

Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền kiểm nghiệm trên mô hình robot delta

Optimization of PID controller by genetic algorithm experiment on delta robot

Lê Minh Thành¹, Lương Hoài Thương¹, Phạm Thanh Tùng¹, Phạm Công Thành², Nguyễn Chí Ngôn^{3*}

¹Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Vĩnh Long

²Học viện Hàng không Việt Nam

³Trường Đại học Cần Thơ

(*) Email: ncngon@ctu.edu.vn

Abstract

This study aims (i) to design optimal controllers for a Delta robot, and (ii) to experiment with controlling the robot's end-effector tracking reference trajectories. Delta robot is a parallel robot that has a fairly wide range of uses in industries. There exist many methods for tracking control of the Delta robot, and PID controller is a popular choice because of its low cost of design and experiment. However, arm parameters such as weight, joint, and friction can be changed and affect the operation of the whole system, where PID controllers no longer maintaining control quality. Therefore, this paper presents the analysis, comparison, and evaluation of using the Genetic Algorithm (GA) for self-tuning the PID controller based on criteria of the absolute value of error (IAE). On the other hand, this paper also presents experimental steps to control the Delta robot. Results with GA-PID controller indicate that robot responses archive settling time of about 0.5 (s), and the overshoot is only 3.14 %. Experimental results also show that the proposed algorithm is stable and has a fast response in controlling the motion of the Delta robot.

Keywords: Delta robot, Parallel robot, PID, GA, Trajectory tracking.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	rad	Góc quay các chân trên của robot
m_1	kg	Khối lượng chân trên
m_b	kg	Khối lượng chân dưới
m_p	kg	Khối lượng tâm chuyển động
f	m	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa nền trên
e	m	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa chuyển động dưới
R	m	Bán kính tâm nền cố định
r	m	Bán kính tâm chuyển động
L_1	m	Chiều dài chân trên
L_2	m	Chiều dài chân dưới
α_i	rad	Góc tách chân trên so với mặt phẳng Ox_0y_0 bằng góc tách chân dưới so với mặt phẳng $PxpyP$

Từ viết tắt

DOF	Degrees of freedom
PID	Proportional Integral Derivative
DC	Direct current
IAE	Integral Absolute Error

Z-N	Ziegler-Nichols
AC	Alternating current
GA	Genetic Algorithm
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
RFNNC	Recurrent Fuzzy Neural Network Control
DSP	Digital Signal Processing

Tóm tắt

Nghiên cứu này nhằm (i) đề xuất thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho robot Delta và (ii) thực nghiệm điều khiển đầu mút robot bám theo quỹ đạo tham chiếu. Robot Delta là loại robot song song có phạm vi sử dụng khá rộng trong các ngành công nghiệp. Việc điều khiển bám quỹ đạo của robot Delta hiện có nhiều phương pháp, trong đó bộ điều khiển PID là một chọn lựa phổ biến do chi phí thiết kế và thực nghiệm thấp. Tuy nhiên, các tham số của cánh tay như trọng lượng, khớp nối 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 tốt chất lượng điều khiển. Vì vậy, bài báo này đưa ra phân tích, so sánh và đánh giá việc ứng dụng giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) để tự chỉnh bộ điều khiển PID dựa theo tiêu chuẩn tích phân trị tuyệt đối sai số (IAE). Ngoài ra, nhóm tác giả còn triển khai thực nghiệm điều khiển robot. Kết quả sử dụng bộ điều khiển GA-PID với thời gian xác lập 0.5 (s) và độ vọt lố

nhỏ 3.14 %. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải thuật đề xuất, có tính ổn định và đáp ứng nhanh trong quá trình điều khiển chuyển động của robot.

1. Phần mở đầu

Trong lĩnh vực công nghiệp, việc tối ưu hóa sản xuất là rất cần thiết, tuy nhiên cũng mang lại một thách thức lớn cho các công ty sản xuất robot từ những năm 80 [1]. Vì vậy, các công ty luôn phải nghiên cứu chế tạo ra những loại robot khác nhau, để tối ưu hóa sản xuất công nghiệp. Trong đó, Delta robot hay còn gọi là robot song song ba bậc tự do (Delta robot 3-DOF), là một loại cơ cấu hoạt động khá linh hoạt. Các chuỗi động lực học khép kín của robot này có đặc điểm như tốc độ, lực, độ chính xác làm cho chúng trở nên phổ biến và được sử dụng rộng rãi trong các hoạt động công nghiệp [2]. Bên cạnh đó, do cấu trúc phức tạp của robot này, làm cho chúng trở thành một trọng tâm nghiên cứu thú vị. Robot song song bắt đầu được nghiên cứu vào năm 1939, khi Pollard xây dựng một robot điều khiển vị trí của một khâu súng phun [3]. Trong bối cảnh này, các robot khác có cùng một kiến trúc đã được thực hiện. Ví dụ, một robot được đề xuất bởi Stewart với hai nền tảng đảm bảo sự ổn định cố định trong một cơ sở tĩnh [4]. Năm 1985, một loại robot song song đã được phát triển và xây dựng trong Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) gọi là robot tập trung vào phục vụ công nghiệp [5]. Dựa trên robot này, kiến trúc mới được thực hiện theo các đặc tính cần thiết trong công nghiệp và trường học. Ví dụ đó là một robot với độ chính xác cao nhưng chuyển động chậm, được sử dụng rộng rãi trong các máy in 3D [6].

Bài báo hướng đến hai mục tiêu chính, một là đề xuất thiết kế các bộ điều khiển tối ưu cho robot và hai là điều khiển góc quay của robot. Có một số phương pháp thiết kế bộ điều khiển khác nhau phụ thuộc vào các yêu cầu thiết kế sao cho phù hợp với những ứng dụng cụ thể, trong đó bộ điều khiển PID có thể là một chọn lựa cho bộ điều khiển bám quỹ đạo robot vì chi phí thiết kế, tính toán và thí nghiệm thấp. Tuy nhiên, các tham số không liên quan đến bộ điều khiển các cánh tay như trọng lượng, khớp, ma sát và lực quán tính làm thay đổi các hoạt động của cả hệ thống khép kín mà ở đó bộ điều khiển PID không còn duy trì điều khiển bám quỹ đạo. Vì vậy, bài báo này đưa ra phân tích, so sánh và đánh giá các giải thuật điều khiển trên tiêu chuẩn đánh giá tích phân trị tuyệt đối sai số để có được hiệu suất tốt hơn của hệ thống vòng kín. Giải thuật GA [27-28] có khả năng tìm nghiệm toàn cục với bài toán tối ưu, vì vậy việc sử dụng GA trong nghiên cứu này nhằm tìm giá trị tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID. Các phương pháp nghiên cứu được mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/Simulink và thực nghiệm điều khiển góc quay của ba động cơ AC servo trên mô hình Delta robot 3-DOF mà nhóm đã chế tạo.

