

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 VĨNG 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 2024

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 Trường họp tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày tháng năm 2024

TÓM TẮT

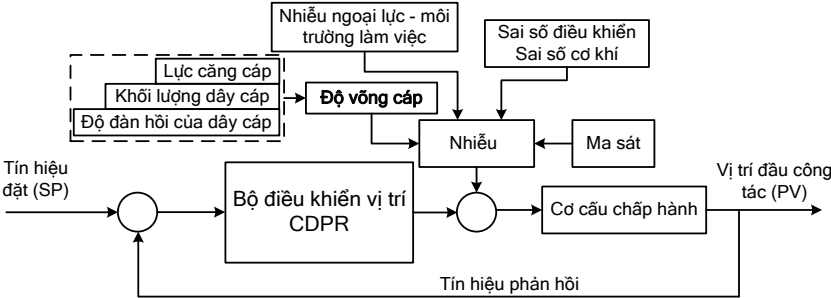
Vấn đề nghiên cứu, thiết kế, tính toán và điều khiển Cable driven parallel robots (CDPR) đang được đẩy mạnh trong những năm gần đây. Thông qua kết quả phân tích các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án, nghiên cứu sinh thực hiện mục tiêu của đề tài là nghiên cứu, phân tích và đánh giá tác động của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của robot truyền động bằng cáp cấu hình song song. Các kết quả nghiên cứu, các đóng góp về mặt khoa học và ứng dụng tóm tắt như sau: Khảo sát tổng quan, xác định các vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu của đề tài; Thiết kế các giải thuật tính toán lực căng cáp DSA, QPA và các giải thuật tính toán độ võng cáp mới là TRDA với giải thuật vùng tin cậy, CSPA và ICSPA dựa trên ANFIS, các giải thuật được tính toán, mô phỏng và cho kết quả phù hợp, từ đó thiết kế giải thuật tính toán bài toán động học nghịch cho CDPR dạng thừa ràng buộc; Thực nghiệm các kết quả tính toán trên CDPR, thu thập và đánh giá kết quả, kết quả phân tích cho thấy, độ võng cáp có ảnh hưởng rõ ràng đến độ chính xác vị trí của CDPR, mô hình tính toán được xây dựng thành công trên cơ sở phân tích, xác định các thành phần tác động 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. 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 với mục tiêu giảm thiểu thời gian tính toán và đơn giản hóa mô hình tính toán. 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. Từ kết quả nghiên cứu này, các hướng nghiên cứu mới có thể được mở rộng như xây dựng các mô hình mới để tối ưu không gian hoạt động, xác định phân bố lực căng cáp cho các CDPR thừa ràng buộc, tính toán độ võng cáp, phân tích rung động, qua đó đơn giản hóa mô hình toán và rút ngắn thời gian 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 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** bao gồm: 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 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 không giãn thì kích thước càng lớn thì độ võng cáp càng lớn, đối với cáp đàn hồi, nếu 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 CDPR, 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 khi ứng dụng CDPR vào thực tế.



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

1.2 Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là robot truyền động bằng cáp cấu hình song song. Trong đó, nội dung nghiên cứu tập trung vào bài toán động học nghịch với các điều kiện ràng buộc về phân bố lực căng cáp, độ võng cáp và các điều kiện biên trên CDPR cấu hình song song dạng thừa ràng buộc.

1.3 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là nghiên cứu phát triển giải thuật tính toán bài toán động học nghịch với các giải thuật xác định lực căng cáp và độ võng cáp, đánh giá tác động của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR.

Mục tiêu cụ thể của luận án là thiết kế giải thuật tính toán lực căng cáp, thiết kế giải thuật tính toán độ võng cáp ứng dụng kỹ thuật tính toán mềm để rút ngắn thời gian tính toán, trong đó mục tiêu cần đạt được là độ chính xác của giải thuật tính toán độ võng cáp có sai số bình phương trung bình nhỏ hơn 0.5mm và thời gian tính toán giảm dưới 20% so với phương pháp số với các điều kiện biên cho trước. Tích hợp bài toán lực căng cáp và độ võng cáp vào bài toán động học nghịch CDPR, qua đó phân tích và đánh giá các tác động của lực

căng cáp và độ võng cáp lên độ chính xác vị trí của hệ thống CDPR với các điều kiện về lực tác động, tải trọng, cấu hình CDRP và điều kiện cân bằng. Các kết quả nghiên cứu được thực nghiệm trên CDPR để đánh giá kết quả.

1.6 Đóng góp của luận án

Các đóng góp về mặt lý luận và học thuật của luận án: Thiết kế các 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, dựa trên kết quả này, tiến hành phân tích tác động của lực căng cáp đến không gian hoạt động của CDPR; Thiết kế 3 giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên giải thuật Miền tin cậy và cấu trúc ANFIS theo các điều kiện của lực căng cáp, đặc tính dây cáp và cấu hình CDPR cụ thể. Tích hợp bài toán lực căng cáp và độ võng cáp vào giải thuật tính toán động học nghịch CDPR, 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 CDRP, độ võng cáp và độ đàn hồi các cơ cấu truyền động; Thực nghiệm và đánh giá kết quả 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.

