

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH ỨNG CHO ROBOT DÂY SONG SONG ỨNG DỤNG CHO VIỆC SƠN VỎ TÀU BIỂN

DESIGN OF ADAPTIVE BACKSTEPPING SLIDING MODE CONTROLLER OF CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOTS FOR SHIP PAINTING

TRẦN THẾ NAM¹, THẨM BỘI CHÂU², PHẠM ĐÌNH BÁ^{2*}

¹Phòng Khoa học - Công nghệ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Bài báo này giới thiệu một bộ điều khiển phi tuyến thích ứng dựa trên điều khiển trượt để kiểm soát hướng và vị trí của thiết bị đầu cuối trong một cấu hình của robot dây song song (CDPR) để thực hiện việc phun sơn cho vỏ tàu thủy. Ưu điểm chính của bộ điều khiển là có khả năng thích nghi và khắc phục lại sự không chắc chắn của hệ thống robot. Ngoài ra một bộ quan sát nhiễu loạn cũng được thiết kế cho hệ thống robot. Mô phỏng số trên phần mềm MATLAB/Simulink được đưa ra để minh chứng khả năng của bộ điều khiển đề xuất.

Từ khóa: Robot dây song song, sơn tàu biển, điều khiển trượt thích nghi, bộ quan sát nhiễu loạn.

Abstract

This paper introduces an adaptive nonlinear controller based on the backstepping sliding control method to control the orientation and position of an end-effector in a cable-driven parallel robot (CDPR) configuration to perform paint spraying for ship hulls. The main advantage of the proposed controller is its ability to adapt and overcome the uncertainties of the CDPR system. In addition, a disturbance observer is also designed for the CDPR system. Several numerical simulations on MATLAB/Simulink software are given to demonstrate the capability of the proposed controller.

Keywords: cable-driven parallel robot (CDPR), painting ship, adaptive backstepping sliding mode control (ABS-SMC), disturbance observer.

1. Giới thiệu chung

Sơn vỏ tàu là một công việc nặng nhọc và nguy hiểm cho công nhân. Để giảm thiểu mối nguy hiểm này, tự động hóa sơn vỏ tàu bằng các loại robot là một công việc cần thiết và có nhiều ý nghĩa. Nó mang lại hiệu quả kinh tế, giải phóng sức lao động cho con người.

Tuy nhiên, quy mô lớn và độ phức tạp của vỏ tàu là một thách thức đối với các hệ thống sơn tự động. Với những ưu điểm như không gian làm việc rộng, linh hoạt trong cấu hình và khả năng chịu tải cao [1], [2], robot song song dẫn động bằng dây (CDPR) cho thấy sự phù hợp của chúng với nhiệm vụ sơn vỏ tàu thủy. CDPR có thể được coi là một loại robot song song trong đó cơ cấu đầu cuối được điều khiển bằng dây chứ không phải là các thanh liên kết cứng.

Bên cạnh những ưu điểm, bộ điều khiển cho CDPR cần phải duy trì độ căng của dây trong thời gian vận hành là một nhiệm vụ cần thiết và khó khăn. Bài toán phân bố lực căng đối với CDPR đã được nghiên cứu trong nhiều nghiên cứu và phương pháp dạng đóng cài tiến là cách nhanh nhất để giải quyết vấn đề phân bố lực căng của dây [3].

Bộ điều khiển chế độ trượt thích nghi (adaptive backstepping sliding mode control - ABS-SMC) được đề xuất trong [4], là một bộ điều khiển chế độ trượt kết hợp với một bộ quan sát thích ứng. Sự kết hợp dẫn đến sự mạnh mẽ từ bộ điều khiển chế độ trượt và nâng cao khả năng thích ứng. Trong nghiên cứu này, một bộ điều khiển ABS-SMC cho robot song song điều khiển bằng dây được thiết kế dựa trên phương pháp của điều khiển trượt. Một số mô phỏng cũng được thực hiện với mục đích kiểm tra tính hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất.

