

# SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU HÓA BẦY ĐÀN PSO ĐỂ TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CỦA BỘ ĐIỀU KHIỂN PID SỬ DỤNG CHO ROBOT DÂY SONG SONG

## USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM TO TUNE GAINS OF PID CONTROLLER FOR CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT

PHẠM ĐÌNH BÁ<sup>1\*</sup>, NGUYỄN ĐÌNH KHIÊM<sup>1</sup>, MAI HÙNG TUẤN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>2</sup> Khoa Máy tàu biển, Trường Cao đẳng nghề Bách nghệ, Hải Phòng

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

### Tóm tắt

Trong bài báo này, một phương pháp thiết lập các thông số bộ điều khiển PID cho robot dây song song (CDPR) dựa vào kết quả tìm kiếm của thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) được đề xuất. Ưu điểm chính của thuật toán PSO là khả năng tự tìm kiếm trong vùng khả dụng cho trước; không yêu cầu mô tả toán học chi tiết của đối tượng mà chỉ sử dụng một hàm mục tiêu để tối ưu hóa. Thuật toán PSO được xây dựng trên phần mềm Matlab/Simulink để thiết lập các thông số của bộ điều khiển PID cho một CDPR với tám dây.

**Từ khóa:** Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO, robot dây song song CDPR, bộ điều khiển PID.

### Abstract

In this paper, a method to tune PID controller parameters for cable-driven parallel robots (CDPR) based on the optimal search result of particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. The main advantage of the PSO algorithm is the ability to manually search within a given available area; does not require a detailed mathematical description of the object, but only uses a cost function for optimization. The PSO algorithm is built on Matlab/Simulink to tune the parameters of a PID controller for a CDPR with eight cables.

**Keywords:** Particle swarm optimization algorithm, cable-driven parallel robot, PID controller.

## 1. Giới thiệu chung

Robot dây song song (CDPR) là một loại robot song song, trong đó vị trí và hướng của robot được điều khiển bằng các dây nối từ robot tới một khung cố định. Các dây được thay thế các thanh cứng truyền thống để tạo ra tính linh hoạt cho robot song song.

Những ưu điểm của CDPR là không gian làm việc rộng [1], khối lượng nhỏ, tốc độ cao [2, 3], và có khả năng mang tải lớn [4]. Tuy nhiên, CDPR này cũng có những nhược điểm như độ chính xác thấp và khá nhạy.

Do cấu trúc đơn giản, chức năng rõ ràng, và dễ thực hiện, bộ điều khiển PID thông thường hoặc các biến thể của bộ điều khiển này, chẳng hạn như bộ điều khiển PI, hay PD, được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp cũng như các hệ thống điều khiển cho CDPR. Bộ điều khiển PD [2] và PID [5] được khai thác để kiểm soát vị trí và hướng của CDPR trong không gian khâu khớp. Kết quả thí nghiệm thể hiện rằng CDPR có thể tiếp cận được tới vị trí và hướng mục tiêu. Bộ điều khiển PID bền vững [6] được thiết kế cho một CDPR để đối phó với tính không chắc chắn của các thông số vật lý của hệ thống này. Meunier [7] đề xuất một cấu trúc điều khiển tầng để kiểm soát vị trí của CDPR. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển vòng ngoài là bộ điều khiển PID được sử dụng để kiểm soát vị trí, trong khi đó bộ điều khiển vòng trong sử dụng tín hiệu từ các encoder để gửi tín hiệu điều khiển tới vòng lặp điều khiển vị trí góc của tời. Các tác giả trong [8] cũng phát triển một bộ điều khiển hai vòng lặp để điều khiển lực/vị trí cho một CDPR. Bộ điều khiển này bao gồm một bộ điều khiển PID vòng trong và một bộ điều khiển PID vòng ngoài. Jun [9] khai thác một bộ điều khiển kết hợp để điều khiển vị trí và lực cho một CDPR. Cả hai bộ điều khiển vị trí và lực đều là bộ điều khiển PID. Trong nghiên cứu [10], bộ điều khiển PID được kết hợp với luật điều khiển mờ được đề xuất để kiểm soát vị trí của CDPR. Tuy nhiên, các hệ số của các bộ điều khiển PI, PD, và PID trong các nghiên cứu nêu trên đều là hằng số, vì vậy bộ điều khiển PID tuyến tính này không những tốn thời gian để thiết lập các thông số mà còn không đảm bảo hiệu quả kiểm soát. Bên cạnh đó, PID tuyến tính khó xác định mức tăng PID thích hợp trong trường hợp cho các đối tượng điều khiển phi tuyến và không xác định.