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 bộ 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 CDPR 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.

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 bộ 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 nhiều, 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 võng là khác nhau, lực căng của cáp khi cáp võng 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]. Các kỹ thuật tính toán mềm cũng đang được thử nghiệm và cho các kết quả tiềm năng [121-123], tuy nhiên kết quả chưa được phân tích chi tiết cũng như chưa được áp dụng với các cấu hình CDPR khác nhau. 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 cáp 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 CDPR cụ thể, cải thiện thời gian tính toán. Tích hợp các giải thuật tính toán vào bộ điều khiển CDPR dựa trên kết quả nghiên cứu, thực nghiệm và đánh giá kết quả.

CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT CDPR

3.2 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. $\mathbf{x} = (\mathbf{r}, \mathbf{R}) \in \mathbb{R}^n$ là vectơ biểu diễn hướng và vị trí của E trong khung B, với n là số bậc tự do của CDPR. Theo giản đồ vectơ trong **hình 3.2**, chúng ta có thể thu được công thức tính vectơ \mathbf{l}_i ($i = 0 \dots m$) tương ứng với cấu hình của MP:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i \tag{3.1}$$

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

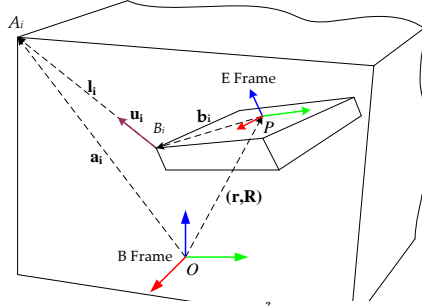
$$|l_i| = \|\mathbf{l}_i\| = \sqrt{[\mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i][\mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i]^T} \tag{3.2}$$

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 Euler.

3.3 Bài toán 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 $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \in \mathbb{R}^3$ là vận tốc dài của tâm bộ di động Op trong hệ trục B, $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y \quad \dot{\theta}_z]^T \in \mathbb{R}^3$ là vận tốc góc của MP theo 3 trục x, y và z

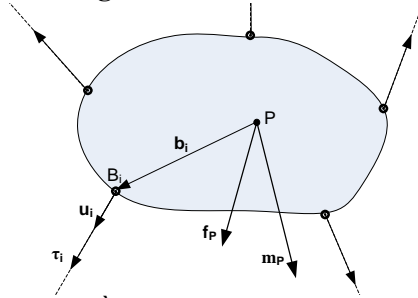
của hệ trục B, $\mathbf{v} = [\dot{\mathbf{r}} \quad \boldsymbol{\omega}]^T \in R^6$ biểu diễn vectơ vận tốc của MP bao gồm cả vận tốc dài và vận tốc góc. Đặt \mathbf{J} ($n \times 6$) là ma trận Jacobi của CDPR, đạo hàm phương trình (3.1) theo thời gian, chúng ta thu được mô hình động học nghịch vận tốc như phương trình (3.8).



Hình 3.2: Mô hình động học tổng quát của CDPR

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{v} \text{ với } \dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1 \quad \dot{i}_2 \quad \dots \quad \dot{i}_n] \quad (3.8)$$

3.4 Hệ phương trình cân bằng



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

Hệ phương trình cân bằng biểu diễn mối liên hệ giữa ngoại lực tác dụng và lực căng cáp tác dụng lên bộ di động. Để thỏa mãn phương trình cân bằng của CDPR hay đảm bảo bộ 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 vectơ của lực và mômen do ngoại lực tác dụng lên MP; $\boldsymbol{\tau}_i$ là vectơ 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 O_p trong hệ trục E (**Hình 3.3**).

3.5 Động lực học CDPR

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. Phương trình (3.20) thể hiện mối quan hệ giữa động học, tĩnh học và động lực học của CDPR. Trong các phần tiếp theo, các thông số đã xác định trong phần này sẽ được xây dựng, phát triển và phân tích để xác định các thông số thiết kế của CDPR, bao gồm các phương pháp xác định vùng làm việc, phân bố lực căng cáp, tính toán độ võng của các dây cáp truyền động, tích hợp kết quả tính toán vào bộ điều khiển.

3.6 Bài toán xác định không gian hoạt động của CDPR

Đối với CDPR, độ căng của cáp ảnh hưởng rất nhiều đến không gian làm việc. **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:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}_p = \mathbf{0} \quad (3.26)$$

Với: $\boldsymbol{\tau}$: Vector lực căng cáp ($m \times 1$);

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

\mathbf{w}_p : vectơ của ngoại lực tác dụng trên khối tâm của bộ di động ($n \times 1$).