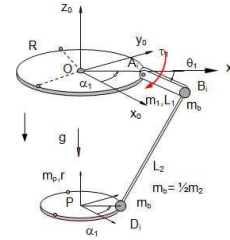
2. Xây dựng mô hình động lực học của Delta robot 3-DOF

2.1. Mô hình của robot

Với 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 robot 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_l 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_iB_i đặt các lực phát động τ_i ($i=1, 2, 3$) như hình 1. Khi 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 dự được chọn để thiết lập phương trình chuyển động của robot là:

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



Hình 1: Mô hình động lực học của robot [7]

2.2. Xây dựng mô hình động lực học của robot

Để xây dựng mô hình động lực học của Delta robot 3-DOF, tác giả đã tham khảo trong các tài liệu [7-11] bao gồm các phương trình chuyển động của robot là hệ phương trình vi phân – đại số được trình bày như sau:

$$(I_{y_1} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_1 = g L_1 \left(\frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_1 + \tau_1 - \quad (2)$$

$$2\lambda_1 L_1 (\sin \theta_1 (R-r) - \cos \alpha_1 \sin \theta_1 x_p - \sin \alpha_1 \sin \theta_1 y_p - \cos \theta_1 z_p)$$

$$(I_{y_2} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_2 = g L_1 \left(\frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_2 + \tau_2 - \quad (3)$$

$$2\lambda_2 L_1 (\sin \theta_2 (R-r) - \cos \alpha_2 \sin \theta_2 x_p - \sin \alpha_2 \sin \theta_2 y_p - \cos \theta_2 z_p)$$

$$(I_{y_3} + m_b L_1^2) \ddot{\theta}_3 = g L_1 \left(\frac{1}{2} m_1 + m_b \right) \cos \theta_3 + \tau_3 - \quad (4)$$

$$2\lambda_3 L_1 (\sin \theta_3 (R-r) - \cos \alpha_3 \sin \theta_3 x_p - \sin \alpha_3 \sin \theta_3 y_p - \cos \theta_3 z_p)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$M(s)\ddot{s} + g(s) + \Phi_s^T(s)\lambda = \tau \tag{11}$$

$$f(s) = 0$$

Trong đó:

$I_{iy} = I_{1y} = I_{2y} = I_{3y}$ là ten-xơ quán tính.

m_p là khối lượng gắn với các khâu $B_i, D_i, (i=1,2,3)$

m_p là khối lượng bàn máy động.

m_i là khối lượng đặt tại điểm $A_i (i=1,2,3)$.

Các biến trạng thái được định nghĩa trong mô hình:

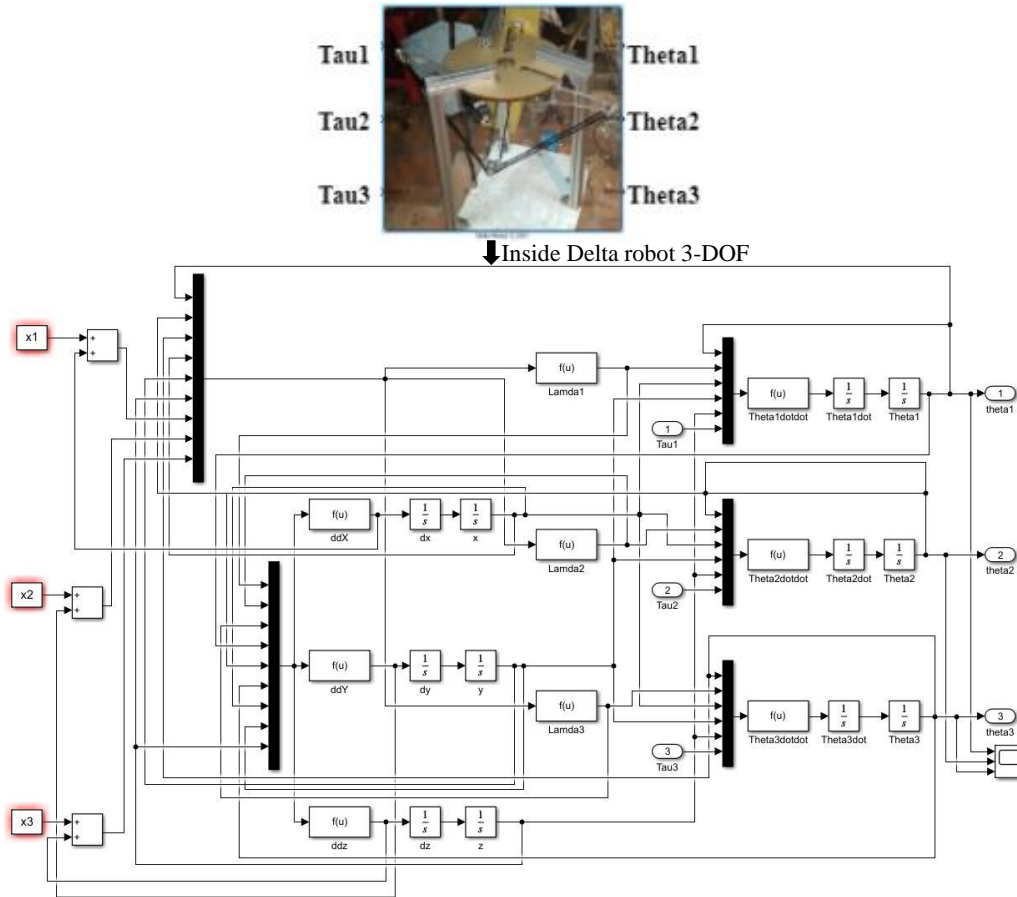
$$s = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_p \ y_p \ z_p]^T \tag{12}$$

Các biến ngõ vào và ngõ ra được định nghĩa:

$$u = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T \tag{13}$$

$$y = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$$

Từ hệ phương trình chuyển động của Delta robot 3-DOF (2) đến (10), tác giả đã xây dựng được mô hình động lực học chuyển động của robot trong MATLAB/Simulink, chế tạo khung cơ khí mô hình robot, nhóm đã chế tạo và thực nghiệm trong hình 2.