2. Mô hình động lực học của CDPR

Bằng việc áp dụng định lý Lagrange, mô hình động lực học của CDPR được đề xuất và phân tích trong các nghiên cứu [5], [6]:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}^e, \quad (1)$$

trong đó: $\mathbf{q} = [x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$: Là chuyển vị của thiết bị đầu cuối;

$\mathbf{M}(\mathbf{q})$: Là ma trận khối lượng của hệ thống;

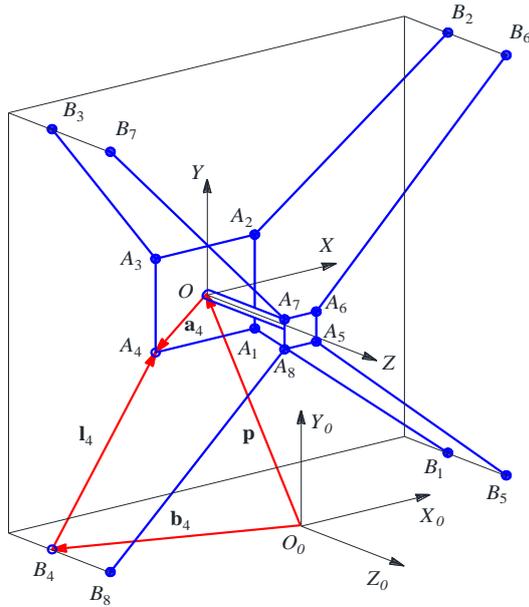
$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: Là ma trận lực ly tâm và Coriolis;

$\mathbf{g}(\mathbf{q})$: Là véc tơ gia tốc trọng trường;

J : Là ma trận Wrench;
 τ : Là véc tơ lực căng của dây;

F^e là véc tơ ngoại lực tác dụng lên thiết bị đầu cuối.
 Trong ứng dụng sơn vỏ tàu thủy, gió hay sự không bằng phẳng của bề mặt vỏ tàu có thể dẫn đến lực d tác dụng lên thiết bị đầu cuối cùng với lực làm việc, F^w như sau:

$$F^e = F^w + d, \quad (2)$$



Hình 1. Cấu trúc của CDPR

3. Thiết kế bộ điều khiển

3.1. Bộ quan sát nhiễu

Trong phần này, chúng tôi thiết kế một bộ quan sát nhiễu \hat{d} của nhiễu d . Bộ quan sát này sẽ được sử dụng trong bộ điều khiển. Bộ quan sát [4] được thiết kế dựa vào sai số giữa thông số trạng thái đo đạc và thông số trạng thái xác định được từ mô hình:

$$\dot{\hat{d}} = \xi \left(Q - \begin{bmatrix} \dot{q} \\ M^{-1}(-C\dot{q} - g + J\tau + F^w) + M^{-1}\hat{d} \end{bmatrix} \right), \quad (3)$$

trong đó $\xi = [\xi_1 \quad \xi_2]$ là hệ số của bộ quan sát và $Q = [q \quad \dot{q}]^T$.

Định nghĩa véc tơ $z = \hat{d} - \xi Q$, và từ (3) chúng ta có:

$$\dot{z} = \xi \left(\begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M^{-1}(C\dot{q} + g - J\tau - F^w) - M^{-1}(z + \xi Q) \end{bmatrix} \right). \quad (4)$$

3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi

Bước 1: Định nghĩa sai số vị trí $e = q - q_d$, với q_d

là quỹ đạo mong đợi, mô hình động lực học (1) có thể được viết lại trong mô hình không gian trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{e} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{e} = b + u + M^{-1}d \end{cases}, \quad (5)$$

trong đó b , u và \tilde{d} được định nghĩa như sau:

$$b = M^{-1}(-C\dot{q} - g + F^w) - \ddot{q}_d, \quad u = M^{-1}J\tau.$$

Trong hệ thống thứ nhất, x_2 được coi như là tín hiệu vào ảo và hàm Lyapunov được lựa chọn như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} x_1^T x_1, \quad (6)$$

và tín hiệu điều khiển cũng là giá trị mong đợi của x_2 ,

$$r_1 = -K_1 x_1. \quad (7)$$

Tính đạo hàm của V_1 theo thời gian:

$$\dot{V}_1 = x_1^T \dot{x}_1 = x_1^T (x_2 - r_1) - x_1^T K_1 x_1. \quad (8)$$

Nếu $x_2 = r_1$ thì $\dot{V}_1 = -x_1^T K_1 x_1 \leq 0$. Luật điều khiển u trong công thức (12) cần tạo ra x_2 theo giá trị mong đợi r_1 .

