

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM**

**TƯỜNG PHƯỚC THỌ**

**NGHIÊN CỨU, PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA  
ĐỘ VĨNH CẤP ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC VỊ TRÍ CỦA CDPR**

Chuyên ngành: KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Mã số chuyên ngành: 9520103

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS NGUYỄN TRƯỜNG THỊNH

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS TRƯỜNG NGUYỄN LUÂN VŨ

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở họp tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày        tháng        năm 2023

## TÓM TẮT

Vấn đề nghiên cứu, thiết kế, tính toán và điều khiển Cable driven parallel robots (CDPR) đang được đẩy mạnh trong những năm gần đây. Có rất nhiều nghiên cứu về CDPR tập trung vào việc tối ưu cấu trúc, xác định không gian hoạt động, tối ưu phân bố lực căng cáp, tính toán độ võng cáp, thiết kế bộ điều khiển và lập quỹ đạo chuyển động. CDPR có cấu trúc và nhiều ràng buộc phức tạp do tính chất đơn hướng của cáp truyền động. Do đó, việc thiết kế, tính toán và triển khai ứng dụng CDPR gặp nhiều thách thức lớn. Trong đó, bài toán động học, động lực học và điều khiển CDPR bị ảnh hưởng bởi các thành phần phức tạp gây ra bởi các vấn đề thiết kế và tính toán cơ khí và điều khiển. Qua việc tổng hợp, phân tích các nghiên cứu liên quan, nghiên cứu sinh thực hiện mục tiêu của đề tài là nghiên cứu, phân tích, đánh giá tác động của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của robot cáp cấu hình song song. Để cụ thể hóa các mục tiêu nghiên cứu, nghiên cứu sinh đã thực hiện chuyên đề tổng quan, chuyên đề nghiên cứu khoa học 1 và chuyên đề nghiên cứu khoa học 2, trong đó tập trung nghiên cứu về cơ sở lý thuyết các bài toán quan trọng trong việc tính toán và thiết kế CDPR. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ võng cáp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của CDPR, mô hình tính toán được xây dựng thành công trên cơ sở phân tích các thành phần ảnh hưởng đến độ võng cáp như cấu hình CDPR, vật liệu cáp, tải trọng và đặc biệt là các giải thuật phân bố lực căng cáp, do lực căng cáp là thành phần chính quyết định đến kết quả tính toán độ võng cáp. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình tính toán độ võng cáp và lực căng cáp đã cải thiện được độ chính xác của CDPR trong bài toán điều khiển vị trí. Mô hình cũng đã được sử dụng để thiết kế quỹ đạo cho các ứng dụng điều khiển thời gian thực, kết quả thực nghiệm cho thấy đáp ứng của hệ thống là phù hợp cho các ứng dụng cần tốc độ và tải trọng lớn. Kết quả nghiên cứu này có thể được mở rộng theo nhiều hướng khác nhau như xây dựng các mô hình mới để tối ưu không gian hoạt động, xác định phân bố lực căng cáp,

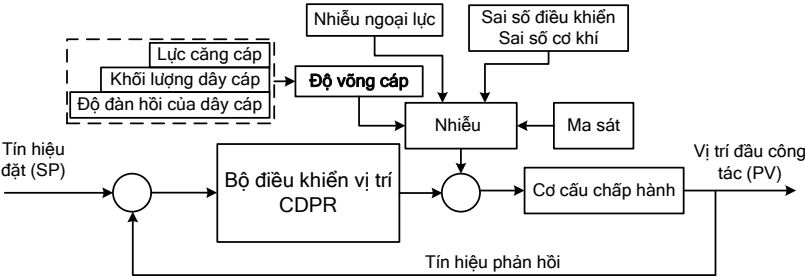
tính toán độ võng cáp, qua đó đơn giản hóa quá trình tính toán, dễ dàng triển khai các cấu hình CDPR phức tạp với chi phí thấp.

## CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

### 1.1 Đặt vấn đề

Trong quá trình nghiên cứu và ứng dụng CDPR, đặc biệt đối với các CDPR có kích thước lớn, việc giảm thiểu sai số vị trí đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển và vận hành CDPR. Các nguồn ảnh hưởng đến sai số vị trí của CDPR được trình bày trong **hình 1.1**, trong đó, thông số thứ 1 là sai số gia công và lắp ráp cơ khí bao gồm cấu trúc khung cố định, bộ di động và cấu hình mắc cáp ảnh hưởng trực tiếp đến sai số vị trí. Thông số thứ 2 chính là sai số của bộ điều khiển, bao gồm các thông số cơ bản của cơ cấu chấp hành như độ chính xác vị trí, vận tốc, độ phân giải, sai số thiết bị đo lường tín hiệu phản hồi. Thông số thứ 3 là nhiễu do ngoại lực tác động, đặc tính khác biệt của CDPR là dây cáp truyền động luôn phải ở trạng thái căng – lực căng dương – và đảm bảo điều kiện ràng buộc cân bằng của hệ thống, do đó nhiễu do ngoại lực có thể làm sai lệch điều kiện ràng buộc đầu vào cho bài toán phân phối lực căng cáp. Thông số thứ 4 là ảnh hưởng của lực ma sát của các thành phần truyền động như cáp, ròng rọc, tời quán dây. Cuối cùng là ảnh hưởng của độ võng cáp, đây là một thông số chỉ có ở những cơ cấu truyền động bằng cáp, đối với cáp đàn hồi thì kích thước càng lớn thì độ võng cáp càng lớn, đối với cáp đàn hồi thì lực căng càng lớn thì độ dãn dài cáp càng lớn. Mô hình xác định độ võng cáp là một hệ phương trình phi tuyến với các thông số đầu vào là lực căng cáp, động học CDPR, khối lượng và độ đàn hồi của dây cáp truyền động. Qua các khảo sát cho thấy, vấn đề nghiên cứu về các tác động của các thông số thiết kế lên sai số của hệ robot cáp cấu hình song song là rất quan trọng, nhất là đối với các CDPR có kích thước lớn, vì lực căng cáp, khối lượng, độ đàn hồi và độ dài của dây cáp sẽ gây ra độ võng cáp, làm sai lệch kết quả bài toán vị trí quỹ đạo điều khiển cũng như độ cứng vững của MP. Vì vậy, đề tài **“Nghiên cứu, phân tích, đánh giá tác động của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR”** được

thực hiện nhằm nghiên cứu các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp lên hệ thống robot cáp cấu hình song song, làm nền tảng cho các nghiên cứu triển khai robot cáp không gian lớn vào thực tế, nâng cao độ chính xác cũng như độ linh hoạt của các cấu hình CDPR khác nhau. Đặc biệt việc tổng hợp mối liên hệ giữa các vấn đề phân bố lực căng và độ võng của cáp truyền động có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác vị trí khi điều khiển robot cáp, việc đơn giản hóa quá trình tính toán và áp dụng các thuật toán điều khiển thông dụng sẽ giảm thời gian nghiên cứu và chi phí chế tạo.



Hình 1.1: Các thông số ảnh hưởng đến sai số vị trí CDPR

**1.2 Đối tượng nghiên cứu**

Robot truyền động bằng cáp cấu hình song song. Các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp trên robot cáp cấu hình song song dạng thừa ràng buộc hoặc dạng pointmass CDPR. Áp dụng kết quả tính toán xây dựng bộ điều khiển quỹ đạo cho robot cáp cấu hình song song.

**1.3 Mục tiêu nghiên cứu**

Phân tích đánh giá các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp lên độ chính xác vị trí của hệ thống CDPR. Thiết kế, mô phỏng và phát triển giải thuật xác định bài toán động học nghịch của robot cáp có tính đến ảnh hưởng của lực căng cáp và độ võng cáp.

