

# THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID THÍCH NGHI CHO ROBOT DÂY SONG SONG DỰA TRÊN MẠNG NƠ-RON DESIGN OF AN ADAPTIVE PID CONTROLLER FOR A CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT BASED ON NEURAL NETWORKS

PHẠM ĐÌNH BÁ\*, PHAN VĂN DƯƠNG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam;

\*Email liên hệ: bapd.vck@vimaru.edu.vn

## Tóm tắt

Mục đích của nghiên cứu này là cải thiện hiệu suất của bộ điều khiển cho robot dây song song (CDPR) bằng cách sử dụng bộ điều khiển PID phi tuyến. Sự kết hợp giữa bộ điều khiển PID tuyến tính và mạng nơ-ron, với khả năng giải quyết các vấn đề phi tuyến mạnh mẽ, mang đến một bộ điều khiển PID thích nghi mới dựa trên mạng nơ-ron. Học có giám sát của mạng nơ-ron được áp dụng để tối ưu hóa hàm chi phí. Bộ điều khiển đề xuất này cho CDPR với những bất định phi tuyến. Nghiên cứu cũng trình bày chi tiết cấu trúc điều khiển, quy trình thiết kế và kết quả thực nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy phương pháp điều khiển đề xuất có khả năng áp dụng cho các hệ thống robot dây song song trong không gian khớp với hiệu suất điều khiển cao.

**Từ khóa:** Robot dây song song, bộ điều khiển PID, không gian khâu khớp, mạng nơ-ron.

## Abstract

The purpose of this research is to improve the controller performance of a cable-driven parallel robot (CDPR) using a nonlinear PID controller. By combining a linear PID controller with a neural network, which has strong learning, adaptation, and nonlinear problem-solving capabilities, a novel adaptive PID controller is developed. Supervised learning of the neural network is used to minimize a cost function. The proposed controller is suitable for cable-driven parallel robots with nonlinearities and uncertainties. Detailed specifications of the control structure, design process, and experimental results are presented. The experimental results show that the proposed control method achieves higher performance for CDPR in joint space.

**Keywords:** Cable-driven parallel robot, PID controller, Joint-space, Neural network.

## 1. Giới thiệu

Robot dây song song (CDPR) là một loại robot song song mà vị trí của thiết bị đầu cuối (EE) được điều khiển thông qua việc cuốn hoặc thả các dây nối giữa EE với khung cố định [1, 2]. Cấu trúc này tạo ra nhiều lợi thế: Không gian làm việc rộng [3], tốc độ chuyển động cao [4, 5], và khả năng mang tải lớn [6]. Tuy nhiên, các dây của CDPR bị giới hạn chỉ có thể chịu kéo mà không có thể đẩy được EE [7]. Đây là một trong những thách thức của CDPR khi so với robot song song sử dụng các thanh cứng. Hơn nữa, CDPR là một hệ thống phi tuyến phức tạp. Sự không chắc chắn về thông số và hệ số ma sát không xác định của các bộ truyền động cũng gây ra những khó khăn trong việc điều khiển CDPR.

Để đạt yêu cầu về điều khiển, nhiều luật điều khiển đã được đề xuất nhằm xử lý ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến trong hệ thống CDPR. Bộ điều khiển trượt [6] hoặc bộ điều khiển mô-men [5] được thiết kế cho CDPR được đề xuất. Bộ điều khiển đồng bộ hóa [8] được khai thác bằng cách đồng bộ chuyển động giữa các dây với nhau để đạt được vị trí chính xác cho EE. Các phương thức điều khiển khác cũng được áp dụng cho CDPR như là bộ điều khiển trượt nâng cao (SMC) [9-11], hay SMC không dao động [12], và bộ điều khiển thụ động [13]. Johann [14] phát triển một bộ điều khiển thích nghi cho CDPR nhằm cải thiện hiệu quả bám quỹ đạo khắc phục lại sự không chắc chắn của các thông số trong hệ thống.

Do cấu trúc đơn giản và dễ dàng thực hiện, bộ điều khiển PID [4] hoặc các biến thể của nó như là bộ điều khiển PI, PD được sử dụng rộng rãi cho hệ thống CDPR cũng như trong công nghiệp. Tuy nhiên, các hệ số của bộ điều khiển PID này chủ yếu là cố định, vì vậy phương pháp điều khiển này không chỉ tốn thời gian mà còn phải đảm bảo hiệu suất điều khiển. Ngoài ra bộ điều khiển PID gặp khó khăn trong việc xác định các hệ số phù hợp khi đối tượng điều khiển là các hệ thống phi tuyến với nhiều yếu tố bất định.