Bước 2: Định nghĩa mặt trượt như sau:

$$s = \lambda x_1 + (x_2 - r_1), \quad (9)$$

trong đó $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6)$, $\lambda_i > 0$. Trong toàn bộ hệ thống, Hàm Lyapunov được lựa chọn:

$$V_2 = \frac{1}{2} x_1^T x_1 + \frac{1}{2} s^T s. \quad (10)$$

Tính toán đạo hàm của V_2 theo thời gian thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & x_1^T (x_2 - r_1) - x_1^T K_1 x_1 \\ & + s^T [\lambda (x_2 - r_1) + b + u + M^{-1}d + K_1 x_2]. \end{aligned} \quad (11)$$

Trong công thức (5), x_2 có thể được xem như là một tín hiệu điều khiển ảo của x_1 và chúng tôi đề xuất tín hiệu điều khiển u của x_2 là [3]:

$$u = u_{eq} + u_{disc} - M^{-1}\tilde{d}, \quad (12)$$

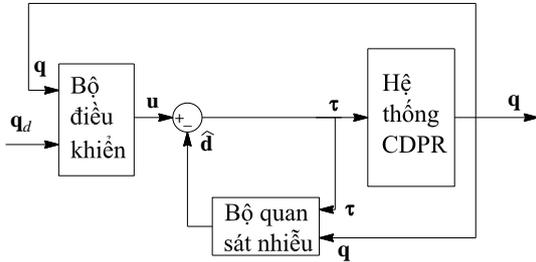
trong đó:

$$\begin{aligned} u_{eq} &= -(\lambda (x_2 + K_1 x_1) + b + K_1 x_2) \\ u_{disc} &= -[h(s + \beta \text{sign}(s))] \\ \hat{d} &= z + \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2 \end{aligned}. \quad (13)$$

Từ (5) và (12), lực căng dây được xác định bởi công thức sau:

$$\mathbf{J}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_{disc} - \mathbf{M}^{-1}\hat{\mathbf{d}}). \quad (14)$$

Sơ đồ hệ thống điều khiển được mô tả trong Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ hệ thống điều khiển

3.3. Sự ổn định

Để chứng minh sai số thiết lập của bộ quan sát, $\mathbf{e}_d = \mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}$, là bị chặn, chúng tôi lựa chọn hàm Lyapunov như sau [3]:

$$V_3 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_d^T \mathbf{e}_d. \quad (15)$$

Lấy đạo hàm của V_3 cho ra:

$$\dot{V}_3 = \mathbf{e}_d^T \dot{\mathbf{e}}_d = -\boldsymbol{\xi}_2^T \mathbf{e}_d^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_d \leq 0. \quad (16)$$

Do \mathbf{e}_d bị chặn và giả thiết rằng: $\|\mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_d\| \leq \varepsilon$.

Sau đó lựa chọn \mathbf{u} trong công thức (12), hàm V_2 trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{x}_1^T (\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}_1) - \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{x}_1 \\ &+ \mathbf{s}^T \left[-h(\mathbf{s} + \beta \text{sign}(\mathbf{s})) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}) \right] \\ &\leq \mathbf{x}_1^T (\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}_1) - \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{x}_1 - h \mathbf{s}^T \mathbf{s} - (h\beta - \varepsilon) \|\mathbf{s}\| \end{aligned} \quad (17)$$

Quan tâm đến thành phần:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^T & (\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}_1)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ (\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}_1) \end{bmatrix} \\ &= -\mathbf{x}_1^T (\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}_1) + \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{x}_1 + h \mathbf{s}^T \mathbf{s} \end{aligned} \quad (18)$$

trong đó:

$$\mathbf{a}_{11} = h\lambda^2 + \mathbf{K}_1, \quad \mathbf{a}_{12} = \mathbf{a}_{21} = h\lambda - 0.5\mathbf{I}, \quad \mathbf{a}_{22} = h\mathbf{I}.$$