**1.6 Đóng góp của luận án**

Luận án “Nghiên cứu, phân tích và đánh giá ảnh hưởng của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR” đã khảo sát, phân tích các công trình nghiên

cứu liên quan, từ đó xác định mục tiêu nghiên cứu bao gồm các đóng góp về mặt lý luận và học thuật như sau: Thứ nhất là khảo sát tình hình nghiên cứu và ứng dụng CDPR trong và ngoài nước, phân tích các vấn đề trọng tâm từ các nghiên cứu về CDPR, xác định các vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu của đề tài; Thứ hai là xây dựng mô hình toán cho CDPR dạng thừa ràng buộc với cấu hình 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 dây cáp bao gồm bài toán động học nghịch, động học vận tốc và động lực học. Phân tích các thông số ảnh hưởng đến không gian hoạt động, xác định mối liên hệ giữa các giới hạn lực căng cáp và tải trọng đến không gian hoạt động của cấu hình CDPR dạng thừa ràng buộc; Thứ ba là thiết kế giải thuật xác định phân bố lực căng cáp với các tiêu chuẩn tối ưu linh hoạt để có thể chọn lựa điều kiện tối ưu ứng với cấu trúc CDPR cụ thể và các điều kiện biên về lực tác động, động lực học; Thứ tư là thiết kế giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên cấu trúc ANFIS theo các điều kiện của lực căng cáp, đặc tính dây cáp và cấu hình CDPR cụ thể. Thực hiện mô phỏng, thu thập và đánh giá kết quả khi ứng dụng giải thuật xác định độ võng cáp so với các phương pháp khác trên cấu trúc CDPR dạng thừa ràng buộc. Phân tích tác động của các phương pháp phân bố lực căng cáp và độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR, đánh giá mối liên hệ giữa lực căng cáp, cấu trúc CDPR, độ võng cáp và độ đàn hồi các cơ cấu truyền động; Thứ năm là áp dụng kết quả tính toán vào việc thiết kế bộ điều khiển cho CDPR, thực nghiệm trên CDPR kích thước lớn 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 dây cáp cho các tác vụ phức tạp như di chuyển vật nặng, nội suy quỹ đạo, mô phỏng chuyển động thực tế ảo. Tổng hợp và đánh giá kết quả thực nghiệm.

## **CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VỀ CDPR**

### **2.1 Các cấu trúc cơ bản CDPR**

Robot điều khiển bằng cáp có bộ di động được điều khiển bằng cách điều chỉnh độ dài và độ căng của các dây cáp truyền động thay vì tác động trực tiếp đến các khâu cứng của hệ thống bằng động cơ quay hoặc tịnh tiến.. So với phương pháp truyền động của các robot có các khâu liên kết cứng, việc sử dụng dây cáp để truyền động robot cho phép các động cơ và hộp số có kích thước và

khối lượng lớn di chuyển từ các bộ phận động đến khung bệ của hệ thống, dẫn đến giảm khối lượng và quán tính của các bộ phận chuyển động. Sự thay đổi này dẫn đến một robot có khả năng tăng tốc nhanh hơn và có thể được thiết kế với động cơ công suất nhỏ hơn, ít tốn kém hơn và ít vật liệu hơn.

## 2.2 Các nghiên cứu về CDPR

CDPR có cấu trúc và nhiều ràng buộc phức tạp vì tính chất đơn hướng của cáp truyền động. Do đó, việc thiết kế, tính toán và triển khai ứng dụng CDPR là một thách thức lớn. Trong đó, bài toán động học CDPR [25][26] và động lực học [27][28] phải xử lý các thành phần ảnh hưởng đến độ chính xác gây ra bởi các vấn đề trong thiết kế và tính toán như lực căng cáp, ngoại lực tác động, hay sự ảnh hưởng của kích thước ròng rọc đối với các vấn đề động học, đặc biệt là độ võng cáp đối với các CDPR có kích thước lớn hoặc các CPR được truyền động bằng cáp đàn hồi. Trong đó, lực tác động, cấu trúc robot, không gian hoạt động và phân bố lực căng cáp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ võng của cáp truyền động, do đó phần khảo sát các tài liệu nghiên cứu liên quan đến hướng nghiên cứu của đề tài tập trung vào 3 vấn đề chính: tính toán không gian hoạt động, phân bố lực căng cáp và tính toán độ võng của cáp truyền động.

Tính toán không gian hoạt động của các CDPR là một vấn đề được nhận nhiều quan tâm vì các tính chất khác biệt so với các loại robot nối tiếp và robot song song khác. Không gian hoạt động của các CDPR có nhiều dạng tùy thuộc vào các điều kiện đầu vào, thường liên quan đến cấu trúc thiết kế, ngoại lực tác động, phân bố lực căng cáp và giới hạn lực căng cáp, điều kiện khả thi về khả năng điều khiển, các loại nhiễu tác động do điều kiện làm việc [29-59]. Tính toán phân bố lực căng cáp là một trong những vấn đề quan trọng trong việc nghiên cứu triển khai các CDPR, đặc biệt là các FC-CDPR và OC-CDPR, do có nhiều giải pháp lực căng cáp ứng với một tọa độ bệ di động (đầu công tác) cho trước, các mô hình toán để giải quyết vấn đề này tập trung vào việc tìm các giải pháp thỏa mãn các điều kiện tối ưu cụ thể, rút ngắn thời gian tính toán cho các ứng dụng thời gian thực, tính toán các giải pháp cho các ứng dụng có sự thay đổi tải trọng trong quá trình làm việc hoặc các tính hiệu nhiễu khác như

gió khi làm việc ngoài trời [60-90]. Tính toán độ võng của cáp truyền động là một vấn đề được quan tâm nghiên cứu, vì độ võng cáp ảnh hưởng lớn đến độ chính xác vị trí trong thiết kế và tính toán các CDPR có kích thước lớn hay cáp đàn hồi. Mô hình độ võng cáp có tính phi tuyến cao, và đặc biệt liên quan trực tiếp đến lực căng cáp và ngoại lực tác dụng, cũng như cấu hình của các CDPR. Các nghiên cứu tính toán độ võng cáp thường dựa vào mô hình cáp võng - Catenary equation của Irvine, tuy nhiên, mô hình này có tính phi tuyến cao, chỉ có thể sử dụng phương pháp lặp để tính toán. Do đó, thời gian tính toán là một vấn đề cần giải quyết cho các ứng dụng điều khiển thời gian thực. Có nhiều công trình nghiên cứu tính toán độ võng cáp theo hướng tuyến tính hóa một số mối liên hệ của các phần tử trong mô hình toán, điều này có thể làm giảm thời gian tính toán, tuy nhiên sẽ hạn chế đối tượng ứng dụng vì các điều kiện ràng buộc về cấu hình, điều kiện hoạt động của các CDPR [91-120].

## 2.6 Những vấn đề còn tồn tại

Nghiên cứu về tác động của độ võng đối với không gian làm việc và đặc tính của cáp cho thấy không gian làm việc và sự phân bố lực căng cáp cho các mô hình cáp thẳng và cáp xích đàn hồi (độ võng của cáp) là khác nhau. Lực căng của cáp khi cáp chùng, không giống như lực căng của cáp đối với mô hình đường thẳng và không cố định trên toàn bộ cáp. Hầu hết các mô hình tính toán độ võng của cáp đều dựa trên hệ phương trình dây xích cáp của Irvine, do tính phi tuyến cao, việc giải bài toán tìm độ võng cáp để bù vào bài toán động học nghịch thường tốn nhiều thời gian, gây khó khăn cho việc thiết kế các ứng dụng điều khiển thời gian thực, các thực nghiệm tính toán ngoại tuyến sử dụng các thuật toán tối ưu hóa giải quyết được động học nghịch CDPR trong 0,4 giây [93]. Một số nghiên cứu đơn giản hóa mô hình tính toán bằng cách tuyến tính hóa mối quan hệ giữa các thành phần lực căng cáp cũng được triển khai, tuy nhiên kết quả hạn chế ở một số điều kiện nhất định, và cũng chưa được kiểm chứng bằng thực nghiệm [97-98]. Trong đó các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác vị trí cao như điều khiển theo quỹ đạo, điều khiển vị trí gấp thả cần một mô



hình toán chính xác nhưng không quá phức tạp để đơn giản hóa việc thiết kế, tính toán và triển khai bộ điều khiển. Các vấn đề còn tồn tại trong các nghiên cứu tính toán độ võng cấp sẽ được tập trung nghiên cứu trong phần sau: Mô hình hóa các bài toán cơ bản của CDPR; Xác định và thiết kế giải thuật tính toán các thông số ảnh hưởng đến độ chính xác vị trí do lực căng cáp, độ võng cáp và độ đàn hồi của các cơ cấu truyền động, rút ngắn thời gian tính toán phân bố lực căng theo các ràng buộc cho trước; Xây dựng mô hình tính toán độ võng của cáp cho các cấu hình CDPRs cụ thể, cải thiện thời gian tính toán. Xây dựng bộ điều khiển thời gian thực dựa trên kết quả nghiên cứu, thực nghiệm và đánh giá kết quả.

## CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT CDPR

### 3.1 Động học vị trí CDPR

**Hình 3.2** biểu diễn sơ đồ động học tổng quát của CDPR. Trong đó, hệ trục quy chiếu chính cố định được kí hiệu là hệ trục B, hệ trục biểu diễn bộ di động là hệ trục E.  $\mathbf{x} = (\mathbf{r}, \mathbf{R}) \in \mathbb{R}^m$  là vector biểu diễn hướng và vị trí của E trong khung B, với m là số bậc tự do của CDPR. Theo giản đồ vector trong **Hình 3.2**, chúng ta có thể thu được công thức tính vector  $\mathbf{l}_i$  ( $i = 0 \dots n$ ) tương ứng với cấu hình của MP:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i \quad (3.1)$$

Chiều dài của các cáp có thể thu được từ phương trình (3.2).

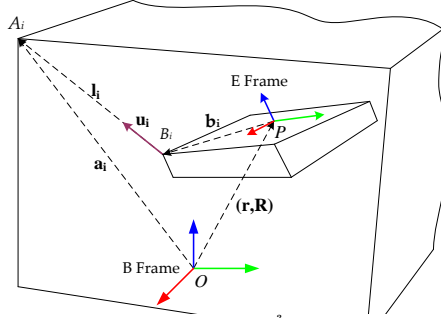
$$|l_i| = \|\mathbf{l}_i\| = \sqrt{[\mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i][\mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i]^T} \quad (3.2)$$

trong đó vector  $\mathbf{a}_i$  là tọa độ của các điểm mắc cáp cố định  $A_i$  trong hệ trục B, vector  $\mathbf{b}_i$  là tọa độ của các điểm mắc cáp di động  $B_i$  trong hệ trục E và vector đơn vị  $\mathbf{u}_i$  biểu diễn hướng của dây cáp  $l_i$ ,  $\mathbf{R}$  là ma trận biểu diễn hướng của hệ trục E trong hệ trục B theo phép quay Roll-Pitch-Yaw.

### 3.2 Động học vận tốc CDPR

Bài toán động học vận tốc của CDPR biểu diễn mối liên hệ giữa vận tốc của MP và vận tốc của cáp truyền động hoặc vận tốc của động cơ phân phối

cáp. Đặt  $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \in R^3$  là vận tốc dài của tâm bệ di động Op trong hệ trục B,  $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y \quad \dot{\theta}_z]^T \in R^3$  là vận tốc góc của MP theo 3 trục x, y và z của hệ trục B,  $\mathbf{v} = [\dot{\mathbf{r}} \quad \boldsymbol{\omega}]^T \in R^6$  biểu diễn vector vận tốc của MP bao gồm cả vận tốc dài và vận tốc góc. Đặt  $\mathbf{J}$  ( $n \times 6$ ) là ma trận Jacobi của C DPR. Đạo hàm phương trình (3.1) theo thời gian, chúng ta thu được mô hình động học nghịch vận tốc như phương trình (3.8).

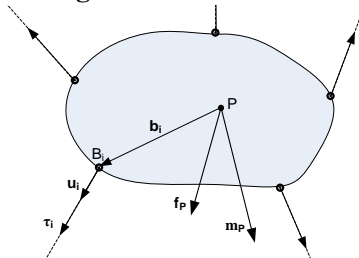


Hình 3.2: Mô hình động học tổng quát của C DPR

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{v} \quad (3.8)$$

Với  $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dots \quad \dot{l}_n]$  vector vận tốc các dây cáp truyền động.

### 3.3 Hệ phương trình cân bằng



Hình 3.3: Sơ đồ các lực tác dụng lên bệ di động

Hệ phương trình cân bằng biểu diễn mối liên hệ giữa ngoại lực tác dụng và lực căng cáp tác dụng lên bệ di động. Để thỏa mãn phương trình cân bằng của C DPR hay đảm bảo bệ di động ở trạng thái cân bằng, tổng của lực tác dụng và lực căng của cáp phải thỏa mãn phương trình sau.

$$\sum_{i=1}^m \boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{F}_p = 0 \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^m (\mathbf{b}_i \times \boldsymbol{\tau}_i) + \mathbf{M}_p = 0 \quad (3.14)$$

Trong đó  $\mathbf{f}_p$  và  $\mathbf{m}_p$  lần lượt là vector của lực và mômen do ngoại lực tác dụng lên MP;  $\boldsymbol{\tau}_i$  là vector lực căng cáp mà mỗi cáp tác dụng lên bộ di động và vector  $\mathbf{b}_i$  đại diện cho vị trí của điểm treo cáp  $B_i$  trên MP so với điểm gốc Op trong hệ trục E (**Hình 3.3**).

### 3.4 Động lực học CDPR

Phương trình Lagrange loại 2 hoặc phương trình Newton-Euler có thể được sử dụng để tính toán mô hình động cho CDPR. Ưu điểm của dạng phương trình này là có thể giải một cách dễ dàng, giảm thời gian tính toán. Tuy nhiên, khi xác định mô hình động lực học, có thể sử dụng các phương pháp khác nhau để đơn giản hóa quá trình tính toán. Trong phần này, mô hình động được phát triển, có tính đến các mô hình cáp và các hệ thống con khác nhau, từ kết quả công trình [121] phương trình động lực học của CDPR có dạng:

$$\mathbf{I}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{w}_p + \mathbf{w}_g = \mathbf{A}\boldsymbol{\tau} \quad (3.20)$$

Trong đó  $\mathbf{I}$  là ma trận quán tính của MP trong hệ trục B,  $\mathbf{C}$  là ma trận biểu diễn thành phần lực ly tâm và Coriolis,  $\mathbf{w}_p$  là vector ngoại lực và  $\mathbf{w}_g$  là vector trọng lực. Trong trường hợp tổng quát, trọng tâm G của MP không trùng với gốc của khung E.  $\mathbf{C}\mathbf{v}$  phần lực Coriolis và lực li tâm. Phương trình (3.20) thể hiện mối quan hệ giữa động học, tĩnh học và động lực học của CDPR.

## CHƯƠNG 4: KHÔNG GIAN HOẠT ĐỘNG CỦA CDPR

### 4.1 Cơ sở tính toán

Vấn đề động học của CDPR là không đủ để điều khiển vị trí hoặc lực của bộ di động của các CDPR. Các dây cáp không thể cung cấp lực đẩy mà chỉ có thể cung cấp lực kéo. Đối với CDPR, độ căng của cáp ảnh hưởng rất nhiều đến không gian làm việc xác định. **Hình 3.3** cho thấy rằng, để cân bằng bất kỳ tổ hợp ngoại lực và moment ( $\mathbf{f}_p$ ,  $\mathbf{m}_p$ ) nào tác dụng trên bộ di động, các dây cáp

phải tạo ra lực căng phù hợp. Các lực và momen tác dụng lên CDPRs có thể nhận được từ các phương trình cân bằng sau:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}_p = \mathbf{0} \quad (4.7)$$

Với:  $\boldsymbol{\tau}$ : Vector lực căng cáp (mx1);

$\mathbf{A}^T$ : Ma trận Jacobian của CDPR (nxm);

$\mathbf{w}_p$ : vectơ của ngoại lực tác dụng trên khối tâm của bộ di động (nx1).

Từ (4.7), không gian làm việc Wrench Closure Workspace (WCW) của CDPR xác định một tập hợp các tư thế (pose) của bộ di động, trong đó các dây cáp có thể cân bằng bất kỳ ngoại lực bên ngoài nào với lực căng dương. Hoặc, WCW là tập hợp các tư thế khả thi của bộ di động; điều này có nghĩa là với bất kỳ ngoại lực  $\mathbf{f}$  nào trong  $[\mathbf{f}]$ , tồn tại một vectơ lực căng cáp  $\boldsymbol{\tau} > \mathbf{0}$  sao cho  $\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} = \mathbf{0}$ . Trong trường hợp CDPR có số lượng cáp nhiều hơn số bậc tự do, ma trận  $\mathbf{A}^T$  sẽ là ma trận chữ nhật ( $n \times m$ ) với  $n$  là số bậc tự do và  $m$  là số lượng cáp truyền động. Điều này dẫn đến có thể tồn tại nhiều hơn một giải pháp phân bố lực căng cho một tư thế cho trước của bộ di động. Một số phương pháp xác định sự tồn tại của một hệ bất đẳng thức có nghiệm hay không đã được sử dụng, như ma trận giả nghịch đảo, tối ưu hóa tuyến tính, phân tích khoảng, v.v.