Từ (3.26), 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 4: THIẾT KẾ GIẢI THUẬT TÍNH TOÁN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH VỚI LỰC CĂNG CÁP VÀ ĐỘ VĨNG CÁP

4.2 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 cáp dương đối với các tư thế của MP thỏa mãn phương trình cân bằng lực sau:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{w}_p \quad \text{với} \quad \mathbf{0} < \boldsymbol{\tau}_{\min} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \quad (4.1)$$

Trong đó \mathbf{A} ($n \times m$) ma trận cấu trúc của CDPR; $\boldsymbol{\tau}$ ($m \times 1$) véc tơ lực căng cáp; \mathbf{w}_p ($n \times 1$) 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.

4.3 Bài toán động học nghịch với độ võng cáp dựa vào phương trình cáp xích Catenary equation – Irvine

4.3.1 Mô hình cáp xích Catenary equation – Irvine [91]

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 4.10**, trong đó B là điểm mắc cáp trên bệ cố định, M là điểm mắc cáp trên bệ 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^2) là gia tốc trọng trường, (x_m, z_m) là tọa độ của cáp tại điểm mắc cáp bệ di động trong hệ trục local, E (Pa) là modul đàn hồi dây cáp và A (m^2) 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 bệ 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 võng 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.

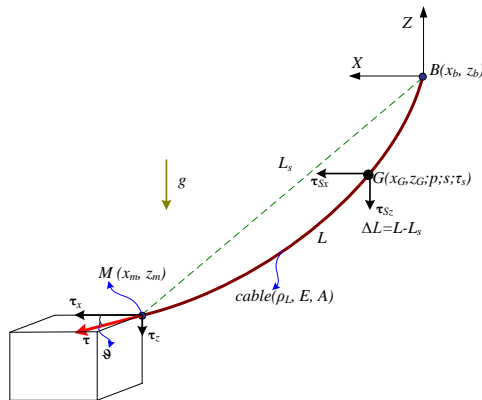
Các phương pháp số có thể được sử dụng để tìm ra các giải pháp phù hợp. Giải thuật Trust-Region-Dogleg [124] được sử dụng để giải hệ phương trình biểu diễn độ võng cáp, giải thuật này được xác định dưới dạng: Cho một tập hợp n hàm phi tuyến $F_i(x)$, với n là số phần tử trong vector \mathbf{x} , mục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

thuật toán này là tìm một vectơ \mathbf{x} làm cho tất cả $F_i(x) = 0$. Trong trường hợp này, mô hình cáp vồng được viết lại thành:

$$F_i = \begin{cases} \frac{|\tau_x|}{\rho_L g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z}{\tau_x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z - \rho_L g L}{\tau_x} \right) \right] - x_m \\ \frac{1}{\rho_L g} \left[\sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} - \sqrt{\tau_x^2 + (\tau_z - \rho_L g L)^2} \right] - z_m \\ \sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} - \tau \end{cases} \quad (4.38)$$

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

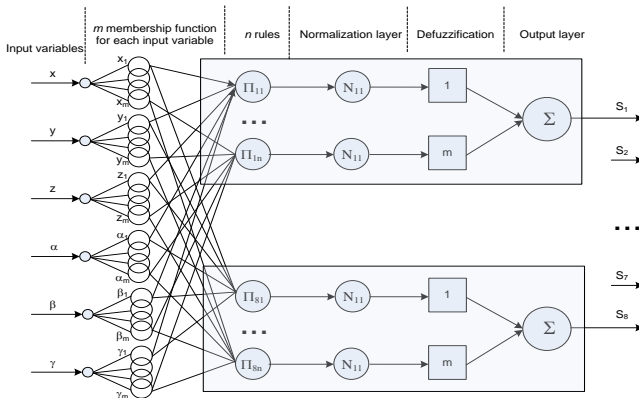
Thuật toán này sẽ đưa ra một tập nghiệm cho mỗi điều kiện đầu vào (τ, X_m, Z_m) , dữ liệu tọa độ này sẽ được đưa vào thuật toán để tìm lực các phân bố lực căng cáp tương ứng, với giả thuyết là đầu công tác chuyển động chậm. Thuật toán Dual Simplex được sử dụng để tìm tập hợp các tổ hợp lực căng sao cho 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 vồng của cáp và sự thay đổi trọng lượng của bộ di chuyển.



