

Design and Calculation of Cable Distribution System for CDRP

Phuoc Tho Tuong^{*}, Nguyen Luan Vu Truong
HCMC University of Technology and Education, Vietnam

^{*}Corresponding author. Email: thotp@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 18/10/2023
Revised: 13/11/2023
Accepted: 29/11/2023
Published: 28/02/2024

KEYWORDS

Cable winch;
Cable robot;
Tension measurement;
Cable parallel robot;
Cable robot simulation.

ABSTRACT

This article presents the design and calculation of a cable distribution system used for large-sized cable robots. The main function of the cable distribution system is to convert the rotational motion of the motor shaft into the translational motion of the cable with constraints on position, velocity and cable tension. With a clear relationship between cable length and motor angle, the cable distribution system is designed to guarantee that cables are fully distributed and oriented. The main contributions of the research are as follows: Designing a cable distribution system with a built-in mechanism for measuring cable tension; Building cable distribution system mathematical models, incorporating the results into a mathematical model of a 6-degree-of-freedom CDRP configuration powered by 8 cables and simulating the computational results. The analysis findings suggest that the structure of the cable distribution system meets the design specifications and is suitable for developing actuators in cable robot applications that involve heavy loads and large sizes.

Thiết Kế và Tính Toán Hệ Thống Phân Phối Cáp cho CDRP

Tuờng Phước Thọ^{*}, Trương Nguyễn Luân Vũ
Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

^{*} Tác giả liên hệ. Email: thotp@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 18/10/2023
Ngày hoàn thiện: 13/11/2023
Ngày chấp nhận đăng: 29/11/2023
Ngày đăng: 28/02/2024

TỪ KHÓA

Tời phân phối cáp;
Robot cáp;
Đo lực căng cáp;
Robot cáp song song;
Mô phỏng robot cáp.

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày thiết kế, tính toán hệ thống phân phối cáp sử dụng cho robot cáp kích thước lớn. Hệ thống phân phối cáp của robot cáp có chức năng biến chuyển động quay từ trục động cơ thành chuyển động tịnh tiến của dây cáp với các điều kiện ràng buộc về vị trí, vận tốc và lực căng cáp. Hệ thống phân phối cáp được thiết kế đảm bảo dây cáp được phân phối và định hướng hoàn toàn với mỗi liên hệ rõ ràng giữa chiều dài cáp và góc quay động cơ truyền động. Các đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm: Thiết kế hệ thống phân phối cáp có tích hợp cơ cấu đo lực căng cáp; Xây dựng các mô hình tính toán hệ thống phân phối cáp, tích hợp kết quả tính toán vào mô hình toán của một cấu hình CDRP 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 dây cáp, mô phỏng kết quả tính toán và đánh giá. Kết quả phân tích cho thấy kết cấu của hệ thống phân phối cáp phù hợp với các yêu cầu thiết kế, có thể ứng dụng triển khai làm bộ truyền động cho các Robot cáp có kích thước và tải trọng lớn.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1486>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Robot song song điều khiển bằng cáp (Cable driven parallel robot - CDRP) là một loại robot cấu trúc song song có cấu hình đặc biệt, trong đó các cơ cấu truyền động cơ khí như bánh răng, vít me, khâu kết nối cứng được thay thế bằng các dây cáp có thể thay đổi chiều dài. Cáp truyền động được quấn và nhả bằng các bộ truyền động tuyến tính hoặc quay (được gọi là tời hoặc cơ cấu phân phối cáp) và được định hướng bằng cách sử dụng các thiết bị dẫn hướng như pully tới một bệ di động (Moving platform - MP),

