

# PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI KHÔNG CÓ MÔ HÌNH CHO RÔ BỐT DÂY SONG SONG

## MODEL-FREE ADAPTIVE CONTROL APPROACH FOR CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT

PHẠM ĐÌNH BÁ<sup>1\*</sup>, PHẠM XUÂN DƯƠNG<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

### Tóm tắt

Khi mô hình toán học không có sẵn và các điều kiện cụ thể của hệ thống được cung cấp, phương pháp điều khiển thích nghi không có mô hình (MFAC) được đề xuất dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa động với đạo hàm riêng cho hệ thống rời rạc nhiều đầu vào và nhiều đầu ra. Ý tưởng điều khiển chính là thiết lập các thông số hệ thống thời gian thực đại diện cho các biến của hệ thống được thực hiện bằng cách chỉ sử dụng các đầu vào và đầu ra. Sau đó, bộ điều khiển đề xuất được thực hiện thành công cho một robot song song điều khiển bằng dây (CDPR) để điều khiển vị trí của robot (EE). MFAC này đã được áp dụng và chứng minh hiệu suất đạt yêu cầu trên nền tảng CDPR thực tế.

**Từ khóa:** Điều khiển không mô hình, điều khiển thích nghi, robot song song.

### Abstract

When a mathematical model is not available and system-specific conditions are fulfilled, a model-free adaptive control (MFAC) approach is proposed based on a new dynamic linearization technique with a pseudo-partial derivative for a class of general multiple-input and multiple-output nonlinear discrete-time cable robot system. The key control ideal is that an estimation of real-time system parameters that represent system dynamic variations is realized by using only inputs and outputs. Then the proposed controller is successfully implemented in a cable-driven parallel robot (CDPR) to control the position of the end-effector (EE). This MFAC was applied and demonstrated satisfactory performance on an actual CDPR platform.

**Keywords:** Model-free control, adaptive control, parallel robot.

### 1. Giới thiệu chung

CDPRs là một robot mà chuyển vị (bao gồm vị trí và hướng) của EE được điều chỉnh bởi các dây độc lập với một đầu nối với EE và đầu còn lại nối với khung [1, 2]. EE được điều khiển đến vị trí và hướng mong muốn bằng việc thay đổi chiều dài của các dây. Những ưu điểm chính của CDPRs bao gồm không gian làm việc lớn [3], tốc độ cao [4, 5], và có khả năng chịu tải lớn [6].

Gần đây, các thuật toán điều khiển cho CDPR đã gây được sự chú ý đáng kể. Luật điều khiển phản hồi PD [4] và PID [7] trong không gian khớp được khai thác để kiểm soát chuyển vị của EE. Một bộ điều khiển bền vững PID [8] được thiết kế cho CDPR với sự không chắc chắn về cấu trúc của hệ thống. Phương pháp điều khiển phân cấp [6] được phát triển để đáp ứng điều khiển vị trí. Một bộ điều khiển mô men xoắn tính toán (CTC) [5] được đề xuất cho một robot song song. Hệ thống điều khiển tạo thành một phần chuyển tiếp động nghịch đảo và một vòng phản hồi. Một tiếp cận điều khiển trong [2] dựa trên CTC với hồi tiếp tuyến tính được giới thiệu để điều khiển CDPR với những dây có tính đàn hồi lớn. Một bộ điều khiển đồng bộ hóa [9] được sử dụng để nhận ra chuyển động đồng bộ hóa giữa các dây và vị trí điều khiển chính xác của EE. Các kế hoạch điều khiển khác cũng đã được áp dụng cho CDPR, chẳng hạn như bộ điều khiển trượt (SMC) [10-12], SMC giảm [13], hoặc điều khiển thụ động [14]. Hơn nữa, bộ điều khiển mạng nơron thích nghi [15] cũng được sử dụng cho CDPR với độ bão hòa đầu vào để bù lại sự không chính xác của mô hình hệ thống.