Từ những phân tích trên, một bộ điều khiển kết hợp giữa bộ điều khiển PID với mạng nơ-ron, tạo ra một khả năng thích ứng mạnh mẽ khắc phục lại yếu tố

phi tuyến và bất định. Đó chính là bộ điều khiển PID thích nghi. Những đóng góp chính của nghiên cứu này được tóm tắt như sau:

(i) Cấu trúc cải tiến của bộ điều khiển đề xuất. Bộ điều khiển bao gồm bộ điều khiển PID kết hợp với thuật toán mạng nơ-ron nhằm điều chỉnh giá trị các hệ số điều khiển của bộ điều khiển PID một cách thích nghi trong quá trình điều khiển.

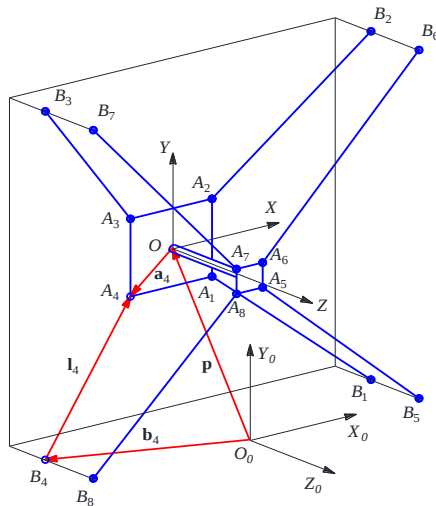
(ii) Bộ điều khiển đề xuất được áp dụng trên mô hình robot dây trong môi trường thí nghiệm. Cả đáp ứng của bộ điều khiển và trạng thái của robot dây trong không gian khâu khớp đều được phân tích trong bài báo này.

## 2. Mô hình động học của CDPR

Mô hình của CDPR được mô tả như trong Hình 1. Các phương trình toán học mô tả chuyển động của CDPR được xây dựng dựa vào hệ thống trục tọa độ gồm: một hệ trục  $OXYZ$  gắn với EE và một hệ trục tọa độ quán tính  $O_0X_0Y_0Z_0$ . Hai hệ trục này liên hệ với nhau nhờ véc tơ vị trí  $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$  và ma trận quay  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\theta_y c\theta_z & s\theta_x s\theta_y c\theta_z - c\theta_x s\theta_z & c\theta_x s\theta_y c\theta_z + s\theta_x s\theta_z \\ c\theta_y s\theta_z & s\theta_x s\theta_y s\theta_z + c\theta_x c\theta_z & c\theta_x s\theta_y s\theta_z - s\theta_x c\theta_z \\ -s\theta_y & s\theta_x c\theta_y & c\theta_x c\theta_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ , and  $\theta_z$  các góc nghiêng của EE,  $c\theta \equiv \cos(\theta)$  và  $s\theta \equiv \sin(\theta)$ .



Hình 1. Phác thảo mô hình CDPR

**Bài toán động học ngược** là xác định chuyển vị của EE trong không gian khâu khớp khi biết vị trí và hướng của EE trong hệ trục quán tính. Bài toán này được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{R}\mathbf{a}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^b \quad i = 1 \div 8 \quad (2)$$

Trong đó:  $\mathbf{l}_i$  là véc tơ chiều dài của dây thứ  $i$ ,  $\mathbf{a}_i^p$  là véc tơ vị trí của điểm  $A_i$  trong hệ trục gắn với EE,

$\mathbf{b}_i^b$  là véc tơ vị trí của điểm  $B_i$ . Tiếp theo, véc tơ đơn vị có thể xác định:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{l}_i / \|\mathbf{l}_i\|_2, \quad (3)$$

Trong đó  $\|\mathbf{l}_i\|_2$  là chuẩn Euclid của  $\mathbf{l}_i$ . Kết quả là:

$$\mathbf{l}_i^2 = [\mathbf{R}\mathbf{a}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^b]^T \cdot [\mathbf{R}\mathbf{a}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^b] \quad (4)$$

Trong quá trình làm việc của CDPR, chuyển vị mong đợi của EE cần được kiểm soát bằng cách điều chỉnh chiều dài của các dây. Do vậy, một mối liên hệ giữa chuyển vị mong đợi của EE với chiều dài dây cần được xác định. Động học ngược có thể đạt được như sau:

$$\mathbf{L} = \mathbf{h}(\mathbf{q}), \quad (5)$$

Trong đó:  $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_8]^T$  ký hiệu là véc tơ chiều dài dây,  $\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$  chuyển vị của EE.