trên đó các đầu dây cáp được bố trí theo cấu hình song song [1]. Ưu điểm lớn nhất của các CDPR là có khả năng cho một không gian làm việc rất lớn và có thể cấu hình lại dễ dàng. Đặc tính này đến từ việc cơ cấu chấp hành là những sợi cáp rất dài, có thể được trữ và phân phối trên các bộ tời và các dây cáp hoạt động hiệu quả về mặt kết cấu, chỉ chịu tải trọng kéo. Ngoài ra, các bộ truyền động và hệ thống dẫn hướng có thể được bố trí lại dễ dàng, cho phép thay đổi nhanh chóng về kích thước và hình dạng không gian làm việc. Một vấn đề khó khăn trong việc triển khai các CDPR là việc đảm bảo cho các dây cáp truyền động hoạt động ở trạng thái căng và các lực căng cáp nằm trong giới hạn cho trước ứng với các tải trọng khác nhau [2]-[3]. Một ưu điểm khác của CDPR so với các robot nối tiếp là các cơ cấu chấp hành có thể lắp đặt trên bệ cố định, không ảnh hưởng đến tải trọng thiết kế hoặc dễ dàng bố trí đối trọng để cân bằng lực tác động [4]. Tuy có nhiều ưu điểm trong thiết kế và khả năng ứng dụng, việc sử dụng CDPR trong thực tế vẫn còn hạn chế do những thách thức về các vấn đề thiết kế, điều khiển và an toàn. Khả năng điều khiển và an toàn có thể được cải thiện bằng cách sử dụng nhiều dây cáp hơn số bậc tự do của MP (Cấu hình thừa ràng buộc). Tuy nhiên, điều này dẫn đến sự phức tạp của các bài toán động học – cân bằng lực và có thể khiến các dây cáp va chạm với nhau hoặc va chạm với môi trường xung quanh, làm hạn chế không gian làm việc của robot, do đó đòi hỏi phải sử dụng các kỹ thuật thiết kế phức tạp để giải quyết các vấn đề nêu trên [5]. Trong trường hợp này, khả năng mở rộng không gian làm việc có thể được cải thiện bằng cấu hình treo cáp (Cấu hình mắc cáp có bộ di động nằm phía dưới các điểm mắc cáp cố định theo hướng lực trọng trường) và sử dụng nhiều cáp dự phòng (số lượng cáp lớn hơn số bậc tự do của MP) [6]-[7], mặc dù vậy, khả năng va chạm giữa cáp với cáp có thể tăng lên và mô hình toán cũng phức tạp hơn. Do đó, để đơn giản hóa thiết kế và hợp lý hóa chi phí của việc phát triển CDPR, các cấu hình CDPR dạng treo đơn giản hơn đã được đề xuất, với số lượng dây cáp truyền động ít hơn số bậc tự do của MP, điều này dẫn đến một bộ điều khiển đơn giản hơn vì MP không bị thừa ràng buộc [8]-[9]. Trong các nghiên cứu về CDPR, để có thể điều khiển được dây cáp đáp ứng các yêu cầu động học, cần phải xác định rõ mối liên hệ giữa độ dịch chuyển của bộ truyền động Δq (động cơ) và độ dịch chuyển của cáp Δl (chiều dài cáp). Do đó, việc đảm bảo tính toán được tỷ số truyền của bộ truyền động cơ cấu phân phối cáp $K = \Delta l / \Delta q$ là một điều kiện tiên quyết khi các nhà nghiên cứu thiết kế các bộ tời phân phối cáp mới cho mục đích truyền động cho các loại robot nói chung và CDPR nói riêng [10].

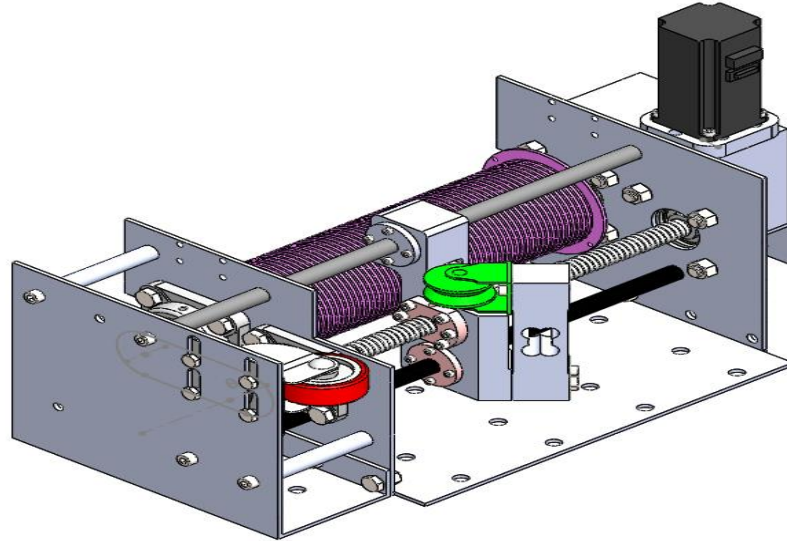
Về mặt giải pháp, cách đơn giản nhất để trữ cáp là sử dụng một tang trống quấn cáp nối với động cơ, như phân tích ở trên. Tuy nhiên, việc thiết kế các phương pháp quấn cáp trên tang là không đơn giản, do chiều dài dây cáp phụ thuộc vào bán kính và vị trí vòng dây trên tang không phải là một hàm của góc quay động cơ. Để tăng chiều dài cáp được dự trữ, dây cáp có thể được quấn trên các trống tròn hoặc có rãnh và đảo chiều bằng vít tự đảo chiều hoặc sử dụng các trống có bán kính thay đổi được [11], [12]. Ngoài ra, dây cáp cũng có thể được quấn chồng lên nhau trên các trống ngăn [13]; tất cả những giải pháp này là để thu được mối tương quan chính xác giữa chuyển vị của cáp và góc quay động cơ. Tuy nhiên, tỷ số truyền K là một hàm của góc tuyệt đối của động cơ, có thể không xác định được tại thời điểm bắt đầu nếu không có chế độ lưu vị trí khi ngắt điện, hay khi bán kính tang r thay đổi do quấn nhiều lớp sẽ làm thay đổi các giới hạn lực căng khác nhau đối với công suất định mức động cơ nhất định. Giải pháp có thể đơn giản hơn và có sẵn trên thị trường đối với hằng số K đã biết là sử dụng một tời nâng dạng hệ ròng rọc và một bộ truyền động tuyến tính để điều khiển nó [14], tuy nhiên, giải pháp này làm tăng kích thước, tăng độ mòn cáp do ma sát khi lưu trữ cáp dài.

