

BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC THUẬN CỦA ROBOT DÂY SONG SONG

THE FORWARD KINEMATICS PROBLEM OF CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOTS

PHẠM ĐÌNH BÁ^{1*}, CAO NGỌC VI¹, TRƯƠNG TIẾN PHÁT²

¹Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Mô hình động học, bao gồm động học nghịch (IK) và động học thuận (FK), là vấn đề đầu tiên cần được giải quyết khi nghiên cứu robot dây song song (CDPR). Ngược lại với bài toán IK, trong đó các phương trình được tách rời và có thể được giải trực tiếp, bài toán FK lại liên quan đến tính phi tuyến và khó giải hơn. Nhìn chung, vấn đề FK của CDPR không thể giải quyết được về mặt phân tích. Tuy nhiên, đối với một CDPR thông thường với sáu bậc tự do (DoF), không có giải pháp phân tích nào khả quan. Do đó, phương pháp số phải được cân nhắc để tìm ra lời giải, phương pháp này có một nhược điểm là tiêu tốn thời gian, đặc biệt là trong tính toán thời gian thực. Trong nghiên cứu này, để giải quyết các vấn đề liên quan đến bài toán FK, chúng tôi đề xuất một mạng nơ-ron để ước tính vị trí và góc nghiêng của thiết bị đầu cuối (EE) dựa trên phương pháp học nông. Dữ liệu huấn luyện đầu vào là chiều dài của dây và dữ liệu đầu ra là vị trí và hướng của EE thu được từ mô hình IK.

Từ khóa: Robot dây song song, mô hình động học, mô hình ngược, mạng Nơ-ron.

Abstract

Kinematic model, including inverse kinematics (IK) and forward kinematics (FK), is the first problem that needs to be solved when researching cable-driven parallel robots (CDPR). In contrast with inverse kinematics, where the equations are decoupled and can be solved directly, the forward kinematics problem is more involved. Generally, the forward kinematics problem of CDPR are not analytically solvable. However, for a general CDPR with six degree of freedom (DoF), there is no analytical solution at hand. Therefore, numerical method has to be considered to find the solution, which is a drawback in terms of time consumption, especially in real-time computing.

In this study, to solve the problems related to the forward kinematics problem, we propose a neural network to estimate the position and orientation of end-effector (EE) based on the shallow learning method. The input training data is the length of the cables and the output data is the position and orientation of EE obtained from the inverse kinematic model.

Keywords: Cable-driven parallel robot, kinematic model, inverse model, neural network.

1. Giới thiệu chung

Robot song song có những ưu điểm về không gian làm việc rộng [1], khả năng chịu lực lớn [2], tốc độ cao [3] khi so sánh với robot nối tiếp. Robot này được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như robot in 3D [4], robot lau kính [5],... Trong quá trình thiết kế và cấu hình cho robot, động học của robot là bài toán đầu tiên cần phải đạt được. Ngoài ra, phân tích động học thuận (FK) trong hệ thống điều khiển thời gian thực rất quan trọng để đưa ra một kế hoạch điều khiển. Do vậy, phân tích FK trong thời gian thực là rất quan trọng cho thiết kế, điều khiển, và phân tích không gian làm việc của robot song song.

Bài toán động học của robot song song được chia làm hai bài toán lớn, đó là bài toán động học nghịch (IK) và bài toán FK. Bài toán FK có thể dễ dàng giải được bằng phương pháp closed-form [6]. Tuy nhiên, vấn đề này là rất phức tạp, bởi vì nó là hệ thống các phương trình phi tuyến bậc cao [7]. Hiện nay, hầu hết các nhà nghiên cứu đều quan tâm đến bài toán FK. Một vài phương thức được đề xuất trong các nghiên cứu [6, 8]. Tuy nhiên, những phương pháp trên cần một khoảng thời gian dài để giải bài toán này, nó không phù hợp trong thời gian thực.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một mạng nơ-ron với phương thức học nông để giải bài toán FK. Sau khi mạng nơ-ron được huấn luyện, nó có thể đưa ra được vị trí và hướng của EE dựa trên chiều dài của mỗi dây trong thời gian thực. Mạng nơ-ron đã được ứng dụng rộng rãi để tìm ra mô hình ngược của hệ

thống. Đây là một đặc điểm rất đáng chú ý khi áp dụng vào giải quyết vấn đề FK của CDPR.