## CHƯƠNG 5: THIẾT KẾ GIẢI THUẬT PHÂN PHỐI LỰC CĂNG CÁP

### 5.1 Xác định phân bố lực căng cáp

Việc tính toán sự phân bố lực căng cáp cho các CDPR là một vấn đề phức tạp trong quá trình tính toán và thiết kế. Lực căng của cáp có liên quan đến các bài toán quan trọng như xác định không gian hoạt động, tính toán độ cứng của cơ hệ, xác định công suất của động cơ, thiết kế bộ điều khiển, tính toán nhiễu do độ võng cáp. Bài toán cần giải quyết là tìm giải pháp lực căng dây dương đối với các tư thế của MP thỏa mãn phương trình cân bằng lực sau:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{w}_p \quad \text{với} \quad \mathbf{0} < \boldsymbol{\tau}_{\min} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \quad (5.1)$$

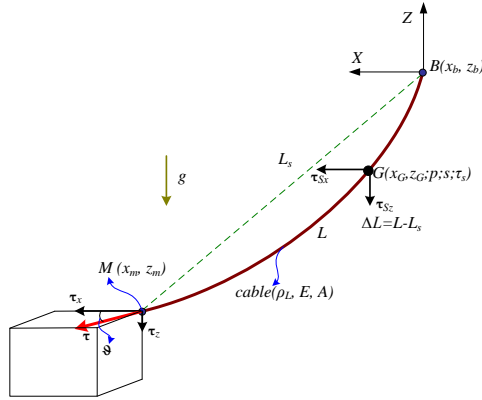
Trong đó  $\mathbf{A}$  ( $m \times n$ ) ma trận cấu trúc của CDPR;  $\boldsymbol{\tau}$  ( $n \times 1$ ) véc tơ lực căng cáp;  $\mathbf{w}_p$  ( $m \times 1$ ) vectơ của lực và moment bên ngoài tác dụng vào khối tâm MP bao gồm cả lực quán tính và trọng lực;  $\boldsymbol{\tau}_{\min}$  là giới hạn dưới của lực căng cáp để đảm bảo cáp luôn ở trạng thái căng và  $\boldsymbol{\tau}_{\max}$  là giới hạn trên của lực căng cáp để đảm bảo động cơ hoặc cáp không bị quá tải. Trong phần này, giải pháp phân bố lực căng cáp được thiết kế cho các CDPR có 1 DOR trở lên dựa trên thuật toán Dual Simplex Algorithm và Phân bố lực căng cáp với thuật toán tối ưu hóa bậc 2 (Quy hoạch bậc 2 - Quy hoạch toàn phương) - Quadratic programming. Kết quả của phương pháp này được phân tích và đánh giá sự ảnh hưởng đến các bài toán liên quan trong các nội dung nghiên cứu tiếp theo như thiết kế bộ điều khiển, tính toán ảnh hưởng do độ võng cáp.

## CHƯƠNG 6: THIẾT KẾ GIẢI THUẬT TÍNH TOÁN ĐỘ VÕNG CÁP

### 6.1 Bài toán động học nghịch với độ võng cáp dựa vào phương trình cáp xích Catenary equation - Irvine

Mô hình võng cáp được giả định rằng cáp chỉ bị lệch bởi trọng lượng của chính nó, bỏ qua gió và phân bố trọng lượng không đồng đều. Hãy xem xét một sợi cáp được treo giữa hai điểm B và M, như trong **Hình 6.1**, trong đó B là điểm mắc cáp trên bộ cố định, M là điểm mắc cáp trên bộ di động,  $L_S$  (m) là chiều dài không chịu lực (Euclidean norm) giữa B và M,  $L$  (m) là chiều dài dây cáp (thực tế) giữa B và M,  $g$  (m/s<sup>2</sup>) là gia tốc trọng trường,  $(x_m, z_m)$  là tọa độ của cáp tại điểm mắc cáp bộ di động trong hệ trục local,  $E$ (Pa) là modul đàn hồi dây cáp và  $A$  (m<sup>2</sup>) là tiết diện dây cáp. Tất cả các tọa độ đều nằm trong hệ trục cục bộ được gắn vào mặt phẳng thẳng đứng chứa cáp. Thuật ngữ  $\Delta L = L - L_S$  đại diện cho sự biến dạng của dây cáp. Khi tìm chiều dài cáp truyền động cho một tư thế nhất định, xem xét ảnh hưởng của độ võng của cáp (tức là khối lượng của cáp) là cần thiết và lực căng của cáp có liên quan đến việc tìm ra chiều dài cáp và độ võng cáp. Do đó, các vấn đề động học và tĩnh học (hoặc bán tĩnh khi bỏ qua vấn đề động lực học khi điều khiển chuyển động bộ di động với tốc độ chậm) được ghép nối và phải được giải quyết đồng thời. Kết quả của các bài

toán động học và tĩnh học là chiều dài cáp và độ căng cáp được sử dụng làm đầu vào của mô hình vồng cáp, đây là một hệ phương trình ẩn phi tuyến và không có phương pháp phân tích nào có thể áp dụng để giải nó.



Hình 6.1: Mô hình cáp vồng giữa 2 điểm

Các phương pháp số có thể được sử dụng để tìm ra các giải pháp phù hợp. Giải thuật Trust-Region-Dogleg [124] được sử dụng để giải hệ phương trình biểu diễn độ vồng cáp. Giải thuật này được xác định dưới dạng: Cho một tập hợp  $n$  hàm phi tuyến  $F_i(x)$ , với  $n$  là số phần tử trong vector  $\mathbf{x}$ , mục tiêu của thuật toán này là tìm một vector  $\mathbf{x}$  làm cho tất cả  $F_i(x) = 0$ . Trong trường hợp này, mô hình cáp vồng được viết lại thành:

$$F_i = \begin{cases} \frac{|\tau_x|}{\rho_L g} \left[ \sinh^{-1} \left( \frac{\tau_z}{\tau_x} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{\tau_z - \rho_L g L}{\tau_x} \right) \right] - x_m \\ \frac{1}{\rho_L g} \left[ \sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} - \sqrt{\tau_x^2 + (\tau_z - \rho_L g L)^2} \right] - z_m \\ \sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} - \tau \end{cases} \quad (6.15)$$

Với  $n = 3$ ,  $x = [\tau_x \quad \tau_z \quad L]$

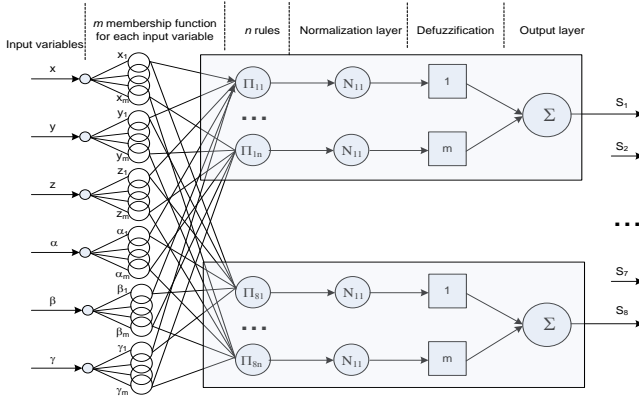
Thuật toán này sẽ đưa ra một tập nghiệm cho mỗi điều kiện đầu vào  $(\tau, X_m, Z_m)$ . Đầu tiên, một thuật toán được sử dụng để xác định xem các điểm này có nằm trong vùng làm việc của CDRP hay không (thỏa mãn phương trình cân bằng). Nếu quỹ đạo là có thể thực hiện được, dữ liệu tọa độ này sẽ được đưa

vào thuật toán để tìm lực các phân bố lực căng cáp tương ứng, với giả thuyết là đầu công tác chuyển động chậm. Thuật toán Dual Simplex được sử dụng để tìm tập hợp các tổ hợp lực căng sao cho tổng hàm mục tiêu của lực căng là nhỏ nhất, với điều kiện lực căng phải nằm trong giới hạn cho trước, kết quả bài toán động học và phân bố lực căng cáp được chuyển đổi thành đầu vào của giải thuật phân bố lực căng cáp. Trong phần này, thuật toán Trust-Region-Dogleg được sử dụng để tính toán chiều dài cáp có tính đến độ võng của cáp và sự thay đổi trọng lượng của bộ di chuyển.