Qua các khảo sát cho thấy, CDPR có tiềm năng phát triển lớn, tuy nhiên vẫn chưa có một nghiên cứu chi tiết về việc thiết kế và tính toán bộ tời phân phối cáp hoàn chỉnh theo các yêu cầu cụ thể, cũng như tích hợp cơ cấu đo lực căng cáp phục vụ quá trình điều khiển. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế, tính toán và mô phỏng bộ tời phân phối cáp sử dụng cho các cấu hình robot cáp khác nhau với tải trọng tối đa là 500N, chiều dài lưu trữ cáp là 20m. Đóng góp chính của nghiên cứu là thiết kế cấu trúc bộ tời phân phối cáp tích hợp thiết bị đo lực căng cáp, xây dựng mô hình toán biểu diễn mối liên hệ giữa chiều dài cáp và góc quay động cơ truyền động, kết quả này được áp dụng để xây dựng bộ điều khiển và mô phỏng trên một cấu hình CDPR để đánh giá sự phù hợp của mô hình nghiên cứu.

2. Thiết kế hệ thống phân phối cáp

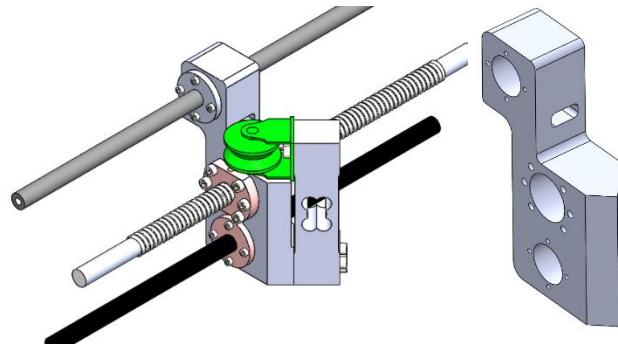
Cơ cấu phân phối cáp cho các CDPR có nguyên lý tương tự như các bộ tời nâng hạ vật, biến chuyển động quay ở trục động cơ thành chuyển động tịnh tiến của dây cáp. Khác với các bộ tời chuyên dụng,

chiều dài dây cáp nâng hạ được điều chỉnh trực tiếp từ người vận hành, cơ cấu phân phối cáp phải được điều khiển chiều dài và vận tốc của cáp truyền động một cách chính xác theo các bài toán quy hoạch quỹ đạo cho trước. Do đó, việc thiết kế và tính toán hệ thống phân phối cáp phải thỏa mãn các yêu cầu sau: thứ nhất, có khả năng phân phối cáp với độ chính xác về vị trí, vận tốc và đáp ứng tải trọng cho trước; thứ 2, có thể lưu trữ số lượng cáp nhất định, tùy theo kích thước của C DPR; thứ 3, có cơ cấu đo lực căng cáp phục vụ quá trình điều khiển.



Hình 1. Thiết kế bộ tời phân phối cáp

Trong nghiên cứu này, bộ tang cuốn phân phối dây cáp bằng thép được thiết kế như trên **hình 1**. Để các dây cáp không bị rơi trong khi quán và xả dây, một cơ cấu phân phối hỗ trợ dẫn hướng dây cáp được thiết kế như **hình 2**, trên đó có tích hợp một cảm biến lực (loadcell) dùng để đo lực căng của dây cáp. Bộ dẫn hướng bao gồm: Một thanh vít me đường kính 20mm, bước 5mm; Hai thanh dẫn hướng đường kính 16mm; Bộ gá đai ốc vít me, đai ốc thanh dẫn; Loadcell (100kg) để đo lực căng dây cáp do tải trên đầu công tác tác động về bộ điều khiển. Bộ dẫn hướng được truyền động thông qua bộ truyền đai răng được đặt ở cuối trục tang. Để dây cáp cuốn vào và xả ra không bị chùng, tang cuốn cáp được thiết kế các rãnh định hướng cáp với bước rãnh phù hợp với sự dịch chuyển của bộ dẫn hướng bằng vít me và bộ truyền đai. Với tải trọng yêu cầu 50kg và trữ được 20m dây cáp, so sánh với bảng thông số cáp **theo tiêu chuẩn** thì chọn cáp 4mm là phù hợp. Do bộ phân phối cáp và tang cuốn cáp hoạt động đồng bộ với nhau, vít me có bước răng $p_1 = 5$, bước trên tang cuốn cáp $p_2 = 5$ nên ta chọn tỉ số truyền cho tang và vít me $k = 1$.