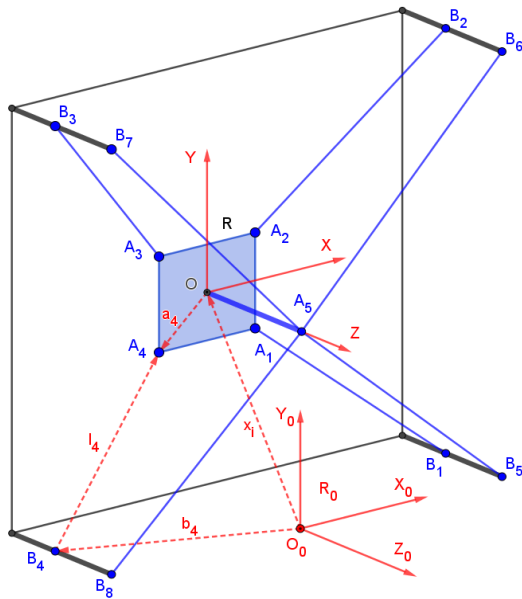
Những nội dung chính của nghiên cứu này được liệt kê như sau:

- Xây dựng mô hình FK của CDPR;
- Lựa chọn và giới thiệu một sơ đồ mạng nơ-ron với học nông để giải bài toán FK; dữ liệu cho việc học sẽ được lấy từ bài toán IK;
- Sử dụng Matlab để huấn luyện cho mạng nơ-ron và mô phỏng kết quả của bài toán FK.

Nghiên cứu này được tổ chức như sau. Mục 2 giới thiệu về mô hình FK và IK của CDPR. Mục 3 mô tả mạng nơ-ron để giải bài toán FK. Kết quả mô phỏng được trình bày trong mục 4. Mục 5 là kết luận và kiến nghị.

2. Mô hình FK của CDPR

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khai thác mô hình của robot song song sử dụng tám dây cho một EE [9]. Mô hình của CDPR được mô tả như trong Hình 1.



Hình 1. Mô hình và cấu trúc của CDPR với tám dây

Trong mô hình này, một hệ thống trục tọa độ bao gồm hệ trục tọa độ toàn cục $O_0X_0Y_0Z_0$ gắn với khung của robot và một hệ trục tọa độ $OXYZ$ gắn với EE. Ma trận chuyển giữa hai hệ trục tọa độ được xác định như sau [9]:

$$\mathbb{R} = \begin{bmatrix} c\varphi c\psi & s\theta s\varphi c\psi - c\theta s\psi & c\theta s\varphi c\psi + s\theta s\psi \\ c\varphi s\psi & s\theta s\varphi s\psi + c\theta c\psi & c\theta s\varphi s\psi - s\theta c\psi \\ -s\varphi & s\theta c\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Trong đó: $c(\cdot) \equiv \cos(\cdot)$ và $s(\cdot) \equiv \sin(\cdot)$, θ , φ , và

ψ là góc nghiêng của EE quanh các trục OX , OY , và OZ .

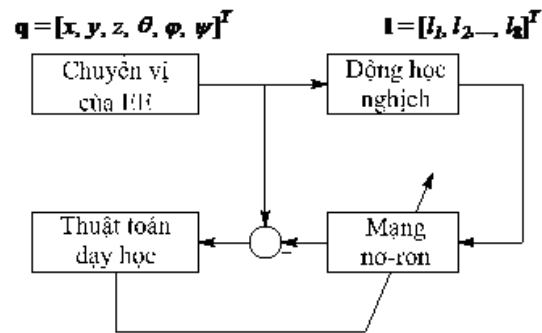
Bài toán động lực học thuận là đưa ra vị trí và hướng của EE theo chiều dài của dây l_i . Phương trình mô tả FK của robot mô tả như sau [9]:

$$F_i(\mathbf{p}) = [\mathbb{R}\mathbf{a}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^p]^T \cdot [\mathbb{R}\mathbf{a}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^p] - l_i^2 = 0, \quad (2)$$