Lấy đạo hàm phương trình (2) theo thời gian và biến đổi về dạng ma trận Jacobian  $\mathbf{J}$  thu được:

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}^T \dot{\mathbf{q}}, \quad (6)$$

với:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \dots & \mathbf{S}_8 \\ \mathbf{R}\mathbf{a}_1^p \times \mathbf{S}_1 & \mathbf{R}\mathbf{a}_2^p \times \mathbf{S}_2 & \dots & \mathbf{R}\mathbf{a}_8^p \times \mathbf{S}_8 \end{bmatrix} \quad (7)$$

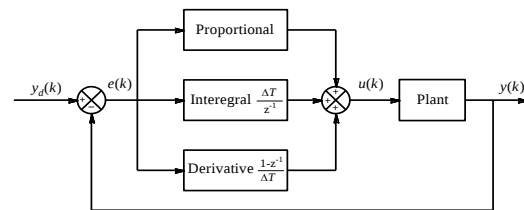
## 3. Thiết kế bộ điều khiển PID phi tuyến

### 3.1. Bộ điều khiển PID tuyến tính

Hình 2 mô tả cấu trúc của bộ điều khiển PID tuyến tính, bộ điều khiển này gồm 3 thành phần tỷ lệ, tích phân và vi phân trong miền rời rạc. Mối liên hệ giữa tín hiệu vào và tín hiệu ra của bộ điều khiển được mô tả như sau:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{n=0}^k e(n) \Delta T + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta T} \quad (8)$$

Trong đó:  $k$  bước thứ  $k$ ;  $\Delta T$  thời gian lấy mẫu;  $K_p$ ,  $K_d$ , và  $K_i$  là các thông số của bộ điều khiển PID.



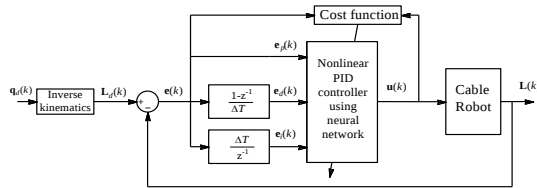
Hình 2. Hệ thống điều khiển với PID tuyến tính

Vì bộ điều khiển PID tuyến tính chỉ dựa vào sai số của tín hiệu ra và hệ số điều khiển cố định, nên nó không đạt được hiệu suất hợp lý trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Chất lượng của hệ thống điều khiển, chẳng hạn như thời gian ổn định, độ vượt lớn, hoặc sai số ở trạng thái ổn định có thể được cải thiện đáng kể bằng cách điều chỉnh giá trị của các hệ số điều khiển  $K_p$ ,  $K_d$ , và  $K_i$ . Sau đó,  $K_p$ ,  $K_d$ , và

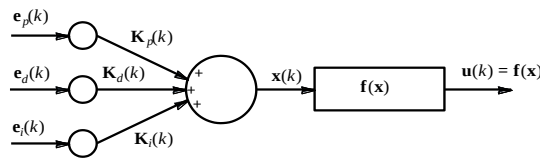
$K_i$  sẽ trở thành hàm của bước thời gian rời rạc  $k$  và sai số  $e(k)$ . Nội dung chi tiết sẽ trình bày trong mục tiếp theo.

### 3.2. Bộ điều khiển PID thích nghi

Một bộ điều khiển kết hợp giữa mạng nơ-ron và PID được đề xuất để điều khiển chuyển động của CDPR trong không gian khâu khớp. Hệ thống điều khiển này được hợp thành từ hai phần, phần thứ nhất là bộ điều khiển PID thích nghi và phần còn lại là hàm chi phí (Hình 3).



Hình 3. Cấu trúc bộ điều khiển PID thích nghi sử dụng mạng nơ-ron



Hình 4. Cấu trúc mạng nơ-ron

Tín hiệu điều khiển  $u(k)$ , một hàm sigmoid:

$$u(k) = f(x) = \frac{2[1 - \exp(-\alpha x)]}{\alpha[1 + \exp(-\alpha x)]} \quad (9)$$

Trong đó:  $x$  là đầu vào,  $\alpha$  là hệ số, hai thông số này là cơ sở để xây dựng hàm sigmoid.