Hình 4.10: Mô hình cáp vồng giữa 2 điểm

4.4.2 Giải thuật xác định độ vồng cáp dựa trên ANFIS [124]

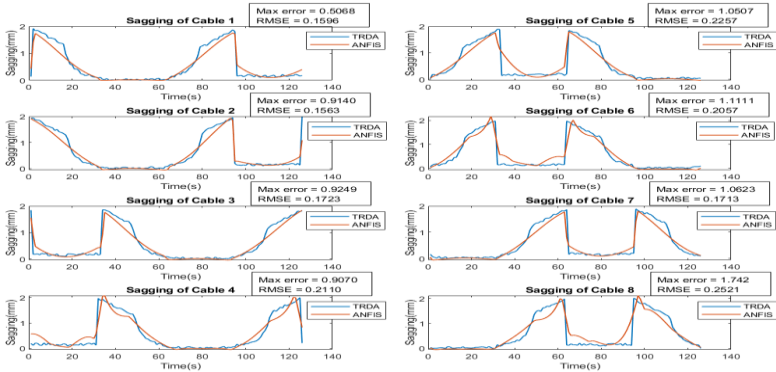
Trong nghiên cứu này, kiến trúc ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) được sử dụng để thiết kế 2 giải thuật ước tính độ võng của cáp cho các CDPR kích thước lớn là CSPA và ICSPA, mô hình ANFIS có thể được sử dụng để giải các hàm phi tuyến, phát hiện các yếu tố phi tuyến trực tiếp trong hệ thống điều khiển, đặc điểm này có thể phù hợp với với mô hình phi tuyến của hệ phương trình tính toán độ võng theo phương trình cấp 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 Quadratic Programming (QPA). 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, kết quả của các mô hình này cũng được áp dụng trên một CDPR có hai bậc tự do thừa. Mô hình ANFIS CSPA được phát triển cho động học nghịch của CDPR có tính đến độ võng của cáp được minh họa trong **Hình 4.15**. Vector vị trí của MP (R^6) được sử dụng làm đầu vào cho các mô hình ANFIS để tính toán độ võng cáp theo các ràng buộc động học và cân bằng.



Hình 4.15: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp

Hình 4.21 cho thấy kết quả tính toán độ võng của 8 sợi cáp khi robot di chuyển dọc theo đường tròn đường kính 2m với $z = 1000\text{mm}$. Quỹ đạo mô phỏng có dạng liên tục có nghĩa là tất cả các điểm nút điều nằm trong WFW.

Chiều dài cáp thay đổi từ 3400mm đến 5700mm với 126 điểm nút. Độ võng của cáp được tính toán bằng hai phương pháp: TRDA và CSPA 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 CSPA dự đoán là liên tục hơn. Sai số tối đa là 1.1111mm 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. Trong quỹ đạo này, chiều dài bù cáp nằm trong khoảng từ 0mm đến tối đa là 2mm. Khi lực căng cáp lớn hơn 300N, chiều dài bù tiến về bằng không (mm).

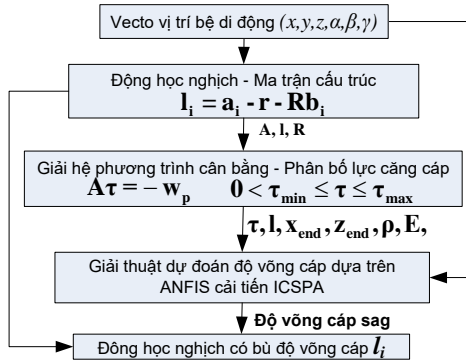


Hình 4.21: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-DSA

4.4.4 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS cải tiến – ICSPA

Một bất lợi của giải thuật CSPA là chỉ áp dụng cho từng giải pháp phân bố lực căng và cấu hình CDPR cụ thể, do đầu vào là vị trí của đầu công tác, nhược điểm này hạn chế khả năng ứng dụng của giải thuật CSPA. Để giải quyết vấn đề này, một giải thuật dự đoán độ võng cáp dựa trên ANFIS cải tiến – Improve Cable Sagging Prediction Algorithm based on ANFIS (ICSPA) - được xây dựng để khắc phục các nhược điểm của CSPA, mở rộng khả năng ứng dụng vào nhiều cấu hình CDPR khác nhau, giải thuật ICSPA cũng dựa vào các bài toán cơ bản của CDPR như bài toán động học nghịch, phân bố lực căng cáp, giải

