giải thuật FUZZY trong bài báo này được chọn lựa thông qua mô phỏng như sau:  $K_e=30$ ,  $K_{et}=1$ ,  $k_1=1$ ,  $k_2=50$ ,  $k_3=1$ ,  $K_{p0}=800$ ,  $K_{i0}=150$ ,  $K_{d0}=100$ . Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ thực nghiệm trên hai quỹ đạo khác nhau để đánh giá tính ổn định của cả hệ thống vòng kín.

Quỹ đạo tham chiếu đầu tiên được tác giả chọn là quỹ đạo đường cong Astroid được mô tả bởi phương trình như (16) và đạt các kết quả như Hình 9, 10; đồng thời kết quả mô phỏng được trình bày trong video [20].

$$\begin{aligned}
 x(t) &= 0.17 \cdot \sin(t) \cdot \sin(t) \cdot \sin(t) + 0.3 \\
 y(t) &= 0.17 \cdot \cos(t) \cdot \cos(t) \cdot \cos(t) + 0.2 \\
 z &= -0.7
 \end{aligned}
 \tag{16}$$



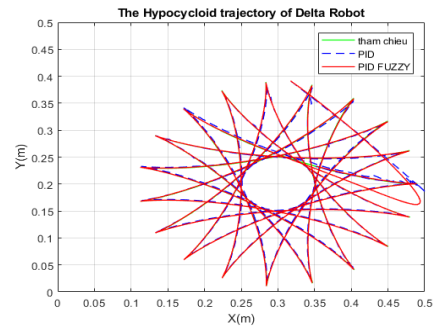
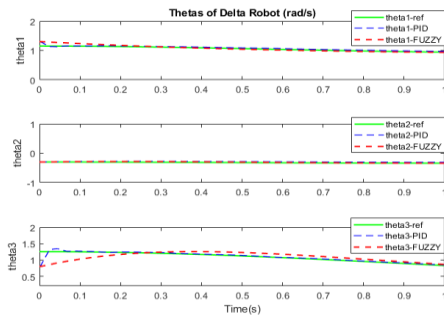
**Hình 9.** Đáp ứng các góc và tín hiệu điều khiển đường cong Astroid



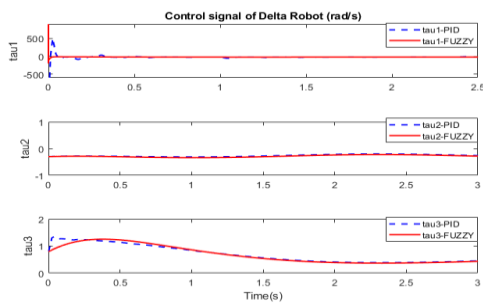
**Hình 10.** Đáp ứng quỹ đạo Astroid khi robot Delta không mang tải và mang tải 1,5 kg

Quỹ đạo tham chiếu số 2 là quỹ đạo đường Hypocycloid được mô tả bởi phương trình như (17) và đạt các kết quả mô phỏng như Hình 11, 12.

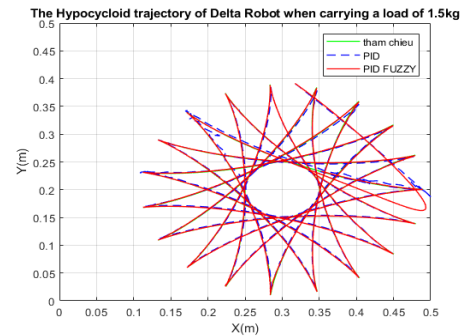
$$\begin{aligned}
 x(t) &= 0.12 \cdot \cos(t) + 0.07 \cdot \cos(1.714 \cdot t) + 0.3 \\
 y(t) &= 0.12 \cdot \sin(t) - 0.07 \cdot \sin(1.714 \cdot t) + 0.2 \\
 z &= -0.7
 \end{aligned}
 \tag{17}$$







**Hình 11.** Đáp ứng các góc và tín hiệu điều khiển đường Hypocycloid



**Hình**

**12.** Đáp ứng quỹ đạo Hypocycloid khi robot Delta không mang tải và mang tải 1,5 kg

Sau khi tiến hành cải tiến bộ điều khiển PID sử dụng thuật toán điều khiển FUZZY-PID. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, đáp ứng của thuật toán FUZZY-PID tốt hơn so với bộ điều khiển PID với các chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở Bảng 3; đồng thời nhóm đã thực nghiệm điều khiển vòng hở trên mô hình robot Delta thật phiên bản 1 và được trình bày trong video [21].

**Bảng 3.** Bảng so sánh các chỉ tiêu chất lượng

Tiêu chuẩn chất lượng	Độ Vọt lố (%)	Thời gian xác lập (s)	Sai số xác lập (rad/s)
<b>PID</b>	5,87	9,5248	0,0186
<b>FUZZY-PID</b>	3,75	0,6580	0,0003