Các nghiên cứu [11-13] cho thấy rằng các thủ tục tối ưu hóa dựa trên thuật toán tiến hóa (Heuristic) đã

nổi lên như một công cụ mạnh mẽ để tìm ra giải pháp cho nhiều vấn đề kỹ thuật điều khiển. Các thuật toán tiến hóa được sử dụng rộng rãi trong điều khiển quá trình vì tính đơn giản về cấu trúc, khả năng tối ưu hóa tốt và tốc độ phản hồi. Các thuật toán tiến hóa có thể hoạt động hiệu quả cho các bài toán tối ưu hóa chiều sâu hơn so với các thủ tục tối ưu hóa cổ điển hiện có. Do tính linh hoạt của chúng, chúng có thể dễ dàng thích ứng với các quy trình thiết kế bộ điều khiển cổ điển hiện có như PID. Chúng có thể được sử dụng như một công cụ quan trọng để thiết kế các bộ điều khiển có cấu trúc cổ điển và sửa đổi cho một loại mô hình không ổn định. Các nhà nghiên cứu đề cập đến tính năng tối ưu hóa bầy đàn PSO nhằm điều chỉnh các bộ điều khiển cổ điển.

Trong bài báo này, các thông số bộ điều khiển PID được thiết lập dựa trên kết quả tìm kiếm của thuật toán PSO. Ưu điểm chính của thuật toán PSO chính là khả năng tự tìm kiếm trong vùng khả dụng cho trước. Thuật toán PSO không yêu cầu mô tả toán học chi tiết và tìm ra giá trị tốt nhất có thể, bằng việc tối ưu hóa một hàm mục tiêu. Nội dung chi tiết của thuật toán PSO cũng được trình bày.

## 2. Mô hình động học của CDPR với tám dây

Trước khi đưa ra mô hình động học của CDPR với tám dây, một hệ thống hệ trục tọa độ bao gồm hai hệ trục tọa độ. Hệ trục tọa độ quán tính  $\{O_0\}$  được đặt tại đáy của khung như thể hiện trong Hình 1; hệ tọa độ địa phương  $\{O\}$  trên cơ cấu di chuyển (EE). Từ Hình 1, thiết lập được mối quan hệ hình học cho dây thứ  $i$  [8]

$$\mathbf{p} + \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i - \mathbf{l}_i = \mathbf{0}, \quad i = 1, \dots, 8, \quad (1)$$

Trong đó:  $\mathbf{p} \equiv \overline{O_0O} = [x \ y \ z]^T$  là véc tơ của điểm  $O$  trong  $\{O_0\}$ ,  $\mathbf{l}_i \equiv \overline{B_iA_i}$  mô tả véc tơ của đoạn  $A_iB_i$ , và  $\mathbf{a}_i \equiv \overline{OA_i}$ ,  $\mathbf{b}_i \equiv \overline{OB_i}$  tương ứng là các véc tơ của các điểm  $A_i$  và  $B_i$  trong  $\{O\}$  và  $\{O_0\}$ .