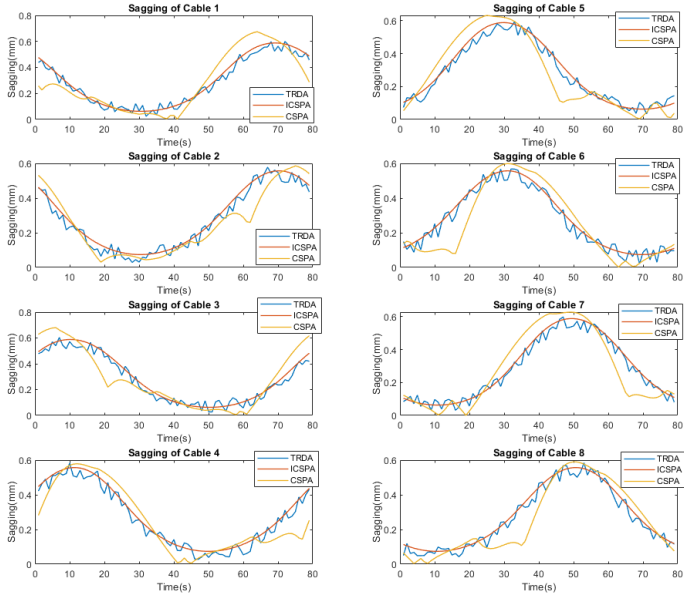
thuật xác định độ võng cấp TRDA và mô hình ANFIS. Dữ liệu đầu vào của ICSPA gồm 4 biến là chiều dài cáp l , tọa độ z_{end} của điểm mắc cáp di động, lực căng cáp τ và đường kính cáp d (**hình 4.25**). Các thông số này là kết quả của các bài toán động học nghịch, phân bố lực căng cáp và thông số của cáp không tính đến độ võng cáp. Mô hình được xây dựng thử nghiệm cho cáp có chiều dài tối đa 20m, lực căng cáp tối đa 1000N, đây cũng là thông số thiết kế của tời phân phối cáp cho CDPR thực nghiệm ở phần sau.



Hình 4.25 Bài toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp với giải thuật xác định độ võng cáp ICSPA

Hình 4.27 biểu diễn kết quả tính toán độ võng cáp bằng 3 phương pháp TRDA, CSPA và ICSPA theo quỹ đạo đường tròn đường kính 1600mm trên cùng một cấu hình CDPR với giải thuật phân phối lực căng cáp QPA. Kết quả cho thấy đáp ứng độ võng cáp theo ICSPA có độ chính xác cao hơn phương pháp CSPA, tiệm cận các giá trị của giải thuật vùng tin cậy TRDA. Đặc biệt ICSPA có dạng liên tục và đồng dạng với TRDA hơn CSPA, với độ võng cáp dao động từ 0.0mm đến 0.6mm cho thấy độ chính xác của phương pháp ICSPA được cải thiện đáng kể. Để kiểm nghiệm khả năng tính toán của giải thuật ICSPA với các cấu hình CDPR và giải thuật phân bố lực căng khác nhau, ICSPA được sử dụng để tính độ võng cáp của CDPR có kích thước lớn 16×16×8m, với bộ di động có khối lượng 80kg và kích thước là 1x1x1m, quỹ đạo thiết kế là một hình tròn có đường kính lớn đến 5m ở cao độ $z = 2\text{m}$ với góc nghiêng theo trục x là 5 độ, kết quả tính toán cho thấy, giá trị độ võng cáp

tính bằng ICSPA bám rất tốt các giá trị độ võng cấp tính bởi giải thuật vùng tin cậy, các giá trị độ võng cấp tính toán dao động trong khoảng từ 1mm đến 16mm, điều này cũng cho thấy khi cáp có độ dài lớn, sự ảnh hưởng của chiều dài cáp đến độ võng cấp tăng lên rất nhiều, cụ thể với cáp có chiều dài 15m và lực căng cáp 140N thì độ võng cấp lên đến 15mm, nếu chiều dài cáp là 10m và lực căng cáp khoảng 250N thì độ võng cấp khoảng 2mm. Điều này cho thấy tính phi tuyến của mô hình tính toán độ võng cấp với phương trình cấp xích của Irvine theo lực căng cáp, chiều dài cáp và vị trí cáp trong không gian, do đó phương pháp dự đoán ICSPA cho kết quả tính toán rất tốt, phù hợp cho việc ứng dụng để dự đoán độ võng của cáp truyền động cho các CDPDR có kích thước lớn



Hình 4.27: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm

Bảng 4.8: So sánh đặc tính của 3 giải thuật tính toán độ võng cấp

Các tiêu chí đánh giá	TRDA	CSPA	ICSPA
Thời gian tính toán	Trung bình	Tốt	Tốt
Liên tục theo quỹ đạo điều khiển	Tốt	Tốt	Rất tốt
Độ chính xác tính toán	Tốt	Khá tốt	Tốt
Đáp ứng với các giải thuật phân bố lực căng cáp	Tất cả	Theo từng giải thuật cho trước	Tất cả

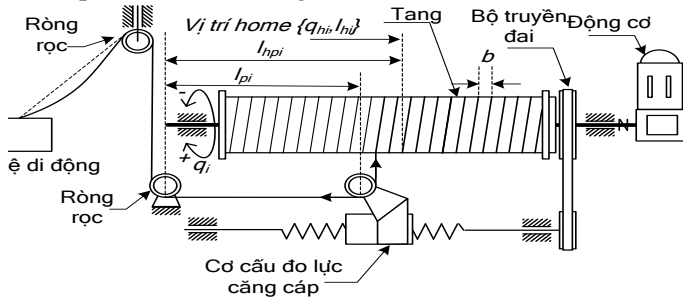
Khả năng áp dụng cho các cấu hình CDPR khác nhau	Tất cả	Theo từng cấu hình cho trước	Tất cả
--	--------	------------------------------	--------

