

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

TƯỜNG PHƯỚC THỌ

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 8/2024

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

TƯỜNG PHƯỚC THỌ

NGHIÊN CỨU, PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ VĨNG
CẤP ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC VỊ TRÍ CỦA CDPR
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ - 9520103

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

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

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 8/2024

QUYẾT ĐỊNH

Về việc đổi tên luận án tiến sĩ

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30/6/2017 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt đề án thí điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 99/NQ-HĐT ngày 21 tháng 10 năm 2022 của Hội đồng trường về công tác cán bộ lãnh đạo Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 118/NQ-HĐT ngày 27/01/2023 của Hội đồng trường sửa đổi, bổ sung Quy chế tổ chức và hoạt động của trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04 tháng 4 năm 2017 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Quyết định số 1557/QĐ-ĐHSPKT ngày 30/8/2017 của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh về việc ban hành Quy định đào tạo tiến sĩ của trường đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Theo đề nghị của của NCS, Khoa quản ngành và Trường phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Đổi tên luận án tiến sĩ cho:

Nghiên cứu sinh : **Tường Phước Thọ**

Ngành : Kỹ thuật cơ khí

Khoá: 2021 – 2024

Tên luận án mới : **Nghiên cứu, phân tích và đánh giá ảnh hưởng của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDP**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS.TS. Nguyễn Trường Thịnh**

Người HD thứ hai : **PGS.TS Trương Nguyễn Luân Vũ**

Thời gian thực hiện : **01/9/2021 đến ngày 01/9/2024**

Điều 2. Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo và Nhà trường đã ban hành.

Điều 3. Trường các đơn vị: phòng Đào tạo, khoa/viện quản ngành, phòng KHTC và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Nơi nhận:

- BGH (để chỉ đạo);
- Như điều 3;
- Lưu: VT, ĐT (5b).



**KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG**

PGS.TS. Lê Hiếu Giang

LÝ LỊCH KHOA HỌC

I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC:

Họ & tên: Trương Phước Thọ

Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 02/07/1982

Nơi sinh: Bến Tre

Quê quán: Bến Tre

Dân tộc: Kinh

Địa chỉ liên lạc: 31/1 Đường 18, P. Long Thạnh Mỹ, TP. Thủ Đức, TP. HCM

Điện thoại: 0909160264

E-mail: tho_tp@hcmute.edu.vn

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO:

1. Đại học:

Hệ đào tạo: Chính quy; Thời gian đào tạo từ: 2001-2006

Nơi học: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

Ngành học: Cơ Điện tử

Tên đề án: Thiết kế và chế tạo hệ thống chiết rót tự động sản phẩm dạng ly

Ngày & nơi bảo vệ đề án: Năm 2006 - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM

2. Cao học:

Hệ đào tạo: Chính quy; Thời gian đào tạo từ: 2008-2011

Nơi học: Trường Đại học Bách khoa TP. HCM

Ngành học: Công nghệ Chế tạo máy

Tên đề án: Thiết kế và chế tạo robot dạng người hỗ trợ điều khiển giao thông và cảnh báo ở công trường xây dựng.

Ngày & nơi bảo vệ LV: Năm 2010 - Trường Đại học Bách khoa TP. HCM

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN TỪ KHI TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
4/2006 – 4/2007	CT TNHH Mạnh Đức	Kỹ sư dịch vụ
4/2007 - Nay	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM	Giảng viên

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày tháng năm 2024

Nghiên cứu sinh

TUỶNG PHƯỚC THỌ

LỜI CẢM TẠ

Chân thành cảm ơn PGS.TS Nguyễn Trường Thịnh và PGS.TS Trương Nguyễn Luân Vũ đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu thực hiện luận án này.

Chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, Bộ phận quản lý Sau Đại học - Phòng Đào tạo, Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Bộ môn Cơ Điện tử - Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án này. Chân thành cảm ơn những đóng góp của Quý Thầy giáo, Cô giáo giảng dạy các học phần trong chương trình đào tạo Nghiên cứu sinh đã giúp tôi hoàn thiện và hoàn thành nhiệm vụ nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh

TUỶNG PHƯỚC THỌ

TÓM TẮT

Robot cấu trúc song song truyền động bằng dây cáp (Cable Driven Parallel Robot – CDPR) là một loại robot có cấu tạo bao gồm một bộ di động được kết nối với khung cố định bằng các dây cáp có chiều dài được điều khiển bởi các bộ phân phối cáp (tời) hoặc các dạng khác. Trong đó, dây cáp truyền động thường được lưu trữ và điều khiển bởi các bộ tời phân phối cáp đặt trên khung cố định, các dây cáp được nối với bộ di động thông qua các điểm mắc cáp và các pulley dẫn hướng. Với cấu trúc đặc biệt cũng như các ưu điểm về kích thước lớn, độ chính xác cao, khối lượng cơ cấu chấp hành nhỏ, lực quán tính nhỏ, giá thành chế tạo thấp, các CDPR thường được thiết kế và áp dụng cho các nhiệm vụ đầy thách thức, đòi hỏi không gian hoạt động lớn, tải trọng lớn, tốc độ cao. Trong những năm gần đây, các nghiên cứu, tính toán, thiết kế, và triển khai CDPR đang được đẩy mạnh, trong đó, nhiều nghiên cứu về CDPR tập trung vào bài toán tối ưu cấu hình, xác định không gian hoạt động, tối ưu phân phối lực căng cáp, tính toán độ võng cáp, xây dựng 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, các bài toán động học, cân bằng lực, động lực học, không gian hoạt động và điều khiển bị ảnh hưởng bởi các thành phần phức tạp trong quá trình thiết kế và tính toán.

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 luận án 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 các công trình liên quan hướng nghiên cứu, phân tích các vấn đề còn tồn tại, xây dựng các bài toán động học nghịch, động học vận tốc, động lực học và cân bằng lực. Dựa vào các mô hình toán của CDPR, xây dựng giải thuật tính toán không gian hoạt động, phân tích thiết kế tối ưu kết cấu, xác định giới hạn lực căng cho CDPR với các điều kiện biên cụ thể.

- 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, trong đó tích hợp bài toán phân phối lực căng cáp và giải thuật tính toán độ võng cáp mới.
- Thực nghiệm các kết quả tính toán trên CDPR, thu thập và đánh giá kết quả. Phân tích, đánh giá tác động của lực căng cáp và độ võng cáp đến độ chính xác của CDPR.

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 phối lực căng cáp, do một trong những thành phần chính quyết định đến kết quả tính toán độ võng cáp là 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 phối 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.

ABSTRACT

Cable Driven Parallel Robot (CDPR) is a type of robot consisting of a moving platform connected to cables with length controlled by a winch or other mechanism. The transmission cables are usually stored and distributed by the cable distribution winches placed on the based frame, and the cables are connected to the moving platform through cable points and guide pulleys. CDPRs are larger, cheaper and easier to build than conventional robots. In addition, due to the wide range of operations and cable feasibility, CDPRs can be applied in challenging tasks that require large accessible workspaces and high payloads. The problem of researching, designing, calculating and controlling CDPRs have been promoted in recent years, many researchs on CDPRs focusing on structure optimization, workspace, cable tension distribution, cable sagging calculation, controller design and trajectory planning. CDPR has a complex structure and constraints due to the unidirectional nature of the driven cable making the design, calculation, and implementation of CDPR applications is a big challenge, wherein, the CDPR kinematics, dynamics, and control problems are affected by complex components caused by design and calculation problems.

Through the synthesis and analysis of related studies, the proposed goal of the project is to study, analyze, and evaluate the impact of cable sagging on the position accuracy of parallel configuration cable robots. The main results and the contributions of the thesis are summarized as follows:

- Overview of research problems, remaining issues, and building problems of position kinematics, velocity kinematics, dynamics, and force equilibrium. Based on the theoretical basis of the basic problems of cable robots, building a method to determine the workspace, and optimal design of the cable robot structure.
- Design cable tension and cable sagging calculation algorithms, including TRDA cable sagging calculation algorithm based on trusted region algorithm, CSPA and ICSPA cable sagging prediction algorithm based on ANFIS. These

algorithms are simulated and given appropriate results, from which, an algorithm for calculating the inverse kinematics problem for over constrained CDPR is designed, which integrates the problem of cable tension distribution and new cable sagging calculation algorithm.

- Experiment with CDPR calculation results, collect and evaluate the results. Analyze and evaluate the impact of cable tension and cable sagging on the accuracy of CDPR.

Research results show that cable sagging directly affects the accuracy of CDPR. The calculation model was successfully built on the basis of analyzing components affecting cable sagging, such as CDPR configuration, cable materials, load, and especially cable tension distribution algorithms, because cable tension is the main component that determines the result of cable deflection calculation. Experimental results show that the cable sagging and cable tension calculation model has improved the accuracy of CDPR in the position control problem. The model has also been used to design the trajectory for real-time control applications, and the experimental results show that the system response is suitable for applications requiring high speed and load. This research result can be extended in many different directions, such as building new models to optimize the workspace, determine the cable tension distribution, calculate the cable sagging, thereby simplifying the computation process, and making it easy to deploy complex CDPR configurations with low fees.

MỤC LỤC

Trang tựa	
Quyết định giao đề tài	
LÝ LỊCH KHOA HỌC	i
LỜI CAM ĐOAN	ii
LỜI CẢM ƠN.....	iii
TÓM TẮT	iv
ABSTRACT	vi
MỤC LỤC.....	viii
Danh mục chữ viết tắt	xii
Ký hiệu	xiii
Danh sách các hình.....	xv
Danh sách các bảng	xix
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU	1
1.1 Đặt vấn đề	1
1.2 Đối tượng nghiên cứu	6
1.3 Mục tiêu nghiên cứu	6
1.4 Nhiệm vụ nghiên cứu.....	7
1.5 Phương pháp nghiên cứu	7
1.6 Phạm vi nghiên cứu	7
1.7 Đóng góp của luận án	8
1.8 Bố cục của luận án	8
CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VỀ ROBOT SONG SONG TRUYỀN ĐỘNG BẰNG CẤP	10
2.1 Giới thiệu	10

2.2 Các cấu trúc cơ bản CDPR	10
2.3 Các nghiên cứu về CDPR	13
2.4 Không gian hoạt động và thiết kế	15
2.5 Phân phối lực căng cáp	23
2.6 Tính toán độ võng cáp	31
2.7 Kết luận.....	36
CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT CDPR.....	39
3.1 Giới thiệu	39
3.2 Động học vị trí CDPR.....	39
3.3 Bài toán vận tốc CDPR.....	41
3.4 Hệ phương trình cân bằng	43
3.5 Động lực học CDPR	44
3.6 Bài toán xác định không gian hoạt động của CDPR	46
3.6.1 Cơ sở tính toán	46
3.6.2 Mô phỏng kết quả tính toán.....	48
3.7 Giải thuật đối ngẫu – Dual Simplex	52
3.8 Giải thuật vùng tin cậy [128]:.....	53
3.9 Kết luận.....	58
CHƯƠNG 4: THIẾT KẾ GIẢI THUẬT TÍNH TOÁN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH VỚI LỰC CĂNG CÁP VÀ ĐỘ VÕNG CÁP.....	59
4.1 Giới thiệu	59
4.2 Xác định phân phối lực căng cáp.....	60
4.2.1 Thuật toán đơn giản kép - Dual Simplex Algorithm (DSA) cho bài toán tối ưu hóa tuyến tính (Quy hoạch tuyến tính).	62
4.2.2 Phân phối lực căng cáp với thuật toán tối ưu hóa bậc 2 (Quy hoạch bậc 2 - Quy hoạch toàn phương) - Quadratic programming - QPA [78-79].....	64

4.2.3 Giải thuật tính toán phân phối lực căng cáp dạng đóng - Forces Distribution in Closed-Form (FDCF) [70-71].....	71
4.2.4 Kết quả và thảo luận.....	72
4.3 Bài toán động học nghịch với độ võng cáp dựa vào phương trình cáp xích Catenary equation – Irvine.....	77
4.3.1 Mô hình cáp xích Catenary equation – Irvine [91]	78
4.3.2 Tính toán độ võng cáp bằng giải thuật vùng tin cậy	81
4.4 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS	86
4.4.1 ANFIS	88
4.4.2 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS [124]	90
4.4.3 Mô phỏng kết quả tính toán.....	92
4.4.4 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS cải tiến – ICSPA.....	100
4.5 Kết luận.....	108
CHƯƠNG 5: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ.....	110
5.1 Giới thiệu	110
5.2 Mô hình truyền động của CDPR	110
5.3 Tính toán chiều dài cáp do biến dạng của hệ thống phân phối cáp	111
5.4 Tích hợp bài toán động học nghịch với độ võng cáp vào bộ điều khiển vị trí	114
5.5 Thực nghiệm và đánh giá.....	120
5.5.1 Tổng quát về CDPR thực nghiệm	121
5.5.2 Thiết lập thực nghiệm.....	123
5.5.3 Thực nghiệm độ chính xác vị trí theo quỹ đạo.....	124
5.5.4 Thực nghiệm đo vị trí trong không gian và độ song phẳng	128
5.5.5 Thực nghiệm vận hành tốc độ cao cho ứng dụng mô phỏng chuyển động	134

5.6 Kết luận.....	138
CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN	140
6.1 Kết quả nghiên cứu của đề tài.....	140
6.2 Các đóng góp về mặt khoa học	142
6.3 Phạm vi ứng dụng của nghiên cứu.....	142
6.4 Các vấn đề còn tồn tại.....	143
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	144
CÁC BÀI BÁO KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	160
Phụ lục 1	164

Danh mục chữ viết tắt

CDPR – Cable Driven Paralell Robot
ANFIS - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
DSA – Dual Simplex Algorithm
QPA – Quadratic Programming Algorithm
FCDF - Force Distribution in Closed Form
TRDA - Trust-Region-Dogleg Algorithm
CSPA – Cable Sagging Prediction Algorithm based on ANFIS
ICSCA – Improved Cable Sagging Prediction Algorithm based on ANFIS
SI – Scatter Index
RMSE – Root-Mean-Square Error
CC – Correlation Coefficient
DOF – Defree of Freedom
DOR – Defree of Redudancy
MP – Moving Platform
WCW - Wrench Closure Workspace
FCW - Force Closure Workspace
FFW - Force Feasible Workspace
WFW - Wrench Feasible Workspace
StW - Static Workspace
CW - Controllable workspace
SP-CDPR – Suspended Cable Driven Paralell Robot
PM-CDPR – Pointmass Cable Driven Paralell Robot
PL-CDPR – Planar Cable Driven Paralell Robot
FC-CDPR – Fully Constrained Cable Driven Paralell Robot
OC-CDPR – Over Constrained Cable Driven Paralell Robot
UC-CDPR – Under-constrained Cable Driven Paralell Robot
SCT – Soft Computing Techniques
FIS - fuzzy inference system

Ký hiệu

Trong luận văn này, một véc tơ được ký hiệu là chữ cái viết thường in đậm (ví dụ \mathbf{f}) hoặc chữ hoa in nghiêng (ví dụ F). Một ma trận được biểu diễn bởi chữ hoa in đậm (Ví dụ \mathbf{F}).

\mathbf{x}	véc tơ biểu diễn hướng và vị trí
\mathbf{l}_i	véc tơ biểu diễn biến khớp dây cáp
$\ \mathbf{l}_i\ $	chuẩn 2 véc tơ \mathbf{l}_i
\mathbf{r}	biểu diễn tọa độ gốc P của hệ trục E trong hệ trục B
α, β, γ	là các góc chỉ phương của hệ trục E trong hệ trục B
\mathbf{b}_i	tọa độ của các điểm mắc cáp di động B_i trong hệ trục E
\mathbf{a}_i	tọa độ của các điểm mắc cáp cố định A_i trong hệ trục B
\mathbf{u}_i	véc tơ đơn vị biểu diễn hướng của dây cáp thứ i
\mathbf{R}	ma trận biểu diễn hướng của hệ trục E trong hệ trục B
$\dot{\mathbf{r}}$	vận tốc dài của tâm bộ di động Op trong hệ trục B
$\boldsymbol{\omega}$	là vận tốc góc của MP theo 3 trục x, y và z của hệ trục B
$\boldsymbol{\omega}_r$	là vi phân các góc quay của MP theo 3 trục x, y và z hệ trục B
\mathbf{v}	véc tơ vận tốc của MP
$\dot{\mathbf{l}}$	véc tơ vận tốc khớp (vận tốc dài các dây cáp truyền động)
\mathbf{J}	là ma trận Jacobian
\mathbf{J}_r	ma trận Jacobian xoay
\mathbf{f}_p	véc tơ lực do ngoại lực tác dụng lên MP
\mathbf{m}_p	véc tơ mômen do ngoại lực tác dụng lên MP
$\boldsymbol{\tau}_i$	véc tơ lực căng cáp mà mỗi cáp tác dụng lên bộ di động
$\mathbf{A} = \mathbf{J}^T$	Ma trận cấu trúc của CDPR ($m \times n$)
\mathbf{w}_p	véc tơ lực và mô men tác động lên tâm của MP ($m \times 1$)
\mathbf{I}	ma trận quán tính của MP trong hệ trục B
\mathbf{C}	ma trận biểu diễn thành phần lực ly tâm và Coriolis
\mathbf{w}_g	véc tơ trọng lực
\mathbf{G}_p	véc tơ vị trí trọng tâm \mathbf{G} của MP trong hệ trục E
$\mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p$	ma trận đường chéo đối xứng (skew-symmetric matrix) liên quan đến động lượng thứ nhất $\mathbf{M}\mathbf{G}_p$ của MP trong hệ trục E
\mathbf{I}_p	ma trận tensor quán tính của bộ di động
\mathbf{I}_g	tensor quán tính của MP

τ_{\min}	giới hạn dưới của lực căng cáp
τ_{\max}	giới hạn trên của lực căng cáp
\mathbf{c}	là ma trận hệ số hàm mục tiêu
τ^*	giải pháp cực tiểu hóa hàm mục tiêu
E	là modul đàn hồi dây cáp
A	là tiết diện dây cáp
ΔL	Độ biến dạng của dây cáp
ρ_L	khối lượng riêng trên một đơn vị chiều dài của vật liệu làm cáp
τ_x	lực căng cáp theo phương x tại điểm G trên dây cáp
τ_z	lực căng cáp theo phương z tại điểm G trên dây cáp
τ_s	lực căng cáp tại điểm G trên dây cáp
L_S	chiều dài không chịu lực (Euclidean norm)
L	là chiều dài dây cáp (thực tế) giữa B và M
(x_m, z_m)	tọa độ của cáp tại điểm mắc cáp bộ di động trong hệ trục local
l_i	chiều dài không quán trên tang của cáp thứ i
l_{hi}	chiều dài cáp tại vị trí Home
k_{mi}	tỷ số truyền hộp giảm tốc từ động cơ đến trang trống
d_{bi}	đường kính bước trống của tời thứ i
q_i	góc quay của động cơ, với $i = 1, \dots, m$
q_{hi}	góc quay động cơ tại vị trí ban đầu (Home pose)
b	chiều rộng của mỗi rãnh trên tang cuộn cáp (mm)
$\Delta l_{c,i}$	độ giãn dài của cáp thứ i
Δl_i	độ dài bù của cáp do tính đàn hồi của cáp và bộ truyền động
l_{cpi}	chiều dài cáp có tính đến bù puli
l_{oi}	chiều dài lý thuyết không quán trên tang của cáp thứ i
$c_{c,i}$	độ cứng của cáp truyền động
ζ_i	góc quán của cáp trên puli thứ i
$\mathbf{\Gamma}_m$	véc tơ mômen của động cơ truyền động
\mathbf{I}_q	ma trận biểu diễn quán tính của động cơ, tang quán cáp và các bộ phận quay khác
\mathbf{F}_v	ma trận đường chéo của hệ số ma sát nhớt
\mathbf{F}_s	ma trận đường chéo của hệ số ma sát khô
\mathbf{K}_C	ma trận hệ số truyền động bao gồm tỷ số truyền hộp giảm tốc, đường kính tang và bước trống

Danh sách các hình

Hình 1.1: Bộ điều khiển vị trí và các thông số ảnh hưởng đến sai số vị trí CDPR.....	4
Hình 1.2: Thiết kế bộ tời phân phối cáp.....	5
Hình 2.1: CDPR cấu hình song song	11
Hình 3.1: Một loại CDPR [49].....	39
Hình 3.2: Sơ đồ động học vị trí của CDPR.....	40
Hình 3.3: Sơ đồ các lực tác dụng lên bộ di động	43
Hình 3.4: CDPR dạng treo (6 bậc tự do; 8 cables).....	49
Hình 3.5: Không gian hoạt động của CDPR dạng treo theo tải trọng	50
Hình 3.6: Cấu hình OC-CDPR (6 DOF; 8 cables).....	50
Hình 3.7: Không gian hoạt động của CDPR dạng treo với tải trọng 80kg và các giới hạn lực căng cáp khác nhau	51
Hình 4.1: Bài toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp.....	59
Hình 4.2: Cấu hình CDPR phẳng	68
Hình 4.3: Quỹ đạo xoắn ốc tính toán	69
Hình 4.4: Phân phối lực căng cáp	69
Hình 4.5: Ngoại lực tác động	70
Hình 4.6: Kết quả các biến bù.....	70
Hình 4.7: Cấu hình CDPR mô phỏng và quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm...	73
Hình 4.8: Kết quả tính toán lực căng quỹ đạo hình tròn	74
Hình 4.9: Kết quả tính toán lực căng quỹ đạo đường thẳng	75
Hình 4.10: Mô hình cáp võng giữa 2 điểm	78
Hình 4.11: Đáp ứng 8 cáp truyền động cho nội suy đường tròn $r = 0.8m$	82
Hình 4.12: Độ võng, lực căng và chiều dài của cáp khi nội suy đường tròn với phân phối lực căng theo tối ưu hóa bậc 1 DSA	84