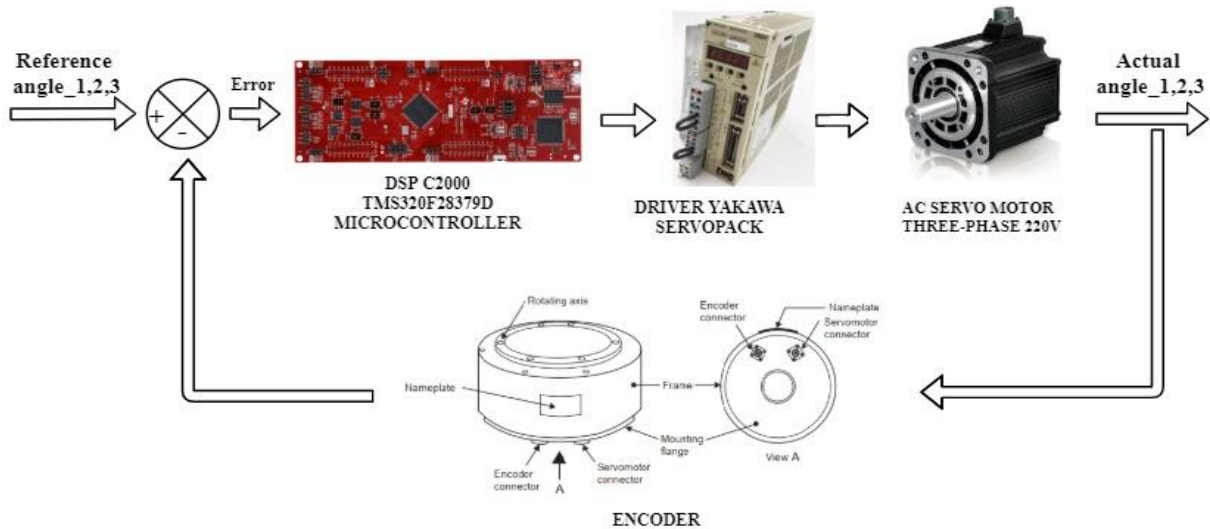


Hình 2: Mô hình động lực học chuyển động của Delta robot 3 - DOF xây dựng trong MATLAB/Simulink và kết cấu cơ khí mô hình robot thực mà tác giả chế tạo phiên bản 2 [11]

3. Mô hình điều khiển Delta robot

Chuyển động mỗi khớp của robot 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 [12-13]. Nhóm tác giả đang thực nghiệm điều khiển chuyển động khớp quay của robot, sử dụng ba động cơ AC Servo Motor Three-Phase 200V [14] 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

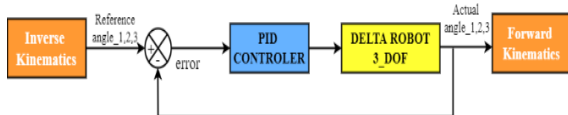
Quy đạo tham chiếu được xây dựng từ khối động học ngược [15], để tạo ra các góc tham chiếu 1, 2, 3 đưa vào bộ DSPC2000 MicroController. Trong DSPC2000, sẽ nạp bộ điều khiển đã thiết kế tối ưu và truyền thông online với máy tính, thông qua giao thức UART Communication. Ngõ ra của DSPC2000 là dạng xung PWM, đưa vào Driver YAKAWA Servopack, ngõ ra của Diver 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.

4. Bộ điều khiển PID

Thuật toán điều khiển đầu tiên được áp dụng cho các bộ điều khiển chân dẫn động robot là thuật toán điều khiển vi tích phân tỷ lệ PID kinh điển, được xác định bởi [16] được trình bày công thức (14)

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

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 thuật toán PID

Trong sơ đồ điều khiển có khối động học ngược [15] 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 có khối động học thuận [15] để chuyển đổi các

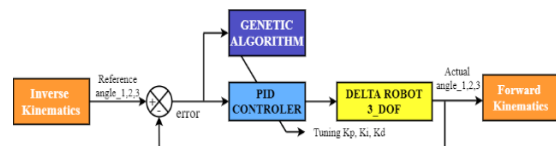
góc thực $[\theta_{1act}, \theta_{2act}, \theta_{3act}]$, sang vị trí thực tại tâm P của tâm chuyển động $[x_{P_act}, y_{P_act}, z_{P_act}]$.

Theo phương pháp Z-N và phương pháp auto-tuning [17-18], 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 [19], 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 GA-PID.

5. Xây dựng bộ điều khiển GA-PID

5.1. Thiết kế bộ điều khiển GA-PID

Giải thuật Z-N được áp dụng để xác định ba thông số của bộ điều khiển PID. Ba thông số này là cơ sở để giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA. Giải thuật GA có khả năng tìm được điểm cực tiểu toàn cục, vì vậy việc sử dụng GA trong nghiên cứu này nhằm tìm giá trị tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID. Nhiệm vụ của giải thuật GA là chọn lọc bộ ba $\{K_p, K_d, K_i\}$ tối ưu cho bộ điều khiển PID, thỏa mãn hàm mục tiêu IAE được trình bày trong sơ đồ hình 5.