## 5. Kết luận

Việc chế tạo và điều khiển thành công robot Delta 3 bậc tự do, theo yêu cầu của công nghiệp, hiện vẫn còn hạn chế về các nghiên cứu được công bố. Bài báo này trình bày giải pháp thiết kế bộ điều khiển tự chỉnh định Fuzzy-PID để điều khiển bám quỹ đạo robot Delta. Kết quả mô phỏng cho thấy, các tiêu chuẩn chất lượng của hệ thống được cải thiện và đạt giá trị tốt hơn so với bộ điều khiển PID kinh điển. Giải thuật đề xuất có tính ổn định, đáp ứng nhanh, độ quá điều chỉnh không đáng kể và có sai số xác lập nhỏ trong quá trình điều khiển chuyển động của robot Delta 3 bậc tự do trong hệ thống vòng kín. Đồng thời, bộ điều khiển đề xuất cũng được nhóm tác giả áp dụng trên mô hình robot Delta thật, do nhóm chế tạo. Minh họa quá trình thực nghiệm trên robot Delta thật phiên bản 2 điều khiển vòng kín được trình bày trong video [22] của bài báo.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Merlet, "Parallel Robots, Solid Mechanics and Its Applications," Ebook ISBN 978-1-4020-41334, P.O. Box 17, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, Springer, 2000.
- [2] W. L. V. Pollard, "Position-controlling apparatus," Patent US2 286 571 A, Jun 16, 1942.
- [3] C. Liu, G. Cao, and Y. Qu, "Workspace Analysis of Delta Robot Based on Forward Kinematics Solution," 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAS.2019.8808987.
- [4] C. Tsai, A. Yao, N. Radakovic, H. Wei, C. Zhong and Z. Zhou, "Design and Simulation of a Delta Type Robot," International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 2016, pp. 370-373, doi: 10.1109/IS3C.2016.102.
- [5] J. Daniel Martinez Reyes, G. G. Badillo, V. E. E. López and G. G. Mora, "Objects color classification and repositioning operated by a delta robot," XVIII Congreso Mexicano de Robotica, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/COMROB.2016.7955157.
- [6] X. Lu and M. Liu, "A Fuzzy logic Controllers Tuned with PSO for Delta robot Trajectory Control," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015, pp. 4345-4351, doi: 10.1109/IECON.2015.7392776.
- [7] J. Zhang and C. L. Ruizhen Lihong, "3-Degree of freedom parallel robot control based fuzzy theory," International Conference on Intelligent Human -Machine Systems and Cybernetics, 2010, pp. 221-224, doi: 10.1109/IHMSC.2010.62.

- 
- [8] L. Wang, "Basics of PID Control," in *PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink*, IEEE, pp. 1-30, 2020, doi: 10.1002/9781119469414.ch1.
- [9] M. A. Johnson and M. H. Moradi, *PID Control - New Identification and Design Methods*, Springer-Verlag London Ltd. ISBN-10:1-85233-702-8, Chapter 8, pp. 297-337, 2005.
- [10] Aftzar Arrahman, "Design technical drawings in 3D space of 3-DOF robot Delta," *grabcad.com*, Dec. 23, 2019. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/delta-robot-15> [Accessed Sept. 16, 2021].
- [11] C.T. Nguyen, "Design technical drawings, Simulate movement in 3D space of 3-DOF robot Delta," *Vinh Long University of Technology and Education*, Nov. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=SbBMu18UeTE> [Accessed Dec. 12, 2021].
- [12] V. K. Nguyen and A. T. Luong, "On the sliding mode control of redundant parallel robots using neural networks," *Proceedings of the 3rd IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, Singapore*, 2013, pp. 168-177.
- [13] V. K. Nguyen and A. T. Luong, "About a numerical method to solve the inverse kinematic problem, the inverse kinematics of a parallel residual driven robot," *Proceeding of the 4<sup>th</sup> national conference on mechanical science & technology*, 2013, pp. 1291-1299.
- [14] M. T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, C. T. Pham, and C. N. Nguyen, "Trajectory tracking control of 3-DOF Delta robot using Fuzzy-PID Algorithm," *Journal of Automation Today - Special issue on Measurement, Control and Automation*, vol. 22, no. 1, pp. 23-30, 2019.
- [15] Yaskawa Electric Corporation Technical Staff, *Sigma II Series Servo System User's Manual*, Yaskawa Electric Corporation, 2002.
- [16] D. D. Nguyen, "Inverse dynamics and spatial delta parallel robot control," Ph.D. thesis, *Graduated from the University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology*, 2018.
- [17] F. C. Liu, L. H. Liang, and J. J. Gao, "Fuzzy PID Control of Space Manipulator for Both Ground Alignment and Space Applications," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 11, pp. 353-360, 2014, doi: 10.1007/S11633-014-0800-Y.
- [18] M. Namazov, "DC motor position control using fuzzy proportional-derivative controllers with different defuzzification methods," *Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering*, 2010.
- [19] R. Tipsuwanporn, T. Runghimmawan, and S. Intajag, "Fuzzy Logic PID controller based on FPGA for process control," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 1495-1500, 2004, doi: 10.1109/ISIE.2004.1572035.
- [20] C. T. Nguyen, "Delta robot PID tuning by fuzzy Algorithm," *Vinh Long University of Technology and Education*, Sept 12, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=P8AhLmaydhw> [Accessed Sept. 25, 2021].
- [21] M. T. Le, "Delta robot 3-DOF programming design, build and simulate," *Vinh Long University of Technology and Education*, July 27, 2021. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=vu\\_VAc7B6uI&t=25s](https://www.youtube.com/watch?v=vu_VAc7B6uI&t=25s) [Accessed Aug. 25, 2021].
- [22] M. T. Le, "Experimenting with three PID controllers to control the real Delta robot online," *Vinh Long University of Technology and Education*, Dec 31, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VBWqVXd2FIM> [Accessed Jan. 01, 2022].