Từ các công thức (17) và (18), chúng ta có:

$$\dot{V}_2 \leq -\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} - (h\beta - \varepsilon) \|\mathbf{s}\|. \quad (19)$$

Nếu chúng ta lựa chọn giá trị của h và λ để \mathbf{A} là một ma trận dương và β thỏa mãn $h\beta - \varepsilon > 0$ thì $\dot{V}_2 \leq 0$.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Giới thiệu về hệ thống

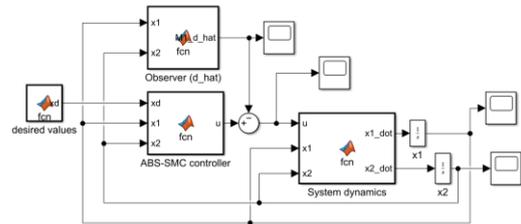
Hệ thống phun sơn cho vỏ tàu thủy cần đảm bảo

vòi phun sơn (được gắn trên thiết bị đầu cuối) phun hết bề mặt vỏ tàu. Hoặc có thể phun dọc theo đường nào đó. Trong một trường hợp cụ thể của nghiên cứu, chúng ta có thể lựa chọn việc phun sơn được thực hiện theo một quỹ đạo cho trước. Để mô tả công việc, chúng tôi sử dụng một CDPR [7] với các thông số 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 $I_z = 0,002\text{kgm}^2$.

Các thông số của bộ điều khiển cũng như bộ quan sát được lựa chọn theo phương pháp sai thử và cuối cùng được lựa chọn như sau: $\mathbf{K}_1 = [5; 5; 4,5; 3; 3,5; 4]$, $\lambda = [6; 6,3; 6,1; 8; 8,3; 8,5]$, $[h, \beta] = [2; 0,5]$; $\boldsymbol{\xi}_1 = [1,25; 1,3; 1,42; 2,1; 1,9; 0,05]$, $\boldsymbol{\xi}_2 = [2,1; 2,5; 3,1; 2,5; 2,4; 0,4]$.

4.2. Môi trường mô phỏng số

Đáp ứng của hệ thống điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu này sẽ được điều tra bằng mô phỏng số. Hệ thống điều khiển vòng kín bao gồm mô hình toán của hệ thống động lực - system dynamics (công thức (1)), bộ quan sát và bộ điều khiển - observer & ABS-SMC controller (công thức (12)) được mô phỏng bằng phương pháp số và được giải theo phương pháp Runge-Kutta với hàm ODE45 trong Matlab/Simulink (xem Hình 3). Chương trình mô phỏng trên hệ thống máy tính được trang bị CPU Corei7-7500, tần số 3.4GHz và 16GB RAM.



Hình 3. Chương trình mô phỏng trên MATLAB/Simulink

Khối *desired values* là khối quỹ đạo tham khảo;
 Khối *Observer (d_hat)* là khối bộ quan sát mô tả bởi công thức (13);
 Khối *System dynamics* là khối hệ thống động lực học mô tả bởi công thức (1);
 Khối *ABS-SMC controller* là khối bộ điều khiển đề xuất mô tả bởi công thức (12).

4.2. Mô phỏng bám quỹ đạo cho CDPR

a. Mô phỏng điều khiển bám quỹ đạo

Trong quá trình phun sơn vỏ tàu thủy, thiết bị đầu cuối không cần phải quay quanh trục Oz nên để thuận tiện cho việc tiếp cận với ứng dụng, chúng ta giả thiết rằng thiết bị đầu cuối không quay quanh trục Oz . Như vậy là CDPR ứng dụng cho việc phun sơn cho tàu

thủy chỉ có 5 bậc tự do với việc bỏ qua chuyển động quay quanh trục Oz của thiết bị đầu cuối. Quỹ đạo mong đợi của thiết bị đầu cuối được lựa chọn như sau:

$$x_d = 0.15\sin\left(\frac{2\pi}{5}t\right), \text{ m} \quad (20)$$

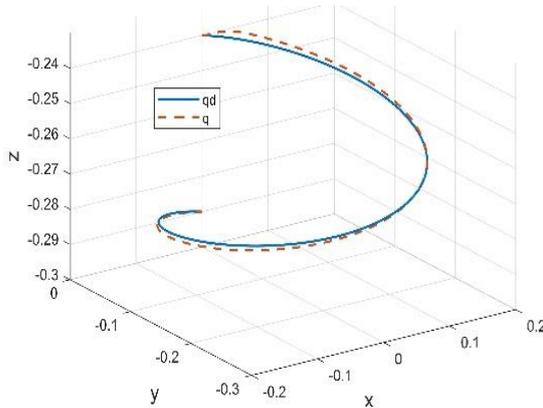
$$y_d = 0.15\sin\left(\frac{2\pi}{5}t\right) - 0.15, \text{ m} \quad (21)$$

$$z_d = -0.24 - 0.01t, \quad (22)$$

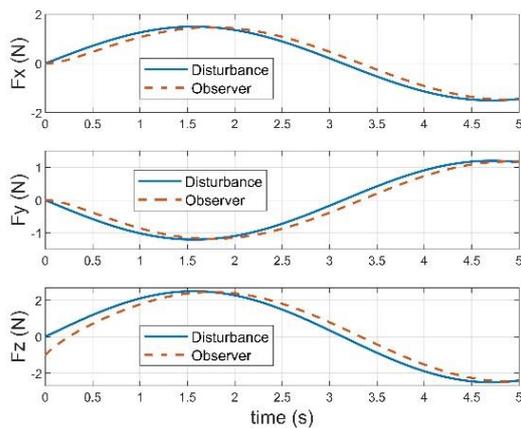
$$\theta_x = 0.01t, \text{ rad} \quad (23)$$

$$\theta_y = 0.015t, \text{ rad} \quad (24)$$

$$\theta_z = 0, \text{ rad.} \quad (25)$$



Hình 4. Quỹ đạo chuyển động của thiết bị đầu cuối

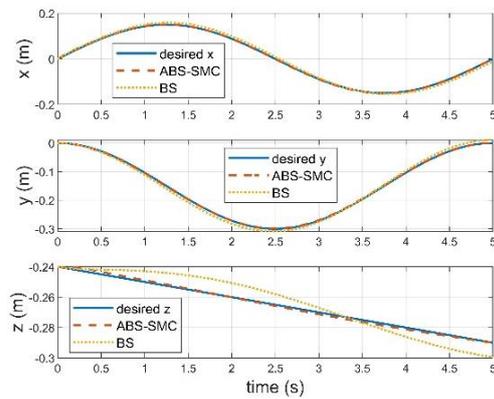


Hình 6. So sánh kết quả quan sát nhiễu của bộ điều khiển ABS-SMC và bộ điều khiển BS
 Disturbance - nhiễu loại tác động lên hệ thống; Observer - bộ quan sát nhiễu loại.

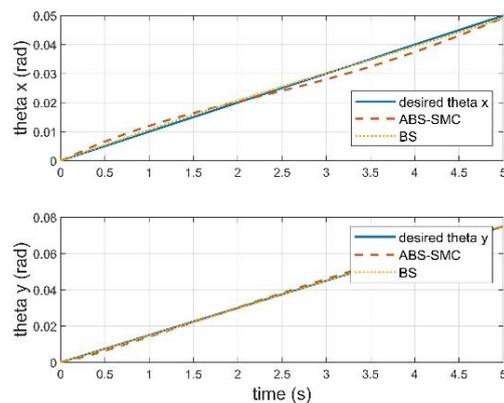
Hình 4 mô tả quỹ đạo chuyển động của thiết bị đầu cuối trong hệ trục tọa độ $Oxyz$. Trong đó, quỹ đạo nét liền màu xanh là quỹ đạo mong đợi, còn quỹ đạo nét đứt màu cam là quỹ đạo thực tế của thiết bị đầu cuối. Độ sai lệch về vị trí thực tế và vị trí tham khảo (như trong Hình 4) không vượt quá 0,0012m. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển đề xuất có khả năng kiểm soát tốt được vị trí chuyển vị của thiết bị đầu cuối.

b. So sánh bộ điều khiển đề xuất (ABS-SMC) với bộ điều khiển trượt thông thường-Basic Sliding controller (BS)

Từ kết quả mô phỏng trong Hình 5, bộ điều khiển ABS-SMC thể hiện một kết quả sai khác không vượt quá 2,5mm giữa vị trí mong đợi và vị trí thực tế, trong khi đó kết quả sai khác này là 3,1mm đối với bộ điều khiển BS. Ngoài ra bộ quan sát của bộ điều khiển đề xuất cũng được trình bày trong mục sau đây.