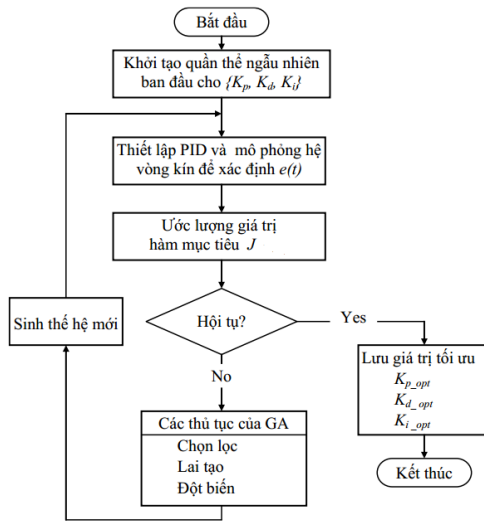


Hình 5: Mô hình bộ điều khiển GA-PID

5.2. Lưu đồ giải thuật của GA

Giải thuật GA được hỗ trợ bởi phần mềm MATLAB/Simulink và được trình bày chi tiết trong ba tài liệu tham khảo [20-22]. Giải thuật GA có khả năng tìm được điểm cực tiểu toàn cục, vì vậy việc sử dụng GA trong nghiên cứu này nhằm tìm giá trị tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID, để đạt được các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ thỏa mãn hàm mục tiêu của giải thuật GA trong (16) với không gian tìm kiếm được

giới hạn bởi (17) được trình bày với lưu đồ giải thuật hình 6.



Hình 6: Lưu đồ tiến trình giải thuật di truyền để xác định thông số bộ điều khiển PID

Trong giải thuật GA thì mỗi phần tử sẽ chứa ba tham số K_p , K_i và K_D từ đó ta xây dựng các bước của lưu đồ giải thuật di truyền, để xác định các thông số tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID.

Tiến hành tối ưu hóa dựa theo tiêu chuẩn IAE (15) và hàm mục tiêu (16) tham khảo trong [23-28]:

$$IAE : J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (15)$$

trong đó $e(t) = \theta_{i(1,2,3)}^{ref} - \theta_{i(1,2,3)}^{act}$

Giải thuật GA được áp dụng là tìm kiếm các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ tối ưu của bộ điều khiển PID, mà ở đó các hàm J đạt giá trị cực tiểu. Vì vậy hàm mục tiêu của giải thuật GA là:

$$Fitness = \min \{J\} \quad (16)$$

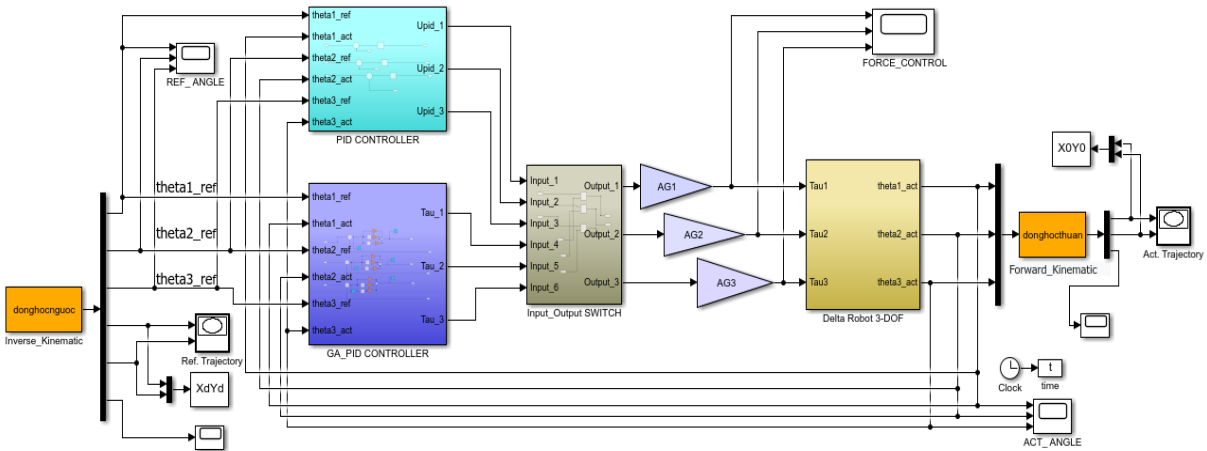
Nhằm giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA, ta giả thiết các giá trị tối ưu $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ nằm xung quanh giá trị $\{K_{p_Z-N}, K_{d_Z-N}, K_{i_Z-N}\}$ đạt được từ giải thuật Z-N. Các giới hạn tìm kiếm tương ứng cho ba thông số của bộ điều khiển PID như sau:

$$\begin{aligned} \alpha K_{p_Z-N} &\leq K_{p_opt} \leq \beta K_{p_Z-N} \\ \alpha K_{d_Z-N} &\leq K_{d_opt} \leq \beta K_{d_Z-N} \\ \alpha K_{i_Z-N} &\leq K_{i_opt} \leq \beta K_{i_Z-N} \end{aligned} \quad (17)$$

Trong đó, các hệ số α và β được chọn sao cho không gian tìm kiếm đủ rộng để chứa được giá trị tối ưu.

6. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Trong bài báo này, tác giả đã tiến hành thực nghiệm trên quỹ đạo đường tròn, để đánh giá tính ổn định của hai bộ điều khiển được trình bày trong sơ đồ hình 7.



Hình 7: Bộ điều khiển GA-PID xây dựng trong MATLAB/Simulink

Trong sơ đồ hình 7 gồm hai bộ điều khiển, là bộ điều khiển PID với các thông số tham khảo từ [19] và bộ điều khiển GA-PID mà tác giả đã xây dựng để so sánh đánh giá chất lượng của hai bộ điều khiển trên cùng một mô hình robot.

6.1. Đối tượng điều khiển:

Đối tượng điều khiển là robot với các thông số được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số của robot

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
A_1	$0(rad)$	Góc lệch tay 1 so với trục Ox của tâm cố định

A_2	$\frac{2\pi}{3}(rad)$	Góc lệch tay 2 so với trục Ox của tâm cố định
A_3	$\frac{4\pi}{3}(rad)$	Góc lệch tay 3 so với trục Ox của tâm cố định
$m_{1,1} = m_{1,2} = m_{1,3}$	$0.42(kg)$	Khối lượng của 3 chân trên bằng nhau
$m_{2,1} = m_{2,2} = m_{2,3} = 2m_b$	$0.1(kg)$	Khối lượng của 3 chân dưới bằng nhau
m_p	$0.75(kg)$	Khối lượng tâm chuyển động
f	$0.32(m)$	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa nền trên
e	$0.052(m)$	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa chuyển động dưới
R	$0.266(m)$	Bán kính tâm nền cố định

r	0.04 (m)	Bán kính tâm chuyển động
L_1	0.3 (m)	Chiều dài chân trên
L_2	0.8 (m)	Chiều dài chân dưới
$I_{1y} = I_{2y} = I_{3y}$	0.084 (kg.m ²)	Ten xoắn quán tính 3 tay trên
$[x_{0P}, y_{0P}, z_{0P}]$	[0.32; 0.38; -0.7] (m)	Vị trí ban đầu của tâm P tâm chuyển động
g	9.81 (m ² /s)	Gia tốc trọng trường

Các tham số của 3 bộ điều khiển PID để điều khiển 3 cánh tay robot được chọn theo [19] với:

$$K_P = \text{diag} (800, 800, 800)$$

$$K_D = \text{diag} (100, 100, 100)$$

$$K_I = \text{diag} (150, 150, 150)$$

Các tham số của giải thuật GA trong bài báo này được chọn lựa như bảng 2.