Chiều dài của dây thứ  $i$  là:

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

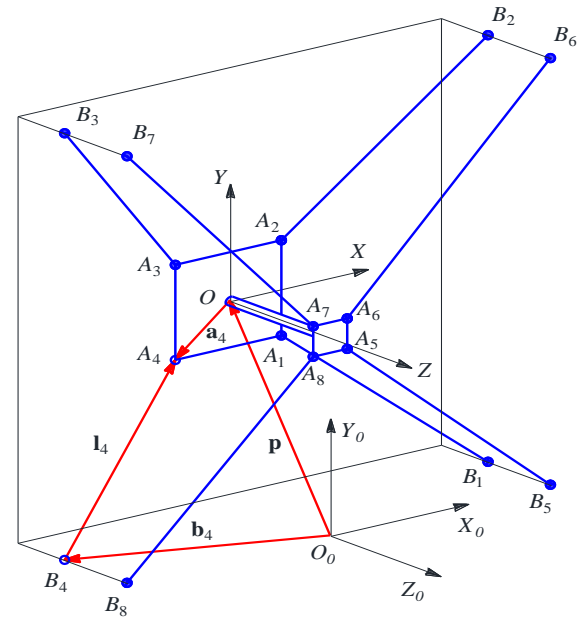
Trong đó:  $\mathbf{R}$  là ma trận chuyển.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_2C_3 & -C_2S_3 & S_2 \\ S_1S_2C_3 + C_1S_3 & -S_1S_2S_3 + C_1C_3 & -S_1C_2 \\ -C_1S_2C_3 + S_1S_3 & C_1S_2S_3 + S_1C_3 & C_1C_2 \end{bmatrix}.$$

Với:  $C_i = \cos \varphi_i$ ,  $S_i = \sin \varphi_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) và  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , và  $\varphi_3$  là các góc quay của EE quanh các trục  $Ox$ ,  $Oy$ , và  $Oz$ .

Phương trình (2) là mô hình động học nghịch của robot, nó cho phép xác định chiều dài của mỗi dây khi

biết vị trí và hướng của EE. Đây là cơ sở để thiết kế bám quỹ đạo trong không gian khâu khớp.



Hình 1. Mô hình robot song song với tám dây cùng với hệ thống các hệ trục tọa độ

## 3. Bộ điều khiển PID cho CDPR với tám dây

Bộ điều khiển PID bao gồm ba thành phần, đó là, bộ điều khiển tỉ lệ, bộ điều khiển tích phân, và bộ điều khiển vi phân được thiết kế cho CDPR với tám dây [8]. Trong trường hợp này, bộ điều khiển PID bao gồm tín hiệu vào,  $\mathbf{y}_d = [l_{1d} \ l_{2d} \ \dots \ l_{8d}]^T$ , và tín hiệu ra,  $\mathbf{y} = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_8]^T$ , và sai số,  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}(t)$  trong hệ thống điều khiển vòng kín để yêu cầu  $\mathbf{y}(t)$ , tiệm cận với giá trị tham khảo  $\mathbf{y}_d(t)$ . Mối quan hệ giữa tín hiệu vào và tín hiệu ra của bộ điều khiển được mô tả dưới dạng thời gian liên tục:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_i(t) + \mathbf{K}_d \mathbf{e}_d(t), \quad (3)$$

Trong đó:  $\mathbf{K}_p = [K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{p8}]^T$  là hệ số tỉ lệ,  $\mathbf{K}_i = [K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{i8}]^T$  hệ số tích phân,  $\mathbf{K}_d = [K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{d8}]^T$  hệ số vi phân,  $\mathbf{e}_i = \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau$  và  $\mathbf{e}_d = \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt}$ .

Vì bộ điều khiển PID là bộ điều khiển tuyến tính và chỉ dựa vào biến số đo được của đối tượng điều khiển và các thông số điều khiển không đổi, nên nó không có hiệu quả hợp lý trong một loạt các điều kiện hoạt động. Hiệu quả của hệ thống điều khiển, chẳng hạn như thời gian điều khiển ( $t_s$ ), lượng quá điều chỉnh ( $m_p$ ) hoặc sai số tĩnh ( $e_{ss}$ ) có thể được cải thiện phần lớn bằng cách điều chỉnh giá trị của các thông số điều

khởi  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_i$ , và  $\mathbf{K}_d$ . Sau đó,  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_i$ , và  $\mathbf{K}_d$  coi là một hàm của thời gian  $t$  và sai số  $\mathbf{e}(t)$ . Sơ đồ khối của bộ điều khiển PID được điều chỉnh bởi PSO mô tả trong Hình 2, và nội dung này được trình bày trong phần tiếp sau đây.