Hình 4.13: Độ võng, lực căng và chiều dài của cáp khi nội suy đường tròn với phân phối lực căng theo tối ưu hóa bậc 2 QPA	85
Hình 4.14: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp	91
Hình 4.15: Mô hình tính toán sai số độ võng cáp giữa phương pháp số và ANFIS	92
Hình 4.16: So sánh độ võng của cáp 1 được tính bởi ANFIS và TRDA	93
Hình 4.17: So sánh độ võng của cáp số 4 được tính bởi CSPA và TRDA	95
Hình 4.18: Quỹ đạo và đáp ứng khớp của đường tròn $r = 1000$ (mm), $z = 1000$ m ..	96
Hình 4.19: Quỹ đạo và phản ứng khớp của hình vuông góc 1600mm, $z = 1050$ mm	96
Hình 4.20: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-DSA	97
Hình 4.21: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-QPA	98
Hình 4.22: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình vuông cạnh 1600mm-DSA	98
Hình 4.23: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình vuông cạnh 1600mm-QPA	99
Hình 4.24: Bài toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp với giải thuật xác định độ võng cáp ICSPA	100
Hình 4.25: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp	102
Hình 4.26: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm	103
Hình 4.27: Cấu hình CDPR kích thước lớn thực hiện quỹ đạo đường tròn.....	103
Hình 4.28: Đáp ứng khớp và phân phối lực căng CDPR với quỹ đạo đường tròn ..	104
Hình 4.29: Độ võng 8 CDPR kích thước lớn với quỹ đạo đường tròn	106
Hình 5.1: Sơ đồ truyền động của CDPR và bộ phân phối cáp.....	110
Hình 5.2: Mô hình đàn hồi của hệ thống phân phối cáp	112
Hình 5.3: Mô hình đàn hồi của thiết bị đo lực căng cáp	112
Hình 5.4: Mô hình tính toán ảnh hưởng pully truyền động	114
Hình 5.5: Mẫu CDPR được chế tạo	115
Hình 5.6: Cấu trúc mô hình điều khiển cơ cấu phân phối cáp	116

Hình 5.7: Cấu trúc mô hình điều khiển CDPR	117
Hình 5.8: Khối Quỹ đạo – Động lực học – Phân phối lực căng cáp- Tính toán độ võng cáp (Trajectory-Dynamic-Tension Distribution - Sagging).....	118
Hình 5.9: Các đường đi của Robot.....	120
Hình 5.10: CDPR được chế tạo cho thực nghiệm.....	121
Hình 5.11: Bộ di động và khối bê tông tải	122
Hình 5.12: Cơ cấu phân phối cáp truyền động.....	122
Hình 5.13: Thiết lập vị trí ban đầu	123
Hình 5.14: Kiểm tra độ chính xác vị trí với quỹ đạo hình tròn đường kính 1.6m ..	124
Hình 5.15: Kiểm tra độ chính xác với quỹ đạo hình tròn đường kính 1.6m với 2 trường hợp	125
Hình 5.16: Giá trị các biến khớp phản hồi về BDK theo quỹ đạo đường tròn	126
Hình 5.17: Giá trị các lực căng cáp phản hồi về BDK theo nội suy đường tròn	126
Hình 5.18: Giá trị bù độ võng cáp theo nội suy đường tròn	127
Hình 5.19: Kết quả đo độ chính xác vị trí không bù độ võng cáp	128
Hình 5.20: Kết quả đo độ chính xác vị trí có bù độ võng cáp	128
Hình 5.21: Thiết bị đo góc và xác định vị trí bằng laser.....	130
Hình 5.22: Bố trí thiết bị đo góc và laser	130
Hình 5.23: Sai số vị trí trường hợp không bù độ võng cáp.....	132
Hình 5.24: Sai số vị trí trường hợp có bù độ võng cáp	132
Hình 5.25: Lực căng cáp dọc theo quỹ đạo điễm.....	133
Hình 5.26: Cấu hình CDPR cho ứng dụng mô phỏng chuyển động.....	134
Hình 5.27: Kết quả mô phỏng chuyển động với mô hình người	135
Hình 5.28: Tọa độ trục Z từ Game trong ứng dụng mô phỏng chuyển động	136
Hình 5.29: Chiều dài cáp phản hồi từ bộ điều khiển.....	136

Hình 5.30: Lực căng cáp phản hồi từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động	137
Hình 5.31: Phản hồi góc Roll từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động	137
Hình 5.32: Phản hồi góc Pitch từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động	138
Hình P.1: Sơ đồ tổng quan các thiết bị của hệ thống	164
Hình P.2: Tủ điện hoàn chỉnh và các nút điều khiển AC servo	165
Hình P.3: Giao diện điều khiển	165
Hình P.4: Tab PATH	167
Hình P.5: Tab MANUAL	167
Hình P.6: Tab MANUAL 2	168
Hình P.7: Tab PS2	168
Hình P.8: Tab PLC COM	169

Danh sách các bảng

Bảng 3.1: Thông số của CDPR dạng treo 1	48
Bảng 3.2: Thông số của CDPR dạng treo 2	49
Bảng 4.1: Thông số kỹ thuật của CDPR phẳng	67
Bảng 4.2: Thông số kỹ thuật của CDPR phẳng	73
Bảng 4.3: So sánh đặc tính của 3 giải thuật phân phối lực căng.....	75
Bảng 4.4: Thông số kỹ thuật của CDPR	94
Bảng 4.5: Giải thuật CSPA với hệ số tương quan của tám dây cáp.....	94
Bảng 4.6: Thông số đầu vào của giải thuật ICSPA.....	101
Bảng 4.7: So sánh thời gian thực hiện của 3 giải thuật xác định độ võng cáp	106
Bảng 4.8: So sánh đặc tính của 3 giải thuật tính toán độ võng cáp	107
Bảng 5.1: Thông số kỹ thuật CDPR.....	121
Bảng 5.2: Thông số kỹ thuật CDPR.....	129
Bảng 5.3: Kết quả thực nghiệm sai số vị trí với 17 điểm nút	131
Bảng 5.4: Kết quả thực nghiệm sai số góc quay với 17 điểm nút.....	133

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

1.1 Đặt vấn đề

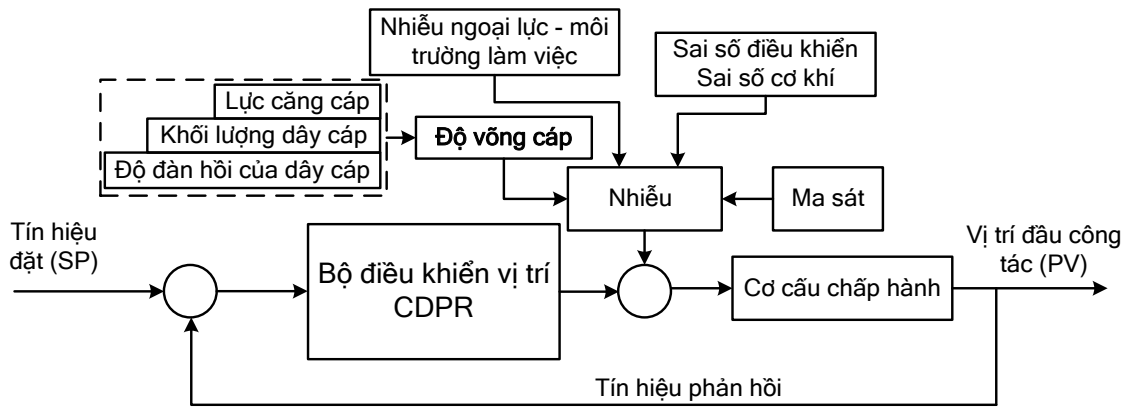
Robot cấu trúc song song truyền động bằng dây cáp (Cable Driven Parallel Robot – CDPR) là một loại robot song song với cấu hình đặc biệt, có cấu tạo bao gồm một bộ di động được kết nối với các dây cáp có chiều dài được điều khiển bằng tời hoặc các dạng khác [1-3]. Các nghiên cứu về CDPR đã tăng lên trong những năm gần đây do một số lợi thế so với các hệ robot liên kết cứng truyền thống, nhìn chung, các CDPR dễ chế tạo hơn và có chi phí chế tạo thấp hơn các robot thông thường. So với các robot song song phổ biến như bộ Stewart, Delta,..., CDPR có quán tính nhỏ hơn nhiều và tỷ lệ trọng tải trên trọng lượng cao hơn, cung cấp tốc độ và gia tốc cao cho cơ cấu chấp hành cuối [4-6]. Ngoài ra, do khả năng dễ dàng mở rộng phạm vi làm việc và tính linh động của cáp, CDPR có thể được áp dụng trong các nhiệm vụ đầy thách thức đòi hỏi phải di chuyển bộ di động trong không gian làm việc lớn có thể tiếp cận và khả năng mang tải trọng lớn [1-2,7].

Nghiên cứu về CDPR có nguồn gốc từ Mỹ vào năm 1984, một cánh tay máy song song điều khiển bằng cáp được thiết kế cho mục đích hoạt động dưới nước. Năm 1989, dự án RoboCrane được Viện NIST (National Institute of Standards and Technology (NIST) khởi xướng tại Mỹ, kết cấu này có nhiều ưu điểm vì đơn giản, không gian làm việc lớn và được ứng dụng trong máy móc chế biến, xử lý hàng hóa ở cảng, xây dựng cầu, hàn và các lĩnh vực khác. CDPR có thể được cấu hình theo nhiều cách khác nhau và do đó, CDPR đã được sử dụng cho nhiều ứng dụng, một số ví dụ bao gồm di chuyển vật liệu, điều khiển từ xa – haptics, nông nghiệp, quay phim sân vận động. Ví dụ nổi tiếng nhất về CDPR có lẽ là hệ thống SkyCam được nghiên cứu và triển khai vào cuối thập kỷ 80 bởi August Design Company, SkyCam truyền động bởi 4 dây cáp và tốc độ tối đa lên tới 44,8 km/h, hiện tại, SkyCam vẫn được sử dụng nhiều để phát sóng trực tiếp ở quy mô lớn, đặc biệt là chụp ảnh và theo dõi tốc độ cao tại các sân vận động thể thao lớn và các địa điểm công cộng lớn khác. Một nghiên cứu từ Đại học Xidian Trung Quốc [8] đã đề xuất một cấu hình CDPR mới cho hệ thống hỗ trợ di chuyển cabin của kính viễn vọng vô tuyến dạng

hình cầu có đường kính 500m (FAST) vào năm 1999 tại Trung Quốc, để di chuyển cabin của kính viễn vọng vô tuyến hình cầu kích thước lớn. Với thiết kế cơ khí và điện tử tích hợp, cũng như công nghệ điều khiển cộng tác - cooperative control - làm cho FAST là một những CDPR tiêu biểu nhất của CDPR[9]. Trong những thập kỷ qua, nghiên cứu về CDPR thu hút được nhiều sự chú ý và được thúc đẩy mạnh mẽ bởi ưu điểm cho khả năng tải lớn và không gian làm việc lớn. CDPR đã được áp dụng ngày càng nhiều trong các nhiệm vụ phù hợp như xây dựng, cứu hộ, phục hồi chức năng và in 3D kích thước lớn, ví dụ, CDPR dạng hoạt động hợp tác bao gồm nhiều cần cầu di động được thiết kế để nâng các vật có kích thước và khối lượng lớn. Các vấn đề điều khiển hợp tác được xem xét và phân tích, bao gồm định vị nhiều cần cầu di động, tránh chướng ngại vật và điều khiển đáp ứng của hướng và tải trọng [10]. Seriani và cộng sự [11] đề xuất một CDPR dạng module, do tầm làm việc lớn của CDPR, CDPR dạng module được đề cập có thể được áp dụng trong các nhiệm vụ kiểm tra trong khu vực và môi trường gồ ghề. Varela và cộng sự [12] đã trình bày một thử nghiệm về đặc tính của cơ chế sinh học đáng đi của con người bằng hệ thống theo dõi Cassino, đây là một hệ thống truyền động bằng cáp có thể vận hành với chi phí thấp được sử dụng như một thiết bị đánh giá cho các quá trình chẩn đoán và phục hồi chức năng trong một số ứng dụng lâm sàng. Mao và cộng sự [13] đã đề xuất một hệ khung xương ngoài điều khiển bằng cáp để phục hồi chức năng thần kinh cánh tay trên, thiết bị này có thể cung cấp nhiều kinh nghiệm qua quá trình tự học tự nhiên được điều khiển bởi CDPR có nhiều giai đoạn thay vì sử dụng các thiết bị liên kết cứng. Pinto và cộng sự [14] đã nghiên cứu và phát triển một CDPR có tên SPIDERobot với bốn bậc tự do (DOF) để in 3D tự động trong xây dựng, trong đó bậc tự do thứ 1 là khớp xoay cơ cấu chấp hành cuối có thể gấp vật liệu xây dựng với các hướng mong muốn, 3 bậc tự do còn lại được điều khiển bởi bốn dây cáp. Barnett và Gosselin [15] đã giới thiệu một máy in 3D điều khiển bằng cáp với không gian làm việc lớn thay vì máy in 3D truyền thống được điều khiển bởi các liên kết cứng, cơ cấu truyền động sử dụng CDPR 6 DOF để định vị và cung cấp không gian làm việc lớn, do được trang bị hệ thống kiểm soát phản hồi tính hiệu, độ chính xác và độ ổn định của máy in 3D dạng CDPR được tăng cường.

Các vấn đề ảnh hưởng đến độ chính xác của các hệ robot công nghiệp nói chung hay các CDPR nói riêng là không thể tránh khỏi và thường rất khó xác định. Trong việc thiết kế và triển khai các CDPR, rung động của bộ di động gây ra bởi độ đàn hồi của dây cáp có thể được coi là nhiễu hệ thống. Sai số đo lường của tín hiệu phản hồi về bộ điều khiển gây ra sai số trong các tính toán đầu vào điều khiển. Nhiễu gây ra bởi ma sát trong các cơ cấu phân phối cấp và các tác nhân nhiễu không xác định khác. Ngoài ra, với đặc tính một chiều của dây cáp truyền động, ảnh hưởng gây ra bởi độ đàn hồi và độ võng của dây cáp truyền động đặc biệt quan trọng với các CDPR có kích thước lớn, nó ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác vị trí của bộ điều khiển. Các vấn đề xử lý các ảnh hưởng do sai số đo lường, do ma sát hoặc các nguồn không xác định đã được nhiều nghiên cứu phân tích và giải quyết để cải thiện độ chính xác trong việc điều khiển CDPR, do đó nghiên cứu này sẽ xây dựng mô hình tính toán và phân tích ảnh hưởng của lực căng cáp, độ đàn hồi của các cơ cấu truyền động và độ võng cáp truyền động đến độ chính xác vị trí của CDPR. Trong phần sau, các nghiên cứu về phân phối lực căng cáp và độ võng cáp được phân tích, từ đó đề xuất các vấn đề nghiên cứu của đề tài.

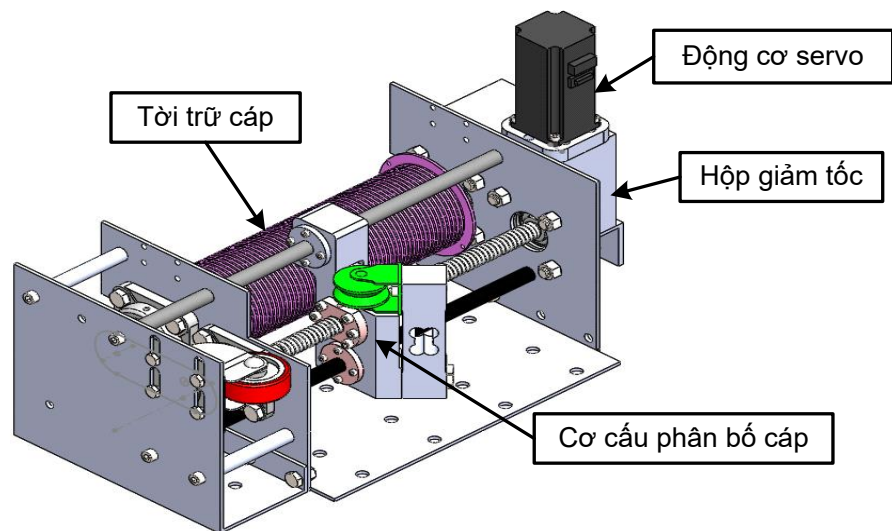
Trong những năm gần đây, các nghiên cứu về CDPR tập trung vào việc tối ưu cấu trúc, xác định không gian hoạt động, phân phối lực căng cáp, tính toán độ võng cáp, thiết kế bộ điều khiển và lập quỹ đạo chuyển động [16-18]. Huajie Hong và cộng sự [16] đã tổng hợp và phân tích các nghiên cứu điển hình về CDPR và trình bày các nghiên cứu về lý thuyết cơ bản cũng như ứng dụng của một số cấu hình CDPR. Các tác giả này đã hệ thống hóa các nghiên cứu về kiến trúc topo của CDPR, cấu hình tối ưu của robot phụ thuộc vào mối quan hệ giữa số số bậc tự do và số lượng cáp truyền động, từ cấu trúc CDPR được tối ưu hóa, ma trận cấu trúc (chuyển vị của ma trận Jacobian) được xây dựng để tính bài toán phân phối lực căng và cân bằng động lực học. Sen Qian và cộng sự [17] đã tóm tắt sự phát triển của CDPR và phân tích một số trường hợp ứng dụng thành công gần đây của CDPR, bài báo đã tổng hợp các nghiên cứu cơ bản về CDPR như thiết kế cơ khí, phân tích hiệu suất và phát triển bộ điều khiển. Hao Xiong và cộng sự [18] đã thực hiện một phân tích tổng quan về các thiết bị phục hồi chức năng dẫn động bằng cáp.



Hình 1.1: Bộ điều khiển vị trí và các thông số ảnh hưởng đến sai số vị trí CDRP

Trong quá trình nghiên cứu và triển khai CDRP, đặc biệt đối với các CDRP có không gian hoạt động lớn, việc giảm thiểu sai số vị trí đóng vai trò trọng trong việc điều khiển và vận hành CDRP. Bộ điều khiển vị trí và các thông số ảnh hưởng đến sai số vị trí CDRP được trình bày trên **hình 1.1**, trong đó cơ cấu chấp hành là các bộ tời phân phối cáp được điều khiển bởi các động cơ điện như **hình 1.2**, các bộ tời này được thiết kế khác với các tời cáp thông thường với tiêu chí bắt buộc là điều khiển được vận tốc và chiều dài cáp một cách chính xác, do đó, ngoài cơ cấu thu nhả cáp, bộ tời phân phối cáp được thiết kế thêm cơ cấu dẫn cáp, cho phép xác định chính xác chiều dài cáp và vận tốc cáp từ tín hiệu điều khiển. Các nguồn ảnh hưởng đến sai số vị trí của CDRP được miêu tả 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 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, bao gồm các nguồn lực không xác định như gió, nhiệt độ khi làm việc trong môi trường ngoài trời, đặc tính khác biệt của CDRP 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 thì lực căng càng lớn thì độ dẫn dài cáp càng lớn. Mô hình xác định độ võng cáp là một hệ phương trình có dạng phi tuyến với các thông số đầu vào là lực căng cáp, động học – không gian hoạt động CDPR, khối lượng và độ đàn hồi của dây cáp truyền động, do đó việc xác định ảnh hưởng của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR là rất quan trọng trong bài toán điều khiển vị trí của CDPR, bởi vì chiều dài của cáp ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả bài toán động học nghịch của CDPR.



Hình 1.2: Thiết kế bộ tời phân phối cáp

Nhiều nghiên cứu đã xây dựng các phương pháp giải các bài toán điện hình của CDPR, trong đó tập trung vào tính toán không gian hoạt động, tối ưu cấu hình thiết kế, xây dựng các giải thuật phân phối lực căng cáp, tính toán động học, tính toán độ võng của cáp truyền động dựa trên nhiều phương pháp khác nhau với các ràng buộc phức tạp. Qua các khảo sát cho thấy, vấn đề nghiên cứu về các ảnh hưởng của các thông số thiết kế lên sai số của hệ CDPR cấu hình song song là rất quan trọng, đặc biệt 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 và đánh giá ảnh hưởng của độ võng cáp đến độ chính**

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

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 phối 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 và 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 CDPR và điều kiện cân bằng. Các kết quả nghiên cứu được thực nghiệm trên CDPR kích thước lớn để đánh giá kết quả.

1.4 Nhiệm vụ nghiên cứu

Khảo sát tổng quan về CDPR cấu hình song song, dựa vào kết quả phân tích các công trình liên quan để nghiên cứu tính toán cấu hình CDPR. Xây dựng, mô phỏng và đánh giá các giải thuật phân phối lực căng cáp, từ đó nghiên cứu, xây dựng, mô phỏng và đánh giá các giải thuật tính toán độ võng cáp. Các mô hình tính toán được tổng hợp để tích hợp vào bộ điều khiển cho CDPR. Các kết quả nghiên cứu được thực nghiệm trên CDPR để thu thập và đánh giá đáp ứng của các mô hình toán đã được xây dựng.

1.5 Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng 3 phương pháp nghiên cứu chính: Thứ nhất là phương pháp phân tích và tổng hợp lý thuyết: thu thập và phân tích các thông tin, các nghiên cứu trong và ngoài nước có liên quan đến đề tài và tổng hợp theo từng phần cụ thể về CDPR. Thứ 2 là phương pháp nghiên cứu, phân tích, mô phỏng để nghiên cứu cấu trúc, không gian hoạt động, các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp trên CDPR. Thứ 3 là phương pháp thực nghiệm khoa học để tiến hành các thí nghiệm, thực nghiệm nhằm đánh giá các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp đến độ chính xác vị trí trong quá trình điều khiển CDPR.

1.6 Phạm vi nghiên cứu

Xây dựng các giải thuật xác định lực căng cáp cho các CDPR dạng thừa ràng buộc với các điều kiện giới hạn về lực căng và ngoại lực tác dụng.

Xây dựng các giải thuật xác định độ võng cáp cho CDPR dạng thừa ràng buộc 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 cáp với các điều kiện biên của lực căng cáp, chiều dài cáp, ngoại lực tác dụng, cấu trúc CDPR và không tính đến tác động của môi trường như gió và nhiệt độ khi làm việc ngoài trời.