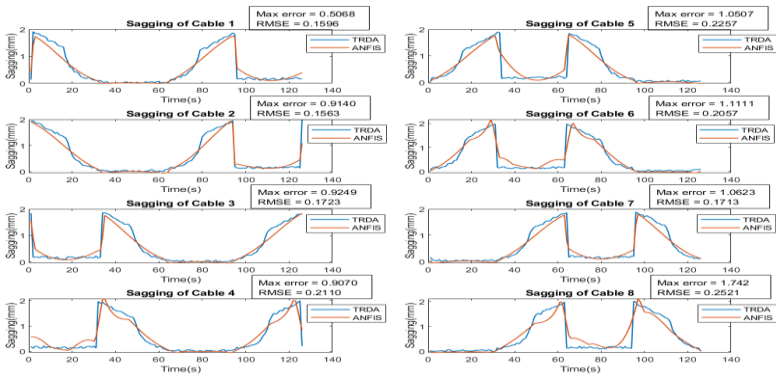
## 6.2 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS

Trong nghiên cứu này, kiến trúc ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) được sử dụng để ước tính độ võng của cáp cho các CDPR kích thước lớn, mô hình ANFIS có thể được sử dụng để giải các hàm phi tuyến, phát hiện các yếu tố phi tuyến trực tiếp trong hệ thống điều khiển, đặc điểm này có thể phù hợp với mô hình phi tuyến của hệ phương trình tính toán độ võng theo phương trình cáp xích. Dữ liệu được đào tạo cho các mô hình ANFIS được lấy từ kết quả tính toán bằng thuật toán Trust-Region-Dogleg (TRDA) [124] dựa trên hai thuật toán tính toán sức căng của cáp là Dual Simplex Algorithm (DSA) và Force Distribution in Closed Form (FDCF). Dữ liệu về độ võng của cáp thu được từ ANFIS và thuật toán TRDA được so sánh và đánh giá bằng các công cụ thống kê của các đánh giá. Kết quả phân tích cho thấy ANFIS đưa ra kết quả tính toán với sai số nhỏ và có thể được áp dụng để dự đoán độ võng của cáp cho bất kỳ cấu hình CDPR nào, với ưu điểm là thời gian tính toán nhanh và độ chính xác cao. Kết quả của các mô hình này cũng được áp dụng trên một CDPR có hai bậc tự do thừa. Để giải quyết vấn đề tính toán độ võng cáp được trình bày trong nghiên cứu này, một hệ thống ANFIS song song được đề xuất. Hệ thống này được mô tả bao gồm 8 lớp 1 bậc tự do song song, trong đó tất cả chúng đều lấy tọa độ Descartes của MP làm đầu vào. Mô hình ANFIS được phát triển cho động học nghịch của CDPR có tính đến độ võng của cáp được minh họa trong **Hình 6.8**. Vector vị trí của MP ( $R^6$ ) được sử dụng làm đầu

vào cho các mô hình ANFIS, là đầu vào phi tuyến để tính toán độ võng cấp theo các ràng buộc động học và cân bằng.



Hình 6.8: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp

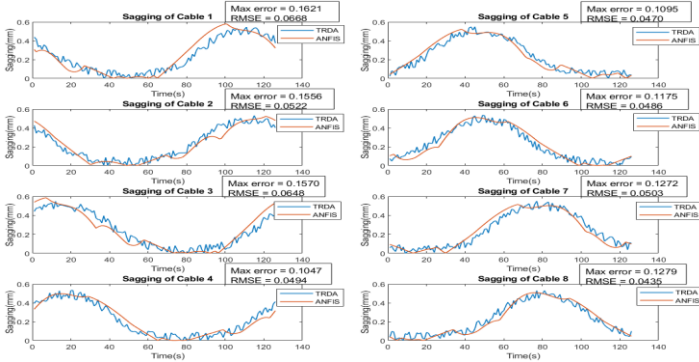


Hình 6.14: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-DSA

**Hình 6.14** cho thấy kết quả tính toán độ võng của 8 sợi cáp khi robot di chuyển dọc theo đường tròn đường kính 2m với vận tốc  $z = 1000m$ . Quỹ đạo mô phỏng có dạng liên tục có nghĩa là tất cả các điểm nút đều nằm trong WFW. Chiều dài cáp thay đổi từ 3400 mm đến 5700 mm với 126 điểm nút. Độ võng của cáp được tính toán bằng hai phương pháp: TRDA và ANFIS dựa trên Thuật toán DSA để giảm thiểu tổng lực căng của CDPR. TRDA tạo ra đường cong biểu diễn độ võng cáp với sự nhấp nhô, trong khi đường cong biểu diễn độ



võng cáp do ANFIS dự đoán là liên tục hơn. Sai số tối đa là 1.1111 mm theo quỹ đạo này. Các lỗi lớn nhất có xu hướng xảy ra khi độ võng thay đổi đột ngột để đáp ứng với sự thay đổi đột ngột của lực căng tương ứng, trong khi RMSE tối đa chỉ là 0,2521mm, điều này cho thấy số lượng điểm có sai số lớn là nhỏ, chỉ xảy ra ở các điểm mà cáp võng xuống có sự thay đổi lớn.



Hình 6.15: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-FCDF

**Hình 6.15** cho thấy kết quả tính toán độ võng của 8 sợi cáp khi robot di chuyển dọc theo đường tròn đường kính 2m tại  $z=1000m$ , 126 điểm nút, độ võng của cáp được tính toán bằng hai phương pháp TRDA và ANFIS dựa trên Phân bố lực FCDF. Tương tự như **Hình 6.14**, TRDA cũng tạo ra đường cong đáp ứng võng với sự nhấp nhô nhưng không có sự thay đổi đột ngột về giá trị độ võng của cáp, trong khi đường cong đáp ứng võng do ANFIS dự đoán là liên tục hơn, cả hai thay đổi dọc theo quỹ đạo khớp và lực căng của cáp tương ứng, sai số tối đa chỉ 0,1621mm theo quỹ đạo này với RMSE tối đa chỉ 0,0668mm. Chiều dài bù của mỗi cáp do độ võng cáp tỷ lệ nghịch với lực căng và chiều dài cáp tương ứng. Bởi vì cáp không co giãn, chiều dài bù luôn dương. Cáp càng dài và trọng lượng cáp càng lớn thì độ võng cáp càng lớn. Đối với lực căng của cáp, khi lực căng càng lớn thì cáp càng bị căng, do đó độ võng cáp càng nhỏ. Kết quả mô phỏng này cho thấy rằng phương pháp tính toán này cho kết quả phù hợp, có thể áp dụng để tính toán hiệu quả cho bộ điều khiển các cơ cấu chấp hành là tời phân phối cáp. Lực căng của tất cả các cáp được duy trì bằng hoặc lớn hơn giới

hạn dưới tmin đặt ở 50N và nhỏ hơn giới hạn trên tmax, đặt ở 500 N. Trong quỹ đạo này, chiều dài bù cáp nằm trong khoảng từ 0 mm đến tối đa là 2 mm. Khi lực căng cáp lớn hơn 300 N, chiều dài bù tiến về bằng không (mm).