Cấu trúc của mạng nơ-ron được mô tả như trong Hình 3.  $K_p(k)$ ,  $K_d(k)$ ,  $K_i(k)$ ,  $e_p(k)$ ,  $e_d(k)$ , và  $e_i(k)$  tương ứng là các hệ số tỉ lệ, hệ số vi phân, hệ số tích phân và các sai số giữa giá trị chiều dài dây tham khảo và chiều dài dây thực tế.

$$e_p(k) = e(k) = L_d(k) - L(k), \quad (10)$$

$$e_i(k) = \sum_{j=1}^k e(j) \Delta T, \quad (11)$$

$$e_d(k) = e(k) \frac{1 - z^{-1}}{\Delta T}, \quad (12)$$

Trong đó:  $z$  là toán tử của phép biến đổi  $Z$ ,  $k$  là chuỗi rời rạc,  $L(k)$  là chiều dài dây, và  $L_d(k)$  là chiều dài tham khảo của dây.

Chiều dài dây  $L_d(k)$  được xác định bằng các encoder trong khi đó chiều dài dây tham khảo  $L_d(k)$  xác định nhờ phương trình (5) và chuyển vị mong đợi của EE  $q_d(k) = [x_d \ y_d \ z_d \ \theta_{xd} \ \theta_{yd} \ \theta_{zd}]^T$ .

$$L_d(k) = [l_{d1} \ l_{d2} \ \dots \ l_{d8}]^T = \mathbf{h}(q_d). \quad (13)$$

Sau đó, tín hiệu vào  $\mathbf{x}(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_8(k)]^T$  trong lớp ra được xác định

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p(k) + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_i(k) + \mathbf{K}_d \mathbf{e}_d(k) \quad (14)$$

với  $\mathbf{K}_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{p8})$ ,  $\mathbf{K}_i = \text{diag}(K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{i8})$ , và  $\mathbf{K}_d = \text{diag}(K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{d8})$  tương ứng là hệ số tỉ lệ, tích phân và vi phân.

Các hệ số  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  cần được điều chỉnh bằng cách sử dụng mạng nơ-ron. Một hàm chi phí  $V(k)$ , biểu diễn sai số giữa đầu ra mong muốn và đầu ra thực tế được định nghĩa:

$$V(k) = \frac{1}{2} [\mathbf{L}_d - \mathbf{L}]^T [\mathbf{L}_d - \mathbf{L}] = \frac{1}{2} \mathbf{e}_d^T \mathbf{e}_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (l_{dn} - l_n)^2 \quad (15)$$

Mạng nơ-ron sẽ tối ưu hàm chi phí bằng thuật toán lan truyền ngược, đồng thời huấn luyện các hệ số của bộ điều khiển PID:

$$K_{pn}(k+1) = K_{pn}(k) - \chi_{pn} \frac{\partial V(k)}{\partial K_{pn}}, \quad (16)$$

$$K_{in}(k+1) = K_{in}(k) - \chi_{in} \frac{\partial V(k)}{\partial K_{in}}, \quad (17)$$

$$K_{dn}(k+1) = K_{dn}(k) - \chi_{dn} \frac{\partial V(k)}{\partial K_{dn}}, \quad (18)$$

Trong đó:  $\chi_p$ ,  $\chi_i$ , và  $\chi_d$  là tốc độ học,  $n = 1, 2, \dots, 8$ .

Lấy đạo hàm hai vế của (11) theo hệ số điều khiển:

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{pn}} = \frac{\partial V(k)}{\partial L_n} \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{\partial u_n}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial K_{pn}}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{in}} = \frac{\partial V(k)}{\partial L_n} \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{\partial u_n}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial K_{in}}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{dn}} = \frac{\partial V(k)}{\partial L_n} \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{\partial u_n}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial K_{dn}}, \quad (21)$$

Trong đó:

$$\frac{\partial V(k)}{\partial L_n} = -[L_{dn}(k) - L_n(k)] = -e_{pn}(k), \quad (22)$$

$$\frac{\partial u_n(k)}{\partial x_n} = \dot{f}(x_n(k)) = \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial x_n(k)}{\partial K_{pn}} = e_{pn}(k), \quad \frac{\partial x_n(k)}{\partial K_{in}} = e_{in}(k), \quad \frac{\partial x_n(k)}{\partial K_{dn}} = e_{dn}(k) \quad (24)$$