Tích hợp kết quả tính toán vào bài toán động học nghịch, thực nghiệm và phân tích các tác động của lực căng cáp và độ võng cáp lên độ chính xác vị trí của CDPR

cấu hình song song dạng thừa ràng buộc 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 cáp tại các điểm nút trong không gian hoạt động.

1.7 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:

- Thiết kế các giải thuật xác định phân phối 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 dạng thừa ràng buộc;

- 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 phối 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;

- 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.

1.8 Bố cục của luận án

Cấu trúc của luận án bao gồm 5 chương. Trong đó, chương 1 giới thiệu tổng quát về các vấn đề cần nghiên cứu, xác định đối tượng, mục tiêu và phương pháp nghiên cứu, cũng như tổng hợp các công trình công bố và các đóng góp chính về mặt lý luận và học thuật. Nội dung chương 2 trình bày về kết quả khảo sát, phân tích các công trình nghiên cứu liên quan đến hướng nghiên cứu của đề tài, từ đó xác

định các vấn đề còn tồn tại và các vấn đề nghiên cứu của đề tài. Chương 3 là tổng hợp cơ sở lý thuyết robot song song truyền động bằng cáp bao gồm các bài toán chính như động học, động lực học, cân bằng lực, xác định độ võng cáp và không gian hoạt động, từ đó phân tích, xác định cấu hình của CDPR được xây dựng trong luận án. Dựa vào nội dung chương 3, chương 4 trình bày các vấn đề bao gồm việc xây dựng và mô phỏng các giải thuật phân phối lực căng cáp, từ đó chọn lựa giải thuật phù hợp cho hướng nghiên cứu của đề tài. Dựa trên kết quả phân phối lực căng cáp và các bài toán cơ bản, thiết kế cấu trúc của giải thuật tính toán độ võng cáp dựa trên giải thuật vùng tin cậy và ANFIS, các giải thuật sau đó được mô phỏng để tính toán quỹ đạo khớp cho cấu hình CDPR trong đề tài, kết quả mô phỏng được phân tích và đánh giá sự phù hợp và các vấn đề còn tồn tại. Chương 5 trình bày kết quả thực nghiệm trên CDPR, trong đó tích hợp các kết quả tính toán của chương 3 và chương 4 như bài toán động học, động lực học, không gian hoạt động, phân phối lực căng cáp, tính toán độ võng cáp và mô hình đàn hồi của các cơ cấu truyền động vào bộ điều khiển được xây dựng cho CDPR thực nghiệm. Kết quả thực nghiệm được thu thập và đánh giá để xác định ảnh hưởng của lực căng cáp và độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR, cũng như đánh giá hiệu quả của mô hình tính toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp. Nội dung chương 6 là trình bày các kết quả đạt được, các đóng góp chính, những vấn đề còn tồn tại và hướng phát triển của đề tài.

CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN VỀ ROBOT SONG SONG TRUYỀN ĐỘNG BẰNG CẤP

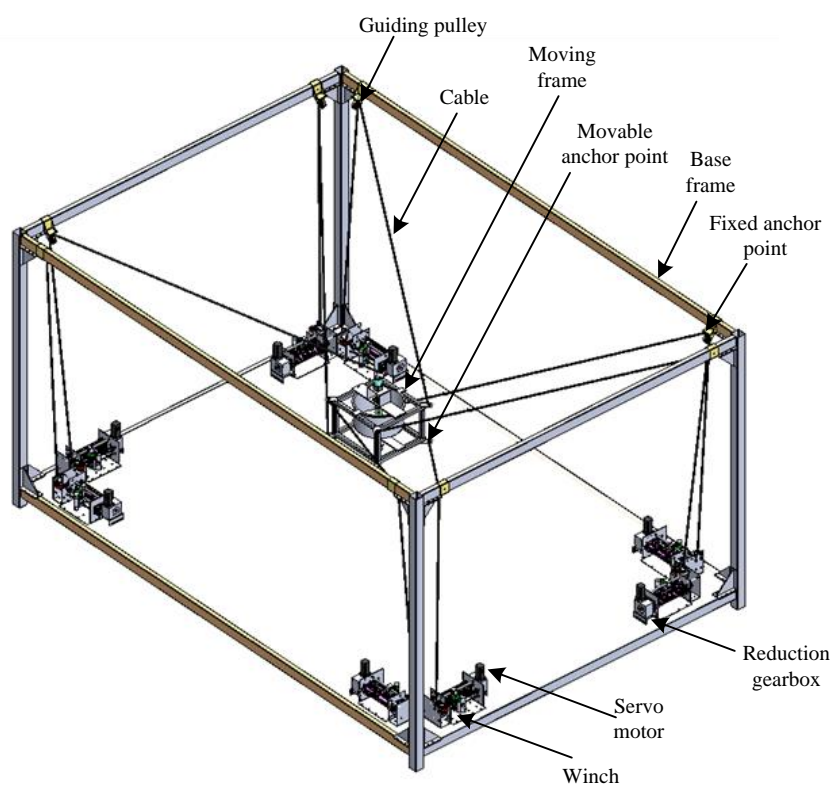
2.1 Giới thiệu

Chương 2 trình bày kết quả khảo sát và phân tích các nghiên cứu về CDPR liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án, nội dung chương này bao gồm các phần chính: Giới thiệu cấu trúc cơ bản, bậc tự do của CDPR; Khảo sát phân tích các nghiên cứu về không gian hoạt động CDPR; Khảo sát, phân tích các nghiên cứu về phương trình cân bằng, các phương pháp tối ưu phân phối lực căng cáp; Khảo sát, phân tích các nghiên cứu về xác định độ võng cáp. Dựa trên kết quả phân tích của nghiên cứu tổng quan, các vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu của luận án được xác định và phân tích, qua đó cho thấy các điểm mới, các đóng góp về mặt học thuật của luận án.

2.2 Các cấu trúc cơ bản CDPR

Trong nhiều năm qua, nghiên cứu và ứng dụng trong lĩnh vực robot đã tăng lên rất nhanh, robot có rất nhiều cấu hình khác nhau và được sử dụng cho nhiều tác vụ khác nhau phụ thuộc vào mục tiêu được thiết kế. Như chúng ta đã biết, nghiên cứu về robot là nghiên cứu thiết bị máy móc có nhiều bậc tự do để thực hiện nhiều nhiệm vụ khác nhau, lĩnh vực robot là lĩnh vực nghiên cứu đa ngành kết nối nhiều ngành khác nhau không chỉ là khoa học - công nghệ. Thực tế robot có thể được phân loại theo nhiều cách, một cách phân loại là dựa vào kết cấu liên kết các khâu để được 2 loại cấu trúc robot: song song và nối tiếp. Trong các robot nối tiếp, các khâu và khớp được sắp xếp theo cách nối tiếp từ bộ cố định đến cơ cấu chấp hành cuối (End Effector -EE) và đối với robot song song thì các khâu được sắp xếp theo cách song song từ bộ cố định đến cơ cấu chấp hành cuối là bộ di động (Moving Platform -MP). Robot song song 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, những robot này được gọi là robot truyền động bằng cáp hoặc dây và thường được phân loại vào nhóm robot song song, phần lớn nghiên cứu về CDPR đã tập trung

vào các robot song song có nhiều cấp được kết nối với một bộ di động [1-3], một sơ đồ đơn giản ví dụ về CDPR cấu hình song song trình bày trong **hình 2.1**. Robot song song điều khiển bằng cáp có thể được chế tạo để có không gian làm việc lớn, trong khi vẫn duy trì cấu trúc cơ cấu truyền động gọn nhẹ và có khả năng tạo chuyển động tốc độ cao...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 nhanh hơn có khả năng tăng tốc nhanh hơn và có thể cho phép robot được thiết kế với động cơ công suất nhỏ hơn, ít tổn kém hơn và ít vật liệu hơn.



Hình 2.1: CDPR cấu hình song song

Robot nối tiếp hiện nay rất phổ biến do thiết kế đơn giản, tuy nhiên có một số ưu và nhược điểm, robot cấu trúc robot song song cũng đang được phát triển và ứng dụng rộng rãi với thiết kế các khâu được gắn với bộ cố định (Fixed Frame – FF) đồng thời kết nối với một bộ di động (Moving Platform – MP) duy nhất, cấu trúc

này cho phép robot song song có thể hoạt động với độ cứng vững và độ chính xác cao hơn nhưng thường hạn chế về không gian hoạt động. CDPR là một dạng robot song song được truyền động bằng dây cáp thay vì các liên kết cứng, CDPR còn có những tên gọi khác trong các công trình nghiên cứu đã công bố như Cable Driven Parallel Manipulators (CDPMs) [19, 20], hoặc đơn giản là Cable Driven Robots (CDR)[21], trong đó, dây cáp truyền động thường được lưu trữ và phân phối bởi các bộ tời phân phối cáp đặt trên khung cố định, các dây cáp được nối với bộ di động thông qua các điểm mắc cáp và các pully dẫn hướng. Với cấu trúc đặc biệt cũng như các ưu điểm về kích thước lớn, độ chính xác cao khối lượng cơ cấu chấp hành nhỏ, lực quán tính nhỏ, giá thành chế tạo thấp, các CDPR đã được thiết kế và phát triển cho các ứng dụng đòi hỏi không gian hoạt động lớn, tải trọng lớn, tốc độ cao [3, 22]. Các CDPR thường được phân loại theo cấu trúc và số bậc tự do và số cáp truyền động [23, 24], gọi n là số bậc tự do và m là số cáp truyền động, $n_r = m - n$ là số bậc tự do ràng buộc thừa của CDPR (Degree Of Redundancy-DOR), các dạng cấu hình cơ bản của CDPR gồm có những loại sau:

1. $n_r < 0$, $m \leq 6$: *incompletely restrained positioning mechanism (IRPM) hoặc under-constrained CDPR (UCCDPR)*, cơ cấu định vị không hoàn toàn, các dạng robot này thường chỉ hoạt động với lực trọng trường, và thường không thể làm việc được với các tổ hợp ngoại lực tùy ý.
2. $n_r = 0$: *kinematically fully-constrained CDPR (KFC-CDPR)*, CDPR được định vị hoàn toàn về mặt động học, tuy nhiên phương trình cân bằng lực vẫn phụ thuộc vào lực trọng trường hoặc các lực tác động khác. Do đó robot chỉ làm việc được với một giới hạn các lực tác động. Do tính chất này, một số nghiên cứu xếp loại robot này cùng lớp với IRPM.
3. $n_r = 1$: *completely restrained positioning mechanisms (CRPM) hay fully-constrained CDPR*, robot được định vị hoàn toàn, vị trí của MP có thể được xác định hoàn toàn thông qua các dây cáp truyền động. Giới hạn của các chuyển động của MP và các lực tác động lên MP phụ thuộc vào giới hạn lực căng cáp truyền động.

4. $n_r > 1$: *redundantly restrained positioning mechanisms (RRPM)* hay *over-constrained CDPR*, CDPR thừa ràng buộc, ứng với một kết quả bài toán động học ngược, có nhiều ràng buộc động học tương ứng, do đó các giải pháp cân bằng của robot có thể có nhiều phương án.
5. Nếu một CDPR có các cáp truyền động nằm phía trên bề di động theo hướng trọng lực thì gọi là *Robot có cấu hình cáp treo - Suspended Configuration CDPR*, cấu hình này thường dựa vào trọng lực để đạt được trạng thái cân bằng [5], không gian làm việc của CDPR dạng treo phần lớn nằm phía dưới các điểm treo cáp. Các loại CDPR ở trên đều có thể cấu hình để hoạt động ở trạng thái treo, không gian làm việc của CDPR dạng treo phụ thuộc rất lớn vào trọng lực của MP, do đó tải trọng là một thông số quan trọng trong việc thiết kế CDPR với một không gian hoạt động cho trước. Tùy theo cấu hình thiết kế, một số CDPR chỉ hoạt động ở trạng thái treo, một số robot có thể hoạt động ở trạng thái định vị hoàn toàn, hoặc có thể hoạt động ở cả trạng thái định vị hoàn toàn và ở trạng thái treo.

2.3 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 phối lực căng cáp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ võng của cáp truyền động, do đó phân 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 phối 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 truyền thống. 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 phối lực căng cáp và các giới hạn lực căng cáp, điều kiện khả thi về khả năng điều khiển, các loại nhiễu tác động do điều kiện làm việc, phần này sẽ được trình bày trong chương cơ sở lý thuyết.

Tính toán phân phối 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 như di chuyển vật liệu, in 3D bê tông hoặc các tín hiệu nhiễu khác như gió khi làm việc ngoài trời.

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 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.

2.4 Không gian hoạt động và thiết kế

Không gian hoạt động của Robot nói chung là một vùng không gian 2D hoặc 3D mà cơ cấu chấp hành cuối của Robot có thể tiếp cận với các điều kiện về hướng và vị trí nhất định, đây là một bài toán quan trọng cho việc xác định cấu hình, thiết kế cơ khí, xây dựng bộ điều khiển và khả năng ứng dụng của CDPR. Việc xác định vùng làm việc của robot song song là khác biệt và khó khăn hơn robot nối tiếp, đặc biệt là các CDPR vì sự phức tạp của các ràng buộc cũng như đặc tính một chiều của dây cáp truyền động. Với cùng một kích thước khung CDPR, không gian làm việc hoặc khả năng di chuyển của MP có thể thay đổi tùy thuộc vào kích thước và thiết kế của MP, tải trọng cũng như cấu hình gắn cáp trên khung cố định và bộ di động, công suất và tải trọng của thiết bị truyền động cũng ảnh hưởng lớn đến kích thước của không gian làm việc. Các định nghĩa về không gian làm việc của CDPR liên quan đến các ràng buộc về ngoại lực và giới hạn của lực căng cáp đã được nghiên cứu, Veheoren [29-32] trình bày các định nghĩa và điều kiện để xác định vùng làm việc của CDPR, trong đó, các mô hình toán học để xác định không gian làm việc được xác định dựa trên hệ phương trình cân bằng, bao gồm không gian làm việc chung, các điều kiện về lực căng, độ cứng và điểm kỳ dị.

Không gian làm việc của CDPR là một dạng hình học phức tạp do các ràng buộc của các tham số thiết kế, do đó, rất khó để xác định không gian làm việc của các CDPR tương ứng với những thay đổi trong các tham số chính. Do đặc tính một chiều của cáp truyền động là chỉ tác dụng lực kéo và không tác dụng được lực đẩy lên khung chuyển động, nên việc xác định trạng thái cân bằng và không gian làm việc của CDPR là một thách thức lớn. Các kỹ thuật và phương pháp tính toán không gian làm việc được sử dụng cho robot song song có liên kết cứng hoặc robot nối tiếp không thể sử dụng cho CDPR, không gian làm việc của CDPR là một tập hợp các tư thế của bộ di động thỏa mãn các ràng buộc về hình học, cân bằng lực, độ cứng của kết cấu với các điều kiện biên như lực và mômen, trạng thái cân bằng, va chạm, công suất động cơ, v.v. Có ba phương pháp thông dụng thường được áp dụng để xác định không gian làm việc CDPR, phương pháp đầu tiên là phương pháp

Pointwise, phương pháp này được xây dựng dựa trên việc xem xét một tập hợp hữu hạn các điểm rời rạc có thỏa mãn các ràng buộc của không gian làm việc hay không. Phương pháp thứ hai là phương pháp liên tục, trong đó, thuật toán hiệu quả được sử dụng phổ biến nhất là phân tích khoảng. Phương pháp thứ ba là phương pháp phân tích, phương pháp này tập trung vào việc xác định ranh giới (hình dạng hình học) của không gian làm việc, ưu điểm của phương pháp phân tích là nó cho chúng ta một cái nhìn trực quan về hình học của không gian làm việc, tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này chỉ được thiết kế riêng lẻ cho từng cấu hình Robot. Các tiêu chuẩn để đánh giá hiệu quả của một giải thuật xác định không gian hoạt động bao gồm: Thứ nhất là thời gian tính toán, tiêu chí này là quan trọng cho các ứng dụng robot đòi hỏi phải tính toán không gian cho quỹ đạo điều khiển thời gian thực, thường sử dụng cho các ứng dụng có các thông số ảnh hưởng đến không gian hoạt động thay đổi như tải trọng, cấu trúc CDPR. Thứ hai là độ chính xác, thông số này được chú trọng trong các nghiên cứu cần xác định chính xác của không gian hoạt động, đặc biệt là ở vùng biên để tối ưu cấu hình CDPR. Thứ 3 là sự phù hợp với các tiêu chí phụ như hướng, tải trọng, cấu hình CDPR cho các mục tiêu xác định các loại không gian hoạt động có tính đến hướng của bộ di động, hoặc không gian hoạt động khả thi cho việc điều khiển. Mục đích của phân khảo sát này là phân tích các giải thuật xác định không gian hoạt động, qua đó chọn lựa một phương pháp phù hợp để ứng dụng tính toán, lựa chọn cấu hình và các đặc tính kỹ thuật của CDRP theo các yêu cầu thiết kế cho trước.

Phương pháp Pointwise thường được áp dụng trong việc xác định vùng làm việc của CDPR, phương pháp này được thiết kế dựa trên việc xem xét các điểm rời rạc có thỏa mãn các ràng buộc của các tư thế của MP để biết liệu các điểm này có thuộc vùng làm việc hay không. Phương pháp Pointwise có ưu điểm là điều kiện rõ ràng và trực quan, nhưng độ chính xác tại vùng biên phụ thuộc vào độ lớn khoảng cách của các điểm rời rạc được chọn (độ phân giải), độ phân giải càng cao thì cho kết quả càng chính xác, nhưng điều này đồng nghĩa với việc làm tăng thời gian tính toán, đặc biệt là đối với các CDPR có không gian làm việc lớn, một hạn chế phương pháp xác định không gian làm việc theo điểm là không thể xác định sự thỏa mãn

của các điểm nằm giữa các điểm đã xét. Các phương án lấy tọa độ điểm thường được áp dụng là phương pháp xuyên tâm, phương pháp cách đều hoặc phương pháp ngẫu nhiên.

Verhoeven và Hiller [31] đề xuất một giải pháp xác định không gian làm việc có thể điều khiển (*controllable workspace*) bằng phương pháp Pointwise. Giải pháp này dựa trên việc biến đổi phương trình cân bằng lực, sau đó phân tích hạng và *nullspace* của ma trận cấu trúc để xem xét sự tồn tại của nghiệm khả dĩ đối với một tổ hợp lực đã cho, tuy nhiên, nghiên cứu đã không xem xét sự thỏa mãn điều kiện cân bằng mô men đối với CDPR với các loại bộ di động khác nhau như dạng thanh hoặc khung. Verhoeven [32] đã đề xuất một phương pháp dựa vào phương pháp Pointwise để xác định không gian làm việc có thể điều khiển được cho các CDPR, tuy nhiên, nó chỉ có thể áp dụng cho một số hạn chế CDPR có cấu trúc đơn giản do sự phức tạp của các biểu thức mô tả hệ thống. Jason Pusey và cộng sự [35] đã phân tích không gian làm việc của một CDPR 6 DOF- 6 cấp theo phương pháp Pointwise, một chỉ số hiệu suất được sử dụng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của cấu trúc của Robot (kích thước của bộ cố định và di động) đến kích thước của không gian làm việc của Robot, các chỉ số này phụ thuộc vào đặc điểm của ma trận cấu trúc, kết quả áp dụng cho việc tính toán thiết kế CDPR 6 DOF - 6 cấp và chưa mở rộng sang các cấu hình khác. Yang và cộng sự [20] đã sử dụng phương pháp phân tích cấu hình phân phối lực căng để kết hợp không gian làm việc cho CDPR, phương pháp này dựa trên việc đánh giá hệ số căng - lực căng tương đối của các dây cáp - để tìm giải pháp phân phối lực căng tương ứng với không gian làm việc tối ưu, trong đó việc xác định hệ số căng dựa trên mô hình tối ưu hóa tuyến tính (Quy hoạch tuyến tính), giải pháp này chỉ ứng dụng cho một số cấu hình cụ thể cho dạng FC-CDPR. Xiumin Diao và Ou Ma [38] giới thiệu một phương pháp số để xác định FCW, phương pháp này kiểm tra điều kiện tồn tại một giải pháp khả thi đối với bất kỳ ngoại lực nào tác động lên MP tại một vị trí nhất định của CDPR. Các giải pháp khả thi được xác định bằng cách phân tích ma trận Jacobian để xem liệu có tồn tại ít nhất một giải pháp căng cáp toàn dương hay không, phương pháp này chỉ áp dụng cho CDPR có 6 DOF và 7 dây cáp. Lim và cộng sự [39] đã phát triển một

thuật toán để xác định FCW dựa trên lý thuyết lỗi, thuật toán kiểm tra các tổ hợp từ ma trận cấu trúc của điểm đang xét, giải thuật này chỉ áp dụng cho FC-CDPR. Bo Ouyang và Wei-Wei Shang [40] đã thiết kế một giải thuật xác định không gian hoạt động của CDPR dựa trên phương pháp Pointwise, giải thuật này xác định điều kiện thỏa mãn của một bài toán bằng cách tính toán nullspace của ma trận cấu trúc và giải hệ bất đẳng thức có giới hạn tuyến tính tương ứng. Hiệu quả tính toán của phương pháp mới có thể được cải thiện rõ ràng, so với thuật toán cũ, các thử nghiệm mô phỏng cho thấy hiệu quả tính toán được cải thiện rõ ràng hơn khi số lượng cáp tăng lên. Tuy nhiên, các ràng buộc vật lý về độ căng cáp bị bỏ qua trong WCW và điều này không đúng với CDPR thực tế, và hạn chế vật lý của độ căng cáp chưa được xem xét trong việc xác định WFW. Cong Bang Pham và cộng sự [41, 42] đã áp dụng một thuật toán làm giảm kích thước ma trận cấu trúc dựa trên lý thuyết lỗi, qua đó sẽ đơn giản hóa quá trình xác định không gian làm việc FCW của FC-CDPR, ưu điểm của thuật toán này là có thể ứng dụng cho nhiều dạng CDPR, tuy nhiên do hạn chế của việc biểu diễn hình học nên giải pháp không phù hợp khi số lượng cáp tăng lên.