Bảng 2. Các tham số giải thuật di truyền

Số cá thể trong quần thể	40
Số nhiễm sắc thể trong cá thể	9
Số gen trong nhiễm sắc thể	10
Xác suất đột biến	0.001 - 0.01
Xác suất lai ghép	0.1
Số thế hệ tối đa	100
α	0.02
β	50

6.2. Kết quả mô phỏng:

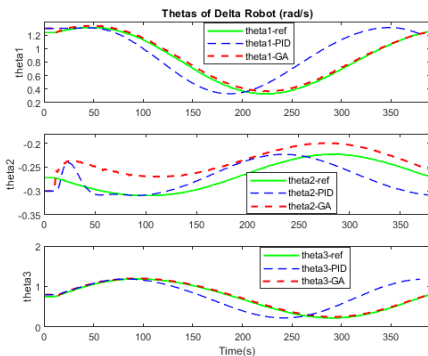
Quỹ đạo tham chiếu số là đường tròn như (18):

$$x(t) = 0.17 * \sin(2 * \pi * t / 10) + 0.3$$

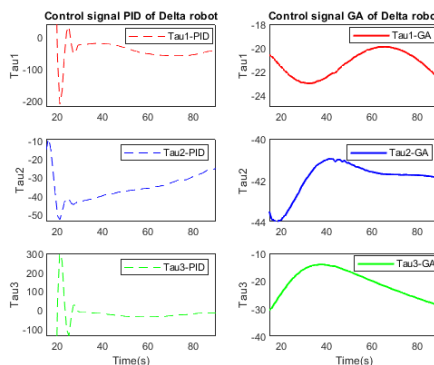
$$y(t) = 0.17 * \sin(2 * \pi * t / 10) * \cos(2 * \pi * t / 10) + 0.2 \quad (18)$$

$$z = -0.7$$

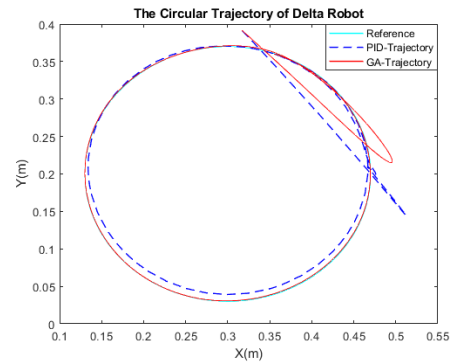
Kết quả chạy mô phỏng bộ điều khiển GA được trình bày trong phụ lục [1-2] và đạt các kết quả sau:



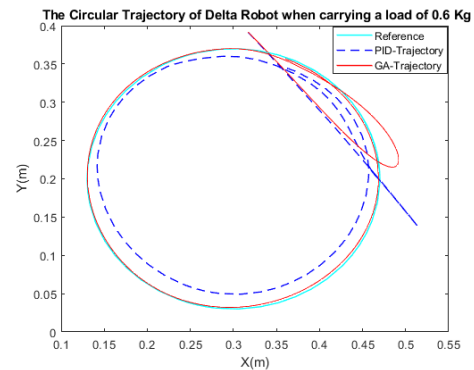
Hình 8: Đáp ứng các góc với quỹ đạo đường tròn



Hình 9: Tín hiệu điều khiển với quỹ đạo đường tròn



Hình 10: Đáp ứng quỹ đạo đường tròn



Hình 11: Đáp ứng quỹ đạo đường tròn khi robot mang tải thêm 0.6 Kg

Sau khi tiến hành cải tiến bộ điều khiển PID sử dụng giải thuật di truyền, sau 40 thế hệ bộ điều khiển này được áp dụng cho mô hình điều khiển hồi tiếp âm đơn vị như hình 7. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng đáp ứng của thuật toán GA tốt hơn so với bộ điều khiển PID kinh điển, với thời gian xác lập khoảng 0.5 (s) và vọt lố nhỏ khoảng 3.14 %. Chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở bảng 3.

Bảng 3. So sánh các chỉ tiêu chất lượng hệ thống

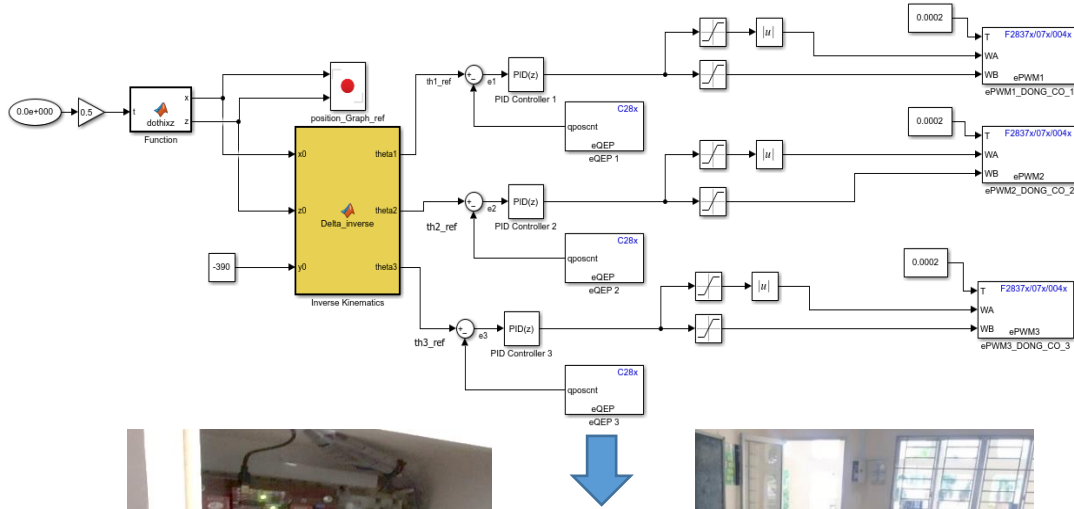
Tiêu chuẩn chất lượng	PID			GA		
Các góc	θ_{1act}	θ_{2act}	θ_{3act}	θ_{1act}	θ_{2act}	θ_{3act}
Vọt lố (%)	4.61	2.2	32.33	3.14	3.57	3.233
Thời gian xác lập (s)	0.046	4.0	0.014	1.1777	0.0491	0.2846
Sai số xác lập (rad)	0.003	0.006	0.002	0.0005	0.0002	0.0055