Hình 2. Thiết kế bộ dẫn hướng cáp và chi tiết gá đai ốc và cảm biến lực

Chu vi một vòng tang cuốn dây cáp:

$$C_T = \pi(D + d) = \pi(100 + 4) = 104\pi(\text{mm}) \quad (1)$$

Trong đó, C_T là chu vi tang quấn cáp (mm), D là đường kính tang quấn cáp (mm), d là đường kính cáp (mm)

Số vòng dây cần quấn được đề đạt được 20m:

$$N = \frac{L}{C_T} = \frac{20 \times 10^3}{104\pi} = 61.21 \text{ (Vòng)} \quad (2)$$

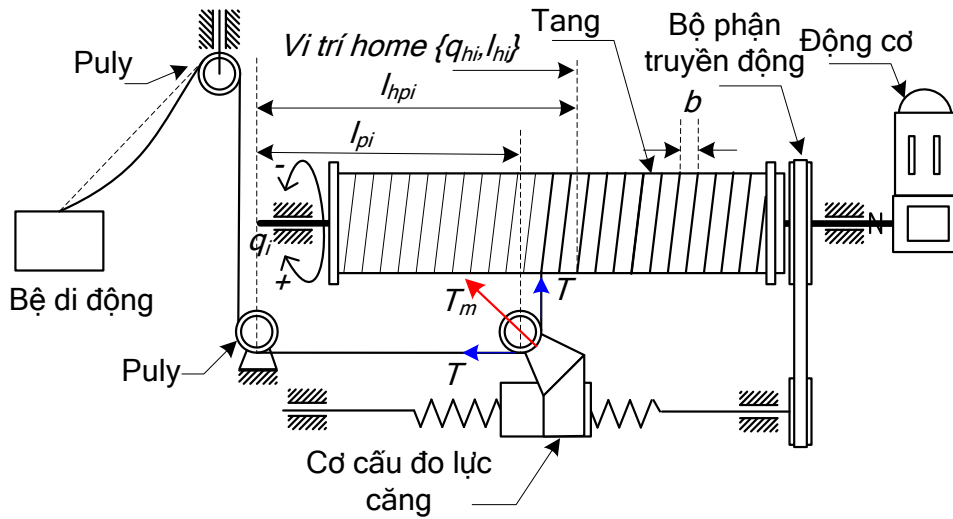
Với L là chiều dài tối đa tang có thể trữ được (m)

Chiều dài cần thiết của tang cuốn cáp:

$$L_T = N \times b = 61.21 \times 5 = 306 \text{ (mm)} \quad (3)$$

Trong đó, L_T là chiều dài tang cuốn cáp (mm), b là bề rộng mỗi bước răng trên tang cuốn cáp (mm).

3. Mô hình truyền động CDPR



Hình 3. Sơ đồ truyền động của Robot cáp và hệ thống phân phối cáp

Hình 3 cho thấy sơ đồ truyền động của cơ cấu phân phối cáp CDPR, chiều dài cáp là biến đầu vào điều khiển được xác định bởi các tham số thiết kế tương ứng và quỹ đạo của bộ di động, mô hình toán liên quan được trình bày trong các nghiên cứu [7], [15], chiều dài thực tế của cáp phản hồi về bộ điều khiển khi hoạt động được đo từ encoder. Để xác định mối liên hệ giữa chiều dài cáp và góc quay động cơ, một vị trí cố định trong không gian làm việc CDPR được lấy làm chuẩn với các chiều dài cáp được xác định trước, có thể coi đây là vị trí Home với các tham số ban đầu $\{q_{hi}, l_{hi}\}$. Từ vị trí này, chiều dài tuyệt đối của l_i cáp $\{i=1, \dots, n\}$ tương ứng với góc quay của động cơ q_i (độ) có thể được tính theo các công thức sau:

$$l_i - l_{hi} = (q_i - q_{hi}) \left(\frac{\sqrt{\pi^2 d_{bi}^2 + b^2} + b}{360 k_{mi}} \right) = (q_i - q_{hi}) k_{ci} \quad (4)$$