Để tăng độ chính xác khi xác định hình dáng của vùng làm việc so với phương pháp điểm, phương pháp phân tích thường được áp dụng để xây dựng đường bao của vùng làm việc. Marc Gouttefarde và Clement M. Gosselin [33] đã phát triển một thuật toán để tính toán COWCW của PL-CDPR 3 DOF được điều khiển bởi 4 cáp, công cụ đồ họa được sử dụng để biểu diễn không gian làm việc là tập hợp của các đường cong bậc hai. Marc Gouttefarde và cộng sự [36] đã phát triển một phương pháp phân tích để xác định ranh giới của không gian làm việc WCW của CDPR có số lượng cáp truyền động nhiều hơn số bậc tự do, phương pháp này dựa trên sự phụ thuộc tuyến tính giữa các cột của ma trận cấu trúc để xác định WCW với các góc định hướng cố định của MP, các đường biên của WCW được xác định là một tập hợp các hình nón tạo thành bởi 2 cáp dự phòng (redundant cables). Kết quả cho thấy ranh giới không gian làm việc được cấu tạo bởi các phần hình nón với các hình dạng khác nhau. Dựa trên kết quả phân tích mô hình được phân tích trong [36], Azizian và cộng sự [43] đưa ra một phương pháp hình học được sử dụng

để xác định hình dạng của các phần hình nón tạo thành một không gian làm việc với hướng cố định của MP để tìm COWCW của PL-CDPR. Tuy nhiên, do sự phức tạp của các công thức tính toán, việc áp dụng phương pháp này cho các SP-CDPR cần phải được xem xét lại. Andreas Pott [44, 45] đã đề xuất một phương pháp để ước tính bề mặt bao của vùng làm việc hướng cố định của CDPR, phương pháp này dựa trên việc tìm các tập con bằng phương pháp giải tích để giảm bớt khối lượng tính toán, các tập con có kích thước nhỏ hơn như mặt phẳng, sau đó tìm đường giao nhau giữa các mặt phẳng và vùng làm việc để xây dựng bề mặt của không gian hoạt động, điều này có thể dẫn đến việc ước tính không gian hoạt động không đầy đủ và kết quả ước tính phụ thuộc vào việc lựa chọn tâm không gian làm việc. Tương tự như [44, 45], Perreault và cộng sự [46] đã thiết lập một phương pháp xác định COWCW bằng đồ thị, phương pháp này sử dụng các mô tả toán học chiều thấp hơn như mặt phẳng để xác định vỏ của không gian làm việc. Hình dạng bề mặt của không gian làm việc được xác định bởi sự kết hợp của các đường cong cắt các mặt phẳng và không gian làm việc. Rezazadeh [47] đã phát triển một phương pháp phân tích để xác định không gian làm việc của CDPR đa thân, phương pháp này dựa trên phân tích null-space và đơn giản hóa các ràng buộc về lực và mômen trong phương trình cân bằng. Dựa trên [33, 36], Zhiyu Sheng và cộng sự [48] đã đưa ra một thuật toán chung để tìm WCW của SP-CDPR, thuật toán này dựa trên việc tính toán null-space của ma trận cấu trúc của CDPR với quy tắc Cramer, từ đó đưa ra điều kiện thỏa mãn của một tư thế CPDR có 6 DOF và 7 cấp.

Mặc dù các phương pháp phân tích đã cải thiện độ chính xác bề mặt của không gian làm việc, nhưng thể tích của không gian làm việc không hoàn toàn được xác định, do đó, nhiều phương pháp xác định không gian làm việc liên tục đã được phát triển để khắc phục hạn chế này. Để xác định không gian làm việc liên tục, phân tích khoảng (Interval Analysis) đã được nghiên cứu và áp dụng cho các loại CDPR khác nhau, phương pháp này dựa trên phân tích số, trong đó các véc tơ khoảng có thể thỏa mãn hoàn toàn, thỏa mãn một phần hoặc không thỏa mãn tất cả các ràng buộc của WFW hoặc WCW. Các véc tơ khoảng thỏa mãn từng phần sẽ được chia nhỏ thành các phần giao nhau và tiếp tục thử nghiệm cho đến khi kích thước của các

véc tơ khoảng nhỏ hơn ngưỡng đặt trước, điều này cho phép xác định không gian làm việc đảm bảo tính liên tục trong một phạm vi và giữa các khoảng liên kề. Tuy nhiên, khối lượng tính toán của phương pháp này lớn, đặc biệt là khi giảm ngưỡng để tăng độ chính xác cũng như làm phẳng đường biên của vùng làm việc. Tobias Bruckmann và cộng sự [49] đã sử dụng thuật toán phân tích khoảng để xác định không gian hoạt động liên tục của CDPR, phương pháp này có thể được sử dụng để tìm cấu hình tối ưu của CDPR với các tiêu chí bổ sung như tải, góc định hướng hoặc độ cứng của MP. Marc Gouttefarde và cộng sự [50] đã phân tích WFW của CDPR với m DOF được điều khiển bởi số lượng cấp bằng hoặc lớn hơn m , một thuật toán phân tích khoảng được áp dụng để xác định WFW với thời gian tính toán hợp lý, so với [49], phương pháp này rút ngắn thời gian xác định WFW bằng cách sử dụng một công cụ bổ sung để kiểm tra xem tọa độ MP có nằm hoàn toàn trong vùng khả thi hay không, phương pháp này giúp giảm thời gian tách lực căng và các ngoại lực tác động. Khalilpour và cộng sự [51] đã phát triển một phương pháp khoảng hệ thống (systematic interval method) để xác định không gian làm việc của CDPR, phương pháp này chỉ sử dụng cho CDPR cấu hình phẳng. Dựa trên [50, 51], Loloei và cộng sự [52] đã nghiên cứu một thuật toán khoảng dựa trên tổng hợp lực tác động cơ bản để chỉ định không gian làm việc có thể kiểm soát của cả PL-CDPR và không gian. Lamine và cộng sự [53] cũng thiết lập không gian làm việc cho CDPR trong quá trình thiết kế dựa trên tính toán phương trình cân bằng với phân tích khoảng, hai cấu hình PL-CDPR 3 DOF - 4 cấp và SP-CDPR 6 DOF - 8 cấp được phân tích để tính toán kích thước tối thiểu của CDPR với một không gian làm việc cho trước.

Dựa trên phương pháp số, Ray-based method lần đầu tiên được nghiên cứu bởi Jean-Pierre Merlet [54] để xác định xem quỹ đạo thiết kế có nằm trong không gian làm việc của Robot song song hay không, phương pháp này xác định WCW bằng cách giải tổ hợp các phương trình đa thức đơn biến. Dựa trên phương pháp phân tích vỏ của không gian làm việc theo phương pháp tam giác, Andreas Pott [44] đã phát triển một phương pháp xác định vỏ của WFW của CDPR 6 DOF có 1 DOR, phương pháp này xác định một hình cầu có tâm không gian làm việc được dự đoán

và mở rộng theo hướng xuyên tâm. Phương pháp này có nhược điểm là kết quả phụ thuộc vào ước lượng tâm của không gian làm việc, nhưng nó có quy trình đơn giản và có thể áp dụng để xác định nhanh không gian làm việc của các cấu hình Robot thông thường. Dựa trên kết quả của [44], Andreas Pott và Werner Kraus [55] đã sử dụng phương pháp phân tích số theo Ray-based method để kết hợp WCW với hướng cố định của MP, ở đây, một số lượng hữu hạn các tia được sử dụng để tạo thành vỏ của không gian làm việc. Tương tự [44, 55], Andreas Pott [45] đề xuất một sơ đồ tính toán không gian làm việc hoạt động với hướng cố định hoặc thay đổi của CDPR, biểu diễn tam giác cho phép xác định nhanh chóng thể tích và ranh giới của không gian làm việc của Robot. Darwin Lau và cộng sự [56] đề xuất một kỹ thuật kết hợp các phương pháp số và phân tích để tính toán WCW cho các cấu hình FC-CDPR, phương pháp được sử dụng là giảm kích thước của ma trận cấu trúc để cải thiện thời gian tính toán, phương pháp này được áp dụng để tính WCW cho CDPR với 6 DOF và 7 cấp. Kết quả cho thấy phương pháp này đã cải thiện thời gian và độ chính xác tính toán so với phương pháp số. Dựa trên [55, 56], Ghasem Abbasnejad [57] giới thiệu một phương pháp Ray-based method để xác định WCW cho các cấu hình CDPR khác nhau, cho phép xác định WCW tổng quát liên tục với bất kỳ số lượng cấp điều khiển nào. Đây là một phân tích chung có thể được áp dụng cho nhiều loại cấu hình CDPR khác nhau. Trong đó, biểu diễn hai chiều của đồ thị có thể được áp dụng cho bất kỳ số bậc tự do nào của CDPR.

Riechel và cộng sự [37] đã mô tả không gian làm việc lực khả thi (Force Feasible Workspace), còn được gọi là không gian làm việc khả thi, vùng làm việc này được xác định dựa trên điều kiện thỏa mãn phương trình cân bằng đối với một tập hợp hữu hạn các lực tác dụng ở trạng thái cân bằng tĩnh, mô hình này được áp dụng để xây dựng không gian làm việc cho PM-CDPR 3 DOF - 3 cấp. Cong Bang Pham và cộng sự [19] đã thiết lập một phương pháp để tối ưu hóa cấu trúc của CDPR dựa trên phân tích lực căng và ma trận độ cứng, trong nghiên cứu này, các điểm kết nối trong khung cố định và khung chuyển động được xem xét và phân tích để tối ưu hóa không gian làm việc. Một PL-CDPR có 3 DOF - 4 cấp được lập mô hình để tính toán không gian làm việc dựa trên các thông số độ cứng của cấu trúc và

giới hạn lực căng của cáp, kết quả tính toán không gian làm việc được phân tích và sử dụng để thiết kế thuật toán tối ưu hóa cấu trúc Robot. Giovanni Boschetti và Alberto Trevisani [59] đã thiết lập một mô hình để đánh giá hiệu suất tổng thể của CDPR với chỉ số hoạt động của Wrench Exertion Capability (WEC), hiệu suất của CDPR được coi là một thông số quan trọng trong quá trình thiết kế và điều khiển, nó thể hiện mối quan hệ giữa cấu trúc Robot, giới hạn căng cáp, giới hạn lực và mômen tác động để Robot có thể hoạt động theo một hướng chuyển động nhất định. Mô hình này được xây dựng dựa trên thuật toán lập trình tuyến tính cho phương trình cân bằng của CDPR.

Như vậy, các phương pháp xác định không gian làm việc của CDPR được nghiên cứu tập trung vào việc xác định các loại không gian làm việc như WFW, WCW, COWCW, COWFW và không gian làm việc điều khiển được. Trong đó phương pháp phân tích được sử dụng để xác định đường bao của không gian làm việc, phương pháp này cho ta cái nhìn trực quan về hình dạng của không gian làm việc, nhưng không xác định được thể tích không gian làm việc. Nhược điểm của phương pháp này là các biểu thức tính toán phức tạp và khó kết hợp các mô hình biểu diễn cho các loại cấu hình CDPR khác nhau. Phương pháp số bao gồm phương pháp điểm, phân tích khoảng, phương pháp dựa trên tia, rất hữu ích trong việc xác định bề mặt và thể tích của không gian làm việc. Phương pháp Pointwise dẫn đến một không gian làm việc không liên tục, độ chính xác phụ thuộc vào cách thu được tọa độ và độ phân giải giữa các điểm trong không gian làm việc, ưu điểm của phương pháp này là có thể tích hợp điều kiện kiểm tra một điểm có nằm trong vùng không gian hoạt động và tính toán phân phối lực căng cáp tại điểm này, đặc biệt hữu dụng với những cấu hình CDPR có không gian hoạt động là một khối liên tục. Phương pháp phân tích khoảng cho kết quả tổng quát hơn, đảm bảo tính liên tục của không gian làm việc ngay cả tại các điểm giao nhau giữa các khoảng. Tuy nhiên, độ chính xác bề mặt của không gian làm việc phụ thuộc vào ngưỡng của các khoảng chia. Phương pháp Ray-based là phương pháp sử dụng số lượng tia để xác định bề mặt của không gian làm việc, phương pháp này có tính liên tục tốt hơn phương pháp Pointwise nhưng vẫn có những khoảng trống giữa các tia không được xác

định, tuy nhiên, có sự cải thiện về thời gian tính toán so với giải thuật phân tích khoảng, một vấn đề khác là hiện tại, các nghiên cứu không gian làm việc của dựa trên phương pháp Ray-based chỉ được áp dụng cho các FC-CDPR. Dựa trên các phân tích tổng hợp này, phương pháp Pointwise sẽ được chọn để tính toán không gian hoạt động cho CDPR ở chương cơ sở lý thuyết, tích hợp vào giải thuật phân phối lực căng cáp, qua đó chọn lựa cấu hình và thông số cho CDPR được xây dựng.

2.5 Phân phối lực căng cáp

Việc tính toán phân phối lực căng cáp cho các CDPR là rất quan trọng trong quá trình tính toán, thiết kế và điều khiển các CDPR. Lực căng của cáp liên quan đến các vấn đề như cân bằng hệ thống, phân phối lực trên các dây cáp, xác định không gian làm việc, tính toán bộ truyền động và tải trọng, tính toán ma trận độ cứng của hệ thống, quỹ đạo điều khiển, thiết kế bộ điều khiển và đặc biệt là một thông số đầu vào để tính toán độ võng của cáp. Có rất nhiều phương pháp tính toán lực căng của cáp đã được nghiên cứu và ứng dụng vào việc phát triển của CDPR, phần này sẽ phân tích cơ sở toán học và xem xét các phương pháp tính toán đã được công bố, từ đó đưa ra giải pháp để xây dựng giải thuật phân phối lực căng cáp cho cấu hình CDPR nghiên cứu trong đề tài. Các thông số chính để đánh giá một giải pháp phân phối lực căng cáp đối với FC và OC-CDPR là tiêu chuẩn tối ưu theo dạng tiết kiệm năng lượng hay lực căng an toàn hoặc ưu tiên độ cứng cơ hệ, sự liên tục theo quỹ đạo, khả năng phân phối lực ở vùng biên của không gian hoạt động, thời gian tính toán nhanh đối với các ứng dụng điều khiển thời gian thực và sự phức tạp của mô hình tính toán.

Wei-Jung Shiang và cộng sự [60] đã sử dụng tối ưu hóa tuyến tính để tìm giải pháp phân phối lực căng cho Robotic-Crane 3 bậc tự do - 4 cáp dựa trên mô hình động lực học của nó, mô hình này chỉ được mô phỏng trên máy tính. Cong Bang Pham và cộng sự [61] cũng đã sử dụng một thuật toán tối ưu hóa tuyến tính để tính toán sự phân phối của lực căng cáp, trong đó, mô hình phân phối lực căng cáp được rút gọn thành dạng tối ưu hóa tuyến tính cơ bản, do đó hạn chế các cấu hình có thể ứng dụng. So-Ryeok Oh và Sunil K. Agrawal [62] đã sử dụng tối ưu hóa tuyến tính

để tính lực căng cáp cho PM-CDPR, kết quả tính toán được mô phỏng và so sánh với các phương pháp khác, dựa trên mô hình này, nhóm tác giả cũng thiết kế phương pháp điều khiển Robot bằng lực căng âm. Tương tự, Per Henrik Borgstrom và cộng sự [63] đã cải tiến thuật toán tối ưu hóa tuyến tính để rút ngắn thời gian tính toán phân phối lực căng cáp. Trong trường hợp phương pháp tập hợp lực căng dương được sử dụng để xác định giải pháp tối ưu, tiêu chí tối ưu cũng là lực căng an toàn. Phương pháp này cho phép tính toán nhanh, nhưng tính liên tục của lực căng cáp và đáp ứng thời gian thực cần được cải thiện thêm. Maryam Agahi và Leila Notash [64] cung cấp một giải pháp phân tích để tìm tổng lực căng dây tối thiểu cho các ứng dụng CDPR trong kỹ thuật cơ khí cắt gọt, giải pháp này chỉ sử dụng cho CPDR phẳng với 3 bậc tự do và 4 cáp.

Tương tự như giải thuật Tối ưu hóa tuyến tính, giải thuật tối ưu hóa phi tuyến (Nonlinear Programming) được sử dụng để tính toán sự phân phối lực căng của cáp. So với tối ưu hóa tuyến tính, phương pháp này cho kết quả phân phối lực căng liên tục theo quỹ đạo khớp. Tối ưu hóa bậc 2 (p -norm = 2) [62, 65] có hàm mục tiêu bậc hai, phương pháp này cho lực căng liên tục vì nó hạn chế trường hợp các nghiệm đó được lấy tại các đỉnh của đa giác lồi (tập nghiệm). Tobias Bruckmann và cộng sự [66] giới thiệu các công cụ dùng để xác định các giải pháp lực căng cáp cho các FC-CDPR hoặc OC-CDPR, bao gồm cả tối ưu hóa bậc 2, trong đó, hàm mục tiêu bậc hai được sử dụng cho thời gian tính toán tốt hơn so với tối ưu hóa tuyến tính. Hui Li và cộng sự [67] đã sử dụng tối ưu hóa bậc 2 để xác định giải pháp lực căng cho kính thiên văn FAST, giải pháp này sử dụng cho CDPR dạng 6 bậc tự do - 6 cáp. Trong [68], tác giả đã sử dụng hàm mục tiêu phi tuyến cho cáp được tối ưu hóa để giảm tiêu thụ điện năng. Alexis Fortin Cote và cộng sự [69] sử dụng tối ưu hóa bậc 2 để phân phối lực căng cho cáp với ý tưởng thu được giải pháp tối ưu thứ hai bằng cách thêm một biến bù vào phương trình cân bằng, biến này có khả năng trả lại sự phân phối của nghiệm ngay cả tại các vị trí bên ngoài không gian làm việc.

Để giảm thời gian tính toán và đảm bảo tính liên tục của lực căng cáp dọc theo quỹ đạo chuyển động liên tục, phương pháp tính toán dạng đóng – Closed Form - là

một thuật toán được phát triển để tính toán phân phối lực căng cáp cho các CDPR có số lượng cáp nhiều hơn số DOF ($DOR > 0$). Phương pháp này chuyển bài toán tìm lực căng cáp thành các bài toán số cơ bản để rút ngắn thời gian tính toán, phù hợp với các yêu cầu điều khiển thời gian thực. Trong đó, hàm mục tiêu cực tiểu là khoảng cách từ nghiệm đến véc tơ tham chiếu (thường là giá trị trung bình của lực căng) p -norm ≥ 2 . Richard Verhoeven [32] đã thiết lập một thuật toán gọi là tối ưu hóa dựa trên Gradient, thuật toán này có thể được áp dụng cho các bậc p -norm khác nhau của hàm mục tiêu, hai nghiệm có thể có giá trị lớn nhất và nhỏ nhất được tính cho một p -norm nhất định, các giải pháp đã chọn sẽ thu được bằng phép nội suy tuyến tính giữa hai giá trị này. Tuy nhiên, độ phức tạp của mô hình toán học của phương pháp này tăng lên khi số lượng cáp dẫn động lớn. Andreas Pott và cộng sự [70] đã đề xuất một phương pháp gọi là "Closed-Form Force Distribution" để xác định sự phân phối lực căng cho CPDR có số lượng cáp nhiều hơn số DOF, phương pháp này cho kết quả lực căng phân phối liên tục dọc theo quỹ đạo khớp và thời gian thực hiện ngắn cũng là ưu điểm của giải pháp này. Tuy nhiên, phương pháp này có thể không tính toán được phân phối lực căng cáp trong một số trường hợp vẫn còn tồn tại giải pháp khả thi, thường xảy ra ở các vùng biên không gian hoạt động. Clément Gosselin và Martin Grenier [71] đã sử dụng tính năng tối ưu hóa chuyên biệt cho chuẩn p để tối ưu hóa sự phân phối lực căng cáp cho CDPR có n DOF được điều khiển bởi $n + 2$ cáp, mục đích là để giảm thiểu độ lệch của lực căng cáp so với một giá trị nhất định (trong giới hạn lực căng), thường là giá trị trung bình của τ_{min} và τ_{max} mà vẫn đảm bảo tính liên tục của các giải pháp. Một thuật toán không lặp được đề xuất để thực hiện tính toán các nghiệm theo chuẩn p , kết quả tính toán được áp dụng cho một PM-CDPR có 2 DOF được điều khiển bởi 4 dây cáp, các nghiệm được xác định theo chuẩn p với các giá trị $p = 1, 2, 4$ và ∞ . Kết quả cho thấy giá trị $p = 4$ cho kết quả phù hợp với mục tiêu đề ra, tuy nhiên, tính liên tục và các hạn chế về thời gian thực chưa được đề cập trong nghiên cứu này. Một số công trình cải tiến thuật toán phân phối lực căng dạng đóng để cải thiện mức độ bao phủ của WFW, mục đích là để tìm sự phân phối lực căng tại các điểm nằm trong khu vực chưa xác định được sự thỏa mãn của các ràng buộc. Rodney G. Roberts và cộng

sự [72] đã phân tích tĩnh học và động học nghịch của CDPR dựa trên phân tích null-space của ma trận cấu trúc, bài toán cân bằng tĩnh của một tư thế MP được phân tích dựa trên các thuộc tính của null-space của ma trận cấu trúc để có cấu trúc ràng buộc đầy đủ, kết quả tính toán được áp dụng cho PM-CDPR để đánh giá hiệu quả của phương pháp phân tích. Tobias Bruckmann và cộng sự [66] đề xuất một phương pháp để tính toán sự phân phối của lực căng cáp trực tuyến cho việc điều khiển cho các CDPR có số $DOR > 0$, dựa trên phương trình động học và phương trình cân bằng của CDPR, nhóm tác giả thiết kế hai thuật toán tính lực căng cáp cho Robot có 1 hoặc nhiều cấp dự phòng. Hai thuật toán tối ưu hóa dựa trên gradient và phân tích khoảng được sử dụng để tính toán lực căng của cáp với yêu cầu lực căng cáp liên tục, tuy nhiên thời gian tính toán của giải pháp này vẫn chưa được đánh giá. Richard Verhoeven và Manfred Hiller [73] đưa ra phương pháp xác định lực căng cáp của CDPR với số $DOR > 1$ dựa trên phân tích đa diện lồi của vùng không gian nghiệm của hệ phương trình cân bằng. Kết quả tối ưu là giải pháp giảm thiểu lực căng của cáp nhưng không đảm bảo tính liên tục của lực căng cáp dọc theo các quỹ đạo tính toán khi bộ di động di chuyển theo các quỹ đạo đã cho. Mahir Hassan và Amir Khajepou [74] phát triển một thuật toán lặp dựa trên phép chiếu của thuật toán Dykstra để tìm sự phân phối lực căng cho một CDPR, thuật toán này sử dụng phép chiếu lặp bắt đầu từ điểm gốc 0 lên không gian nghiệm và chiếu ngược khối đa diện lên vùng giới hạn lực căng, phần giao (vùng nghiệm) sẽ được xác định khi khoảng cách giữa không gian nghiệm và khối đa diện giới hạn lực căng bằng không. Kết quả được áp dụng để tính toán lực căng cho một CDPR 3 DOF được điều khiển bởi 5 dây cáp ($DOR = 2$) để tạo ra lực căng cáp ứng với tất cả các lực tác dụng.