#### 4. Thiết lập các thông số của bộ điều khiển bằng cách sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO

Mục đích chính của phần này là tìm giá trị tối ưu của thông số bộ điều khiển  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_i$ , và  $\mathbf{K}_d$ .

Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO [14, 15] là một phương pháp tối ưu hóa dựa trên tập hợp, trong đó hệ thống được khởi tạo với tập hợp các phần tử ngẫu nhiên và thuật toán tìm kiếm tối ưu bằng cách cập nhật các thế hệ. Giả sử rằng không gian tìm kiếm được thực hiện trong không gian  $d$ -chiều, và sau đó phần tử thứ  $i$  của bầy có thể được biểu diễn bằng một véc tơ  $d$ -chiều, với bộ điều khiển PID như mô tả trong phương trình (3) thì véc tơ này có dạng

$$\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$$

$$= [K_{p1}, \dots, K_{p8}, K_{i1}, \dots, K_{i8}, K_{d1}, \dots, K_{d8}] \quad (4)$$

Tốc độ của bầy đàn này có thể được biểu thị bằng một vectơ  $d$ -chiều khác

$$\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}] \quad (5)$$

Tính phù hợp của mỗi phần tử có thể được đánh giá bởi hàm chi phí. Hàm này là tổng sai số bình phương của sai số điều khiển  $\mathbf{e}$  [13] và mức tiêu thụ năng lượng  $\mathbf{u}$  như sau:

$$s = \sum_{j=1}^k [\mathbf{e}^T(j)\mathbf{e}(j) + \mathbf{u}^T(j)\mathbf{u}(j)] \quad (6)$$

Vị trí tốt nhất đã tiếp cận trước đây của phần tử thứ  $i$  được ghi nhận là vị trí tốt nhất riêng lẻ của nó  $\mathbf{x}_i^* = [x_{i1}^*, x_{i2}^*, \dots, x_{id}^*]$ . Vị trí của cá thể tốt nhất trong cả bầy được biểu thị là vị trí tốt nhất toàn cục  $\mathbf{g}^* = [g_{i1}^*, g_{i2}^*, \dots, g_{id}^*]$ . Ở mỗi bước, tốc độ của phần tử và vị trí mới được xác định tương ứng như sau [15]

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \theta \mathbf{v}_i^k + \alpha \varepsilon_1 (\mathbf{g}^* - \mathbf{x}_i^k) + \beta \varepsilon_2 (\mathbf{x}_i^k - \mathbf{x}_i^k), \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1}, \quad (8)$$

Trong đó:  $\theta$  là hệ số và có giá trị khoảng từ 0 đến 1, thông thường chọn  $\theta \in [0,5 \div 0,9]$ ,  $\varepsilon_1$  và  $\varepsilon_2$  là các hệ số lấy ngẫu nhiên từ 0 đến 1;  $\alpha$  và  $\beta$  là các hệ số học. Lưu đồ giải thuật của thuật toán tối ưu hóa bầy đàn PSO được mô tả như trong Hình 3.

#### 5. Kết quả và đáp ứng của hệ thống điều khiển

Trong phần tính toán mô phỏng kết quả này, chúng tôi sử dụng mô hình của CDPR trong nghiên cứu [8].

##### 5.1. Thiết lập các thông số của bộ điều khiển PID bằng pháp tối ưu hóa bầy đàn PSO cho CDPR

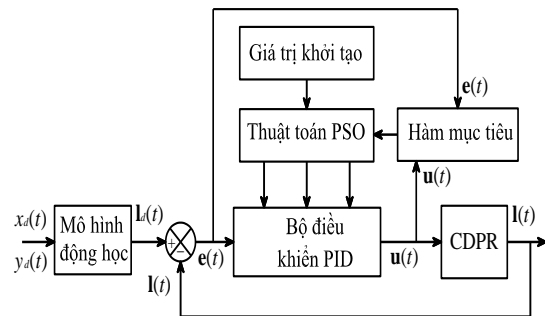
Hàm mục tiêu để thuật toán PSO tối ưu hóa là tổng bình phương sai số điều khiển, và mức tiêu thụ năng lượng:

$$s = \sum_{j=1}^k [\mathbf{e}^T(j)\mathbf{e}(j)] + \sum_{j=1}^k [\mathbf{u}^T(j)\mathbf{u}(j)]$$

$$= \left[ \sum_{j=1}^k \left[ \{y_d(j) - y(j)\}^T \{y_d(j) - y(j)\} \right] + \sum_{j=1}^k \left[ \{ \mathbf{K}_p \mathbf{e}(j) + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_i[j] + \mathbf{K}_d \mathbf{e}_d[j] \}^T \{ \mathbf{K}_p \mathbf{e}(j) + \mathbf{K}_i \mathbf{e}_i[j] + \mathbf{K}_d \mathbf{e}_d[j] \} \right] \right] \quad (9)$$

Không gian tìm kiếm của các hệ số điều khiển:

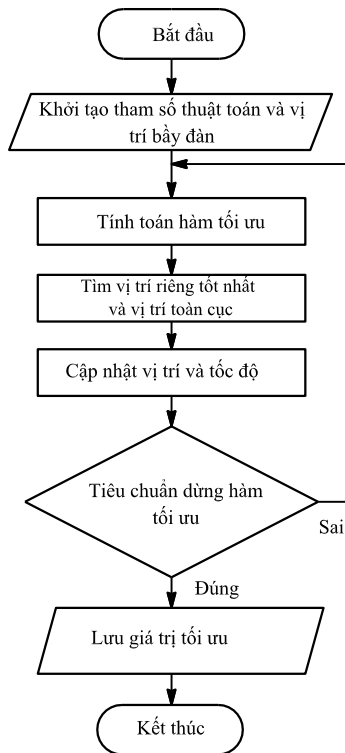
$$\begin{cases} K_{pn} \in [0,001; 3] \\ K_{in} \in [0,0001; 1] \\ K_{dn} \in [0,001; 1.5] \end{cases}, n = 1 \div 8. \quad (10)$$



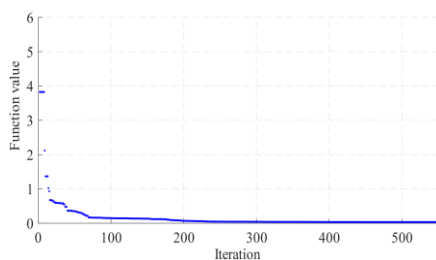
Hình 2. Sơ đồ khối bộ điều khiển PID dựa trên PSO

Thuật toán PSO (Hình 3) được xây dựng trên phần mfile của Matlab [16], trong khi đó hệ thống điều khiển vòng kín với bộ điều khiển PID được xây dựng trên Simulink (Hình 5) để thu thập tín hiệu sai số và tín hiệu điều khiển cho việc thiết lập hàm chi phí cho thuật toán PSO tối ưu nó.

Các thông số của bộ điều khiển PID  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_i$ , và  $\mathbf{K}_d$  đạt được khi hàm chi phí đạt giá trị nhỏ nhất. Từ kết quả trên Hình 4 cho thấy hàm chi phí đạt giá trị nhỏ nhất (gần như bằng không) sau khoảng 550 lần lặp điều chỉnh. Kết quả này được thể hiện như trong Hình 4. Khi hàm mục tiêu đạt giá trị tiệm cận với giá trị không. Có nghĩa là  $\mathbf{e}(t)$  sẽ bằng không, trong trường hợp này  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_d(t)$ .