Bảng 4.8 so sánh tổng quát các chỉ tiêu thiết kế như thời gian tính toán, sự liên tục theo quỹ đạo điều khiển, đáp ứng với các giải thuật phân bố lực căng cáp và độ chính xác dự đoán với các cấu hình CDPR khác nhau. Kết quả cho thấy giải thuật TRDA có thời gian tính toán trung bình, dạng độ võng cáp tính toán liên tục theo quỹ đạo điều khiển, giải thuật này có thể đáp ứng tất cả các giải pháp phân bố lực căng cũng như bất kỳ cấu hình CDPR nào, tuy nhiên thời gian tính toán chậm là một trở ngại cho các ứng dụng cần đáp ứng nhanh trong thời gian thực. Giải thuật CSPA có thời gian tính toán nhanh nhất, nhưng phụ thuộc vào một giải pháp phân bố lực căng cụ thể và một cấu hình CDPR cho trước, điều này gây khó khăn khi thay đổi cấu hình CDPR cũng như giải pháp phân bố lực căng theo yêu cầu thực tế. Giải thuật ICSPA có thời gian tính toán lớn hơn CSPA do phải giải bài toán động học và phân bố lực căng cáp, tuy nhiên thời gian tính toán giảm vẫn giảm hơn 99% so với TRDA và giải thuật này có thể đáp ứng cho các cấu hình CDPR, giải thuật phân bố lực căng cáp khác nhau với các điều kiện biên về kích thước CDPR, giới hạn lực căng cáp và một khoảng đường kính cáp cho trước, mặc khác ICSPA cho giá trị dự đoán chính xác và liên tục với sai số bình phương trung bình dưới 0.1mm nhỏ hơn CSPA với sai số bình phương trung bình dưới 0.3mm trong cùng một điều kiện tính toán đầu vào. Như vậy, kết quả tính toán mô phỏng cho thấy sự phù hợp của 2 mô hình CSPA và ICSPA dựa trên ANFIS được xây dựng để tính toán độ võng cáp cho bài toán động học nghịch của CDPR, với ưu điểm là thời gian tính toán nhanh, 2 mô hình này có tiềm năng ứng dụng cho các tác vụ cần điều khiển CDPR với vận tốc cao. Trong đó, đáng chú ý là ICSPA có khả năng triển khai dễ dàng cho các CDPR kích thước lớn với chiều dài cáp truyền động lên đến 20m cho các yêu cầu điều khiển khác nhau. Kết quả này sẽ được tích hợp vào bộ điều khiển và thực nghiệm trên CDPR kích thước lớn ở chương 5.

CHƯƠNG 5: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

5.4 Tích hợp bài toán động học nghịch với độ võng cáp vào BDK vị trí

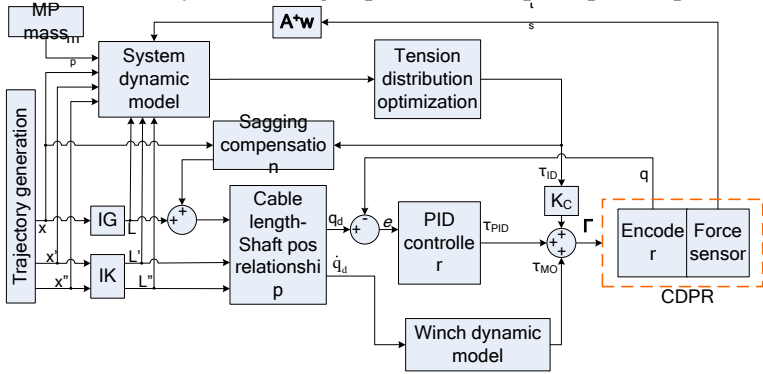
Sơ đồ truyền động của các bộ phân phối cáp được trình bày trên **hình 5.1**. Cấu trúc của mô hình điều khiển của một cơ cấu phân phối cáp (được xem như 1 khớp) được miêu tả trên **hình 5.6**, cấu hình này được xây dựng trên các bài toán động học và động lực học bao gồm bài toán phân bố lực căng và tính toán độ võng cáp. Khối động lực học được sử dụng để tính toán tính hiệu điều khiển nhiều sớm (feedforward) cho bộ điều khiển do lực kéo và lực ma sát tác dụng lên từng trục động cơ [134-135]. Khối động lực hệ thống dựa trên phương trình 3.20, trong đó phân bố lực căng cáp τ_{ID} thu được từ giải thuật trong chương 5, kết hợp với mô hình động lực học 3.20 và 5.12.