Dựa trên các đặc điểm hình học của đa giác lồi biểu thị vùng khả thi của lực căng cáp thỏa mãn phương trình cân bằng với lực tác dụng $w = 0$, Tobias Bruckmann và cộng sự [75] đề xuất một thuật toán tính toán lực căng cáp mới gọi là phương pháp phân phối lực an toàn- Safe Force Generation Method - với yêu cầu các giải pháp phải khả thi (nằm trong vùng làm việc) và liên tục. Thuật toán dựa trên sự phân rã của ma trận cấu trúc, từ đó chọn ra các nghiệm nằm trong vùng an toàn (ưu tiên tránh xa các giá trị biên của lực căng dây), điều này cho phép MP

được điều khiển ở tốc độ và gia tốc lớn mà không bị chùng hoặc quá căng cáp truyền động. Để tính toán lực căng cáp theo thời gian thực cho một CDPR camera 3 DOF được điều khiển bởi 4 cáp, Yu Su và cộng sự [76] đề xuất một giải pháp không lặp lại dựa trên lý thuyết lỗi. Kết quả mô phỏng cho thấy lực căng cáp thu được có dạng liên tục theo quỹ đạo điều khiển với thời gian tính toán phù hợp với các ứng dụng điều khiển thời gian thực. Giải pháp này có thể được sửa đổi để áp dụng cho các cấu hình CDPR khác, tuy nhiên, việc tính toán các chỉ số hiệu suất và chỉ số tính liên tục cần được xem xét cho từng loại cấu hình cụ thể. Zhiwei Cui và cộng sự [77] đề xuất một phương pháp không lặp lại để tính toán sự phân phối lực căng của cáp, phương pháp này xác định vùng khả thi về lực căng của cáp dựa trên phương pháp quét hình học của Graham áp dụng cho CDPR có 2 DOR, bài báo cũng đề xuất phương pháp đánh giá độ an toàn của kết quả phân phối lực căng cáp. Roland Boumann và Tobias Bruckmann [78] phát triển một phương pháp tìm giải pháp phân phối lực căng khi CDPR hoạt động bên ngoài WFW, dựa trên phân tích hình học, phương pháp Nearest Corner Method được sử dụng để tìm các nghiệm gần nhất thỏa mãn phương trình cân bằng tĩnh dựa trên việc phát hiện các góc của siêu hình hộp được hình thành từ giới hạn của lực căng cáp, tính liên tục của giải pháp cũng được xem xét trong trường hợp Robot trong vùng WFW. Andreas Pott [79] đã cải tiến Closed-Form Method để tính lực căng tại các điểm trong vùng không xác định đối với các CDPR có $DOR > 0$ trong thời gian thực, giải pháp này có tốc độ tính toán nhanh nhưng lực căng cáp thường nằm ngoài giới hạn tại điểm gần biên không gian hoạt động. Lars Mikelsons và cộng sự [80] đã thiết kế một phương pháp không lặp lại để tính toán sự phân phối của lực căng cáp với điều kiện tối ưu của lực căng an toàn, phương pháp này xác định các đỉnh của đa giác lỗi khả thi, sau đó tính giá trị trung bình của các đỉnh tìm được, các giá trị lực căng được tính gần với giá trị an toàn (trung bình của τ_{min} và τ_{max}), nó còn được gọi là phương pháp tiếp cận Barycentric, tuy nhiên, thời gian thực hiện là một vấn đề cần lưu ý khi áp dụng phương pháp này. Dựa trên Barycentric, Johann Lamaury và Marc Gouttefarde [81] đề xuất phương pháp “Fast Tension Distribution Algorithm” để cải thiện việc tính toán các giải pháp lực căng cáp cho CDPR với n DOF và số lượng

cáp $m = n + 2$. Phương pháp này dựa trên việc xác định đa giác lồi khả thi được tạo thành bởi giao tuyến giữa tập hợp các hệ thống lực căng cáp thỏa mãn các ràng buộc trong phương trình cân bằng và không gian giới hạn bởi các ranh giới của lực căng dây. Bằng cách giảm số lượng đỉnh được quét, thời gian để xác định đa giác lồi khả thi được cải thiện, sau đó, phân tích và tính toán điểm trung tâm (barycenter) của đa giác lồi ở trên và kết quả tính toán được áp dụng trên CDPR 6 DOF được điều khiển bởi 8 dây cáp, kết quả mô phỏng cho thấy giá trị lực căng cáp thay đổi liên tục dọc theo quỹ đạo thiết kế. Dựa trên kết quả của [81], Marc Gouttefarde và cộng sự [82] đã phát triển một thuật toán tính toán lực căng của cáp được gọi là “Versatile Tension Distribution Algorithm”, thuật toán này được áp dụng cho các CDPR 6 DOF được điều khiển bởi 8 sợi cáp, với cấu hình này, tập hợp các giải pháp lực căng cáp có thể có là một đa giác lồi hai chiều với 2 cáp dự phòng. Thuật toán được thiết kế dựa trên việc xác định các đỉnh của đa giác theo chiều kim đồng hồ hoặc ngược lại, kết quả tính toán được xác minh trên hai mẫu CDPR 6-DOF 8 cáp trong dự án CABLAR và CoGiRo. Phương pháp này có hiệu quả với các yêu cầu khác nhau để xác định sự phân phối lực căng tối ưu, cũng như để thiết lập số lần lặp lại tối đa trong trường hợp xấu nhất. Cũng dựa trên thuật toán của [81], Tahir Rasheed và cộng sự [83] đã thiết kế một thuật toán để tìm sự phân phối lực căng tối ưu cho CDPR 6 DOF và 8 cáp, CDPR này có thể được cấu hình lại vì 4 trụ cáp có thể di chuyển bằng bánh xe của chúng. Dựa trên [75, 80] Da Song và cộng sự [84] đề xuất một phương pháp gọi là phân tích lồi để tìm ra cấu hình tối ưu cho CDPR 6 DOF, trong đó hướng của khung chuyển động được xác định trong không gian làm việc, cấu hình cáp được tìm thấy bằng cách so sánh và phân tích không gian làm việc và tính linh hoạt. Các tác giả cũng đề xuất một thuật toán để tìm giải pháp căng cáp theo thời gian thực, dựa trên việc tính toán các phương trình cân bằng của một CDPR 6 DOF được điều khiển bởi 8 cáp, kết quả được so sánh với 2 phương pháp là phương pháp định mức tối thiểu và phương pháp lực căng an toàn, kết quả phân tích cho thấy các nghiệm lực căng là liên tục và nằm trong giới hạn của lực căng cáp yêu cầu, tương tự như phương pháp lực căng an toàn với thời gian tính toán nhanh, phù hợp cho các ứng dụng thời gian thực. Một phương pháp khác được phát

triển dựa trên Closed-Form Method để tính lực căng tối thiểu liên tục dọc theo quỹ đạo khớp là Puncture Method. Phương pháp này dựa trên việc xác định một giải pháp ban đầu trong một tập hợp khả thi, có thể được tính toán bằng Closed-Form Method. Sau đó kết hợp với nghiệm gần gốc từ null-space của ma trận cấu trúc thành một đường thẳng, nghiệm tối thiểu sẽ được xác định trên đường này vì tính liên tục tuyến tính của nullspace. Katharina Müller và cộng sự [85] và cộng sự đã phân tích kết quả và hạn chế của phương pháp phân phối lực căng tối thiểu của Closed-Form Method, từ kết quả này tác giả đã phát triển Improved Puncture Method, dựa trên sự kết hợp của Improved Closed-Form Method và Puncture Method, lực căng cáp được phân phối liên tục và có xu hướng đạt đến giới hạn dưới của lực căng cáp. Kết quả tính toán cho thấy Improved Puncture Method cho kết quả tính toán giải pháp phân phối lực căng cáp trong thời gian ngắn hơn với không gian làm việc lớn hơn, nhưng lực căng cáp có xu hướng phân phối gần giới hạn dưới và có biên độ thay đổi cao.

Andreas Pott [86] cung cấp một phương pháp phân tích để xác định các giới hạn của lực căng cáp cho CDPR, để có lực căng lớn nhất, các thông số quan trọng cần quan tâm là vấn đề an toàn, giới hạn bền của kết cấu cơ khí, độ mỏi của cáp trong quá trình vận hành và công suất của cơ cấu chấp hành. Như vậy, lực giới hạn trên của cáp truyền tải chủ yếu phụ thuộc vào cấu trúc cơ học và cơ cấu truyền dẫn, đây là những tiêu chí chính ảnh hưởng đến chi phí chế tạo và triển khai CDPR. Đối với lực căng tối thiểu thì tiêu chí quan trọng cần tính toán là độ võng của cáp, đặc biệt đối với những loại cáp có chiều dài lớn và không dẫn thì lực căng của cáp sẽ tỷ lệ nghịch với độ võng của cáp. Độ cứng và độ đàn hồi của cáp cũng ảnh hưởng đến độ chính xác của CPDR, vì nó ảnh hưởng đến hoạt động của cơ cấu phân phối cáp. Độ rung của cáp cũng được phân tích khi tính toán giới hạn dưới của lực căng cáp vì có thể giảm độ rung trên hệ thống bằng cách tăng lực căng của cáp. Leila Notash [87] phân tích các đặc tính của lực căng cáp với ảnh hưởng của các tham số chưa biết đến ma trận kết cấu và null-space của CDPR, kết quả tính toán được áp dụng trên một PM-CDPR để đánh giá hiệu quả của mô hình. Yu Su và cộng sự [88] đề xuất một phương pháp lặp để tính toán sự phân phối lực căng của cáp cho một SP-

CDPR lớn 3 DOF được điều khiển bởi 4 cáp, CDPR này được sử dụng để di chuyển camera, trong đó phương trình cân bằng được xây dựng dựa trên phương trình động lực học và mô hình võng của cáp truyền động. Thuật toán lập được phát triển dựa trên phân tích nhân của ma trận cấu trúc, kết quả cho thấy lực căng của cáp thay đổi liên tục dọc theo quỹ đạo chuyển động của CDPR. Barroso và Saltaren [89] phân tích mối quan hệ giữa lực căng cực đại và ngoại lực tác dụng lên MP, mục tiêu là xác định công suất của cơ cấu chấp hành được sử dụng để thiết kế cơ cấu phân phối cáp, từ đó xác định không gian làm việc của CDPR dựa trên phân tích null-space của ma trận cấu trúc. Einar Ueland và cộng sự [90] phân tích vấn đề xác định phân phối lực căng cáp tối ưu cho các OC-CDPR dựa trên các nghiên cứu [70], [81], [89] từ đó đề xuất một hàm mục tiêu tối ưu mới đảm bảo tính liên tục của lực căng cáp.

Qua phân tích các nghiên cứu trên cho thấy, có nhiều phương pháp đã được phát triển để tính toán sự phân phối lực căng cho các FC-CDPR hay OC-CDPR. Các phương pháp này tập trung vào việc tối ưu hóa các giải pháp theo các mục tiêu khác nhau, chẳng hạn như giảm thiểu lực căng cho các ứng dụng yêu cầu tiết kiệm năng lượng tiêu thụ, lực căng an toàn thuận tiện cho việc điều khiển hoặc lực căng tối đa để tăng độ cứng của kết cấu. Các phương pháp tối ưu hóa tuyến tính (Linear Programming), Dykstra và Available Wrench Set cho kết quả không liên tục theo quỹ đạo khớp, trong khi các phương pháp tối ưu hóa bậc 2 (Quadratic Programming Methods), tối ưu hóa phi tuyến (Nonlinear Programming), Puncture, Barycentric, Closed-Form và Improved Closed-Form, cho kết quả các lực căng cáp liên tục theo quỹ đạo chuyển động. Trong đó, các phương pháp Puncture, Barycentric, Closed-Form, và Improved Closed-Form cho thời gian tính toán nhanh, phù hợp với yêu cầu điều khiển thời gian thực. Ngoài ra, một số phương pháp như Tối ưu hóa tuyến tính, Dykstra, và Improve Closed-Form cũng có thể được sử dụng để xác định vùng làm việc theo phương pháp Pointwise. Các nghiên cứu [86, 89] cũng đã đưa ra cách xác định giới hạn của lực căng cáp. Giới hạn dưới và giới hạn trên của lực căng cáp có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế, xác định cấu trúc của CDPR, tính toán sự phân phối lực căng, xác định vùng làm việc và độ cứng của CDPR.

Như vậy, vấn đề đặt ra cho nghiên cứu tiếp theo là xây dựng giải thuật phân phối lực căng cáp thỏa mãn các yêu cầu và các điều kiện biên ràng buộc cho cấu hình OC-CDPR cụ thể, tính toán, mô phỏng và đánh giá sự ảnh hưởng của các giải pháp phân phối lực căng đến bài toán động học nghịch có tính đến độ võng cáp, cũng như sự ảnh hưởng của phân phối lực căng đến các ứng dụng điều khiển CDPR thực nghiệm. Đặc biệt là vấn đề về thời gian tính toán cho các ứng dụng thời gian thực, sự bao phủ không gian làm việc và tác động đến phương pháp tính toán độ võng cáp của từng giải thuật phân phối lực căng.

2.6 Tính toán độ võng cáp

Một trong những vấn đề quan trọng trong thiết kế và phát triển các CDPR kích thước lớn là xác định ảnh hưởng của độ võng của dây cáp truyền động đến việc tính toán và thiết kế CDPR, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác vị trí của CDPR. Quy trình chung để xác định độ võng cáp truyền động của các Robot song song điều khiển bằng cáp (CDPR) là rất phức tạp, do tính phi tuyến cao của mô hình toán học cũng như quy trình tính toán chúng. Mô hình xác định độ võng của cáp là sự kết hợp của bài toán động học, động lực học, sự phân phối lực căng của cáp và mô hình võng của cáp. Các mô hình tính toán độ võng của cáp hầu hết dựa trên phương trình dây xích cáp (Catenary equation) được phát triển bởi Irvine [91], trong mô hình độ võng cáp của Irvine, ảnh hưởng của khối lượng bản thân dây cáp, độ đàn hồi và lực căng của dây cáp đều được tính đến. Các tiêu chí thường sử dụng để đánh giá hiệu quả của một giải thuật xác định độ võng cáp: thứ nhất là thời gian tính toán, tiêu chí này đặc biệt quan trọng đối với những ứng dụng điều khiển trong thời gian thực; thứ 2 là độ chính xác tính toán, tiêu chí này thường được đánh giá so với mô hình tiêu chuẩn; thứ 3 là khả năng đáp ứng các cấu hình và các điều kiện biên khác nhau, có nhiều nghiên cứu đơn giản hóa mô hình biểu diễn độ võng cáp để có thể rút ngắn thời gian tính toán, điều này sẽ hạn chế khả năng áp dụng của giải thuật thiết kế.

Korayem và cộng sự [92] đã phân tích bài toán động học và xác định không gian làm việc của CDPR kích thước lớn có tính đến độ võng của cáp đàn hồi, vấn đề đánh giá không gian làm việc được tiếp cận bằng cách sử dụng mô hình đã được

hiệu chỉnh dành cho cáp có thể biến dạng. Thuật toán được đề xuất dùng để kiểm tra xem một cấu hình nhất định có nằm trong không gian làm việc khả thi hay không, mô hình này không được thiết kế để giải bài toán động học và thuật toán này chỉ được kiểm chứng thông qua kết quả mô phỏng của một số CDPR dạng treo phẳng. Nicolas Riehl và cộng sự [93] đã nghiên cứu ảnh hưởng của khối lượng dây cáp đối đến vấn đề động học của các CDPR có số bậc tự do bằng số dây cáp truyền động, bài toán động học thuận và nghịch của CDPR dạng treo kích thước lớn với 3 bậc tự do - 3 cáp được tính toán dựa trên mô hình cáp đàn hồi của Irvine. Các tác giả chỉ ra rằng, với các CDPR hoạt động với không gian làm việc lớn hoặc trọng tải nặng, ảnh hưởng của khối lượng cáp đến độ võng của cáp và độ chính xác của CDPR là đáng kể, dựa trên các kết quả này, nhóm tác giả đã xác định được không gian làm việc CDPR lớn có tính đến độ võng của cáp [94]. Kính thiên văn FAST là một dự án tiêu biểu cho ứng dụng của CDPR không lò, liên quan đến dự án này, Rui Yao và cộng sự [95] đã thiết lập một mô hình hoàn chỉnh cho CDPR 6 cáp có tính đến khối lượng và độ đàn hồi của cáp truyền động, mô hình được thiết lập như một phương trình đường thẳng có cấu trúc đơn giản, và thời gian tính toán nhanh hơn so với mô hình phương trình dây xích chính xác. Tuy nhiên, độ chính xác của mô hình này không cao và cần có mô hình hiệu chỉnh để đạt độ chính xác yêu cầu, mô hình này được thử nghiệm trên phiên bản thu nhỏ của FAST với độ chính xác trung bình là $\pm 10\text{mm}$. Li Hui [96] nghiên cứu các bài toán cơ bản cho robot song song điều khiển bằng cáp của kính viễn vọng FAST không lò với 6 cáp truyền động, trong đó, động học nghịch của robot được nghiên cứu để tìm ra không gian làm việc định hướng khả thi về lực căng. Do robot có 6 dây cáp võng linh hoạt có khối lượng đáng kể nên mô hình cáp võng đặc biệt được xây dựng để giải động học nghịch bằng cách đơn giản hóa một số thành phần trong mô hình toán để xây dựng giải thuật tính toán độ võng cáp, do đó phương pháp này không thể áp dụng cho các cấu hình thừa ràng buộc. Dựa trên phương trình biên dạng cáp parabol của Irvine [91], trong đó, mô hình võng của cáp truyền động không đàn hồi lớn được coi là một đường cong parabol, Gouttefarde và cộng sự [97] đã đề xuất một phân tích tĩnh đơn giản hóa mới của CDPR với giả định rằng một loại cáp có khối lượng đáng kể và

không đàn hồi được sử dụng để truyền động các CDPR, mô hình độ võng của cáp này được phát triển với giả định rằng độ võng của cáp là nhỏ. Mô hình được đơn giản hóa bằng cách tuyến tính hóa mối quan hệ giữa hai hình chiếu của lực căng cáp trên hệ trục được phân tích, tuy nhiên mô hình này không thể áp dụng cho các OC-CDPR do kết quả không duy nhất của phân phối lực căng cáp và cáp đàn hồi. Jean-Pierre Merlet [107, 108] thiết lập các cảm biến dùng để tính toán trực tiếp động học của CDPR trong trường hợp cáp bị võng và phân tích các đặc tính quan trọng của mô hình đàn hồi tĩnh dựa trên phương trình độ võng của cáp Irvin, kết quả này có thể được sử dụng để tính toán bài toán động học CDPR có tính đến độ võng của cáp, trong đó, một dạng mới của phương trình Irvine đã được thiết lập để có thể giảm thời gian tính toán của các bài toán động học thuận và nghịch bằng giải thuật phân tích khoảng, điều này cũng giới hạn đối tượng áp dụng của mô hình. Jean-Pierre Merlet [109] đã phân tích điểm kỳ dị của CDPR có tính đến độ võng của DC, kết quả cho thấy điểm kỳ dị của CDPR có xu hướng xuất hiện gần rìa của không gian làm việc, kết quả tính toán chỉ xác định được các điểm kỳ dị riêng lẻ, chưa xác định được các điểm kỳ dị cho cả động học nghịch và động học thuận. Jean-Pierre Merlet [110] đã tính toán bài toán động học thuận cho PM-CDPR dạng treo với một cáp dự phòng, mô hình tính toán được xây dựng dựa trên phương trình độ võng của cáp và phân tích khoảng. Tác giả cũng xây dựng hệ thống đo chiều dài cáp, góc cáp và lực căng cáp để đánh giá kết quả của chuyển động tịnh tiến với ảnh hưởng của các thông số không đảm bảo. Trong [111], Marc Fabritius và Andreas Pott đã xây dựng một chương trình tính toán không gian hoạt động và động học nghịch áp dụng cho CDPR có nhiều hơn một DOR, trong đó có tính đến đường kính pully dẫn hướng và độ võng của cáp, từ đó thiết lập mối quan hệ giữa lực căng cáp sau khi bù độ võng cáp. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp mới cho không gian làm việc lớn hơn gần 20% so với phương pháp còn lại. Tuy nhiên thời gian tính toán dài hơn phương pháp truyền thống do phải giải bài toán phi tuyến cáp võng có pully.