Trong đó: $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ là vị trí của EE, \mathbf{a}_i^p và \mathbf{b}_i^p ($i = 1 \div 8$) tương ứng là véc-tơ mô tả vị trí của điểm A_i và B_i trong hệ trục tọa độ $OXYZ$ và $O_0X_0Y_0Z_0$, l_i là chiều dài của dây thứ i .

Như vậy, trong mô hình FK đầu vào của nó là chiều dài l_i của các dây $i = 1 \div 8$, trong khi đó đầu ra với sáu thông số trong đó ba thông số vị trí, x , y , và z , và ba thông số về hướng của EE, θ , φ , và ψ .

Mô hình mạng nơ-ron được khai thác để giải bài toán FK như được mô tả trong Hình 2. Trong hình này, dữ liệu để cho việc huấn luyện mạng nơ-ron được đưa ra từ mô hình IK [9].



Hình 2. Giải bài toán FK

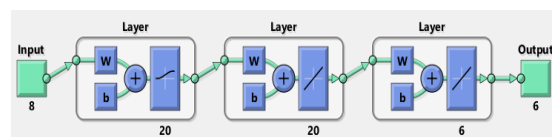
3. Mô hình mạng nơ-ron cho mô hình FK

Trong phần này mạng nơ-ron được xây dựng trên phần mềm Matlab để giải bài toán FK. Thuật toán lan truyền ngược được sử dụng cho việc học nông.

3.1. Thiết kế mạng nơ-ron cho bài toán FK

Để giải bài toán FK, một mạng nơ-ron được đề xuất như trong Hình 3. Bao gồm các lớp như sau: 01 lớp đầu vào, 01 lớp đầu ra, và 03 lớp ẩn.

Lớp input (đầu vào). Lớp này mô tả các thông số đầu vào cho mạng nơ-ron. Trong bài toán FK, lớp đầu vào chính là chiều dài của tám dây $\mathbf{l} = [l_1, l_2, \dots, l_8]^T$.



Hình 3. Sơ đồ mạng nơ-ron

Lớp output (đầu ra). Lớp đầu ra là kết quả của bài toán FK để đưa ra chuyển vị của EE tương ứng với 06 đầu ra, bao gồm vị trí (x, y, z) và hướng (θ, φ, ψ) của EE.

Lớp hidden layer (ẩn). Cấu trúc mạng nơ-ron, như trong Hình 3, bao gồm ba lớp ẩn. Lớp ẩn đầu tiên được cấu thành từ 20 nơ-ron với hàm trọng số là hàm 'logsig', lớp ẩn thứ hai được tạo thành cũng từ 20 nơ-ron có hàm truyền là 'purelin', và lớp ẩn còn lại có tương ứng 6 nơ-ron với hàm truyền được lựa chọn là hàm 'purelin'.

Việc lựa chọn cấu trúc mạng nơ-ron bao gồm số lớp ẩn và hàm truyền của các lớp được lựa chọn theo kinh nghiệm để đáp các yêu cầu của bài toán.

3.2. Dữ liệu cho việc huấn luyện mạng nơ-ron

Không gian làm việc của EE là cơ sở để tạo ra tính tổng quát cho dữ liệu huấn luyện cho mạng nơ-ron. Trong nghiên cứu [9], không gian làm việc của EE được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} x_{min} \div x_{max} &= -0,5 \div 0,5, \text{ m} \\ y_{min} \div y_{max} &= -0,5 \div 0,5, \text{ m} \\ z_{min} \div z_{max} &= -0,8 \div 0,8, \text{ m} \\ \theta_{min} \div \theta_{max} &= -45^\circ \div 45^\circ \\ \varphi_{min} \div \varphi_{max} &= -45^\circ \div 45^\circ \\ \psi_{min} \div \psi_{max} &= -45^\circ \div 45^\circ \end{aligned}$$