$$k_{ci} = \frac{\sqrt{\pi^2 d_{bi}^2 + b^2} + b}{360 k_{mi}} \quad (5)$$

$$q_i - q_{hi} = \frac{(l_i - l_{hi})}{k_{ci}} = \frac{(l_i - l_{hi}) 360 k_{mi}}{\sqrt{\pi^2 d_{bi}^2 + b^2} + b} \quad (6)$$

trong đó:

l_i : chiều dài không quấn trên tang của cáp thứ i (mm)

l_{hi} : chiều dài cáp tại vị trí Home (mm)

k_{mi} : tỷ số truyền hộp giảm tốc từ động cơ đến trang trống

d_{bi} : đường kính bước trống của tời thứ i (mm)

q_i : góc quay của động cơ, với $i = 1, \dots, m$ (độ)

q_{hi} : góc quay động cơ tại vị trí ban đầu (độ)

b_i : chiều rộng của mỗi rãnh trên tang cuộn cáp (mm)

Để kiểm tra lực căng trên dây cáp, một cảm biến lực được thiết kế đặt trên bộ dẫn hướng cáp, khi đầu công tác có tải trọng sẽ gây ra một lực căng nhất định lên dây cáp. Lực căng dây được giữ nguyên giá trị thông qua các ròng rọc định hướng dây cáp. Theo sơ đồ **hình 3**, lực căng của dây cáp được tính bằng công thức:

$$T = \frac{T_m}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

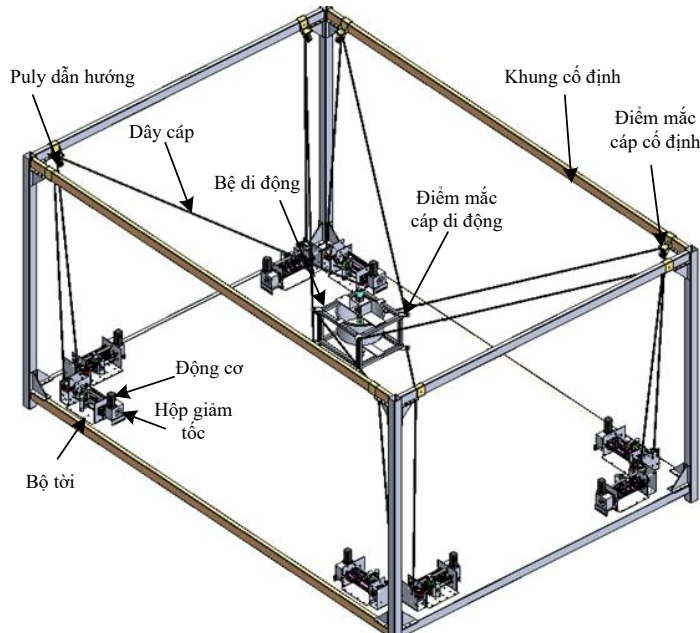
Trong đó, T là lực căng cáp, T_m là lực căng cáp đo được từ cảm biến lực.

Từ bài toán động lực học được phân tích trong [15]-[16], mô hình động lực học của động cơ truyền động cơ cấu phân phối cáp được biểu diễn theo công thức sau:

$$\Gamma_m = \mathbf{I}_m \ddot{q} + \mathbf{f}_v \dot{q} + \mathbf{f}_s \text{sign}(\dot{q}) + \mathbf{K}_C \tau \quad (10)$$

Trong đó $\mathbf{I}_m \in \mathbb{R}^{m \times m}$ là ma trận biểu diễn quán tính của động cơ, tang quán cáp và các bộ phận quay khác, $\mathbf{f}_v \in \mathbb{R}^{m \times m}$ và $\mathbf{f}_s \in \mathbb{R}^{m \times m}$ là ma trận đường chéo của hệ số ma sát nhớt và ma sát khô tương ứng, $\mathbf{K}_C = \text{diag}(k_{c1}, \dots, k_{cm}) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ là ma trận hệ số truyền động bao gồm tỷ số truyền hộp giảm tốc, đường kính tang và bước trống, và $\Gamma_m \in \mathbb{R}^m$ là véc tơ mômen của động cơ truyền động. Từ công thức (10) với các điều kiện biên về tải trọng, gia tốc và vận tốc dây cáp, công suất động cơ và hộp giảm tốc được tính toán và lựa chọn.