Điều khiển thích nghi không mô hình lần đầu tiên được giới thiệu bởi Hou [16, 17] cho các hệ thống phi tuyến rời rạc. Thuật toán điều khiển này được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Dựa trên lý thuyết MFAC, vấn đề kiểm soát hướng đi của các thiết bị mặt nước [18] với sự không chắc chắn được điều tra. Một thuật toán MFAC mới [19] dựa trên phương pháp chiếu kép liên tiếp được đề xuất cho các bài toán điều khiển xe ô tô tự lái. Yaoyao [20] phát triển một

phương pháp điều khiển bền vững không mô hình dựa trên phương pháp điều khiển trượt và phương pháp điều khiển không mô hình cho robot song song. Raul-Cristian [21] kết hợp MFAC với thành phần mờ bằng cách điều chỉnh phản hồi tham chiếu ảo cho các hệ thống cần cấu thấp. Kết quả thuật toán được minh chứng thông qua vị trí góc cánh tay robot của cần cấu thấp trang bị trong phòng thí nghiệm.

Trong nghiên cứu này, điều khiển không mô hình (MFAC) được thiết kế dựa trên những lý thuyết được trình bày trong [17, 18, 22] để điều khiển vị trí của CDP. Bộ điều khiển đề xuất là dựa trên mô hình động lực học tuyến tính và đạo hàm riêng của hệ thống rời rạc phi tuyến nhiều tín hiệu vào nhiều tín hiệu ra (MIMO).

### 2. Vấn đề về điều khiển không mô hình

Mô hình đầu vào/đầu ra (I/O) của một hệ thống rời rạc phi tuyến MIMO [17] được mô tả như sau

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{y}(k), \dots, \mathbf{y}(k-n_y), \mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k-n_u)), \quad (1)$$

Trong đó:  $\mathbf{y}(k) \in \mathbb{R}^p$  và  $\mathbf{u}(k) \in \mathbb{R}^q$  tương ứng là các I/O,  $n_y, n_u$  là bậc tự do,  $p, q$  là các số nguyên, và  $\mathbf{f}(\bullet) \in \mathbb{R}^p$  là hàm phi tuyến.

Dạng tuyến tính động của hệ thống rời rạc (1) được xây dựng dựa trên các giả thiết sau:

*Giả thiết 1:* Đạo hàm từng phần của  $\mathbf{f}(\bullet)$  đối với đầu vào  $\mathbf{u}(k)$  là liên tục.

*Giả thiết 2:*  $\|\Delta \mathbf{y}(k+1)\| \leq b \|\Delta \mathbf{u}(k)\|$  và  $\|\Delta \mathbf{u}(k)\| \neq 0$  cho mỗi  $k$ , với  $\Delta \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{y}(k)$ ,  $\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)$ , và  $b$  là một hằng số dương.

Như thảo luận trong [17], hệ thống phi tuyến rời rạc (1) có thể chuyển đổi thành một mô hình dữ liệu

$$\Delta \mathbf{y}(k+1) = \Phi(k) \Delta \mathbf{u}(k), \quad (2)$$

Trong đó:  $\Phi(k)$  là ma trận giả Jacobi (PJM),

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(k) & \Phi_{12}(k) & \dots & \Phi_{1q}(k) \\ \Phi_{11}(k) & \Phi_{12}(k) & \dots & \Phi_{1q}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{11}(k) & \Phi_{12}(k) & \dots & \Phi_{1q}(k) \end{bmatrix}_{p \times q}$$

và  $\|\Phi(k)\| \leq b$ .

### 3. Thiết kế bộ điều khiển MFAC

Trong nghiên cứu này, mục tiêu chính là điều khiển hệ thống MIMO khi không biết mô hình toán trong điều kiện cụ thể, chỉ sử dụng dữ liệu đo đạc I/O của hệ thống điều khiển vòng kín. Quan tâm đến hàm

tối ưu sau:

$$J = \|\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{y}(k+1)\|^2 + \lambda \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)\|^2, \quad (3)$$

Trong đó:  $\mathbf{y}_d(k+1)$  là tín hiệu ra mong muốn và  $\lambda$  là một hằng trọng số.

Từ (2), công thức có thể được viết lại như sau:

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}(k) + \Phi(k) [\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)]. \quad (4)$$

Thế (4) vào (3) chúng ta có

$$J_u = \left( \begin{array}{l} \|\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{y}(k) - \Phi(k) [\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)]\|^2 \\ + \lambda \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)\|^2 \end{array} \right). \quad (5)$$

Khi hệ thống ổn định, hàm tối ưu  $J_u$  tiến tới không. Do vậy, đạo hàm của (5) theo  $\mathbf{u}(k)$ , và cho nó bằng không,  $J_u$  tiếp cận tới giá trị tối ưu xung quanh giá trị không.