Thay các phương trình (22), (23), và (24) vào các phương trình (19), (20), và (21) cho ra:

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{pn}} = \frac{\partial V(k)}{\partial L_n} \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{\partial u_n}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial K_{pn}} = -e_{pn}^2(k) \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{in}} = -e_{pn}(k) e_{in}(k) \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial V(k)}{\partial K_{dn}} = -e_{pn}(k)e_{dn}(k) \frac{\partial L_n}{\partial u_n} \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2}, \quad (27)$$

Khi  $\partial L_n / \partial u_n = 1$  hội tụ với một tốc độ không đổi và thế phương trình (25), (26), và (27) vào (16), (17) và (18) thu được:

$$K_{pn}(k+1) = K_{pn}(k) + \chi_{pn} e_{pn}^2(k) \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2} \quad (28)$$

$$K_{in}(k+1) = K_{in}(k) + \chi_{in} e_{pn}(k) e_{in}(k) \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2} \quad (29)$$

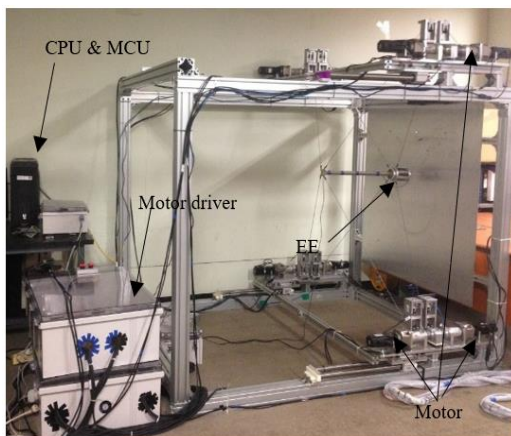
$$K_{dn}(k+1) = K_{dn}(k) + \chi_{dn} e_{pn}(k) e_{dn}(k) \frac{4 \exp(-\alpha x_n(k))}{[1 + \exp(-\alpha x_n(k))]^2} \quad (30)$$

#### 4. Kết quả thí nghiệm

Phần cứng của CDPR gồm máy tính HP (Intel® Core™ i-7 CPU 3.4GHz), các mô tơ (Delta, ECMA-C10604ES) và vi điều khiển (TMS320F28379D). Mô tả thông số và cấu trúc của CDPR tương ứng thể hiện trong Bảng 1, và Hình 5. Bộ điều khiển thích nghi được phát triển trên môi trường của Simulink/Matlab và sau đó nó được chạy trên vi điều khiển TMS320F28379D dựa vào toolbox real time. Vi điều khiển kết nối với mô tơ thông qua chuẩn CAN-Bus.

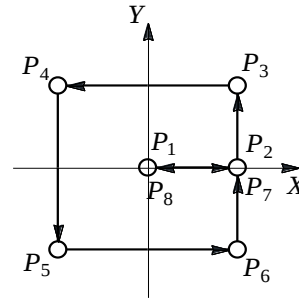
**Bảng 1. Thông số của hệ thống và thông số điều khiển**

| Hệ thống                    | Thông số điều khiển                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| $m = 1.91\text{kg}$ ,       | $\alpha = 0.5$ , $K_p(0) =$                      |
| $g = 9.81\text{m/s}^2$ ,    | $[1 \ 1 \ \dots \ 1]_{1 \times 8}$ ,             |
| $I_x = 0.059\text{kgm}^2$ , | $K_i(0) =$                                       |
| $I_y = 0.059\text{kgm}^2$ , | $[0.001 \ 0.001 \ \dots \ 0.001]_{1 \times 8}$ , |
| $I_z = 0.002\text{kgm}^2$   | $K_d(0) =$                                       |
|                             | $[0.1 \ 0.1 \ \dots \ 0.1]_{1 \times 8}$ .       |



**Hình 5. Hệ thống CDPR trong phòng thí nghiệm**

Thí nghiệm đưa ra để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển PID thích nghi sử dụng mạng nơ-ron. Các hệ số  $K_p$ ,  $K_d$  và  $K_i$  sẽ được xác định online theo công thức (16), (17) và (18). Quỹ đạo di chuyển là một hình chữ nhật có kích thước  $30 \times 30$  cm với thời gian di chuyển là 200 giây. Trong thí nghiệm này, một kích bản được mô tả như trong Hình 6 trong đó, vị trí ban đầu của EE tại  $[0, 0, -0.24, 0, 0, 0]$ , điểm bắt đầu  $P_1(0,0)$  cm,  $P_2(15, 0)$  cm,  $P_3(15, 15)$  cm,  $P_4(-15, 15)$  cm,  $P_5(-15, -15)$  cm,  $P_6(15, -15)$  cm,  $P_7 = P_2$ , và điểm cuối  $P_8 = P_1$ .