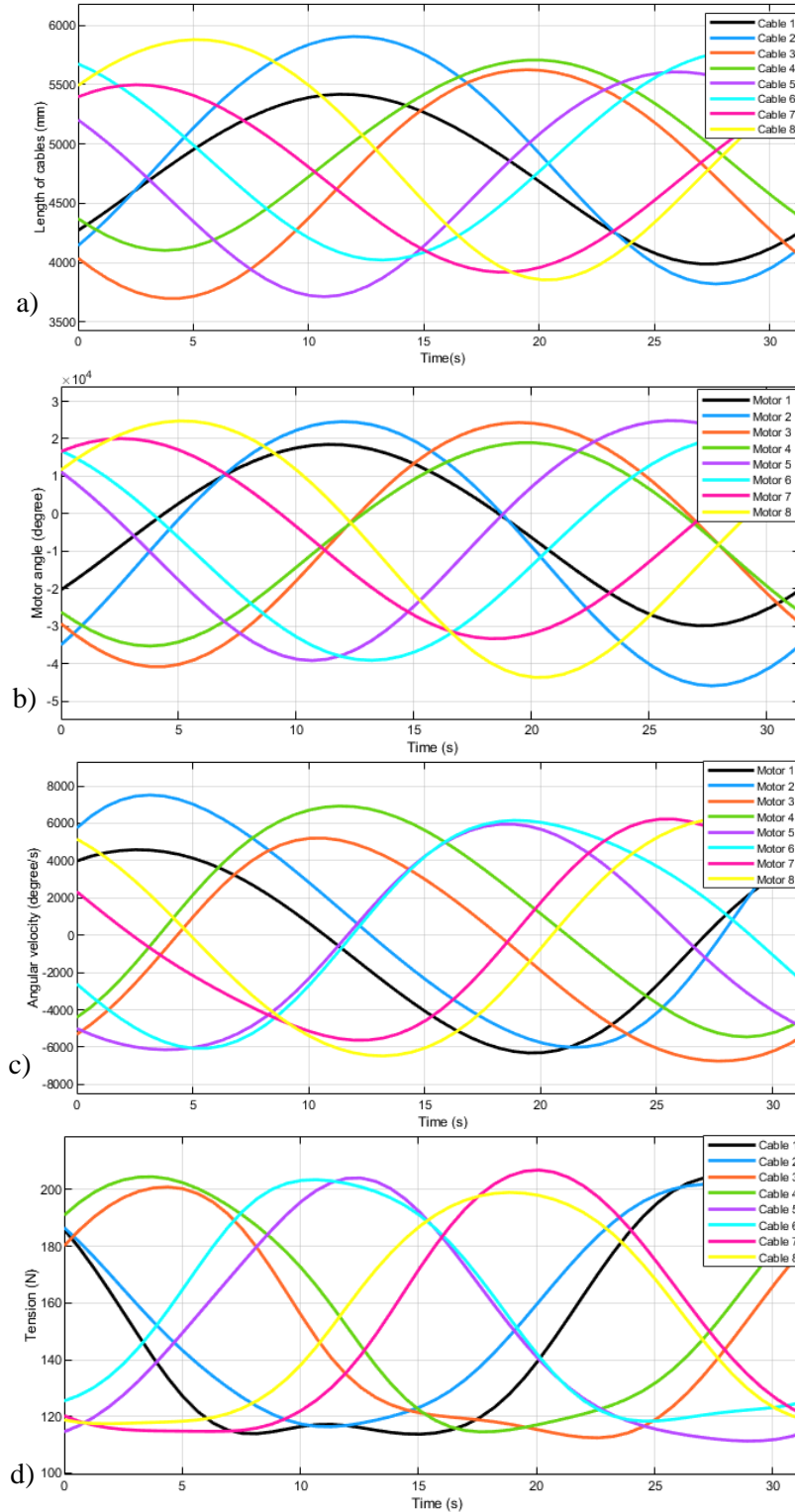
4. Mô phỏng và đánh giá



Hình 4. Robot cáp cầu hình song song

Mô hình thiết kế của bộ tời phân phối cáp được mô phỏng trên một CDPR 6 bậc tự do truyền động bởi 8 dây cáp (8 bộ tời) được thiết kế để di chuyển vật nặng. **Hình 4** mô tả cấu trúc của CDPR trong ứng dụng này và các mô hình toán của hệ thống được xây dựng trong các công thức từ (4-7), (10) và trong nghiên cứu [15]. Với quỹ đạo mô phỏng đường tròn bán kính $r = 1$ (m); đường tròn nằm trên mặt phẳng XY với $z = 1000$ mm, và được chia thành nhiều điểm nút. Một thuật toán được thiết kế để kiểm

tra xem các tọa độ này có nằm trong vùng làm việc của CDPDR hay không (thỏa mãn phương trình cân bằng lực). Nếu quỹ đạo là có thể thực hiện được, dữ liệu tọa độ này sẽ được đưa vào thuật toán để tìm các giải pháp phân bố lực căng cáp tương ứng, quỹ đạo và vận tốc khớp cũng được tính toán theo cấu hình CDPDR.