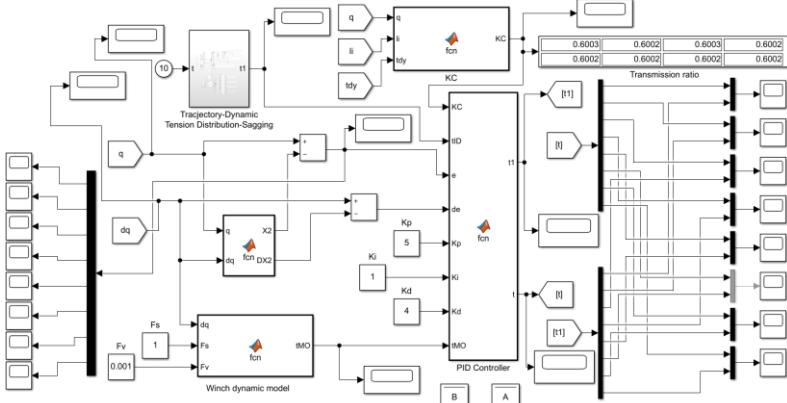
Hình 5.1: Sơ đồ truyền động của robot cáp và bộ phân phối cáp

Hình 5.7 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 5.12 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 5.13 và 5.14. 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) CDPR là các thành phần trong bài toán động lực học CDPR. 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 5.6: Cấu trúc mô hình điều khiển cơ cấu phân phối cáp



Hình 5.7: Cấu trúc mô hình điều khiển CDPR

5.5 Thực nghiệm và đánh giá

Hình 5.10 là CDPR thực nghiệm 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 5.14** 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 5.15** 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.



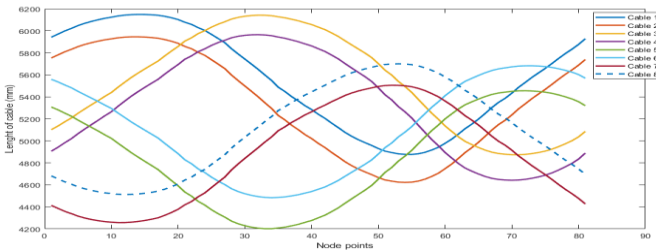
Hình 5.10: CDPR được phát triển cho thực nghiệm

Lực căng cáp được đo dọc theo quỹ đạo hình tròn từ các cảm biến lực gắn trên các bộ phận phối cáp, các lực căng cáp thay đổi trong khoảng từ 50N đến 300N, dạng của lực căng cáp liên tục theo quỹ đạo khớp, 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 căng trong giới hạn cho 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 800N, trong khi lực căng cáp dao động từ 50N-300N.

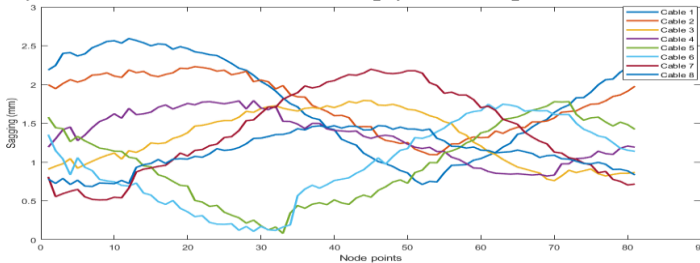


Hình 5.14: Kiểm tra độ chính xác với quỹ đạo hình tròn



Hình 5.15: Giá trị các biến khớp phản hồi theo nội suy đường tròn

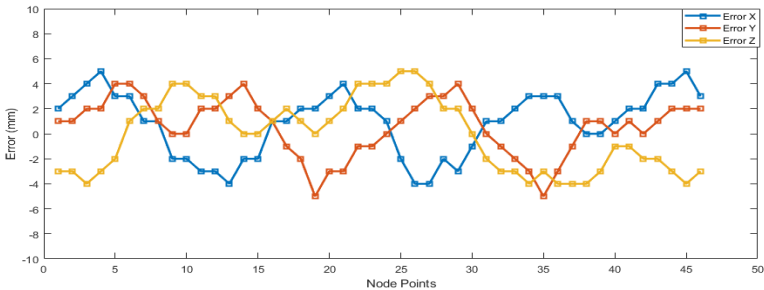
Hình 5.18 biểu diễn các giá trị bù độ võng cáp theo quỹ đạo hình tròn, kết quả này hoàn toàn phù hợp với mô hình tính toán đã mô phỏng, trong đó, mối liên hệ giữa lực căng cáp, chiều dài cáp và độ võng cáp được đảm bảo. Độ võng cáp thay đổi từ 0mm đến 3mm theo quỹ đạo khớp.