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \frac{\Phi(k)}{\lambda + \|\Phi(k)\|^2} [\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{y}(k)]. \quad (6)$$

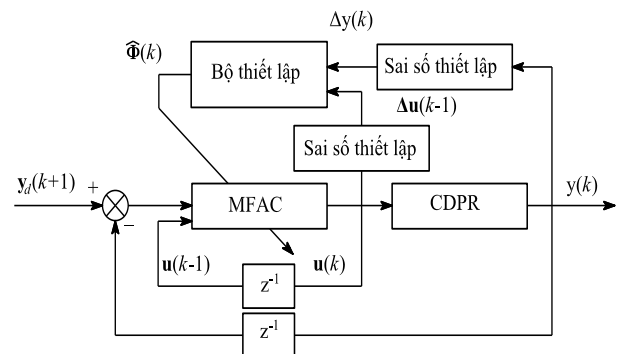
Trong thực tế,  $J_u$  có thể không hội tụ. Vấn đề này có thể được khắc phục bằng cách đề xuất tham số  $\rho \in (0, 1]$  để giảm kích thước bước lặp. Sau đó, công thức (6) có thể được viết lại như sau:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \rho \frac{\Phi(k)}{\lambda + \|\Phi(k)\|^2} [\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{y}(k)]. \quad (7)$$

Để thiết lập  $\Phi(k)$ , một hàm tối ưu khác đưa ra trong [22] cho  $\hat{\Phi}(k)$  được sử dụng trong nghiên cứu này.

$$J_\Phi = \left( \begin{array}{l} \|\Delta \mathbf{y}(k) - \hat{\Phi}(k) \Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2 \\ + \mu \|\hat{\Phi}(k) - \hat{\Phi}(k-1)\|^2 \end{array} \right), \quad (8)$$

Trong đó:  $\mu > 0$  là trọng số.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển của MFAC [17]

Khi cho  $\partial J_{\Phi} / \partial \Phi(k) = 0$ , chúng ta thu được:

$$\hat{\Phi}(k) = \begin{pmatrix} \frac{\mu}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2} \hat{\Phi}(k-1) \\ + \frac{1}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2} \Delta \mathbf{y}(k) \Delta \mathbf{u}^T(k-1) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Để đảm bảo tính hội tụ của  $\hat{\Phi}(k)$ , thông số  $\eta \in (0 \div 1]$  được đề xuất để giảm kích thước bước lặp.

$$\hat{\Phi}(k) = \begin{pmatrix} \frac{\mu}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2} \hat{\Phi}(k-1) \\ + \frac{\eta}{\mu + \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\|^2} \Delta \mathbf{y}(k) \Delta \mathbf{u}^T(k-1) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

với  $\hat{\Phi}(1)$  là giá trị khởi tạo của PJM.

PJM [18] khởi động lại khi:

$$\hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(1) \text{ if } \begin{cases} \|\hat{\Phi}(k)\| < \varepsilon \\ \|\Delta \mathbf{u}(k-1)\| \leq \varepsilon \\ \text{sign}(\hat{\Phi}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\Phi}(1)) \end{cases}, \quad (11)$$

Trong đó:  $\text{sign}(\bullet)$  là hàm sign và  $\varepsilon$  là một số dương bé tùy ý.

Trong kế hoạch điều khiển của MFAC, dữ liệu I/O của hệ thống điều khiển được sử dụng để thiết lập thông số thay đổi theo thời gian  $\Phi(k)$ . Giá trị thiết lập  $\hat{\Phi}(k)$  và tối ưu hóa sai số được giới thiệu trong kế hoạch điều khiển, tín hiệu điều khiển mới  $\mathbf{u}(k)$  là đạt được. Dựa trên tín hiệu điều khiển  $\mathbf{u}(k)$  và đầu ra  $\mathbf{y}(k)$ , PJM mới được thiết lập thông qua  $\hat{\Phi}(k+1)$ . Toàn bộ quá trình điều khiển được mô tả như trong Hình 1.