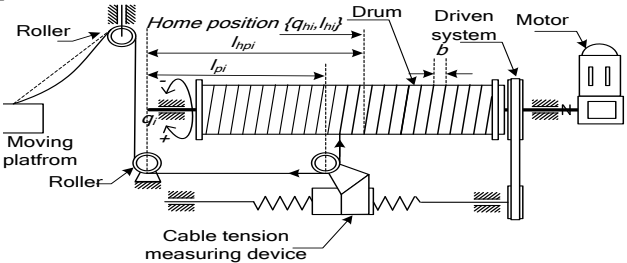
Kết quả mô phỏng tính toán cho thấy mô hình ANFIS dựa trên thuật toán tổng hợp lực căng FCDR cho độ chính xác tốt hơn so với thuật toán DSA có cùng quỹ đạo tính toán cũng như đối với dữ liệu mẫu và dữ liệu thử nghiệm. Đáp ứng của mô hình ANFIS được xây dựng phù hợp để tính toán bài toán quỹ đạo cho CDPR cỡ lớn, với thời gian tính toán nhanh hơn so với phương pháp số. Tính liên tục được đảm bảo cho các bộ điều khiển được thiết kế cho các cấu hình CDPR khác nhau. Nhìn chung, sai số trong việc xây dựng mô hình này phụ thuộc vào phương pháp thu thập và phân tích dữ liệu, vì mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra có dạng phi tuyến cao, trong đó dữ liệu tham chiếu đầu ra được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán độ võng cáp phụ thuộc vào phương pháp tính toán phân bố lực căng cáp, cấu trúc CDPR và tọa độ của MP, lực căng cáp tương ứng với các vị trí của MP phải thỏa mãn các ràng buộc về động học và động lực học. Điểm mới trong nghiên cứu này là mô hình ANFIS được xây dựng dựa trên hai giải thuật phân bố lực căng là DSA và FCDR cho ra các sai số khác nhau, mô hình ANFIS cho phản hồi tốt hơn với FCDR do tính liên tục của độ căng cáp. Kết quả tính toán cho thấy sự phù hợp của mô hình ANFIS được xây dựng để tính toán độ võng cáp, kết quả này sẽ được sử dụng để phát triển bộ điều khiển và thực nghiệm trên CDPR mẫu.

## **CHƯƠNG 7: BỘ ĐIỀU KHIỂN VÀ QUỸ ĐẠO**

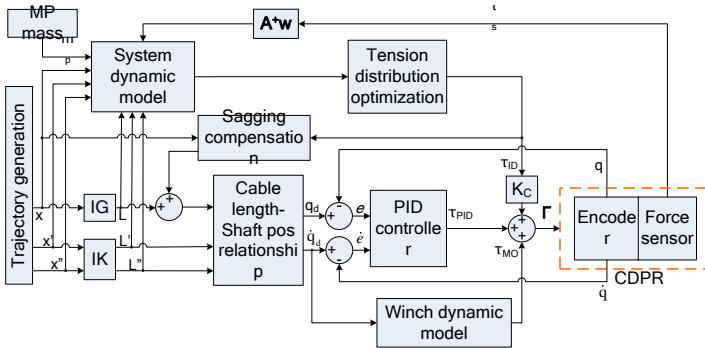
### **7.1 Mô hình truyền động của Robot cáp**

Dựa vào các kết quả tính toán và mô hình hóa CDPR trong các chương trước, chương này trình bày cấu trúc của hệ thống điều khiển CDPR có tính đến ảnh hưởng của các thông số như lực căng cáp, độ võng cáp, độ đàn hồi các cơ cấu truyền động và đường kính pully tại điểm mắc cáp cố định. Sơ đồ truyền động của các bộ phân phối cáp được trình bày trên **hình 7.1**. Giải thuật phân phối lực căng và tính toán độ võng cáp được trình bày trong chương trước đã được triển khai trên nguyên mẫu CDPR 6 DOF. Cấu trúc của mô hình điều

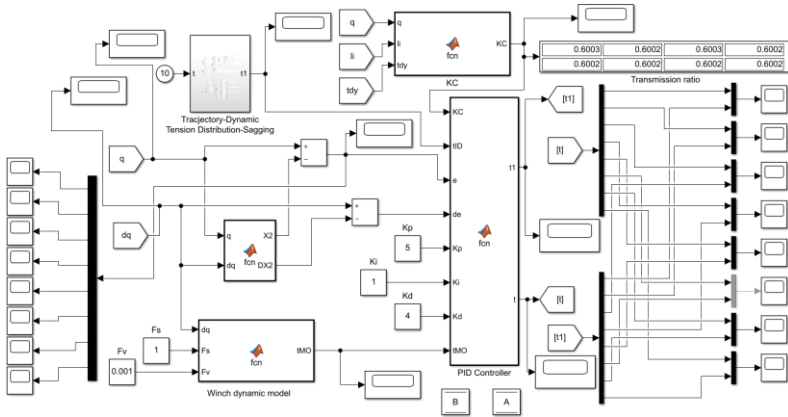
khiển của một cơ cấu phân phối cáp (được xem như 1 khớp) được miêu tả trên **hình 7.7**. Cấu hình này được xây dựng trên các bài toán động học và động lực học bao gồm bài toán phân bố lực căng và tính toán độ võng cáp. Khối động lực học được sử dụng để tính toán tính hiệu điều khiển nhiễu sớm (feedforward) cho bộ điều khiển do lực kéo và lực ma sát tác dụng lên từng trục động cơ [131]. Khối động lực hệ thống dựa trên phương trình 3.20, trong đó phân bố lực căng cáp  $\tau_D$  thu được từ giải thuật trong chương 5, kết hợp với mô hình động lực học 3.20 và 7.12. **Hình 7.8** là cấu trúc các thành phần mô hình điều khiển được thiết lập trên Matlab simulink, mô hình này bao gồm các khối đã tính toán trong các chương trước. Khối Winch Dynamic model được thiết lập từ phương trình 7.12 với các thành phần ma sát trong bộ tời phân phối cáp. Khối PID controller là bộ điều khiển vị trí với mô hình toán 7.13 và 7.14. Khối Quỹ đạo – Động lực học – Phân bố lực căng cáp – tính toán độ võng cáp (Trajectory – Dynamic - Tension Distribution - Sagging) tổng hợp các bài toán lập quỹ đạo, động học, động học vận tốc, động lực học, tính toán độ võng cáp từ quỹ đạo đầu vào. Trong đó khối Động học – Vận tốc (Kinematic – Veclocity) tính toán bài toán động học, động học vận tốc, đầu ra của khối này là các dữ liệu dùng để tính toán bài toán động lực học, phân bố lực căng cáp và tính toán độ võng cáp. Khối Tensor quán tính (Inertia tensor) và ma trận Tensor quán tính (Symetric inertia tensor) CDPD là các thành phần trong bài toán động lực học CDPD. Khối ‘Dynamic Tension Distribution’ chứa các mô hình động lực học và giải thuật phân phối lực căng cáp, đầu ra của khối này là lực căng cáp trên các bộ phân phối cáp.



Hình 7.1: Sơ đồ truyền động của robot cáp và bộ phân phối cáp



Hình 7.7: Cấu trúc mô hình điều khiển cơ cấu phân phối cáp



Hình 7.8: Cấu trúc mô hình điều khiển CDPR

## CHƯƠNG 8: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

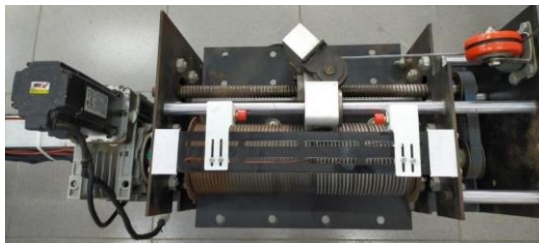
**Hình 8.1** và **Hình 8.3** là CDPR và thiết bị phân phối cáp đã hoàn thiện.

Phần tính toán không gian hoạt động và phân bố lực căng cáp đã trình bày cách tính toán phạm vi di chuyển dựa trên trọng lượng của tải, góc quay và vị trí bệ để đảm bảo rằng độ căng của cáp luôn nằm trong phạm vi an toàn. Trong thực tế, việc kiểm tra độ căng cáp được trả về từ các cảm biến loadcell và trạng thái cáp bằng cách kiểm tra trực quan sẽ trả lại kết quả nằm trong phạm vi ước tính và không cho thấy quá tải ngay cả khi nền tảng di chuyển đến các điểm nằm ở giới hạn bị ràng buộc. Độ chính xác vị trí được thực hiện trên 2 mô hình tính

toán: không tính đến ảnh hưởng độ võng cáp và có bộ hiệu chỉnh bù độ võng cáp. Việc kiểm tra độ chính xác được đo ở ba trục tịnh tiến: X, Y và Z, do đó quá trình thực nghiệm sẽ cho Robot vẽ các quỹ đạo cơ bản như đường thẳng hoặc được tròn để đo độ chính xác theo trục X, Y và di chuyển đến các vị trí trong không gian để đo sai số theo phương Z. Kết quả được so sánh với quỹ đạo mong muốn để đo được độ chính xác vị trí trong 2 trường hợp. **Hình 8.6** là kết quả thực nghiệm đo độ chính xác vị trí của CDPR. Cho robot vẽ hai quỹ đạo khác màu chồng lên nhau, màu đỏ là quỹ đạo không có bù độ võng cáp, màu xanh là quỹ đạo có bù độ võng cáp, sau đó đo độ lệch giữa 2 quỹ đạo theo phương X, Y so với quỹ đạo thiết kế để đánh giá độ chính xác vị trí của 2 trường hợp. **Hình 8.7** là quỹ đạo khớp tương ứng với quỹ đạo hình tròn thu được từ encoder của các động cơ servo, dạng của quỹ đạo liên tục, đáp ứng theo quỹ đạo khớp thiết kế.