Hình 5.18: Giá trị bù độ võng cáp theo nội suy đường tròn

Hình 5.20 là sai số vị trí trong trường hợp có tính đến độ võng cáp dao động trong khoảng $\pm 5\text{mm}$ so với trong trường hợp không tính đến độ võng cáp là $\pm 8\text{mm}$, 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 5.20: Kết quả đo độ chính xác vị trí có bù độ võng cáp

Kết quả thực nghiệm đo vị trí trong không gian và độ song phẳng với độ võng cáp cũng cho kết quả tương tự, trong đó đáp ứng song phẳng là rất tốt với sai số nhỏ hơn $\pm 0.8^0$ so với trường hợp không có bù độ võng cáp là $\pm 2,2^0$. Kết quả thực nghiệm mô phỏng chuyển động thực tế ảo cũng cho kết quả khả quan, 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.

CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN

6.1 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 với hai phương pháp số và phương pháp dự đoán đã được áp dụng để tính toán bài toán tính độ võng của cáp, qua đó cải thiện thời gian tính toán và độ chính xác của bài toán động học nghịch. 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 QPA với phân bố lực căng liên tục và chọn được xu hướng phân bố đã được xây dựng và thử nghiệm với các điều kiện ràng buộc về động học và giới hạn lực căng cáp. Mô hình ANFIS đã được sử dụng để xây dựng 2 giải thuật dự đoán độ võng cáp CSPA dựa trên cấu trúc động học của một CDPR thừa ràng buộc 6 bậc tự do và 8 cấp truyền động và ICSPA cho các cấu hình CDPR khác nhau. 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, QPA và FCDF) cũng được tính đến khi tạo dữ liệu đầu vào cho việc xây dựng mô hình CSPA - ANFIS. Trong khi đó, ICSPA sử dụng các đầu vào là tọa độ cáp chuyển đổi từ vị trí đầu công tác, lực căng cáp và thông số của cáp cho một giải pháp tổng quát và chính xác hơn, trong khi vẫn đảm bảo về thời gian tính toán. Kết quả tính toán mô phỏng cho thấy thời gian tính toán của giải thuật CSPA bằng 0.08% (giảm 99.92%) và thời gian tính toán của giải thuật ICSPA bằng 0.6% (giảm 99.4%) so với phương pháp số TRDA. Về độ chính xác tính toán so với phương pháp số, ICSPA cho giá trị dự đoán chính xác và liên tục với sai số bình phương trung bình dưới 0.1mm nhỏ hơn CSPA có sai số bình phương trung bình dưới 0.3mm trong cùng một điều kiện tính toán đầu vào. Kết quả thực nghiệm trên CDPR với bài toán động học nghịch có tính đến độ võng cáp cho thấy, độ chính xác vị trí có cải thiện hơn 50% ở mức ± 4 mm trong các thực nghiệm quỹ đạo và vị trí trong không gian, trong khi độ chính xác về hướng hay độ song phẳng có sai số nhỏ hơn 1° , điều này cho thấy mô hình tính toán độ võng cáp cho kết quả phù hợp với kết quả mô phỏng.

Dựa vào kết quả nghiên cứu và thực nghiệm các 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 hai, độ võng cáp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác vị trí của CDPR; thứ ba, độ võng cáp và lực căng cáp có mối liên hệ chặt chẽ, độ chính xác của mô hình dự đoán độ võng cáp CSPA có phụ thuộc

vào phương pháp phân bố lực căng cáp và cấu hình CDPR, trong khi ICSPA không ràng buộc về cấu hình và phương pháp tính lực căng cáp; thứ 4, các kết quả tính toán được sử dụng để tích hợp vào bộ điều khiển có bù độ võng cáp cho CDPR dạng thừa ràng buộc 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 dây cáp. Kết quả đã được thực nghiệm trên một CDPR 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 rõ rệt khi áp dụng giải thuật tính toán bài toán động học nghịch với bộ bù độ võng cáp. Kết quả này mở ra một hướng nghiên 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. Trong đó 3 giải thuật tính toán độ võng cáp dựa trên phương trình võng cáp Irvine là TRDA, CSPA và ICSPA cho thấy một hướng nghiên cứu sử dụng các kỹ thuật tính toán mềm để phát triển các giải thuật tính toán bài toán động học có tính đến độ võng cáp với độ chính xác và độ liên tục cao cho các CDPR kích thước và tải trọng lớn hơn.

9.2 Các vấn đề còn tồn tại

Giải thuật tính toán độ võng cáp CSPA 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. Giải thuật tính toán độ võng cáp ICSPA đã giải quyết được hạn chế của CSPA với việc tổng quát hóa các điều kiện đầu vào theo mô hình cáp xích ở chương 4, 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 cáp dựa vào mô hình ANFIS hoặc các mô hình tính toán mềm khác sẽ được hiệu chỉnh và áp dụng để tính toán độ võng của dây cáp truyền động và thực nghiệm cho các cấu hình CDPR có kích thước và tải trọng lớn hơn.

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] Tuong, Phuoc Tho, and Nguyen Luan Vu Truong. "Thiết Kế và Tính Toán Hệ Thống Phân Phối Cấp cho CDPR." *Journal of Technical Education Science* 19, no. SI01 (2024): 64-71.