Hình 5. Đáp ứng mô phỏng 8 bộ tời cho nội suy đường tròn bán kính $r = 1m$

Hình 5 biểu diễn kết quả mô phỏng tương ứng quỹ đạo nội suy đường tròn với bán kính $r = 1m$. **Hình 5a** là chiều dài của 8 sợi cáp hay quỹ đạo khớp tính toán tương ứng với quỹ đạo điều khiển, các biến khớp có dạng liên tục dọc theo quỹ đạo điều khiển, cho thấy tất cả các điểm nút đều nằm trong không gian hoạt động khả thi (WFW) [1]. Chiều dài cáp thay đổi từ 3600mm đến 6000mm nằm trong thông số thiết kế của tang trữ cáp. **Hình 5b** là đáp ứng các góc quay động cơ theo các biến chiều dài cáp tương ứng, một số góc quay có giá trị âm do quỹ đạo hoàn toàn nằm phía trên vị trí Home, giá trị của góc quay của các động cơ phù hợp với quỹ đạo khớp tương ứng, các đáp ứng góc quay động cơ cũng có dạng liên tục và thay đổi trong khoảng từ -5×10^4 đến 3×10^4 (độ). **Hình 5c** là vận tốc của các động cơ tương ứng, kết quả tính toán cho thấy các vận tốc động cơ dao động trong khoảng $\pm 8000^0/s$ tương ứng ± 1333 vòng/phút, các giá trị này nằm trong khoảng vận tốc thiết kế của các động cơ AC Servo, dấu của vận tốc thể hiện chiều quay của động cơ trong quá trình quán cáp hoặc xả cáp. **Hình 5d** là biểu đồ biểu diễn các lực căng cáp tương ứng dọc quỹ đạo thiết kế, đây là bài toán quan trọng trong quá trình điều khiển CDP, đối với cấu hình có 2 cấp dự phòng, một giải thuật tính toán phù hợp để tối ưu các giải pháp phân bố lực căng cho quỹ đạo điều khiển [3], [15] đã được tích hợp vào trong bài toán thiết kế quỹ đạo, kết quả tính toán cho thấy tất cả các lực căng được tính toán đều nằm trong vùng giới hạn cho trước và lớn hơn 0, điều này cho thấy tất cả các dây cáp đều hoạt động ở trạng thái căng với lực căng dương và không vượt quá giới hạn tải trọng của động cơ thiết kế.

Thông qua kết quả mô phỏng tính toán ở **hình 5** cho thấy, thiết kế và mô hình tính toán của cơ cấu phân phối cáp đáp ứng được yêu cầu thiết kế ban đầu về tải trọng, khả năng lưu trữ cáp, tốc độ kéo thả cáp. Trong đó đáp ứng góc quay và vận tốc gốc của động cơ truyền động đã được tính toán trực tiếp từ quỹ đạo khớp (chiều dài và vận tốc dài cáp truyền động). Đặc biệt lực căng cáp luôn nằm trong giới hạn cho phép với tải trọng 500N, trong đó, các giá trị các lực căng cáp lớn nhất đều không vượt quá 220N, điều này cho thấy ưu điểm của các CDP trong việc phân tán tải trọng của các dây cáp truyền động, qua đó có thể giảm công suất cơ cấu chấp hành bằng cách tối ưu giải thuật phân phối lực căng cáp, trong khi vẫn đảm bảo được tải trọng yêu cầu.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả thiết kế và tính toán bộ tời phân phối cáp tích hợp cơ cấu đo lực căng cáp sử dụng cho CDP, bộ tời có khả năng phân phối dây cáp chính xác với tốc độ cao cho yêu cầu điều khiển vị trí và quỹ đạo với tải trọng cho trước. Kết quả mô phỏng trên mô hình CDP 6 bậc tự do truyền động bởi 8 dây cáp cho thấy thiết kế và tính toán bộ tời phân phối cáp là phù hợp với yêu cầu điều khiển của các CDP, mô hình tính toán cho thấy quỹ đạo góc quay và vận tốc của động cơ phù hợp với quỹ đạo khớp thiết kế, các giá trị hoạt động của động cơ đều nằm trong vùng cho phép. Đặc biệt là các giá trị lực căng tính toán đều dương và nằm trong giới hạn hoạt động của động cơ. Kết quả này có thể làm cơ sở tham khảo cho việc thiết kế tính toán bộ tời phân phối cáp, triển khai chế tạo, thử nghiệm và ứng dụng truyền động cho các CDP. Các công việc tiếp theo bao gồm chế tạo và thực nghiệm các bộ tời phân phối cáp trên CDP, đánh giá độ chính xác và khả năng kết hợp của nhiều bộ tời cho các cấu hình CDP phức tạp, nghiên cứu ảnh hưởng của độ đàn hồi của các cơ cấu truyền động và độ võng cáp đến độ chính xác của CDP có kích thước và tải trọng lớn.