Marc Fabritius và Andreas Pott [112] đã tính toán bài toán động học thuận của CDPR có tính đến ảnh hưởng của độ võng cáp và kích thước pully dẫn hướng, kết quả tính toán cho thấy có sự khác biệt so với mô hình hình học tiêu chuẩn, trong đó

WFW và độ cứng thu được nhỏ hơn mô hình tiêu chuẩn. Những kết quả này cho thấy ảnh hưởng đáng kể của mô hình độ võng của cáp và thông số ròng rọc đến việc tính toán các vấn đề động học thuận và nghịch của các CDPR có $DOR > 0$. Cũng dựa trên phương trình võng cáp của Irvine, Kozak và cộng sự [113] cho thấy kết quả phân tích mô hình tĩnh của CDPR kích thước lớn có tính đến khối lượng của cáp dẫn động. Do sự võng của cáp, chuyển vị tĩnh của cáp đàn hồi đồng đều cũng được tính toán trong phân tích động học nghịch và độ cứng CDPR, kết quả này có thể được sử dụng để tính toán không gian làm việc của CDPR có dây cáp bị võng hoặc quá trình thiết kế các CDPR kích thước lớn. Han Yuan và cộng sự [114, 115] đã phân tích mối quan hệ giữa độ võng của dây cáp, độ cứng và bài toán động lực học đối với các CDPR dạng treo khi cáp và MP rung trong quá trình hoạt động. Các nghiên cứu này có thể được sử dụng để xây dựng các giải pháp giảm rung cho các CDPR có kích thước lớn hoặc làm việc ngoài trời. Han Yuan và cộng sự [116] cũng xây dựng ma trận độ cứng động lực học của một cáp đơn để tính toán các phương trình động lực học của CDPR, mô hình tính toán này được thử nghiệm trên SP-CDPR dạng treo 6 DOF- 6 cáp. Kết quả cho thấy có sự ảnh hưởng của động lực học cáp đến mô hình động lực học và độ chính xác của CDPR. Arsenault [21] đã thiết lập một mô hình biểu diễn độ cứng CDPR có tính đến độ võng của các dây cáp, kết quả cho thấy ảnh hưởng của độ võng cáp đến không gian làm việc và ma trận độ cứng của Robot, nghiên cứu này có thể mở rộng để tính toán mối quan hệ giữa lực căng, độ võng và độ cứng của cơ hệ trong quá trình hoạt động của CDPR.

Duan và cộng sự [117] đã xây dựng một mô hình toán học thu hồi và phân phối cáp dựa trên phương pháp khối lượng gộp, mô hình này có tính đến khối lượng cáp, kết quả mô phỏng đối với mô hình KFC-CDPR 6 DOF - 6 cáp 50m dạng treo cho thấy rằng mô hình này có hiệu quả trong việc phân tích phản ứng động lực của cáp. Huiling Wei và cộng sự [118] phân tích ảnh hưởng của quán tính cáp dẫn động đến độ ổn định của CDPR, đây là một loại CDPR có kích thước lớn và tốc độ cao được sử dụng để di chuyển camera quay phim trong không gian lớn. Mô hình động của CDPR đã được xác định dựa trên phương trình dây cáp và phương pháp phân tử hữu hạn, từ các kết quả tính toán này, một bộ điều khiển CDPR đã được thiết kế và

mô phỏng. Phan Gia Luân và cộng sự [119] đã đưa ra một mô hình mới để tính toán bài toán động học nghịch cho CDPR với ảnh hưởng của độ võng cáp ở trạng thái bán tĩnh dựa trên cả phương pháp phân tích và thực tế. Theo kết quả tính toán, mô hình này chỉ có giá trị đối với các CDPR hoạt động ở tốc độ thấp và gia tốc nhỏ, do đó mô hình không phù hợp cho các ứng dụng có tốc độ cao. Karim Moussa và cộng sự [120] đề cập đến việc mô hình hóa và mô phỏng CDPR tính đến ảnh hưởng của độ võng và độ đàn hồi của cáp nhưng độ phức tạp của mô hình vẫn còn hạn chế. Mô hình được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong cơ sở vật lý nền tảng mô phỏng, kết quả mô phỏng được so sánh với dữ liệu thực thu được trên nền tảng thử nghiệm trên CAROCA CDPR, cũng như với các kết quả mô phỏng khác thu được từ mô hình được triển khai bằng phần mềm, kết quả thử nghiệm chưa có đánh giá về độ chính xác vị trí sau khi áp dụng mô hình độ võng cáp.

Trong các nghiên cứu mới nhất, các kỹ thuật tính toán mềm đã được nghiên cứu ứng dụng vào để giải bài toán động học có tính đến độ võng cáp của CDPR. Feng Gao [121] thiết kế một giải thuật tính toán bài toán động học nghịch có tính đến độ võng cáp sử dụng mạng lan truyền ngược (back-propagation) kết hợp với tối ưu hóa bầy đàn (Particle swarm optimization) dựa trên giải thuật vùng tin cậy (Trust-region dogleg algorithm), phương pháp mới giảm gần 22.22% thời gian tính toán so với giải thuật vùng tin cậy, giải thuật này được thiết kế riêng cho một Pointmass CDPR không gian 3 bậc tự do, giải thuật được mô phỏng và thực nghiệm nhưng kết quả vẫn chưa được phân tích kỹ. Ichrak [122] và cộng sự sử dụng mạng nơ-ron NN để giải bài toán động học thuận và nghịch cho các CDPR 2 bậc tự do 2 cấp và 3 bậc tự do 3 cấp dạng điểm treo, 2 cấu hình này chỉ có một giải pháp duy nhất cho bài toán động học. Kết quả sơ bộ cho thấy cho thấy rằng NN cung cấp kết quả gần đúng và có thể thiết kế chiến lược giải kết hợp NN và phương pháp Newton để có được kết quả chính xác trong thời gian tính toán thấp, hiệu quả phương pháp này vẫn chưa được phân tích kỹ càng, nhưng các thử nghiệm ban đầu cho thấy tiềm năng phát triển của giải pháp là có cơ sở. Merlet [123] đưa ra một phương pháp sử dụng NN để giải quyết bài toán động học thuận cho CDPR, phương pháp mới được phát triển và bắt đầu thu được những kết quả thú vị, hạn chế đầu tiên của phương

pháp này là việc giả định khối lượng MP không đổi và hạn chế thứ hai đối với giai đoạn thiết kế là việc lấy mẫu không gian làm việc để kiểm tra thuộc tính nên có thể bỏ sót những thay đổi quan trọng trong thuộc tính.

Các kết quả nghiên cứu về độ võng cấp cho thấy mô hình tính toán độ võng cấp chủ yếu dựa vào phương trình cấp xích của Irvine, một số nghiên cứu tính toán không gian hoạt động của CDPR có tính đến độ võng cấp. Bài toán động học vị trí của CDPR được quan tâm đặc biệt trong các thiết kế CDPR có không gian lớn, vì kết quả tính toán ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của đầu công tác. Một số mô hình tính toán độ võng cấp được áp dụng cho các cấu hình cụ thể như FAST hoặc các cấu hình PM-CDPR, một số nghiên cứu tập trung vào việc đơn giản hóa mô hình tính toán nhằm với các điều kiện biên cho trước, mục đích là giảm thời gian tính toán, ứng dụng cho các yêu cầu cần điều khiển thời gian thực. Giải thuật phân tích khoảng cũng được ứng dụng để tính toán độ võng cấp cho mục đích khảo sát tập hợp điều kiện động học nghịch, tuy nhiên thời gian tính toán cũng là vấn đề cần giải quyết. Các kỹ thuật tính toán mềm đang được nghiên cứu ứng dụng để tính toán các bài toán động học có tính đến độ võng cấp, các kết quả tính toán cho thấy tiềm năng phát triển của phương pháp này với ưu điểm về thời gian tính toán nhanh, tuy nhiên, độ chính xác chưa được phân tích rõ, cũng như việc xác định mô hình thích hợp để xây dựng là một vấn đề cần khắc phục để mở rộng khả năng ứng dụng. Do đó vấn đề tồn tại cần giải quyết là thiết kế một quy trình tính toán động học nghịch có tính đến ảnh hưởng của độ võng cấp với thời gian tính toán thấp, độ chính xác cao cho các cấu hình CDPR khác nhau, và phân tích đánh giá ảnh hưởng của mô hình tính toán độ võng cấp đến độ chính xác vị trí của CDPR cho các ứng dụng cụ thể, qua đó đánh giá được độ chính xác, thời gian tính toán và sự phù hợp với các cấu hình CDPR khác nhau.

2.7 Kết luận

Nghiên cứu tổng quan đã tóm tắt các công trình nghiên cứu, các ứng dụng tiêu biểu và các vấn đề quan trọng trong việc nghiên cứu và triển khai CDPR. Các vấn đề cơ bản của CDPR được trình bày tập trung vào thiết kế, phân tích không gian

làm việc, xác định các thành phần ảnh hưởng đến độ chính xác vị trí của CDPR trong các bài toán phân phối lực căng và xác định độ võng của cáp. Điểm đặc biệt của CDPR so với Robot song song được truyền động bằng liên kết cứng là vị trí và hướng của MP được điều khiển bằng dây cáp mềm, tính chất này tạo nên những ưu điểm vượt trội của CDPR như tốc độ cao, khả năng tăng tốc nhanh và tỷ lệ tải trọng trên trọng lượng cao hơn. Đặc biệt, có thể đạt được không gian làm việc lớn do tính linh hoạt trong việc lưu trữ và phân phối các dây cáp truyền động, tuy nhiên, một thách thức khi thiết kế và mô hình hóa CDPR là đặc tính một chiều của dây cáp, có nghĩa là dây cáp chỉ hoạt động với lực căng dương, điều này dẫn đến một cách tiếp cận khác trong nghiên cứu CDPR so với các Robot liên kết cứng. Các vấn đề cơ bản của CDPR như động học, động lực học, không gian làm việc, điều khiển đều liên quan đến lực căng của các dây cáp. Trong những năm gần đây, đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào các vấn đề thiết kế, động học và điều khiển tối ưu CDPR, tạo điều kiện mở rộng khả năng ứng dụng của CDPR, qua kết quả phân tích các công trình nghiên cứu về CDPR cho thấy các bài toán tối ưu hóa kết cấu của CDPR tập trung vào các hạn chế về không gian hoạt động, độ cứng, tải trọng và cấu hình hình học. Đặc biệt các nghiên cứu về CDPR có thể cấu hình lại cho các ứng dụng linh hoạt hơn. Các nghiên cứu về các tác nhân nhiều như phân phối lực căng cáp tập trung vào việc tạo ra các phân phối lực căng liên tục với các hạn chế về độ cứng động, tiêu thụ năng lượng hoặc lực căng an toàn. Nhiều phương pháp đã được nghiên cứu để giảm thời gian tính toán, rất hữu ích cho các ứng dụng yêu cầu điều khiển thời gian thực.

Các nghiên cứu về ảnh hưởng của độ võng của cáp đến độ chính xác vị trí đặc biệt quan trọng đối với các CDPR có không gian làm việc lớn vì độ võng của cáp ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác động học của CDPR. 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 cáp

xích của Irvine, do tính phi tuyến cao, việc giải bài toán tìm độ võng cấp 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. Đối với 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 nghiên cứu trong phần sau, trong đó tập trung nghiên cứu về các giải thuật phân phối lực căng cáp, các ảnh hưởng của lực căng cáp đến không gian hoạt động và độ võng cấp, thiết kế và đánh giá các giải thuật xác định độ võng cấp cho các cấu hình CDPR kích thước lớn dạng thừa ràng buộc. Thực nghiệm và đánh giá các giải thuật tính toán trên CDPR.

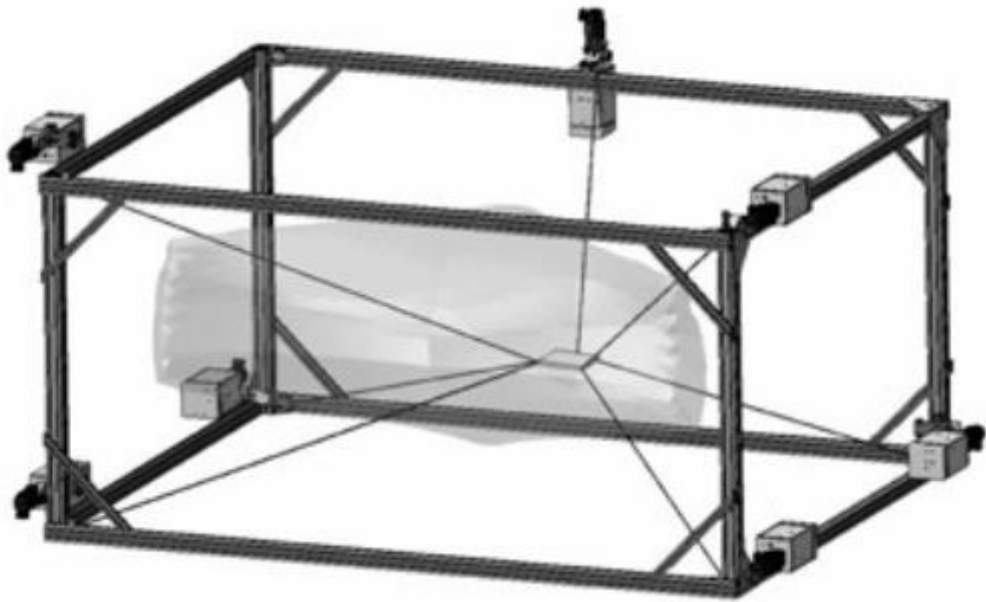
Trên cơ sở phân tích trên, các nghiên cứu sâu hơn về CDPR được thực hiện trong nội dung nghiên cứu của đề tài theo các hướng sau: Mô hình hóa các bài toán cơ bản của CDPR; Xác định và thiết kế giải thuật tính toán các thông số ảnh hưởng đến độ chính xác vị trí do lực căng cáp, độ võng cấp và độ đàn hồi của các cơ cấu truyền động, rút ngắn thời gian tính toán phân phối lực căng theo các ràng buộc cho trước; Xây dựng mô hình tính toán độ võng của cáp cho các cấu hình OC-CDPR dựa trên phương pháp số và kỹ thuật tính toán mềm nhằm tăng độ chính xác và cải thiện thời gian tính toán với khả năng áp dụng cho nhiều cấu hình CDPR khác nhau. Tích hợp các kết quả tính toán vào bộ điều khiển CDPR, thực nghiệm và đánh giá kết quả.

CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT CDPR

3.1 Giới thiệu

Nội dung chương 3 trình bày cơ sở lý thuyết robot song song truyền động bằng cáp, bao gồm việc xây dựng các bài toán: động học nghịch, biểu diễn hướng và vị trí bộ di động; bài toán vận tốc; bài toán cân bằng lực CDPR; bài toán động lực học CDPR và bài toán xác định không gian hoạt động. Kết quả của chương này là nền tảng để triển khai các vấn đề nghiên cứu ở các chương sau với các ràng buộc cụ thể về vận tốc, gia tốc, góc nghiêng của bộ đi động, phân phối lực căng cáp, độ võng cáp và phương án tích hợp vào bộ điều khiển cho CDPR thực nghiệm.

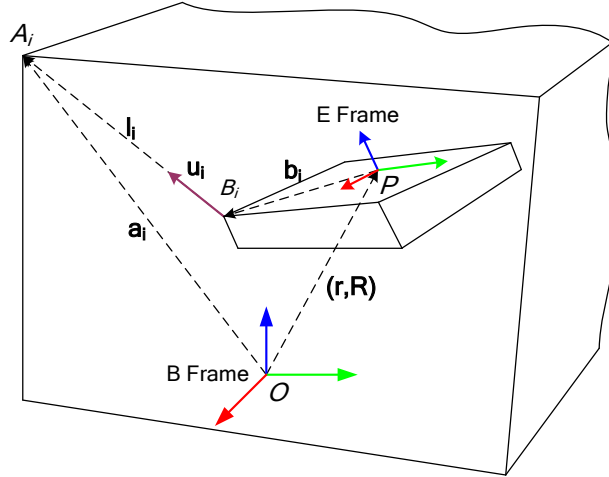
3.2 Động học vị trí CDPR



Hình 3.1: Một loại CDPR [49]

Cấu trúc điển hình của CDPR (**Hình 3.1**) bao gồm một bộ cố định với các điểm neo cáp cố định và các puli dẫn hướng được sử dụng để dẫn hướng các dây cáp truyền động theo các cấu hình khác nhau, một bộ di động được kết nối với các cáp thông qua các điểm neo có thể di chuyển được. Cáp điều khiển được lưu trữ và phân phối bằng tời, những bộ tời này thường được dẫn động bởi các động cơ servo để có thể điều khiển chính xác tốc độ và vị trí của cáp. Thông thường, CDPR làm

việc với tải trọng lớn nên hộp giảm tốc được sử dụng để giảm tốc độ động cơ và tăng mômen xoắn. Để tạo điều kiện thuận lợi cho việc chế tạo và lắp đặt bộ phân phối cáp dẫn động, tời thường được lắp vào bệ cố định, tuy nhiên, có một số cấu hình mà tất cả các tời được đặt trên bệ di động, ưu điểm của cấu hình này là thuận tiện cho việc truyền tín hiệu điều khiển giữa các động cơ và bộ điều khiển chính, đặc biệt đối với các CDPR có không gian làm việc lớn.



Hình 3.2: Sơ đồ động học vị trí của CDPR

Hình 3.2 biểu diễn sơ đồ tính toán bài toán động học vị trí của CDPR, trong đó, hệ trục quy chiếu chính cố định được kí hiệu là hệ trục B, hệ trục biểu diễn bệ di động là hệ trục E. $\mathbf{x} = (\mathbf{r}, \mathbf{R}) \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ biểu diễn hướng và vị trí của hệ trục E trong hệ trục B, với n là số bậc tự do của CDPR. Theo giản đồ véc tơ trong **Hình 3.2**, chúng ta có thể thu được công thức tính véc tơ \mathbf{l}_i ($i = 0 \dots m$) tương ứng với các cấu hình của CDPR [28, 35, 38]:

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

Trong đó véc tơ $\mathbf{a}_i = [A_{ix} \ A_{iy} \ A_{iz}]^T \in \mathbb{R}^3$ là tọa độ của các điểm mắc cáp cố định A_i trong hệ trục B, véc tơ $\mathbf{b}_i = [B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz}]^T \in \mathbb{R}^3$ là tọa độ của các điểm mắc cáp di động B_i trong hệ trục E và véc tơ 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. Chiều dài của các cáp truyền động 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 trường hợp CDPR có 6 DOF thì $\mathbf{r} = [P_x \ P_y \ P_z]^T \in \mathbb{R}^3$ biểu diễn tọa độ gốc P của hệ trục E trong hệ trục B, ma trận \mathbf{R} biểu diễn hướng của hệ trục E trong hệ trục B (Có thể sử dụng phép quay Euler, Roll-Pitch-Yaw hoặc các phương pháp biểu diễn khác). Từ (3.2) ta có:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} A_{ix} - P_x \\ A_{iy} - P_y \\ A_{iz} - P_z \end{bmatrix} - \mathbf{R} \begin{bmatrix} A_{ix} \\ A_{iy} \\ A_{iz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ma trận \mathbf{R} biểu diễn hướng của hệ trục E trong hệ trục B được xác định theo phép quay Euler ZYX, chuỗi phép quay Euler ZYX bao gồm phép quay một góc γ theo trục z (trục z của hệ trục B) được hệ trục B', phép quay một góc β quanh trục y (trục y của hệ trục B') được hệ trục B'' và phép quay một góc α quanh trục x (trục x của hệ trục B'') được hệ trục E, c và s lần lượt biểu thị hàm cos và sin tương ứng.

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ c\beta s\gamma & sas\beta s\gamma + cac\gamma & cas\beta s\gamma - sac\gamma \\ -s\beta & sac\beta & cac\beta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.3 Bài toán vận tốc CDPR

Bài toán 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, động học vận tốc được sử dụng để tính toán vận tốc khớp điều khiển từ vận tốc của MP theo quỹ đạo

thiết kế, bài toán vận tốc cũng là một thành phần của bộ điều khiển CDPR được xây dựng cho thực nghiệm. Đặt $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T \in R^3$ là vận tốc dài của tâm bệ di động P trong hệ trục B, $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y \quad \dot{\theta}_z]^T \in R^3$ là vận tốc gốc 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 gốc. Đặt \mathbf{J} ($m \times 6$) 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).

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

với $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1 \quad \dot{i}_2 \quad \dots \quad \dot{i}_m]^T$ véc tơ vận tốc các dây cáp truyền động và \mathbf{J} là ma trận Jacobian.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_m \\ \mathbf{b}_1 \times \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{b}_m \times \mathbf{u}_m \end{bmatrix}^T \quad (3.9)$$

với \mathbf{b}_i véc tơ vị trí của điểm mắc cáp B_i trên MP so với gốc P trong hệ trục E, \mathbf{u}_i là véc tơ đơn vị của cáp thứ i trong hệ trục B.

$$\mathbf{u}_i = \frac{A_i B_i}{\|A_i B_i\|} \quad (3.10)$$

Vận tốc gốc $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y \quad \dot{\theta}_z]^T \in R^3$ có thể thu được bằng các đạo hàm theo các góc quay α, β , và γ với ma trận Jacobian xoay \mathbf{J}_r :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\gamma c_\beta & -s_\gamma & 0 \\ s_\gamma c_\beta & c_\gamma & 0 \\ -s_\gamma & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Biểu diễn hệ phương trình (3.11) dưới dạng rút gọn

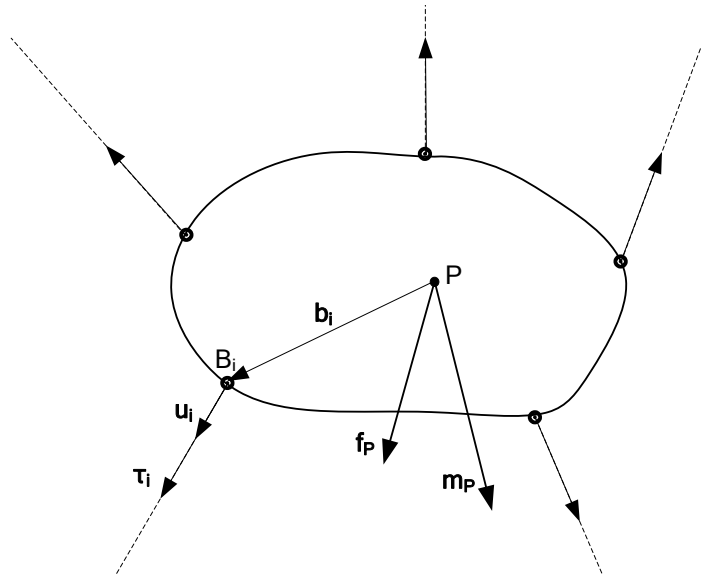
$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}_r \boldsymbol{\omega}_r \quad (3.12)$$

3.4 Hệ phương trình cân bằng

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 các lực tác dụng và lực căng của cáp phải thỏa mãn phương trình sau.