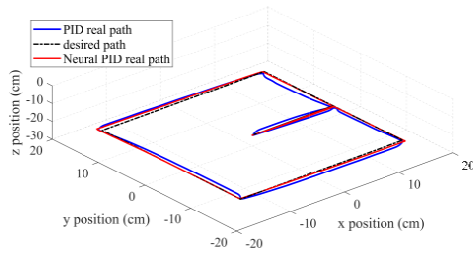
**Hình 6. Tám vị trí mà EE đi qua**

Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong các Hình 7, 8, 9, và 10. Hình 7 thể hiện kết quả thí nghiệm giữa bộ điều khiển PID thông thường và bộ điều khiển PID phi tuyến với vị trí của EE. Giá trị cập nhật của thông số điều khiển ( $K_p$ ,  $K_i$ , và  $K_d$ ) được thể hiện trong các Hình 8, 9 và 10.

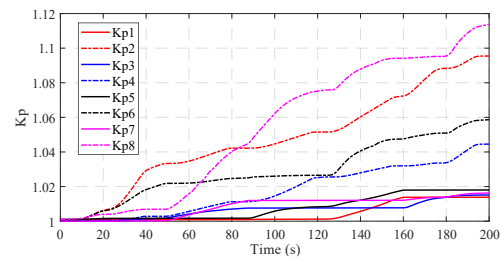
Trong thí nghiệm, giá trị khởi tạo ban đầu của cả hai bộ điều khiển cho  $K_p$ ,  $K_i$ , và  $K_d$  được đặt là bằng nhau (tương ứng 1, 0.01, 0.1) (xem Bảng 1). Mục đích của thí nghiệm là để chứng minh khả năng của bộ điều khiển PID thích nghi. Tốc độ học được đặt bằng  $\chi_p = 0.15[1,1,1,1,1,1,1,1]$ ,  $\chi_i = 0.1[1,1,1,1,1,1,1,1]$ ,  $\chi_d = 0.1[1,1,1,1,1,1,1,1]$ . Từ trong Hình 7, chúng ta có thể nhận thấy rằng bộ điều khiển PID thông thường có phản ứng dao động và sai số lớn (0,3cm) (xem đường màu xanh trong Hình 7) trong khi đó bộ điều khiển PID thích nghi gần như không có dao động và sai số rất bé (nhỏ hơn 0,05cm).

Trong Hình 8, 9 và 10 thể hiện giá trị của các hệ số  $K_p$ ,  $K_d$  và  $K_i$  được xác định thông qua mạng nơ-ron bằng cách tối ưu hóa hàm chi phí. Các thông số này sẽ thay đổi theo sai số của chiều dài dây. Trong khi bộ điều khiển thích nghi PID luôn luôn thay đổi  $K_p$ ,  $K_d$  và  $K_i$  để đáp ứng quá trình bám quỹ đạo thì bộ điều khiển PID tuyến tính chỉ có một giá trị không đổi với các hệ số điều khiển.

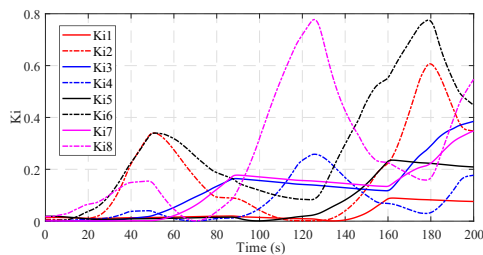
Từ kết quả thí nghiệm trên, bộ điều khiển PID thích nghi sử dụng mạng nơ-ron đã được xác nhận là hiệu quả trong việc điều khiển vị trí của EE và thể hiện khả năng thích nghi trong việc tinh chỉnh các hệ số điều khiển PID để tăng chất lượng điều khiển.