Lời cảm ơn

Công trình này thuộc đề án năm 2023 được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. P. Tho and N. T. Thinh, "An Overview of Cable-Driven Parallel Robots: Workspace, Tension Distribution, and Cable Sagging," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, pp. 1-15, 2022.
- [2] V. Mattioni, E. Idà, and M. Carricato, "Force-distribution sensitivity to cable-tension errors in overconstrained cable-driven parallel robots," *Mech. Mach. Theory*, vol. 175, p. 104940, 2022.
- [3] C. H. K. Dao, T. P. Tho, N. D. Vu, and M. N. Nguyen, "On Research of Cable Tension Distribution Algorithm for Four Cables-Three DOF Planar Cable-Driven Parallel Robot," *Journal of Technical Education Science*, vol. 78B, pp. 8-17, 2023.

- [4] T. Bruckmann *et al.*, "An energy-efficient wire-based storage and retrieval system," in *Proceedings of the 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Wollongong, Australia, 9–12 July 2013, pp. 631–636.
- [5] K. Iturralde *et al.*, "Cable-driven parallel robot for curtain wall module installation," *Autom. Constr.*, vol. 138, p. 104235, 2022.
- [6] D. Lin *et al.*, "Dynamically-Feasible Trajectories for a Cable-Suspended Robot Performing Throwing Operations," in *ROMANSY 23—Robot Design, Dynamics and Control*, G. Venture *et al.*, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 547–555.
- [7] T. P. Tho and N. T. Thinh, "Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 563, 2021.
- [8] E. Idà, S. Briot, and M. Carricato, "Robust Trajectory Planning of Under-Actuated Cable-Driven Parallel Robot with 3 Cables," in *Advances in Robot Kinematics 2020*, J. Lenarcic and B. Siciliano, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 65–72.
- [9] E. Idà and M. Carricato, "A New Performance Index for Underactuated Cable-Driven Parallel Robots," in *Cable-Driven Parallel Robots*, M. Gouttefarde *et al.*, Eds. Springer International Publishing, 2021, pp. 24–36.
- [10] J. P. Merlet, "Comparison of Actuation Schemes for Wire-Driven Parallel Robots," in *New Trends in Mechanism and Machine Science*, F. Viadero and M. Ceccarelli, Eds. Springer, 2013, pp. 245–254.
- [11] L. Scalera *et al.*, "Cable-Based Robotic Crane (CBRC): Design and Implementation of Overhead Traveling Cranes Based on Variable Radius Drums," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 34, pp. 474–485, 2018.
- [12] S. Seriani and P. Gallina, "Variable Radius Drum Mechanisms," *J. Mech. Robot.*, vol. 8, p. 021016, 2015.
- [13] M. S. Varziri and L. Notash, "Kinematic calibration of a wire-actuated parallel robot," *Mech. Mach. Theory*, vol. 42, pp. 960–976, 2007.
- [14] J. P. Merlet, "Kinematics of the wire-driven parallel robot MARIONET using linear actuators," in *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19–23 May 2008, pp. 3857–3862.
- [15] T. P. Tho and N. T. Thinh, "Evaluating cable tension distributions of CDPR for virtual reality motion simulator," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 0, pp. 1-19, 2023, doi: 10.1080/15397734.2023.2265452.
- [16] J. Lamaury and M. Gouttefarde, "Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 4659-4664.



Tuong Phuoc Tho is a Lecturer of the Faculty of Mechanical Engineering at Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam. He received his B.S. degree from Ho Chi Minh City University of Technology and Education in 2006, and his master's degree in Manufacturing Technology from Ho Chi Minh University of Technology in 2011. His work focuses on Robotics and Mechatronics systems. Email: hotp@hcmute.edu.vn.

ORCID:  <https://orcid.org/0000-0002-5688-6096>



Truong Nguyen Luan Vu is currently an Associate Professor of Mechanical Engineering at Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam. He received his B.S. degree from Ho Chi Minh City University of Technology, Ho Chi Minh City National University in 2000, and his master's and Ph.D. degrees from Yeungnam University, the Republic of Korea in 2005 and 2009, respectively. He has also taught at Yeungnam University for two years in terms of being an International Professor. His research interests include multivariable control, fractional control, PID control, process control, automatic control, and control hardware. Email: vuluantn@hcmute.edu.vn