Hình 8.1: CDPR được phát triển cho thực nghiệm



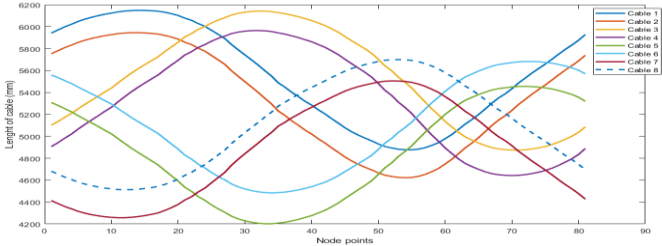
Hình 8.3: Cơ cấu phân phối cáp truyền động

**Hình 8.8** là kết quả đo lực căng cáp theo quỹ đạo hình tròn, các lực căng này thu được từ các cảm biến lực gắn trên các bộ phân phối cáp, các lực căng

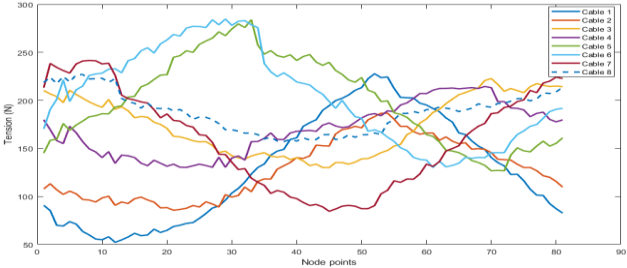
cáp thay đổi trong khoảng từ 50N đến 300N, dạng của lực căng cáp liên tục theo quỹ đạo khép, điều này phù hợp với kết quả tính toán ở các chương trước, lực căng cáp ổn định cũng cho thấy sự phù hợp của giải thuật điều khiển đã thiết kế, đây là kết quả quan trọng trong việc điều khiển CDPR, kiểm soát lực căng trong giới hạn chi trước đảm bảo độ cứng vững, độ chính xác của cơ cấu, qua đó tận dụng được ưu điểm của CDPR cho các yêu cầu cần di chuyển tải trọng lớn với các cơ cấu chấp hành công suất nhỏ, trong thực nghiệm này, tải trọng mang là 1000N, trong khi lực căng cáp dao động từ 50N-300N. Kiểm soát tốt lực căng cáp còn đảm bảo an toàn cho cơ cấu chấp hành trong trường hợp quá tải.



Hình 8.6: Kiểm tra độ chính xác với quỹ đạo hình tròn

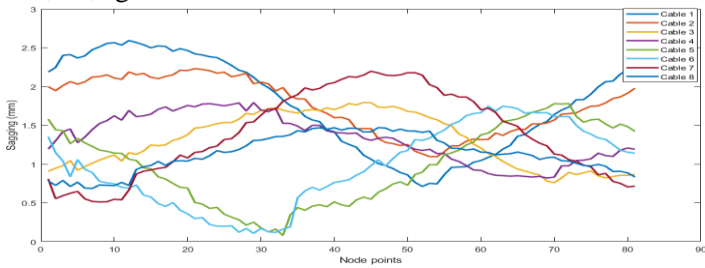


Hình 8.7: Giá trị các biến khớp phản hồi theo nội suy đường tròn

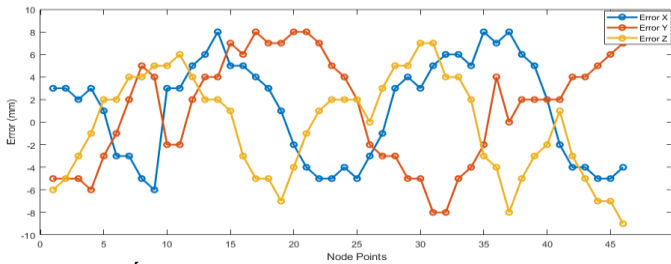


Hình 8.8: Giá trị các lực căng cáp phản hồi theo nội suy đường tròn

**Hình 8.9** biểu diễn các giá trị bù độ võng cáp theo quỹ đạo hình tròn, kết quả này hoàn toàn phù hợp với mô hình tính toán đã mô phỏng, trong đó, mối liên hệ giữa lực căng cáp, chiều dài cáp và độ võng cáp được đảm bảo. Độ võng cáp thay đổi từ 0mm đến 3mm theo quỹ đạo khớp. **Hình 8.10** cho thấy sai số vị trí trong trường hợp không tính đến độ võng cáp dao động trong khoảng  $\pm 8$ mm, **hình 8.11** là sai số vị trí trong trường hợp có tính đến độ võng cáp dao động trong khoảng  $\pm 5$ mm, sai số theo phương z của cả 2 trường hợp cũng cho kết quả tương tự. Kết quả này cho thấy độ chính xác vị trí có cải thiện đáng kể với mô hình tính toán độ võng cáp đã xây dựng. Hiệu quả tính toán sẽ tăng lên khi kích thước robot càng lớn do ảnh hưởng của độ võng cáp tỉ lệ thuận với không gian hoạt động.



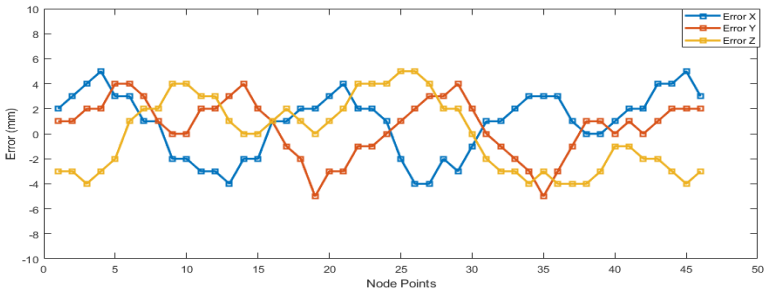
Hình 8.9: Giá trị bù độ võng cáp theo nội suy đường tròn



Hình 8.10: Kết quả đo độ chính xác vị trí không bù độ võng cáp

Kết quả thực nghiệm trên cấu hình CDPR mô phỏng chuyển động thực tế ảo cũng cho kết quả tương tự, vị trí của cabin mô phỏng được điều khiển phù hợp với tính hiệu từ Game tương ứng. Một số giá trị lực căng cáp tuy nhỏ hơn giới hạn dưới nhưng vẫn lớn hơn 0, đảm bảo lực căng dương trong quá trình di chuyển, điều này cho thấy phân bố lực căng và bù độ võng cáp hết sức quan

trọng trong quá trình điều khiển CDPR, nhất là đối với các ứng dụng cần đáp ứng thời gian thực, để đảm bảo lực căng dương cũng như bù chiều dài cáp điều khiển trực tiếp khi lực căng thay đổi đột ngột ngoài giới hạn đặt trước.