6.3. Kết quả thực nghiệm:

Delta robot 3-DOF phiên bản 3, được tác giả cùng nhóm nghiên cứu chế tạo và thực nghiệm vào năm 2022, sử dụng 3 động cơ AC servo 3 pha 220Vac. Các bộ điều khiển thông minh được xây dựng trên MATLAB/Simulink để điều khiển vòng kín robot Delta 3-DOF, bám theo quỹ đạo đặt trước là quỹ đạo vòng tròn và quỹ đạo hình số 8. Ưu điểm của phiên bản 3 là khung cơ khí được tối ưu về khối lượng, cũng như không gian làm việc và mạch điều khiển được sử dụng vi điều khiển DSPC2000 của Texas Instruments, ưu điểm của phiên bản 3 là robot hoạt động nhanh và chính xác, lực quán tính nhỏ và robot có thể mang tải lên đến

vài Kg. Đồng thời tích hợp các bộ điều khiển thông minh, để điều khiển online vòng kín, hồi tiếp Encoder. Thời gian thực giao tiếp với các thuật toán điều khiển

thông minh, được tác giả xây dựng trên phần mềm MATLAB/Simulink, để điều khiển bám quỹ đạo Delta robot 3-DOF được trình bày trong hình 12.



Hình 12: Ứng dụng giải thuật điều khiển thông minh trên hệ thực nghiệm Delta robot 3-DOF phiên bản 3

Các thông số của robot phiên bản 3 trên hệ thực nghiệm, được tác giả cùng nhóm nghiên cứu xây dựng [11], [29], [30] và được trình bày trong bảng 1 ở trên và các thông số của 3 bộ điều khiển PID rời rạc tham khảo trong [29], [31] và được trình bày trong bảng 4.

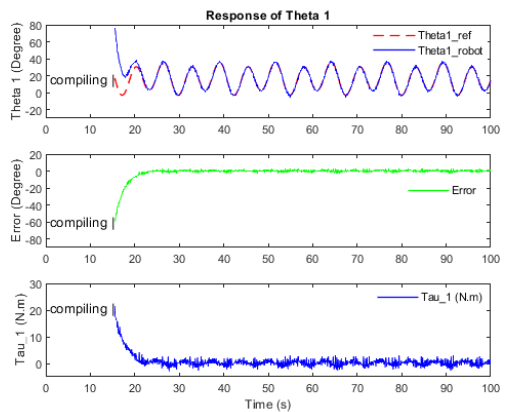
Bảng 4. Các thông số của 3 bộ PID rời rạc

Các thông số của bộ PID rời rạc 1	$K_p = 1.02; K_i = 0.00008; K_d = 0.009$
Các thông số của bộ PID rời rạc 2	$K_p = 1; K_i = 0.00008; K_d = 0.0009$
Các thông số của bộ PID rời rạc 3	$K_p = 0.98; K_i = 0.00001; K_d = 0.009$

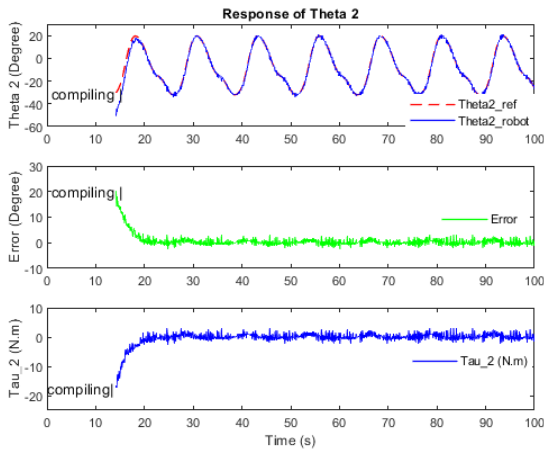
Quỹ đạo đường số 8 được tạo ra bằng cách lập trình trong khối MATLAB Function, được trình bày trong công thức (19), thời gian lấy mẫu chọn là 0.01(s) và thời gian chạy thực nghiệm được chọn là vô cực (t=inf).

$$\begin{aligned}
 x_{ref} &= 10+6*\cos(t) \text{ (cm)} \\
 y_{ref} &= 10+6*\cos(t)*\sin(t) \text{ (cm)} \\
 z_{ref} &= -590 \text{ (cm)}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

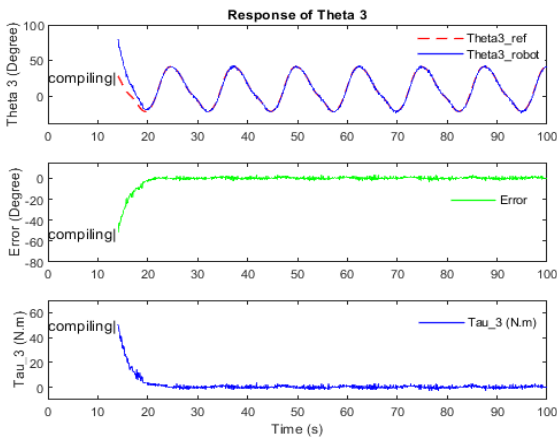
Các kết quả đạt được khi chạy thực nghiệm với quỹ đạo đường số 8, trên phiên bản 3 được trình bày trong phụ lục [3] và các kết quả đạt đáp ứng các góc, đáp ứng các sai số và đáp ứng lực tác động làm quay 3 cánh tay vẽ quỹ đạo đường số 8 được trình bày từ hình 13 cho đến hình 15.