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

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



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

Trong đó, \mathbf{f}_p và \mathbf{m}_p lần lượt là véc tơ của lực và mômen do ngoại lực tác dụng lên MP; $\boldsymbol{\tau}_i$ là véc tơ lực căng cáp mà mỗi cáp tác dụng lên bộ di động và véc tơ \mathbf{b}_i đại diện cho vị trí của điểm treo cáp B_i trên MP so với điểm gốc P trong hệ trục E. Từ hướng dây cáp được chỉ ra trong **Hình 3.3**, với các véc tơ đơn vị \mathbf{u}_i , hướng của các lực $\boldsymbol{\tau}_i$ có thể nhận được như dưới đây.

$$\boldsymbol{\tau}_i = \tau_i \mathbf{u}_i \quad (3.15)$$

Từ phương trình (3.13-3.15), ta có.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_m \\ \mathbf{b}_1 \times \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{b}_m \times \mathbf{u}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{m}_p \end{bmatrix} = 0 \quad (3.16)$$

Đặt

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{u}_m \\ \mathbf{b}_1 \times \mathbf{u}_1 & \dots & \mathbf{b}_m \times \mathbf{u}_m \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{w}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_p \\ \mathbf{m}_p \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

với $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \tau_2 \dots \tau_m]$;

Phương trình (3.16) có thể được viết lại như sau

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}_p = \mathbf{0} \quad (3.19)$$

trong đó $\boldsymbol{\tau}$: véc tơ lực căng cáp ($m \times 1$);

$\mathbf{A} = \mathbf{J}^T$: Ma trận cấu trúc của CDPR ($n \times m$);

\mathbf{w}_p : véc tơ lực và mô men tác động lên tâm của MP ($n \times 1$).

3.5 Động lực học CDPR

Bài toán động lực học CDPR được xây dựng để khảo sát mối liên hệ giữa các thành phần lực tác dụng trên CDPR trong quá trình hoạt động, qua đó xác định được các thông số điều khiển và được tích hợp vào bộ điều khiển 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 lực học được phát triển, có tính đến các hệ thống con khác nhau, từ kết quả công trình [125] và phương trình (3.19) phương trình động lực học của CDPR được biểu diễn dưới 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 véc tơ ngoại lực và \mathbf{w}_g là véc tơ trọng lực. Trong trường hợp tổng quát, trọng tâm G của MP không trùng với gốc của khung E, ma trận \mathbf{I} có dạng như sau.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} m_p \mathbf{I}_3 & -\mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p \\ \mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p & \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Với m_p là khối lượng của MP, \mathbf{I}_3 là ma trận đơn vị có kích thước (3x3), $\mathbf{G}_p = [G_x \ G_y \ G_z]^T$ là véc tơ vị trí trọng tâm \mathbf{G} của MP trong hệ trục E, $\mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p$ là ma trận đường chéo đối xứng (skew-symmetric matrix) liên quan đến động lượng thứ nhất $\mathbf{M}\mathbf{G}_p$ của MP trong hệ trục E.

$$\mathbf{M}\mathbf{G}_p = \mathbf{R} [m_p G_x \ m_p G_y \ m_p G_z]^T \quad (3.22)$$

Ma trận \mathbf{I}_p là ma trận tensor quán tính của bộ di động được tính dựa trên lý thuyết Huygens-Steiner với \mathbf{I}_g là tensor quán tính của MP.

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{R} \mathbf{I}_g \mathbf{R}^T - \frac{\mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p \mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p}{m_p} \quad (3.23)$$

Với \mathbf{I}_g là tensor quán tính của MP

$$\mathbf{I}_g = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

\mathbf{w}_g là ma trận lực trọng trường được tính theo công thức (3.24)

$$\mathbf{w}_g = \begin{bmatrix} m_p \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{M}\hat{\mathbf{G}}_p \end{bmatrix} g \quad (3.24)$$

Thành phần lực Coriolis và lực li tâm $\mathbf{C}\mathbf{v}$ có dạng như sau

$$\mathbf{C}\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\omega}} \hat{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{M}\mathbf{G}_p \\ \hat{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{I}_p \hat{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Phương trình (3.20) thể hiện mối quan hệ giữa động học, tĩnh học và động lực học của CDP. Các phương trình (3.16), (3.19) và (3.20) là các phương trình quan trọng trong các bài toán xác định vùng làm việc, tính toán lực căng cáp và thiết kế bộ điều khiển của CDP. 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 CDP, bao gồm các phương pháp xác định vùng làm việc, phân phối lực căng

cáp, tính toán độ võng của các dây cáp truyền động, tích hợp kết quả tính toán vào bộ điều khiển với các ảnh hưởng của các thông số như môi trường làm việc, vật liệu cáp, kích thước hình học của toàn bộ hệ thống, phạm vi áp dụng của hệ thống.

3.6 Bài toán xác định không gian hoạt động của CDPR

Phần này trình bày các vấn đề liên quan đến không gian hoạt động của CDPR, trong đó phân tích các thành phần ảnh hưởng đến không gian hoạt động của CDPR như tải trọng, cấu hình mắc cáp, lực căng cáp, công suất cơ cấu chấp hành. Các phương pháp thường dùng để tính toán không gian hoạt động được phân tích chi tiết, từ đó chọn các thông số kỹ thuật cho việc xây dựng cấu hình CDPR thực nghiệm như kích thước khung, tải trọng, công suất động cơ.

3.6.1 Cơ sở tính toán

Theo kết quả phân tích các nghiên cứu về không gian hoạt động của CDPR, không gian hoạt động của các Robot song song dẫn động bằng cáp phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau, chẳng hạn như kích thước của khung cố định và bộ di động, khối lượng và tải trọng trên bộ di động, cấu hình mắc cáp và các đặc tính của cáp. Mặt khác, điều kiện ràng buộc về phân phối các lực căng cáp không âm gây ra nhiều khó khăn và thách thức cho việc xác định vùng làm việc của các CDPR. Vấn đề này đã là chủ đề của một số nghiên cứu và gần đây, các phương pháp hiệu quả cho phép xác định không gian làm việc của các cơ cấu dẫn động bằng cáp song song đã được đề xuất [47]. Sheng và cộng sự [48] đã đề xuất một phương pháp hiệu quả để xác định và phân tích không gian làm việc Wrench Closure Workspace (WCW) của các cơ cấu song song điều khiển bằng cáp có DOR lớn hơn hoặc bằng 1, phương pháp này dựa trên các phương trình biểu diễn bề mặt biên thu được từ không gian rỗng (nullspace) của ma trận cấu trúc của CDPR. Gouttefarde và cộng sự [50] đã đề xuất một phương pháp để xác định mặt cắt của WCW cho CDPR 6 bậc tự do (6-DOF), tương ứng với một hướng cụ thể của bộ di động, không gian hoạt động này được gọi là WCW có hướng MP không đổi (COWCW). Do đó, trong trường hợp CDPR có 6-DOF, chỉ có một phần không gian làm việc là được xác định, bởi vì ba trong số sáu biến đặt ra phải được cố định để tính toán không gian

làm việc. Một hạn chế khác của các phương pháp này nằm ở sự khó khăn khi tính đến yêu cầu của lực căng tối thiểu và tối đa trong mỗi cáp (giới hạn của lực căng cáp cho phép), đặc biệt là đối với CDPR 6-DOF được điều khiển bởi nhiều hơn sáu dây cáp.

Bài toán động học vị trí của CDPR không thể sử dụng để thiết kế bộ điều khiển bệ di động của các CDPR, do các dây cáp chỉ có thể cung cấp lực kéo mà không thể cung cấp lực đẩy. Đối với CDPR, lực căng của cáp tác động rất lớn đến không gian làm việc, **hình 3.3** cho thấy rằng, để cân bằng bất kỳ tổ hợp ngoại lực và mô men ($\mathbf{f}_p, \mathbf{m}_p$) nào tác dụng trên bệ di động, một tổ hợp lực căng cáp phải được phân phối một cách phù hợp lên các dây cáp. Các mối liên hệ giữa các thành phần lực và mô men tác dụng trên bệ di động CDPR có thể được biểu diễn bằng hệ phương trình từ (3.13 đến 3.19). Từ (3.19), không gian làm việc Wrench Closure Workspace (WCW) của CDPR xác định một tập hợp các tư thế (pose) của bệ 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 bệ di động với bất kỳ ngoại lực \mathbf{f} nào trong $[\mathbf{f}]$, tồn tại một véc tơ lực căng cáp $\boldsymbol{\tau} > \mathbf{0}$ sao cho $\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} = \mathbf{0}$. Đối với mỗi vị trí của bệ di động, cần tính toán tổ hợp phân phối của các lực căng cáp để cân bằng với các lực bên ngoài, các giải pháp phân phối lực căng cáp có thể thu được bằng cách nghịch đảo ma trận \mathbf{A} .

$$\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{A})^{-1} \mathbf{w}_p \quad (3.26)$$

Trong trường hợp CDPR có số lượng cáp nhiều hơn số bậc tự do, ma trận \mathbf{A} 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 phối lực căng cho một tư thế cho trước của bệ di động. Một số phương pháp được sử dụng để kiểm tra 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... Với các khảo sát ở chương tổng quan và mô hình toán của không gian hoạt động CDPR, một giải thuật xác định sẽ được sử dụng để tính toán không gian hoạt động, kết quả tính toán là cơ sở để xác định được cấu hình và các thông số kỹ thuật của CDPR.

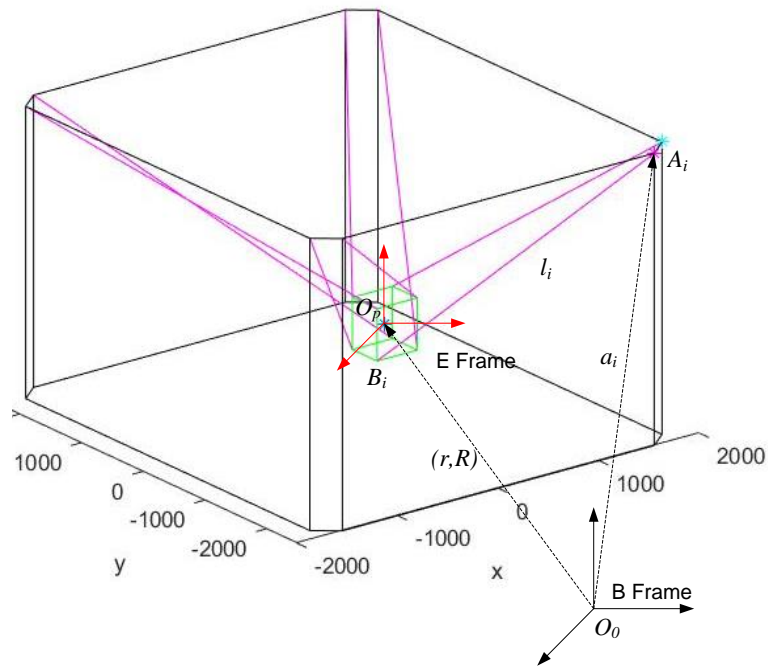
3.6.2 Mô phỏng kết quả tính toán

Các phương trình từ (3.13) đến (3.19) được sử dụng để tính toán không gian làm việc tĩnh (Static Workspace) cho CDPR dạng treo với 6 DOF được truyền động bởi 8 dây cáp như trên **hình 3.4** với các giới hạn về lực căng và tải trọng của MP. Thông số CDPR được cho trên **bảng 3.1**. Hệ trục tham chiếu $\{B\}$ được đặt tại tâm mặt dưới của khung cố định. MP là khung hình chữ nhật nối với khung Robot bằng các điểm neo cáp A_i và B_i ; l_i là chiều dài cáp truyền động. Các điểm neo cáp A_i và B_i được thiết kế dạng khớp cầu và không có ràng buộc cứng bức.

Bảng 3.1: Thông số của CDPR dạng treo 1

Thông số kỹ thuật	
Số bậc tự do	6
Số lượng cáp	8
Kích thước	5000 × 3500 × 2800 mm
Tải trọng tối đa	80 kg
Tải trọng tối thiểu	40 kg
Lực căng tối đa	800 N
Lực căng tối thiểu	80 N

Cấu trúc này không có WCW vì không tồn tại tập hợp lực căng cáp τ thỏa mãn điều kiện phương trình cân bằng (3.19). Không gian làm việc tĩnh của CDPR dạng treo 1 (**Hình 3.5**) được xác định bởi phương pháp pointwise. Với cấu hình này, bỏ qua các ngoại lực tác dụng, véc tơ lực tác dụng lên MP chỉ có trọng lực do trọng lượng của bộ di động gây ra, vì vậy không gian làm việc của CDPR tỷ lệ với tải trọng (trọng lượng của bộ di động và tải). Trong cùng một cấu hình, khi thay đổi trọng tải đặt trên MB thì không gian làm việc cũng thay đổi theo: trọng tải càng lớn thì không gian làm việc càng lớn. Với kết quả mô phỏng cho thấy, tải trọng ảnh hưởng lớn đến vùng không gian phía dưới các điểm mắc cáp cố định, tải trọng càng nhỏ thì vùng không gian hoạt động phía dưới càng nhỏ, nên chú ý rằng tải trọng tăng quá mức giới hạn của lực căng cáp thì không gian hoạt động sẽ thu hẹp phần phía trên. Dựa vào kết quả phân tích này, có thể thiết kế quỹ đạo điều khiển phù hợp tùy theo tải trọng và giới hạn lực căng thiết kế.

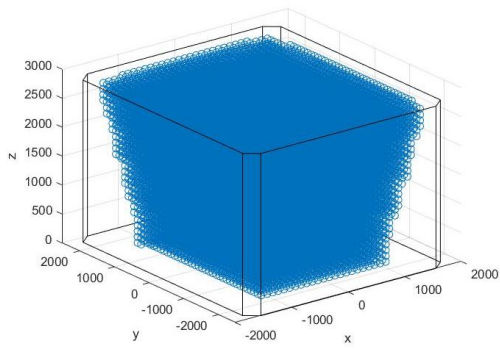


Hình 3.4: CDPR dạng treo (6 bậc tự do; 8 cables)

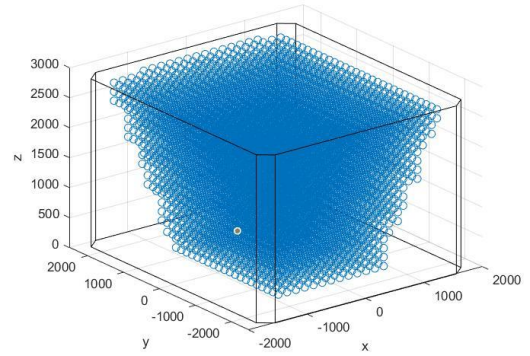
Tương tự như CDPR 1, phương xác định không gian hoạt động trên được áp dụng cho CDPR 2 - **Hình 3.6** - với các thông số cho trên **bảng 3.2**, các điều kiện lực căng được thay đổi để xác định sự ảnh hưởng của các giới hạn lực căng cáp đến không gian hoạt động tĩnh. Kết quả tính toán mô phỏng – **Hình 3.7** – cho thấy các giới hạn của lực căng cáp ảnh hưởng lớn đến kích thước vùng làm việc, thông thường khoảng giới hạn lực căng cáp càng lớn thì không gian hoạt động càng lớn do không gian nghiệm được mở rộng.

Bảng 3.2: Thông số của CDPR dạng treo 2

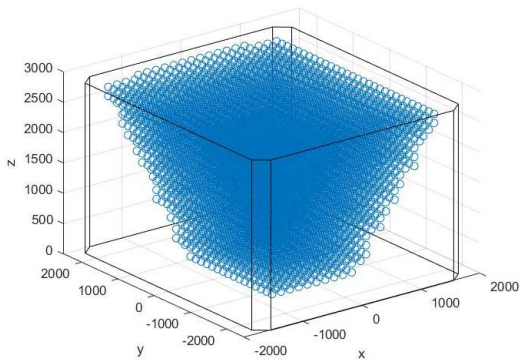
Thông số kỹ thuật	
Bậc tự do	6
Số lượng cáp	8
Kích thước	6000 × 6000 × 3000 mm
Tải trọng tối đa	80 kg
Tải trọng tối thiểu	40 kg
Lực căng tối đa	800 N
Lực căng tối thiểu	20 N



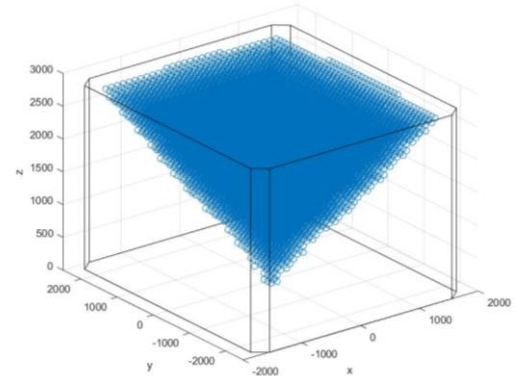
Payload = 80 kg



Payload = 60 kg

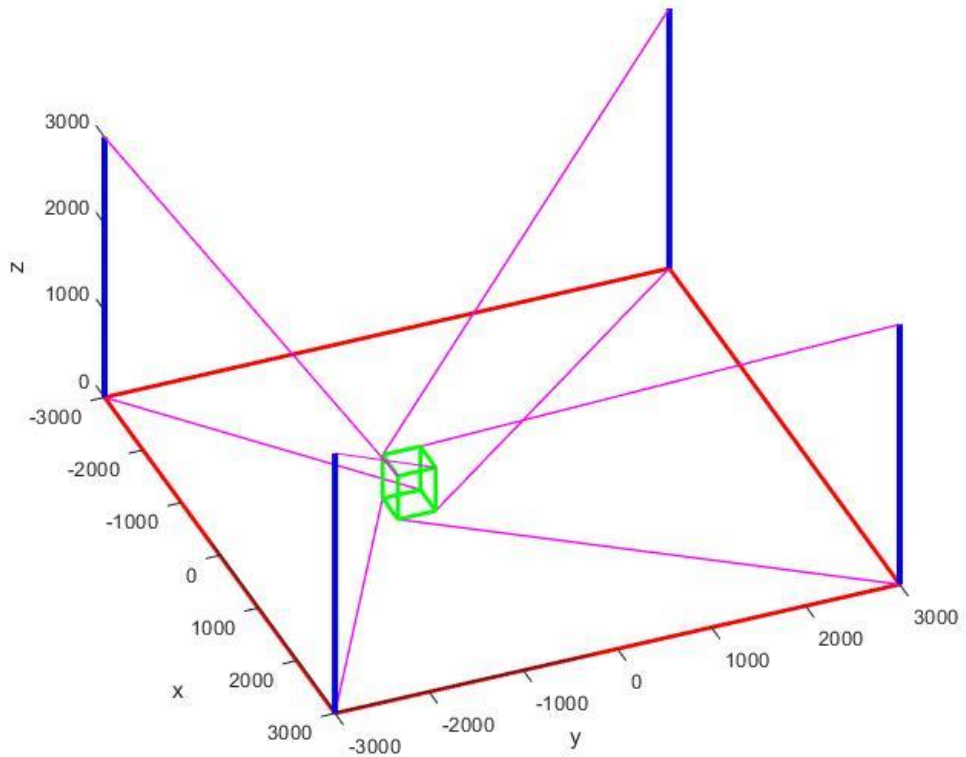


Payload = 50 kg

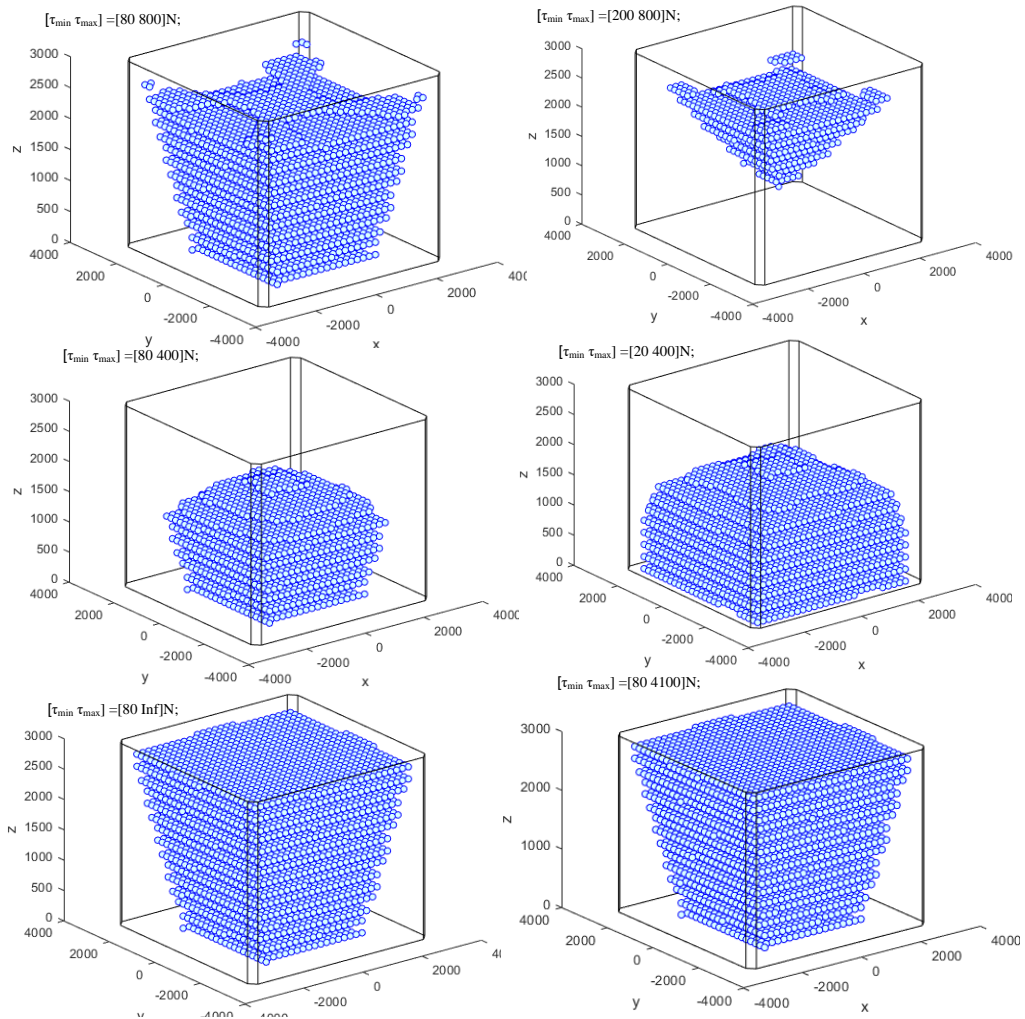


Payload = 30 kg

Hình 3.5: Không gian hoạt động của C DPR dạng treo theo tải trọng



Hình 3.6: Cấu hình OC-C DPR (6 DOF; 8 cables)



Hình 3.7: Không gian hoạt động của CDRP dạng treo với tải trọng 80kg và các giới hạn lực căng cáp khác nhau

Tuy nhiên có sự khác nhau giữa ảnh hưởng của giới hạn trên và giới hạn dưới của lực căng dây, giới hạn trên lực căng dây có xu hướng ảnh hưởng đến vùng làm việc phía trên các điểm mắc cáp cố định. Giới hạn trên càng lớn thì không gian hoạt động càng lớn, việc tìm giới hạn trên lớn nhất – điểm bão hòa – cho không gian hoạt động là một bài toán tối ưu có điều kiện, có nghĩa là khi giới hạn trên vượt qua giá trị này thì không gian hoạt động không mở rộng được nữa, ứng với cấu hình đã cho trên **bảng 3.2**, không gian hoạt động ứng với khoảng giới hạn lực căng cáp $[\tau_{min} \tau_{max}] = [80 \ 4100]N$ và $[\tau_{min} \tau_{max}] = [80 \ Inf]N$ là giống nhau, như vậy giới hạn trên bão hòa cho trường hợp này là $\tau_{max} = 4100N$. Giới hạn dưới của lực căng dây có xu hướng ảnh hưởng đến vùng không gian phía dưới gần gốc tọa độ, giới hạn dưới

càng tiến về 0 thì không gian hoạt động phía dưới khung cố định càng mở rộng. Giới hạn dưới của lực căng cáp còn có ảnh hưởng đến độ cứng của hệ thống, nếu giới hạn dưới quá thấp sẽ gây mất ổn định hoặc rung bệ di động trong quá trình di chuyển. Các tính chất này phụ thuộc vào từng cấu hình C DPR khác nhau, do đó, cần có các nghiên cứu cụ thể ứng với các cấu hình khác nhau.