**Hình 3. Lưu đồ giải thuật của thuật toán PSO**



**Hình 4. Sự thay đổi của hàm tối ưu với số lần lặp điều chỉnh sử dụng thuật toán PSO**

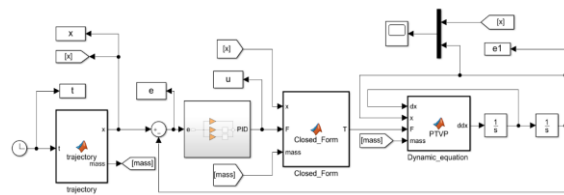
Kết quả tính toán các thông số điều khiển tối ưu của bộ điều khiển PID được thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1. Thông số điều khiển tối ưu**

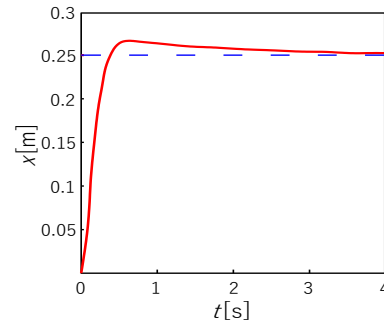
Thông số điều khiển	
$K_p$	$[0,85 \ 0,75 \ 1,21 \ 1,18 \ 0,79 \ 0,82 \ 0,87 \ 0,76]^T$ ,
$K_i$	$10^{-3}[1,5 \ 0,87 \ 1,6 \ 1,9 \ 2,7 \ 1,9 \ 2,3 \ 3,9]^T$ ,
$K_d$	$[0,20 \ 0,33 \ 0,52 \ 0,31 \ 0,09 \ 0,61 \ 0,78 \ 0,16]^T$ ,

**Bảng 2. So sánh đáp ứng của bộ điều khiển**

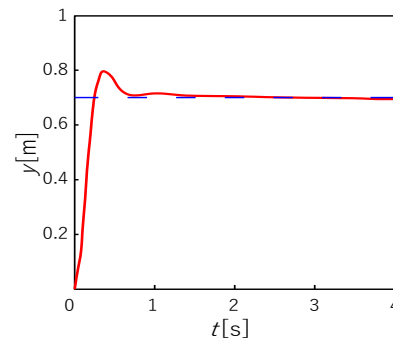
Bộ điều khiển	$m_p$ (%)	$T_s$ (s)	$e_{ss}$ (%)
PSO-PID (trục x)	8	2	1
PSO-PID (trục y)	14	2	0,8
PID tuyến tính [11]	41	7,5	0,8
Cohen Coon PID [17]	38	5	0,9



**Hình 5. Sơ đồ hệ thống điều khiển trong Matlab/Simulink**



**Hình 6. Chuyển vị của EE theo phương trục x**



**Hình 7. Chuyển vị của EE theo phương trục y**

### 5.2. Đáp ứng của bộ điều khiển tối ưu PID cho CDP

Phần này trình bày một mô phỏng số được thực hiện trên Simulink/Matlab để đánh giá đáp ứng của hệ thống điều khiển cho CDP. Sơ đồ điều khiển vòng kín được mô tả như trong Hình 5. Kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 6 và 7.

Trong mô phỏng này, EE được yêu cầu di chuyển trong mặt phẳng xy từ vị trí gốc tọa độ ban đầu đến vị trí mới với  $(x_d, y_d) = (0,25m; 0,7m)$  và hướng của CDP bằng không. Hình 6 và 7 thể hiện rằng EE có thể tiếp cận được vị trí mong đợi. Trong Hình 6 lượng quá điều chỉnh bằng 8% và thời gian quá trình điều chỉnh bằng 2s trong khi đó lượng quá điều chỉnh, như thể hiện trong Hình 7,  $m_p = 14\%$  và thời gian quá trình điều chỉnh,  $t_s = 2s$ . Sai số tĩnh theo phương x và y được thể hiện trong Bảng 2. Bảng 2 cũng thể hiện so sánh về chất lượng của bộ điều khiển PID dựa trên PSO so với bộ điều khiển PID tuyến tính [11] và bộ điều khiển



PID dựa trên thuật toán Cohen Coon [17]. Kết quả trên minh chứng cho khả năng của bộ điều khiển tối ưu PID có thể áp dụng để kiểm soát vị trí của CDP.