Sau đó, dựa vào công thức IK đưa ra chiều dài của l_i của mỗi dây ($i = 1 \div 8$) [9]:

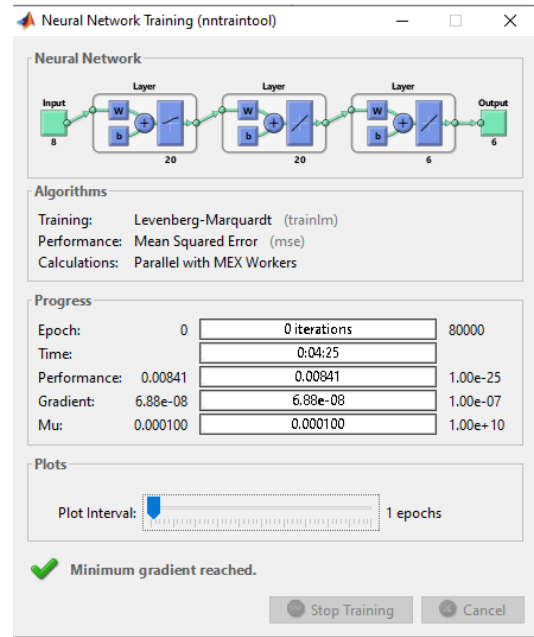
$$l_i = \sqrt{(\mathbf{Ra}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^b)^T (\mathbf{Ra}_i^p + \mathbf{p} - \mathbf{b}_i^b)}. \quad (3)$$

Dữ liệu phục vụ cho việc thiết lập mô hình động học thuận được tạo ra từ phương trình (3) với 34.012.224 mẫu trong đó số mẫu cho việc huấn luyện (dạy học) là 27.209.779 (tương ứng 80%) và số mẫu cho việc kiểm tra và xác minh lại kết quả tính toán là 6.802.444 (tương ứng 20%).

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Huấn luyện cho mạng nơ-ron

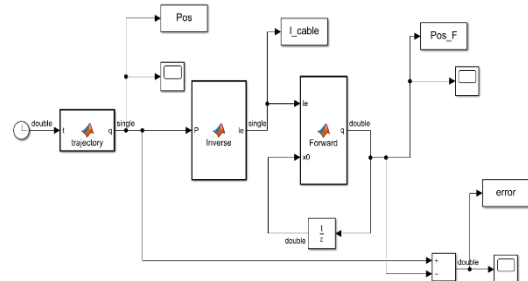
Trong mục này, quá trình huấn luyện sử dụng dữ liệu như đã trình bày trong Mục 3.2 để xác định các trọng số của các lớp trong mạng nơ-ron. Công việc này được thực hiện trong phần mềm Matlab. Thuật toán Levenger-Marquardt được sử dụng cho việc huấn luyện. Quá trình huấn luyện được thể hiện và mô tả như trong Hình 4. Số lần lặp để đạt được kết quả tối ưu là 80.000 lần, sai số cho phép đặt 0,00841, quá trình trên kết thúc sau 265 phút.