Hình 8.11: Kết quả đo độ chính xác vị trí có bù độ võng cáp

## CHƯƠNG 9: KẾT LUẬN

### 9.1 Kết quả nghiên cứu của đề tài

Qua kết quả nghiên cứu và thực nghiệm cho thấy, việc tính toán độ võng của cáp truyền động là cần thiết để cải thiện độ chính xác vị trí của CDPR. Trong chuyên đề 1 và chuyên đề 2, phương pháp số và phương pháp dự đoán đã được áp dụng để tính toán bài toán tìm độ võng của cáp, qua đó cải thiện thời gian tính toán cho những ứng dụng điều khiển thời gian thực. Dựa vào kết quả nghiên cứu của chuyên đề tổng quan và chuyên đề 1, chuyên đề 2, báo cáo tổng kết đã tổng hợp các vấn đề nghiên cứu của luận án và thực hiện nghiên cứu, phát triển bộ điều khiển với giải thuật xác định độ võng cáp và thực nghiệm đánh giá độ chính xác vị trí của mô hình dự đoán so với phương pháp số. Trong đó, hai thuật toán xác định phân bố lực căng cáp là DSA với mục tiêu tối ưu là tổng lực căng cáp nhỏ nhất và FCDF với mục tiêu là lực căng cáp an toàn và liên tục với thời gian tính toán nhanh đã được thiết kế và thử nghiệm với các điều kiện ràng buộc về động học và giới hạn lực căng cáp. Mô hình ANFIS đã được xây dựng để dự đoán độ võng của cáp dựa trên cấu trúc động học của một Robot cáp thừa ràng buộc 6 bậc tự do và 8 cáp truyền động có kích thước lớn. Các thông số ảnh hưởng đến độ võng của cáp như cấu trúc động học,



độ căng cáp, phương pháp phân bố độ căng cáp (DSA và FCDF) cũng được tính đến khi tạo dữ liệu đầu vào cho ANFIS. Mô hình ANFIS được áp dụng để tính toán mô phỏng trên tập dữ liệu học và tập dữ liệu thử nghiệm, cũng như dữ liệu từ các quỹ đạo chuyển động cơ bản. Kết quả thống kê bao gồm hệ số tương quan, sai số bình phương trung bình và chỉ số phân tán cho thấy kết quả của phương pháp tính toán là phù hợp cho mục đích xác định độ võng cáp cho CDPR. Mô hình ANFIS có thể được sử dụng để xác định độ võng cho các CDPR với thời gian tính toán nhanh và độ chính xác cao, do đó ANFIS có thể trở thành một phương pháp thay thế cho các phương pháp số trong một số trường hợp với các điều kiện biên cụ thể như giới hạn lực căng cáp, chiều dài dây cáp truyền động, cấu hình CDPR, độ chính xác yêu cầu, độ cứng vững của cơ cấu, đặc điểm của bộ điều khiển. Quy trình tính toán này có thể được phát triển để xây dựng các mô hình ANFIS tính toán bài toán động học nghịch có tính đến ảnh hưởng của độ võng của cáp cho các CDPR có cấu trúc khác nhau.

Dựa vào kết quả nghiên cứu và thực nghiệm các giải thuật tính toán độ võng cáp, bài toán động học nghịch có tính đến độ võng cáp với các thông số ảnh hưởng đến việc xác định độ võng cáp là độ đàn hồi và khối lượng dây cáp đã được xây dựng, có thể kết luận rằng: Thứ nhất, mô hình tính toán là phù hợp cho ứng dụng xây dựng CDPR kích thước lớn; thứ 2, độ võng cáp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác vị trí của CDPR; thứ 3, độ võng cáp và lực căng cáp có mối liên hệ chặt chẽ, độ chính xác của mô hình dự đoán độ võng cáp có phụ thuộc vào phương pháp phân bố lực căng cáp; thứ 4, các kết quả tính toán được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển có bù độ võng cáp cho CDPR dạng thừa ràng buộc 6 bậc tự do được truyền động bằng cáp với các bài toán động học, động lực học, phân bố lực căng và độ võng cáp. Đánh giá kết quả thực nghiệm, phân tích ảnh hưởng của độ võng cáp độ chính xác vị trí của CDPR cho thấy, độ chính xác vị trí đã được cải thiện khi áp dụng giải thuật tính toán bài toán động học với bộ bù độ võng cáp. Kết quả này mở ra một hướng

nguyên cứu mới để đơn giản hóa quá trình tính toán, rút ngắn thời gian tính toán, cải thiện khả năng triển khai các CDPR kích thước lớn, có cấu hình phức tạp cho các ứng dụng đòi hỏi tốc độ, tải trọng lớn và độ chính xác cao.

## 9.2 Các vấn đề còn tồn tại

Giải thuật tính toán độ võng cấp sử dụng mô hình ANFIS đã được phát triển để xây dựng mô hình dự đoán độ võng của cáp dựa trên tọa độ của MP và lực căng cáp, do đó mô hình tính toán phụ thuộc vào cấu trúc của các CDPR cụ thể cũng như phương pháp tính toán phân bố lực căng cáp tương ứng. Điều này có nghĩa là giải thuật tính toán độ võng cấp dựa vào mô hình ANFIS hiện tại chỉ áp dụng cho một loại CDPR nhất định với một phương pháp phân bố lực căng cụ thể. Theo mô hình cáp xích ở **chương 6**, độ võng của cáp phụ thuộc vào chiều dài cáp, đường kính cáp, khối lượng riêng và lực căng cáp trong hệ trục tọa độ cục bộ, vì vậy có thể xây dựng một mô hình tính toán độ võng của cáp chung cho tất cả các CDPR bằng cách đồng bộ hóa dữ liệu đầu vào bao gồm cấu hình CDPR, phương pháp phân bố lực căng, để lấy dữ liệu đầu vào cho mô hình tính toán độ võng của cáp là tọa độ cáp và lực căng cáp trong hệ trục cục bộ tương ứng. Phương pháp này có ưu điểm là có thể áp dụng cho bất kỳ cấu hình nào. Tuy nhiên, thời gian tính toán tăng lên do yêu cầu giải các bài toán về động học CDPR và phân bố lực căng cáp. Trong các nghiên cứu tiếp theo, giải thuật tính toán độ võng cấp dựa vào mô hình ANFIS hoặc các mô hình tính toán mềm khác sẽ được hiệu chỉnh và áp dụng để dự đoán độ võng của dây cáp truyền động cho các cấu hình CDPR khác nhau. Các thông số khác như ma trận độ cứng, lực tác động bên ngoài cũng được phân tích để cải thiện độ chính xác của CDPR. Kết quả tính toán sẽ được so sánh với các phương pháp hiện có để đánh giá hiệu quả của mô hình.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

- [1] Tuong Phuoc Tho, Nguyen Truong Thinh, "Analysis and Evaluation of CDPR Cable Sagging Based on ANFIS", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, Article ID 4776317, 20 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4776317> (**SCIE - Q3, IF 1.576**)
- [2] Tuong Phuoc Tho, Nguyen Truong Thinh, "An Overview of Cable-Driven Parallel Robots: Workspace, Tension Distribution, and Cable Sagging", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Article ID 2199748, 15 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2199748> (**SCIE - Q2, IF 1.576**)
- [3] Tuong Phuoc Tho & Nguyen Truong Thinh (2023) Evaluating cable tension distributions of CDPR for virtual reality motion simulator, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, DOI: 10.1080/15397734.2023.2265452, Volume 0, page 1-19. (**SCIE – Q1, IF 3.9**)
- [4] Tho, Tuong Phuoc, and Nguyen Truong Thinh. "Sagging Cable Analysis and Evaluation of 4-degree-of-freedom Cable Robot Using Adaptive Neural Fuzzy Algorithm" *IJMERR* 2022 Vol.11(2): 73-78. (**SCOPUS - Q3, IF 1.012**)
- [5] Tho, Tuong Phuoc, and Nguyen Truong Thinh. "A Study of Tension Distribution for Control of Planar Cable Driven Parallel Robot Using Quadratic Programming Algorithm" *IJMERR* 2022 Vol.11(7): 479-485 (**SCOPUS - Q3, IF 1.012**)
- [6] Xuan, Hoang Tran, Tho Tuong Phuoc, Chien Do Manh, and Nghia Vo Luong Nhon. "Design and Modeling Camera Cable Robot." In *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development: Proceedings of the International Conference GTSD2022*, pp. 271-281. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [7] Quan, Chu Nhat Minh, Tuong Phuoc Tho, and Nguyen Truong Thinh. "Implementation of the Racing Game with the Virtual Reality and Cable Suspended Parallel Robot (CSPR)." In *2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 288-291. IEEE, 2022.
- [8] Dao, Cong Hoang Kha, Phuoc Tho Tuong, Ngoc Duc Vu, and Minh Nhat Nguyen. "On Research of Cable Tension Distribution Algorithm for Four Cables-Three DOF Planar Cable-Driven Parallel Robot." *Journal of Technical Education Science* 78B (2023): 8-17.
- [9] Phuoc Tho Tuong, Nguyen Luan Vu Truong. "Design and Calculation of Cable Distribution System for CDPR." *Journal of Technical Education Science*, ISSN: 1859-1272.