## 6. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất một phương pháp để xác định các thông số của bộ điều khiển PID tuyến tính dựa trên giải thuật bầy đàn PSO. Các nội dung chính của nghiên cứu này có thể được tổng kết như sau:

- (i) Xây dựng mô hình động học của CDP.
- (ii) Giới thiệu và ứng dụng thuật toán PSO để thiết lập các hệ số  $K_p$ ,  $K_d$ , và  $K_i$  của bộ điều khiển PID.
- (iii) Đáp ứng của hệ thống vòng kín với bộ điều khiển PID dựa trên PSO cũng được mô phỏng số trên Matlab/Simulink.
- (iv) Mô phỏng số được thực hiện bộ điều khiển trên CDP để kiểm soát vị trí của EE, ngoài ra một sự so sánh chất lượng của bộ điều khiển được đưa ra để minh chứng tính hiệu quả của bộ điều khiển PID dựa trên PSO.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số DT20-21.34.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. D. Taghirad and M. Nahon, *Kinematic Analysis of a Macro-Micro Redundantly Actuated Parallel Manipulator*, *Advanced Robotics*, Vol.22, No.6-7, pp.657-687, 2008.
- [2] S. Kawamura, H. Kino, and C. Won, *High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots*, *Robotica*, Vol.18, No.1, pp.13-21, 2000.
- [3] F. Shiqing, D. Franitza, M. Torlo, F. Bekes, and M. Hiller, *Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.9, No.3, pp.561-568, 2004.
- [4] J. Lin, C. Y. Wu, and J. Chang, *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, p.1-10, 2018.
- [5] D. Wang *et al.*, *Winch-integrated mobile end-effector for a cable-driven parallel robot with auto-installation*, *International Journal of Control, Automation and Systems*, journal article Vol.15, No.5, pp.2355-2363, 2017.
- [6] M. A. Khosravi and H. D. Taghirad, *Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots*, *Mechatronics*, Vol.24, No.2, pp.87-97, 2014.
- [7] G. Meunier, B. Boulet, and M. Nahon, *Control of an Overactuated Cable-Driven Parallel Mechanism for a Radio Telescope Application*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.17, No.5, pp.1043-1054, 2009.
- [8] P. Đ. Bá, L. V. Điềm, and P. X. Dương, *Thiết kế bộ điều khiển lực/vị trí của robot dây song sử dụng hai vòng lặp*, *Vietnam Mechanical Engineering Journal*, No. special issue, pp.138-143, 2020.
- [9] J. Jun, X. Jin, A. Pott, S. Park, J.-O. Park, and S. Y. Ko, *Hybrid position/force control using an admittance control scheme in Cartesian space for a 3-DOF planar cable-driven parallel robot*, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol.14, No.4, pp.1106-1113, 2016.
- [10] H. Sun, X. Tang, S. Hou, and X. Wang, *Vibration suppression for large-scale flexible structures based on cable-driven parallel robots*, *Journal of Vibration and Control*, p.1-12, 2020.
- [11] K. Latha, V. Rajinikanth, and P. M. Surekha, *PSO-Based PID Controller Design for a Class of Stable and Unstable Systems*, *ISRN Artificial Intelligence*, Vol.2013, p.1-11, 2013.
- [12] P. Chen, M. Yang, and T. Sun, *PSO-based on-line tuning PID controller for setpoint changes and load disturbance*, 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC), pp.1887-1894, 2011.
- [13] Y. Y. Nazaruddin, A. D. Andrini, and B. Anditio, *PSO Based PID Controller for Quadrotor with Virtual Sensor*, *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, No.4, pp.358-363, 2018.
- [14] Y. Zhang, P. Agarwal, V. Bhatnagar, S. Balochian, and J. Yan, *Swarm Intelligence and Its Applications*, *The Scientific World Journal*, Vol. 2013, p.1-10, 2013.
- [15] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier Inc, 2014.
- [16] R. K. Arora, *Optimization: Algorithms and Applications*. CRC Press, Inc, 2015.
- [17] R. J. Rajesh and C. M. Ananda, *PSO tuned PID controller for controlling camera position in UAV using 2-axis gimbal*, 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), pp.128-133, 2015.

Ngày nhận bài:	02/02/2021
Ngày nhận bản sửa:	10/3/2021
Ngày duyệt đăng:	20/3/2021