Hình 13: Đáp ứng góc Theta_1 của quỹ đạo đường số 8

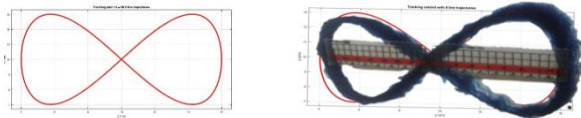


Hình 14: Đáp ứng góc Theta_2 của quỹ đạo đường số 8



Hình 15: Đáp ứng góc Theta_3 của quỹ đạo đường số 8

Quỹ đạo thực tế của đường số 8 được trình bày trong hình 16 và được thực nghiệm phụ lục [3].



Hình 16: Đáp ứng thực tế của quỹ đạo đường số 8

Sau khi thực nghiệm trên quỹ đạo đường số 8, ta thấy quỹ đạo thực của Delta robot 3-DOF bám theo đường số 8 nhưng chất lượng chưa đạt được như mong muốn, với sai số nằm trong khoảng $[-1.5\pi/180; 1.5\pi/180](rad)$ và vị trí cây bút còn rung lắc. Do hạn chế về vật liệu và khả năng cơ khí chính xác, nên phần chân đế và các tay máy của Delta robot 3-DOF chưa đủ cứng vững, dẫn đến bị rung lắc trong quá trình hoạt động.

7. Kết luận

Bài báo trình bày một phương pháp tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA, thỏa mãn hàm mục tiêu IAE dựa trên các giá trị khởi điểm xác định bởi giải thuật Z-N. Ưu điểm lớn của phương pháp này là thiết kế được bộ điều khiển tối ưu, để điều khiển trên các mô hình toán của đối tượng điều khiển khác nhau và giải thuật GA có khả năng tìm được điểm cực tiểu toàn cục. Vì vậy, việc sử dụng GA trong nghiên cứu này là nhằm tìm ra giá trị tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này

là phải chạy rất nhiều vòng hồi tiếp âm đơn vị để xác định giá trị hàm mục tiêu, trong quá trình áp dụng giải thuật GA. Việc thiết kế bộ điều khiển thời gian thực, trở nên khả thi cho nhiều đối tượng bằng cách kết nối máy tính vào các thiết bị đo đạc và hồi tiếp vòng kín để điều khiển. Đồng thời, nhóm tác giả đã thiết kế, chế tạo và thực nghiệm thành công phiên bản 3 của Delta robot 3-DOF tại trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Vĩnh Long được trình bày trong phụ lục [4]. Đánh giá hạn chế kết quả thực nghiệm trên mô hình robot: do hạn chế về vật liệu và khả năng cơ khí chính xác, nên phần chân đế và các tay máy của Delta robot 3-DOF chưa đủ cứng vững, dẫn đến bị rung lắc trong quá trình hoạt động, làm cho kết quả điều khiển quỹ đạo đầu cuối chưa được như mong muốn, mặc dù các tín hiệu điều khiển và đáp ứng góc vẫn đáp ứng được tiêu chuẩn kỹ thuật. Thời gian tới, việc cải tiến khung cơ khí cho khối lượng tổng thể của Delta robot 3-DOF nhẹ hơn, có không gian làm việc lớn hơn và nhóm sẽ triển khai áp dụng bộ điều khiển giám sát sử dụng mạng nơ-ron mờ hồi quy kết hợp với PID và bộ nhận dạng mạng nơ-ron mờ hồi quy (RFNNC-PID-RFNNI) ứng dụng điều khiển bám quỹ đạo Delta robot 3-DOF trên hệ thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- [1] M-1 series, compact high-speed picking and assembly. [Online]. Available: <http://www.fanuc.eu/ru/en/robots/robot-filter-page/m1-series>
- [2] J. Merlet (2000), *Parallel Robots*. P.O. Box 17, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers
- [3] P. W. L.V (1942), *Position-controlling apparatus*, - Patent US2 286 571.
- [4] D.Stewart (1965), *A platform with six degrees of freedom*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.
- [5] R. Clavel (1991), *Conception d'un robot parallele rapide a 4 degres de liberte*, Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne.
- [6] M. Bouri and R. Clavel (2010), *The linear delta: Developments and applications*, in Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th, German Conference on Robotics (ROBOTIC), pp1. 8.
- [7] J.P. Merlet (2006), *Parallel robots*. Springer-Verlag.
- [8] F. A. Azad, S. Rahimi, M. R. Haiiri Yazdi and M. T. Masouleh (2020), *Design and Evaluation of Adaptive and Sliding Mode Control for a 3-DOF Delta Parallel Robot*, Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) pp 1-7.
- [9] Nguyen Van Khang and Luong Anh Tuan (2013), *On the sliding mode control of redundant parallel robots using neural networks*. Proceedings of the 3th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, Singapore, pp. 168-177.
- [10] Nguyễn Văn Khang và Lương Anh Tuấn (2013) *Về một phương pháp số giải bài toán động học ngược, động lực học ngược robot song song dư dẫn động*, Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ toàn quốc về Cơ khí, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, tr. 1291-1299.
- [11] Lê Minh Thanh, Lương Hoài Thương, Phan Thanh Lộc, Chi-Ngon Nguyen (2020), *Delta robot Control Using Single Neuron PID Algorithms Based on Recurrent Fuzzy Neural Network Identifiers*, Inter. J. of Mechanical Eng. and Robotics Research Vol. 9, No. 10.
- [12] Takashi Harada: Design and Control of a Parallel Robot for Mold Polishing (2015), *The 3rd International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCM)*.
- [13] Mohamed Bouri, Clavel Reymond, Zerrouki Mohamed-Yassine, Maeder Willy (2004), *Towards a new Delta robot: an inverted Delta*, Conference, International Symposium on Robotics, at Paris, France.
- [14] https://www.yaskawaindia.in/wpcontent/uploads/2012/10/Rotational_Motor_Analog_Voltage_and_Pulse_Train_Reference_1.pdf.
- [15] Lê Minh Thành, Lương Hoài Thương, Phạm Thanh Tùng, Phạm Công Thành, Nguyễn Chí Ngôn (2019), *Điều khiển bám quỹ đạo robot Delta ba bậc tự do sử dụng thuật toán Fuzzy-PID*, Chuyên san Đo lường, Điều khiển và Tự động hóa.