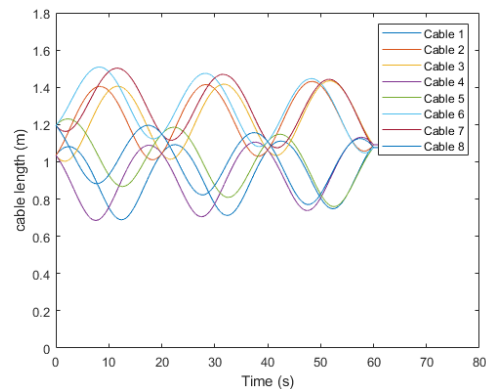
Hình 4. Kết quả huấn luyện với Matlab

4.2. Mô phỏng kết quả trong Simulink

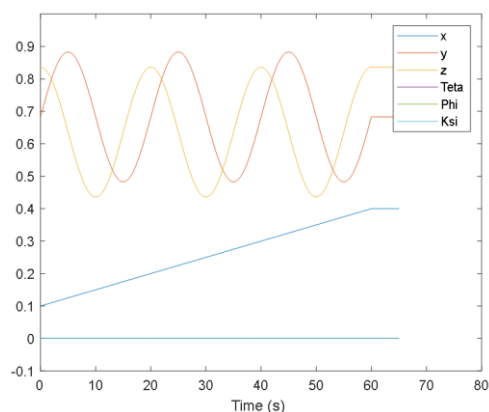
Kết quả của quá trình huấn luyện mạng nơ-ron là tìm ra các trọng số của các nơ-ron trong các lớp mạng. Sau đó, mạng nơ-ron này được mô phỏng lại trong Simulink như trong Hình 5.



Hình 5. Mô phỏng mô hình FK với Simulink

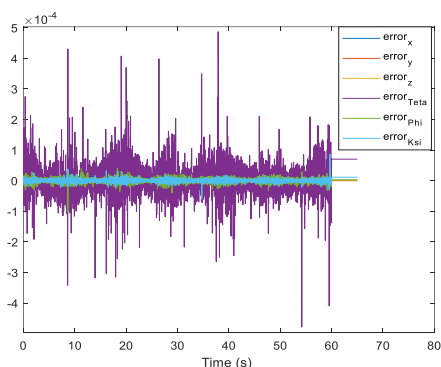


Hình 6. Chiều dài của các dây l_i



Hình 7. Vị trí và hướng của EE

Kết quả mô phỏng trên Matlab Simulink được thể hiện như trong các Hình 6 và 7. Hình 6 thể hiện đầu vào cho mạng nơ-ron với tám tín hiệu vào. Mô hình tính toán FK của mạng này đưa ra chuyển vị và hướng của EE tương ứng như trong Hình 7 với độ lớn sai số khá nhỏ không vượt quá 0,0005 (như trong Hình 8).



Hình 8. Sai số tính toán

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo này đề xuất một mạng nơ-ron để giải bài toán FK cho một C DPR với sáu bậc tự do.

FK được đưa ra để xác định vị trí và hướng của EE từ một tập dữ liệu các chiều dài của các dây (trong thực tế chiều dài dây này có thể được xác định từ các encoder gắn trên các mô tơ lai dây).

Kết quả huấn luyện mạng nơ-ron cho bài toán FK được thực hiện trên Matlab sau đó mạng nơ-ron này được xây dựng trên Simulink trong mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Baklouti, E. Courteille, P. Lemoine et al., *Input Shaping for Feed-Forward Control of Cable-Driven Parallel Robots*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.143, No.2, 2020.

- [2] J. Lin, C. S. Huang, and J. Chang, *A mechatronic kit with a control methodology for a modularized cable-suspended robot*, Journal of Vibration and Control, Vol.22, No.20, pp.4211-4226, 2015.
- [3] 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.
- [4] B. Zi, N. Wang, S. Qian et al., *Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer*, Mechanism and Machine Theory, Vol.132, pp.207-222, 2019.
- [5] Z. Shao, G. Xie, Z. Zhang et al., *Design and analysis of the cable-driven parallel robot for cleaning exterior wall of buildings*, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.18, No.1, 2021.
- [6] A. Pott, and V. Schmidt, *On the forward kinematics of cable-driven parallel robots*. pp.3182-3187, 2015.
- [7] M. A. Khosravi, and H. D. Taghirad, *Experimental Performance of Robust PID Controller on a Planar Cable Robot*, Cable-Driven Parallel Robots, T. Bruckmann and A. Pott, eds., pp.337-352, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [8] Y. Liu, M. Kong, N. Wan et al., *A Geometric Approach to Obtain the Closed-Form Forward Kinematics of H4 Parallel Robot*, Journal of Mechanisms and Robotics, Vol.10, No.5, 2018.
- [9] P. D. Ba, N. D. Khiem, and M. H. Tuan, *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*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 66 (4/2021), Tr.36-40, 2021.

Ngày nhận bài:	12/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	05/8/2021
Ngày duyệt đăng:	16/8/2021