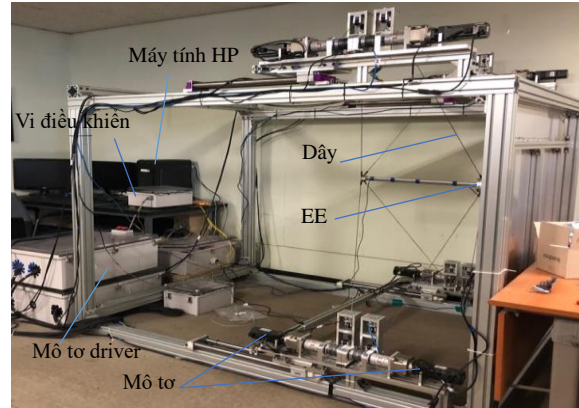
#### 4. Nghiên cứu trường hợp cho CDPR

Trong phần này, các thí nghiệm tập trung vào kiểm soát vị trí của EE trong không gian khớp của CDPR. CDPR là một hệ thống MIMO trong đó tín hiệu ra  $\mathbf{y}(k) = [l_1(k) \ l_2(k) \ \dots \ l_8(k)]^T$ , ở đó  $l_i$  là chiều dài của dây thứ  $i$  ( $i = 1 \div 8$ ) và tín hiệu vào  $\mathbf{u}(k) = [\tau_1(k) \ \tau_2(k) \ \dots \ \tau_8(k)]$  với  $\tau_i$  là mô men điều khiển của dây thứ  $i$  trong không gian khớp.

Động học ngược [23] được sử dụng để chuyển đổi chuyển vị của EE thành chiều dài của các dây:

$$l_i = \|\mathbf{a}_i - \Xi \mathbf{b}_i - \mathbf{p}\|, \quad (12)$$

Trong đó:  $\mathbf{a}_i$  là véc tơ vị trí của đầu dây thứ  $i$  nói với khung,  $\mathbf{b}_i$  là véc tơ vị trí của đầu dây thứ  $i$  nói với EE,  $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$  là véc tơ vị trí của trọng tâm của EE, và  $\Xi$  là một ma trận chuyển.



**Hình 2. Mô hình CDPR trong phòng thí nghiệm**

$$\Xi = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix},$$

Trong đó:  $\alpha$ ,  $\beta$ , và  $\gamma$  tương ứng là các góc nghiêng của EE theo ba trục  $x$ ,  $y$ , và  $z$ ,  $c\alpha \equiv \cos \alpha$ ,  $s\alpha \equiv \sin \alpha$ ,  $c\beta \equiv \cos \beta$ ,  $s\beta \equiv \sin \beta$ ,  $c\gamma \equiv \cos \gamma$ , và  $s\gamma \equiv \sin \gamma$ .

Mô hình trong phòng thí nghiệm của CDPR được thể hiện trong Hình 2. Phần cứng bao gồm máy tính HP (Intel® Core™ i-7 CPU 3.4GHz), được sử dụng để tính toán tín hiệu điều khiển và điều khiển 08 mô tơ (Delta, ECMA-C10604ES) thông qua mạch D/A (TEXAS INSTRUMENTS LUANCHXL-F280049C and TMS320F28379D). Chiều dài của mỗi dây được xác định thông qua các encoder (gắn trên các mô tơ) và hồi tiếp thông chuẩn giao tiếp CAN-Bus tới máy tính. Phần mềm điều khiển được thực hiện với Simulink/Matlab.

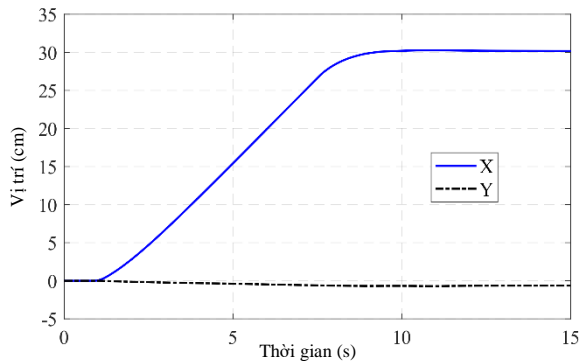
Các thông số của CDPR được sử dụng trong thí nghiệm là:  $m = 1,91\text{kg}$ ;  $g = 9,81\text{m/s}^2$ ;  $I_x = 0,059\text{kgm}^2$ ;  $I_y = 0,59\text{kgm}^2$ ; và  $I_z = 0,002\text{kgm}^2$ .