- [16] Johnson M.A. and M.H. Moradi (2005), *Chapter 8, in: PID Control - New Identification and Design Methods* Springer-Verlag London Limited, pp. 297-337.
- [17] A. Leva, C. Cox, A. Ruano (2002), *Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation*, IFAC. Professional Brief.
- [18] Åström, K.J. and T. Hägglund (1998), *Automatic Tuning of PID Controllers*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC.
- [19] Nguyễn Đình Dũng (2018), *Động lực học ngược và điều khiển robot song song delta không gian, Luận án tiến sĩ kỹ thuật*, Học viện khoa học và công nghệ.
- [20] Nguyễn Chí Ngón (2008), *Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền*, Tạp chí Khoa học 2008:9 241-248, Trường Đại học Cần Thơ.
- [21] <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6232-optimization-with-matlab-and-the-genetic-algorithm-and-direct-search-toolbox>. (truy cập 7/2021)
- [22] https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/53760-how-can-i-tune-pid-controller-using-genetic-algorithm?s_tid=srchtitle. (truy cập 7/2021)
- [23] L. A. Yusuf and N. Magaji, (2014) *GA-PID controller for position control of inverted pendulum*, International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST).
- [24] R. Sharma, K. P. S. Rana and V. Kumar, (2014) *Statistical analysis of GA based PID controller optimization for robotic manipulator*, International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT).
- [25] D. C. Meena and A. Devanshu (2017), *Genetic algorithm tuned PID controller for process control*, International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC).
- [26] E. Flores-Morán, W. Yáñez-Pazmiño and J. Barzola-Monteses (2018), *Genetic algorithm and fuzzy self-tuning PID for DC motor position controllers*, International Carpathian Control Conference (ICCC).
- [27] A. Alouache and Q. W (2018), *Genetic Algorithms for Trajectory Tracking of Mobile Robot Based on PID Controller*, IEEE 14th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP).
- [28] Tanvir Ahmmed, Irin Akhter, S. M. Rezaul Karim, F. A. Sabbir Ahamed (2020) *"Genetic Algorithm Based PID Parameter Optimization,"* American Journal of Intelligent Systems.
- [29] Lê Minh Thành, Nguyễn Chiến Thắng, Nguyễn Chí Ngón, 2021, *Chỉnh Định Bộ Điều Khiển PID Bằng Hệ Mờ Áp Dụng Cho Robot Delta Ba Bậc Tự Do*, Tạp Chí Khoa Học và Kỹ Thuật Đại Học Thái Nguyên, Tập 227, Số 02, Trang 44-53.
- [30] Lê Minh Thành, Lương Hoài Thương, Phạm Thanh Tùng, Công-Thanh Phạm, Chi-Ngon Nguyen, 2021, *Evaluating the Quality of Intelligent Controllers for 3-DOF Delta Robot Control*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 10, No. 10, pp. 542-552, October 2021, DOI: 10.18178/ijmerr.10.10.542-552.
- [31] J. Fabian, C. Monterrey and R. Canahuire, 2016, *Trajectory tracking control of a 3 DOF delta robot: a PD and LQR comparison*, 2016 IEEE XXIII International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2016, pp. 1-5.

Phụ lục – Các clip minh họa

- [1]. <https://www.youtube.com/watch?v=NoQzbHk4S2U>



- [2]. <https://www.youtube.com/watch?v=CYZwYRm9QQE>



- [3]. <https://www.youtube.com/watch?v=P1uS8J9-zRs>



- [4]. https://www.youtube.com/watch?v=vu_VAc7B6uI&t=24s



Lê Minh Thành nhận bằng Kỹ sư chuyên ngành Kỹ thuật Điện - Điện tử tại trường Đại học Cửu Long năm 2006, tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa năm 2011 tại trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh. Hiện là giảng viên Khoa Điện - Điện tử tại trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long từ năm 2006 đến nay. Lĩnh vực nghiên cứu của anh robot hướng ứng dụng, điều khiển thông minh...



Lương Hoài Thương nhận bằng Kỹ sư Kỹ thuật điều khiển tại Trường Đại học Cần Thơ năm 2009, bằng Thạc sĩ Kỹ thuật điện tử tại Trường Đại học SPKT Tp Hồ Chí Minh năm 2015. Hiện là giảng viên khoa Điện - Điện Tử Trường Đại Học SPKT Vĩnh Long.



Phạm Thanh Tùng nhận bằng Kỹ sư Công nghệ Kỹ thuật Điện - Điện Tử tại Trường Đại Học Cửu Long năm 2004, bằng Thạc sĩ Tự động hóa năm 2010, bằng Tiến sĩ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa năm 2019 tại Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải Tp Hồ Chí Minh. Hiện là giảng viên khoa Điện - Điện Tử Trường Đại Học SPKT Vĩnh Long.



Phạm Công Thành đã nhận bằng Kỹ sư và bằng Thạc sĩ chuyên ngành Điều khiển học kỹ thuật tại trường Đại học Bách khoa TP.HCM năm 2002 & 2006, nhận bằng Tiến sĩ Khoa học Điều khiển tại Đại học Khoa học và Kỹ thuật Hoa Trung, Vũ Hán, Trung Quốc năm 2014. Anh hiện đang giảng dạy tại Khoa Điện-Điện tử, trường Học viện Hàng không Việt Nam. Lĩnh vực nghiên cứu của anh: Điều khiển Điện tử công suất; điều khiển tối ưu, thích nghi hệ phi tuyến; điều khiển động cơ...



Nguyễn Chí Ngón nhận bằng Kỹ sư Điện tử tại Đại học Cần Thơ năm 1996, bằng Thạc sĩ Kỹ thuật Điện tử tại ĐH Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP.HCM năm 2001, bằng Tiến sĩ Kỹ thuật Điều khiển tại Đại Học Rostock, CHLB Đức năm 2007, được phong hàm Phó giáo sư Tự động hóa năm 2015.

PGS.TS. Nguyễn Chí Ngón giảng dạy tại Bộ môn Tự động hóa, Khoa Công nghệ, ĐH Cần Thơ từ năm 1996 đến nay. Lĩnh vực nghiên cứu của anh bao gồm: Điều khiển thông minh, nhận dạng hệ thống, ứng dụng IoT, AI...