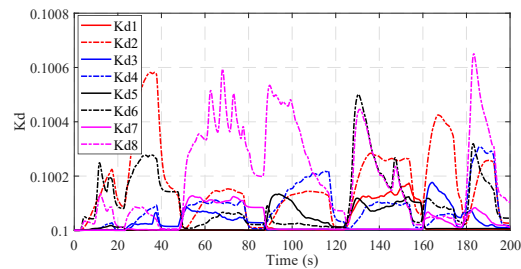
Hình 7. Quỹ đạo của EE



Hình 8. Hệ số  $K_p$  trong quá trình di chuyển theo quỹ đạo hình chữ nhật



Hình 9. Hệ số  $K_i$  trong quá trình di chuyển theo quỹ đạo hình chữ nhật



Hình 10. Hệ số  $K_d$  trong quá trình di chuyển theo quỹ đạo hình chữ nhật

## 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PID thích nghi sử dụng mạng nơ-ron đã được đề xuất. Hiệu suất của bộ điều khiển đã được kiểm tra trên hệ thống CDPR và so sánh với bộ điều khiển PID tuyến tính được đề xuất. Bộ điều khiển này có khả năng điều khiển thích nghi và các hệ số điều khiển được tối ưu hóa thông qua thuật toán lan truyền ngược. Thí nghiệm đã minh chứng bộ điều khiển được đề xuất là phù hợp cho việc điều khiển CDPR.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.35.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Rashvand, Ehsan Damghani, H. D. Taghirad (2023), *Kinematic and Dynamic Analysis of CPR-A: An Aerial Cable Suspended Parallel Robot*, 2023 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), pp.544-549.
- [2] Mahmoud Zarebidoki, Jaspreet Singh Dhupia, Weiliang Xu (2022), *A Review of Cable-Driven Parallel Robots: Typical Configurations, Analysis Techniques, and Control Methods*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol.29, No.3, pp.89-106.
- [3] H. D. Taghirad and M. Nahon (2008), *Kinematic Analysis of a Macro-Micro Redundantly Actuated Parallel Manipulator*, Advanced Robotics, Vol.2, No.6-7, pp.657-687.
- [4] Arthur Ngo Foon Chan, Wuichung Cheng, Darwin Lau (2024), *Deformable Open-Frame Cable-Driven Parallel Robots: Modeling, Analysis, and Control*, IEEE Transactions on Robotics, Vol.40, pp.3465-3480.
- [5] F. Shiqing, D. Franitza, M. Torlo, F. Bekes, and M. Hiller (2004), *Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.9, No.3, pp.561-568.
- [6] J. Lin, C. Y. Wu, and J. Chang (2018), *Design and implementation of a multi-degrees-of-freedom cable-driven parallel robot with gripper*, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.15, No.5.
- [7] B. Zi, N. Wang, S. Qian, and K. Bao (2019), *Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer*, Mechanism and Machine Theory, Vol.132, pp.207-222.
- [8] W. Shang, B. Zhang, B. Zhang, F. Zhang, and S. Cong (2019), *Synchronization Control in the Cable Space for Cable-Driven Parallel Robots*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.66, No.6, pp.4544-4554.

- [9] H. Bayani, M. T. Masouleh, and A. Kalhor (2016), *An experimental study on the vision-based control and identification of planar cable-driven parallel robots*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 75, pp.187-202.
- [10] A. Alikhani and M. Vali (2011), *Modeling and robust control of a new large scale suspended cable-driven robot under input constraint*, in 2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), pp.238-243.
- [11] S. A. Khalilpour, R. Khorrambakht, H. D. Taghirad, and P. Cardou (2019), *Robust cascade control of a deployable cable-driven robot*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.127, pp.513-530.
- [12] M. Zeinali and A. Khajepour (2010), *Design and Application of Chattering-Free Sliding Mode Controller to Cable-Driven Parallel Robot Manipulator: Theory and Experiment*. Available: <https://doi.org/10.1115/DETC2010-29153>.
- [13] J. R. J. Caverly and J. R. Forbes (2014), *Dynamic Modeling and Noncollocated Control of a Flexible Planar Cable-Driven Manipulator*, IEEE Transactions on Robotics, Vol.30, No.6, pp.1386-1397.
- [14] J. Lamaury, M. Gouttefarde, A. Chemori, and P. Hervé (2013), *Dual-space adaptive control of redundantly actuated cable-driven parallel robots*, in 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4879-4886.

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Ngày nhận bài:     | 08/02/2025 |
| Ngày nhận bản sửa: | 11/03/2025 |
| Ngày duyệt đăng:   | 11/03/2025 |