(a) Vị trí của thiết bị đầu cuối



(b) Hướng của thiết bị đầu cuối

Hình 5. So sánh kết quả của bộ điều khiển ABS-SMC và bộ điều khiển trượt thông thường (BS)

Desired $x, y, z, \theta_x, \theta_y$ tương ứng là vị trí và góc nghiêng tham khảo. ABS-SMC là đáp ứng của bộ điều khiển ABS-SMC. BS là đáp ứng của bộ điều khiển BS.

c. Khả năng quan sát nhiễu của bộ điều khiển đề xuất ABS-SMC

Quan sát nhiễu cũng là một trong những đặc điểm của bộ điều khiển đề xuất. Trong nghiên cứu này chúng tôi tạo ra nhiễu loạn có dạng hàm tuần hoàn (hàm \sin) để tác động vào hệ thống.

Các đường nét liền màu xanh (xem Hình 6) là nhiễu tác động vào hệ thống. Bằng việc sử dụng bộ quan sát được định nghĩa trong công thức (3), bộ quan sát thiết lập và ước lượng được những nhiễu loạn với giá trị tạo nên đường nét mảnh màu cam (như trong Hình 6). Từ kết quả này, độ sai khác giữa giá trị nhiễu quan sát với giá trị nhiễu đưa ra ban đầu khoảng 0,15N. Mặc dù không thể thiết lập một cách chính xác nhiễu tác động lên đối tượng điều khiển, nhưng bằng việc ước lượng nhiễu từ bộ quan sát cũng sẽ đảm bảo cho hệ thống tính ổn định trong quá trình đương đầu với những nhiễu loạn từ môi trường bên ngoài.

5. Kết luận và kiến nghị

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một mô hình toán học cho robot dây song với sáu bậc tự do. Trong nỗ lực kiểm soát vị trí và hướng của thiết bị đầu cuối, một bộ điều khiển phi tuyến dựa những lý thuyết của bộ điều khiển trượt được thiết kế cho robot. Ngoài ra nghiên cứu cũng đề xuất một bộ quan sát nhiễu loạn để đảm bảo tính bền vững của hệ thống điều khiển. Kết quả mô phỏng số cho thấy bộ điều khiển có thể kiểm soát được vị trí và hướng của thiết bị đầu cuối với sự sai khác không vượt quá 2,5mm. Một sự so sánh kết quả của bộ điều khiển đề xuất với bộ điều khiển BS cũng được đưa ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. D. Taghirad and M. Nahon (2008), *Kinematic analysis of a macro-micro redundantly actuated parallel manipulator*, Adv. Robot., Vol.22, No.6, pp.657-687.
- [2] S. Qian, B. Zi, W. W. Shang, and Q. S. Xu (2018), *A review on cable-driven parallel robots*, Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.), Vol.31, No.4, 2018.
- [3] A. Pott, *Cable-driven parallel robots: Theory and application*, Vol.120.
- [4] Q. Ai et al. (2018), *Disturbance-estimated adaptive backstepping sliding mode control of a pneumatic muscles-driven ankle rehabilitation robot*, Sensors (Switzerland), Vol.18, No.1.
- [5] C. W. Sadao Kawamura, Hitoshi Kino (2000), *High-speed manipulation by using parallel wire-*

driven robots, Robotica, Vol.18, pp.13-21.

- [6] X. Diao and O. Ma (2008), *Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators for hardware-in-the-loop contact-dynamics simulation*, 2007 Proc. ASME Int. Des. Eng. Tech. Conf. Comput. Inf. Eng. Conf. DETC2007, Vol.8 PART A, No. January, pp.307-313.
- [7] Phạm Đình Bá, Phạm Xuân Dương (2021), *Phương pháp điều khiển thích nghi không có mô hình cho rô bốt dây song song*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 66.

Ngày nhận bài:	06/10/2022
Ngày nhận bản sửa:	20/10/2022
Ngày duyệt đăng:	31/10/2022