Điều kiện khởi tạo và các thông số của bộ điều khiển là:  $\tau(0) = 0$ ,  $l_1(0) = l_2(0) = l_3(0) = l_4(0) = 1,048\text{m}$ ;  $l_5(0) = l_6(0) = l_7(0) = l_8(0) = 1,08\text{m}$ ;  $\hat{\Phi}(1) = \text{diag}(0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1)$ ;  $\lambda = 0,38$ ;  $\rho = 0,003$ ;  $\mu = 0,095$ ;  $\eta = 0,0095$ ; và  $\varepsilon = 0,008$ .

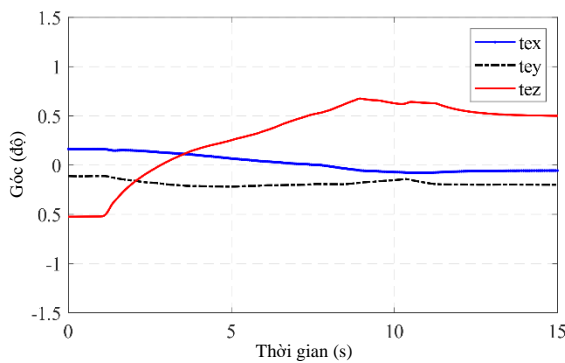
Thí nghiệm được đưa ra để hoàn thành hai nhiệm vụ di chuyển dọc theo trục  $x$  và trục  $y$ .

Thí nghiệm đầu tiên điều tra đặc tính di chuyển của CDPR dọc theo trục  $x$ . Trong thí nghiệm này, EE di chuyển từ điểm này  $(x, y) = (0, 0)$  tới điểm mục tiêu  $(x, y) = (30\text{cm}, 0\text{cm})$ . Đáp ứng điều khiển được thể hiện trong Hình 3. Vị trí của EE được mô tả trong Hình 3(a), trong khi hướng của EE duy trì quanh giá

trị không trong suốt quá trình di chuyển (Hình 3(b)).

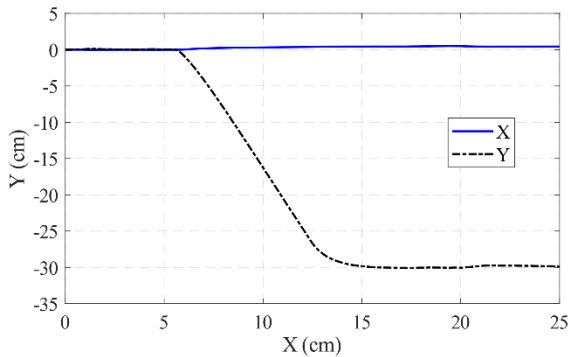


(a) Vị trí của EE.

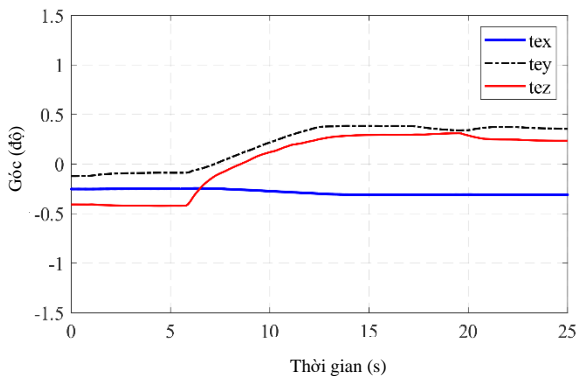


(b) Hướng của EE.

**Hình 3. Thí nghiệm di chuyển dọc theo trục x**



(a) Vị trí của EE.



(b) Hướng của EE.

**Hình 4. Thí nghiệm di chuyển dọc theo trục y**

Thí nghiệm thứ hai đảm bảo sự di chuyển của EE dọc theo trục y từ gốc tọa độ đến vị trí  $y = -30\text{cm}$ . Hình 4 thể hiện đáp ứng của CDPR. Trong Hình 4(a), EE được yêu cầu di chuyển từ gốc tọa độ tới điểm mục tiêu  $(x, y) = (0\text{ cm}, -30\text{cm})$  trong khoảng thời gian 9s. Hướng của EE được thể hiện trong Hình 4(b).

Dựa trên những kết quả thí nghiệm nêu trên, chúng đã thể hiện rằng bộ điều khiển đề xuất là phù hợp để kiểm soát cả vị trí và hướng của CDPR.

### 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tiếp cận điều khiển MFAC được đề xuất và ứng dụng cho hệ thống CDPR phi tuyến MIMO khi không biết mô hình toán học. Đóng góp của nghiên cứu này có thể được tổng hợp như ở dưới đây:

- (i) Giới thiệu bộ điều khiển MFAC để kiểm soát các đầu ra của những hệ thống MIMO.
- (ii) Sau đó, bộ điều khiển đề xuất này được ứng dụng trên mô hình CDPR chỉ dựa trên việc đo đạc dữ liệu I/O của CDPR.
- (iii) Những thí nghiệm thể hiện rằng bộ điều khiển MFAC phù hợp với CDPR để kiểm soát vị trí và hướng của EE.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. B. Alp and S. K. Agrawal, *Cable suspended robots: design, planning and control*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp.4275-4280, 2002.

[2] J. Begey, L. Cuvillon, M. Lesellier, M. Gouttefarde, and J. Gangloff, *Dynamic Control of Parallel Robots Driven by Flexible Cables and Actuated by Position-Controlled Winches*, IEEE Transactions on Robotics, Vol.35, No.1, pp.286-293, 2019.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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, 2018.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] W. Shang, B. Zhang, B. Zhang, F. Zhang, and S. Cong, *Synchronization Control in the Cable Space for Cable-Driven Parallel Robots*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.66, No.6, pp.4544-4554, 2019.
- [10] H. Bayani, M. T. Masouleh, and A. Kalhor, *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, 2016.
- [11] A. Alikhani and M. Vali, *Modeling and robust control of a new large scale suspended cable-driven robot under input constraint*, 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp.238-243, 2011.
- [12] S. A. Khalilpour, R. Khorrambakht, H. D. Taghirad, and P. Cardou, *Robust cascade control of a deployable cable-driven robot*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.127, pp.513-530, 2019.
- [13] M. Zeinali and A. Khajepour, *Design and Application of Chattering-Free Sliding Mode Controller to Cable-Driven Parallel Robot Manipulator: Theory and Experiment*, 2010.
- [14] R. J. Caverly and J. R. Forbes, *Dynamic Modeling and Noncollocated Control of a Flexible Planar Cable-Driven Manipulator*, IEEE Transactions on Robotics, Vol.30, No.6, pp.1386-1397, 2014.
- [15] H. Jabbari Asl and F. Janabi-Sharifi, *Adaptive neural network control of cable-driven parallel robots with input saturation*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.65, pp.252-260, 2017.
- [16] Z. Hou and S. Jin, *Model free adaptive control: theory and applications*, CRC press, 2013.
- [17] Z. Hou and S. Jin, *Data-Driven Model-Free Adaptive Control for a Class of MIMO Nonlinear Discrete-Time Systems*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.22, No.12, pp.2173-2188, 2011.
- [18] Q. Jiang, Y. Li, Y. Liao, Y. Miao, W. Jiang, and H. Wu, *Information fusion model-free adaptive control algorithm and unmanned surface vehicle heading control*, Applied Ocean Research, Vol.90, 2019.
- [19] S. Liu, Z. Hou, T. Tian, Z. Deng, and Z. Li, *A Novel Dual Successive Projection-Based Model-Free Adaptive Control Method and Application to an Autonomous Car*, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol.30, No.11, pp.3444-3457, 2019.
- [20] Y. Wang, S. Meng, F. Ju, B. Chen, and H. Wu, *A Novel Model-Free Robust Control of Cable-Driven Manipulators*, IEEE Access, Vol.7, pp. 125532-125541, 2019.
- [21] R.-C. Roman, R.-E. Precup, C.-A. Bojan-Dragos, and A.-I. Szedlak-Stinean, *Combined Model-Free Adaptive Control with Fuzzy Component by Virtual Reference Feedback Tuning for Tower Crane Systems*, Procedia Computer Science, Vol.162, pp.267-274, 2019.
- [22] Z. Hou, R. Chi, and H. Gao, *An overview of dynamic-linearization-based data-driven control and applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.64, No.5, pp.4076-4090, 2017.
- [23] A. Ghasemi, M. Eghtesad, and M. Farid, *Neural Network Solution for Forward Kinematics Problem of Cable Robots*, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.60, No.2, pp.201-215, 2010.

Ngày nhận bài:	12/12/2020
Ngày nhận bản sửa:	28/01/2021
Ngày duyệt đăng:	12/02/2021