3.7 Giải thuật đối ngẫu – Dual Simplex

Giải thuật Dual Simplex được sử dụng để tìm một giải pháp phân phối lực căng τ sao cho hàm số (3.19) có giá trị nhỏ nhất và thỏa mãn các ràng buộc về lực căng cáp và các điều kiện biên của lực tác dụng. Trong bài toán tối ưu hóa tuyến tính, chúng ta định nghĩa hàm chi phí $F = \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau}: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ như là giá trị mục tiêu của bài toán gốc P (primal problem) và véc tơ $\boldsymbol{\tau}^*$, là giải pháp cực tiểu hóa hàm mục tiêu $F = \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau}^*$, và cũng thỏa mãn các điều kiện $\mathbf{A} \boldsymbol{\tau}^* = -\mathbf{w}_p$ và $0 \leq \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ được gọi là giải pháp tối ưu của bài toán P. Tương ứng với bài toán gốc P, tồn tại một bài toán đối ngẫu D, được xây dựng theo phương pháp sau:

Cực tiểu hóa hàm mục tiêu: $\mathbf{b}^T \mathbf{u}$ sao cho: $\mathbf{A}^T \mathbf{u} \leq \mathbf{c}$ với mọi \mathbf{u} ,

Với $\mathbf{u} = (u_1; u_2; \dots; u_m) \in \mathbb{R}^m$ được gọi là véc tơ biến đối ngẫu (dual variables vector). Chú ý rằng nếu bài toán đối ngẫu của D được tạo ra thì bài toán nguyên hàm ban đầu P cũng được tạo ra. Mối quan hệ giữa bài toán P và D được thiết lập bởi ba định lý sau [126, 127].

Định lý 1. (Weak duality) *Đối ngẫu yếu: Nếu τ là nghiệm khả thi của P và u là nghiệm khả thi của D thì $\mathbf{b}^T \mathbf{u} \leq \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau}$.*

Định lý 2. (Strong duality) *Tính đối ngẫu mạnh: Nếu bài toán P có một giải pháp tối ưu thì bài toán D cũng có một giải pháp tối ưu. Hơn nữa, các giá trị giải pháp tối ưu tương ứng bằng nhau.*

Trong Định lý 1, nếu tồn tại một cặp nghiệm \mathbf{u} và $\boldsymbol{\tau}$, làm cho $\mathbf{b}^T \mathbf{u} = \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau}$, thì $\boldsymbol{\tau}$ và \mathbf{u} lần lượt là nghiệm của P và D. Bên cạnh đó, điều kiện định lý bù yếu

(*complementary slackness condition*) có thể được sử dụng để kiểm tra tính chất tối ưu của τ và u . Điều kiện định lý bù yếu được trình bày trong Định lý 3.

Định lý 3. Gọi τ và u lần lượt là các nghiệm của P và D. Khi đó, τ và u là các nghiệm tối ưu cho mỗi bài toán khi và chỉ khi $u^T(A\tau - b) = 0$ và $(c - A^T u)^T \tau = 0$.

Định lý 3 có thể được sử dụng để thiết lập tính chất tối ưu của một nghiệm τ ($\tau \geq 0$); nếu bài toán P ở dạng chuẩn thì lời giải này thỏa mãn điều kiện bổ sung đầu tiên về định lý bù yếu. Giả sử rằng $\tau_i > 0$ tạo thành điều kiện thứ hai; sau đó chúng ta thu được một hệ phương trình, bao gồm các phương trình $A_{ij}^T u = c_i$ ứng với $\tau_i > 0$. Nếu nghiệm u thỏa mãn ràng buộc thứ nhất của bài toán đối ngẫu và tổng chi phí bằng cùng chi phí của bài toán nguyên thủy thì τ là phương án tối ưu giải pháp cho lập trình tuyến tính ban đầu. Ba điều kiện Karush – Kuhn – Tucker (KKT) cho một bài toán tối ưu hóa tuyến tính (LP) được thể hiện trên định lý 4.

Định lý 4. Điều kiện tối ưu KKT cho tối ưu hóa tuyến tính: Cho một bài toán tối ưu hóa tuyến tính P, véc tơ τ là một nghiệm tối ưu của P nếu và chỉ khi tồn tại véc tơ u và r sao cho:

1. $A\tau = b; \tau \geq 0$ (primal feasibility);
2. $A^T u + r = c; r \geq 0$ (dual feasibility);
3. $r^T \tau = 0$ (complementary slackness);

3.8 Giải thuật vùng tin cậy [128]:

Một trong những phương pháp phổ biến để giải các hệ phương trình phi tuyến đa biến là chia các bài toán phức tạp thành một loạt các nhiệm vụ nhỏ hơn để giải dễ dàng hơn, sau đó sẽ tính toán một chuỗi các phép tính gần đúng liên tiếp cho quá trình tối ưu hóa, đây là cách tiếp cận được thực hiện bởi các thuật toán dạng “LineSearch” như phương pháp Newton hoặc Gradient liên hợp. Thuật toán vùng tin cậy cũng dựa trên phương pháp này, nhưng khác với phương pháp “LineSearch” ở một số điểm tính toán chính, giả sử chúng ta muốn tìm cực tiểu hàm f , chọn điểm bắt đầu là một điểm cụ thể x_k nào đó trong miền xác định của f , nhiệm vụ là phải chọn được một điểm mới x_{k+1} sao cho hàm số đạt cực tiểu hóa tốt hơn. Thuật toán

“LineSearch” giải quyết vấn đề này bằng cách trước tiên chọn hướng tìm kiếm d_k (thường liên quan đến đạo hàm của f), sau đó chọn độ dài bước α_k để cực tiểu f dọc theo hướng d_k . Điểm tiếp theo được xác định như công thức (3.27).

$$x_{k+1} := x_k + \alpha_k d_k \quad (3.27)$$

Thuật toán vùng tin cậy không sử dụng thông số hướng tìm kiếm và độ dài bước mà xấp xỉ hàm f bằng một số hàm m_k đơn giản hơn (được gọi là hàm mô hình) trong vùng lân cận của x_k . Lưu ý rằng hàm mô hình m_k có thể sẽ không phải là một xấp xỉ tốt cho f trên toàn bộ miền xác định, do đó thuật toán vùng tin cậy chỉ tìm kiếm giá trị tối ưu trong một vùng dạng hình cầu có bán kính r_k và có tâm tại điểm x_k , bên vùng xác định này, m_k xấp xỉ chính xác với f . Sau đó, chúng ta tìm cực tiểu m_k trên miền xác định này và đặt x_{k+1} là điểm xét tiếp theo. Nghĩa là sẽ tính x_{k+1} bằng cách giải bài toán con theo công thức (3.28). Vùng $B(x_k; r_k)$ được gọi là vùng tin cậy vì hàm mô hình m_k cho giá trị xấp xỉ chính xác của f trên vùng này.

$$x_{k+1} := \underset{x \in B(x_k, r_k)}{\text{agr min}}(m_k(x)) \quad (3.28)$$

Hàm mô hình thường được coi là xấp xỉ tuyến tính hoặc bậc hai của f dựa trên khai triển chuỗi Taylor của nó tại điểm x_k . Hàm xấp xỉ bậc 2 có dạng như công thức (3.29):

$$m_k(x) = f(x_k) + (x - x_k)^T \nabla f(x_k) + \frac{1}{2} (x - x_k)^T H_k (x - x_k) \quad (3.29)$$

trong đó $\nabla f(x_k)$ là đạo hàm bậc 1 của f tại x_k , H_k là ma trận Hessian của f tại x_k , hoặc một giá trị gần đúng nào đó của nó, với một vùng tin cậy có bán kính r_k , bài toán con có thể được viết theo cách sau:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \underset{x \in B(x_k, r_k)}{\text{agr min}}(m_k(x)) \\ &= x_k + p_k \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\text{với } p_k = \underset{\|p\| < r_k}{\text{agr min}} \left\{ f(x_k) + p^T \nabla f(x_k) + \frac{1}{2} p^T H_k p \right\} \quad (3.31)$$

p_k được gọi là bước và p được xác định bởi công thức sau

$$p = x - x_k \quad (3.32)$$

Từ (3.29, 3.30, 3.31, 3.32), hàm mô hình có dạng sau

$$m_k(p) = f(x_k) + p^T \nabla f(x_k) + \frac{1}{2} p^T H_k p \quad (3.33)$$

Một vấn đề quan trọng của thuật toán vùng tin cậy là việc làm thế nào để chọn được bán kính r_k phù hợp, nếu giá trị r_k quá nhỏ thì thuật toán sẽ tiến chậm về phía cực tiểu của f , nếu giá trị r_k quá lớn, hàm mô hình sẽ không phù hợp với hàm mục tiêu f và lần lặp tiếp theo x_{k+1} có thể không giảm được f . Lưu ý là giá trị bán kính r_k nhỏ hay lớn phụ thuộc vào đặc tính cục bộ của f , đặc tính này có thể thay đổi khi thuật toán hội tụ, vì vậy một thuật toán vùng tin cậy phù hợp phải có khả năng chọn bán kính vùng tin cậy một cách thích ứng. Trong giải thuật này, để chọn bán kính thích hợp r_{k+1} cho lần lặp thứ $k + 1$ liên quan đến việc đánh giá độ chính xác của hàm mô hình ở lần lặp thứ k . Nếu mô hình chính xác và đã thực hiện được một bước lớn, chúng ta có thể chọn r_{k+1} lớn hơn r_k với hy vọng đạt được sự hội tụ nhanh hơn. Tuy nhiên, để ngăn việc chọn bán kính tăng quá lớn, bán kính được chọn sẽ bé hơn bán kính r_{max} cho trước, nếu mô hình rất không chính xác, có nghĩa là hàm mô hình có sai số lớn trên một vùng tin cậy bán kính lớn, lúc này r_{k+1} được chọn nhỏ hơn r_k , nếu mô hình không đặc biệt chính xác cũng như không chính xác với sai số không quá lớn, thì chọn $r_{k+1} = r_k$. Độ chính xác của mô hình được đo lường bằng cách tính giá trị sau:

$$\rho_k = \frac{f(x_k) - f(x_k + p_k)}{m_k(0) - m_k(p_k)} \quad (3.34)$$

Giá trị này là tỷ lệ giữa mức giảm thực tế của hàm f và mức giảm dự đoán của hàm m_k trong hàm mục tiêu, ρ_k càng tiến đến 1 thì mô hình càng chính xác. Nếu ρ_k âm hoặc dưới một ngưỡng dương nhất định η thì điểm $x_k + p_k$ là một sự cải thiện kém hoặc tệ hơn so với x_k . Trong trường hợp này, điểm mới sẽ được loại bỏ và điểm tiếp theo được đặt lại $x_{k+1} = x_k$.

Thuật toán vùng tin cậy được xây dựng kết hợp hai bước tối thiểu hóa hàm mô hình và chọn bán kính vùng tin cậy. Trong thực tế, thuật toán sẽ dừng khi $\|\nabla f(x_k)\|$ nhỏ hơn một giá trị ngưỡng cho trước.

Thuật toán Vùng tin cậy

1: Chọn điểm bắt đầu x_0 , bán kính ban đầu r_0 , và ngưỡng $\eta \in [0, 0.25)$.

2: Khi $\|\nabla f(x_k)\| > tol$ thực hiện

3: Tính p_k bằng cách giải phương trình (3.33)

4: Tính ρ_k

5: nếu $\rho_k < 0.25$ thì

6: $r_{k+1} = 0.25r_k$

7: trường hợp khác

8: nếu $\rho_k < 0.75$ và $\|p_k\| = r_k$ thì

9: $r_{k+1} = \min(2r_k, r_{max})$

10: trường hợp khác

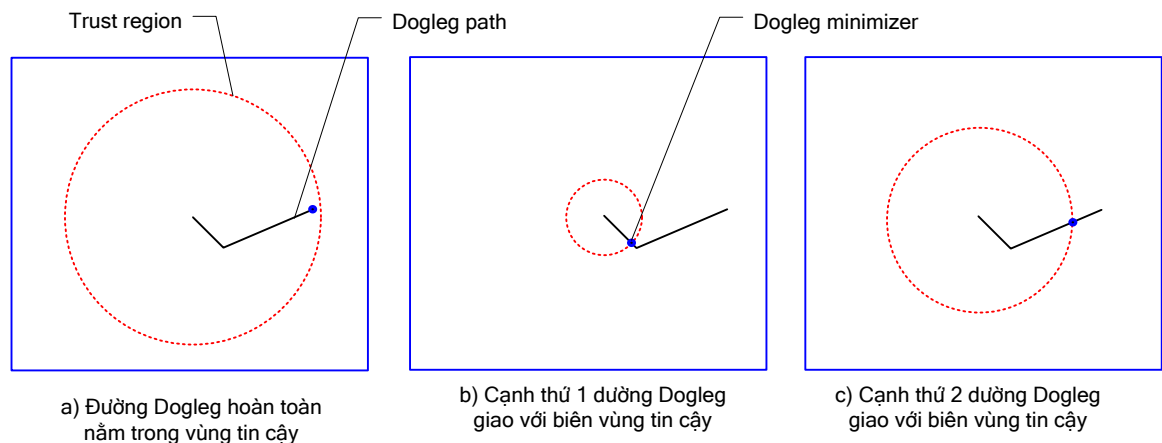
11: $r_{k+1} = r_k$

12: nếu $\rho_k < \eta$ thì

13: $x_{k+1} = x_k + p_k$

14: trường hợp khác

15: $x_{k+1} = x_k$



Hình 3.8: Mối quan hệ giữa đường dogleg (đường liền màu đen), ranh giới vùng tin cậy (vòng tròn nét đứt màu đỏ) và cực tiểu dogleg (chấm màu xanh).

Lưu ý rằng thuật toán vùng tin cậy ở trên vẫn chưa hoàn chỉnh vì không có phương tiện khả thi để giải bài toán con được đưa ra bởi phương trình (3.33). Mục tiêu đưa ra là có thể tìm kiếm cực tiểu thực sự của hàm mô hình trên vùng tin cậy, nhưng giải thuật có thể dừng chỉ với một bộ cực tiểu gần đúng, do đó phương thức

“dogleg” sẽ được sử dụng khi chọn một bộ cực tiểu gần đúng của hàm mô hình, phương pháp này sẽ tối thiểu hóa hàm mô hình dọc theo một quỹ đạo cụ thể kéo dài từ điểm gốc đến ranh giới của vùng tin cậy. Quỹ đạo này là tuyến tính từng phần và có hình dạng như **hình 3.8**.

Để tính toán cực tiểu dogleg của hàm mô hình, trước tiên chúng ta tìm cực tiểu không bị ràng buộc của hàm mô hình với p^B là cực tiểu không giới hạn của hàm mô hình:

$$p^B = -H_k^{-1}\nabla f(x_k) \quad (3.35)$$

Tiếp theo là tính toán hướng đi xuống dốc nhất cho hàm mô hình, được tính bởi công thức (3.36)

$$p^U = -\frac{\nabla f(x_k)^T \nabla f(x_k)}{\nabla f(x_k)^T H \nabla f(x_k)} \nabla f(x_k) \quad (3.36)$$

Đường dogleg được xác định bởi 2 điểm này theo công thức sau:

$$\gamma(\tau) = \begin{cases} \tau p^U, & 0 \leq \tau \leq 1 \\ p^U + (\tau - 1)(p^B - p^U), & 1 \leq \tau \leq 2 \end{cases} \quad (3.37)$$

Có thể thấy rằng hàm mô hình giảm dọc theo quỹ đạo này. Do đó, cực tiểu dogleg là điểm cuối của đường dogleg nếu nó nằm hoàn toàn trong vùng tin cậy hoặc là điểm giao nhau giữa đường dẫn và ranh giới của vùng tin cậy. **Hình 3.8** minh họa ba trường hợp có thể xảy ra, đặc điểm cụ thể từng trường hợp như sau.

Hình 3.8(a) là trường hợp khi đường dogleg nằm hoàn toàn trong vùng tin cậy khi $\|p^B\| \leq r_k$, cực tiểu dogleg đơn giản là điểm cuối, cụ thể là p^B .

Hình 3.8(b) là trường hợp khi đường dogleg giao với ranh giới của vùng tin cậy trong đoạn đầu tiên khi $\|p^U\| \geq r_k$, cực tiểu dogleg là $r_k p^U / \|p^U\|$.

Hình 3.8(c) là trường hợp khi đường dogleg giao với ranh giới của vùng tin cậy trong đoạn thứ hai, cực tiểu dogleg là $p^U + (\tau^* - 1)(p^B - p^U)$, trong đó τ^* thỏa mãn phương trình bậc hai sau

$$\|p^U + (\tau^* - 1)(p^B - p^U)\|^2 = r^2 \quad (3.38)$$

Phương trình (3.38) có thể được đơn giản hóa thành

$$a(\tau^* - 1)^2 + b(\tau^* - 1) + c = 0 \quad (3.39)$$

Với

$$a = (p^B)^T p^B - 2(p^B)^T p^U + (p^U)^T p^U$$

$$b = 2(p^B)^T p^U - 2(p^U)^T p^U$$

$$c = (p^U)^T p^U - r_k^2$$

3.9 Kết luận

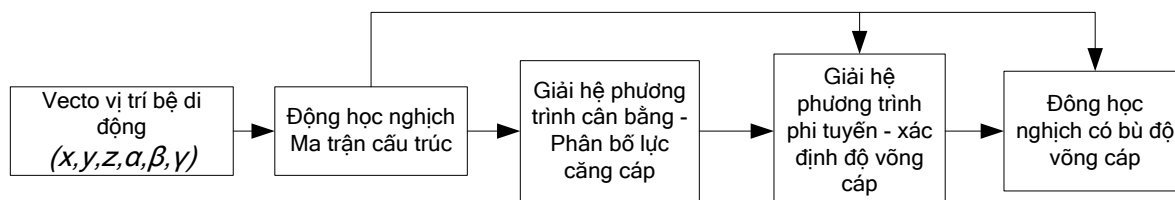
Chương 3 đã trình bày các bài toán chính cho cấu hình CDPR thừa ràng buộc, trong đó có bài toán động học nghịch, biểu diễn hướng và vị trí bộ di động; bài toán động học vận tốc và mối liên hệ giữa vận tốc góc và vận tốc của các góc chỉ phương; bài toán cân bằng lực đặc trưng của CDPR có liên qua đến ngoại lực, lực trọng trường và lực căng cáp; bài toán động lực học có tính đến các thành phần lực quán tính, lực tương hỗ và ly tâm, lực trọng trường và lực căng của dây cáp. Kết quả của chương này được trình bày dưới dạng ma trận và véc tơ, thuận tiện cho việc xây dựng chương trình tính toán và mô phỏng ở các phần sau.

Chương này cũng đã thiết lập được cơ sở xác định không gian hoạt động của CDPR, kết quả tính toán được mô phỏng để phân tích các thành phần 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. Kết quả tính toán có 2 kết luận quan trọng: Thứ nhất là ứng với cấu hình CDPR đề xuất, tải trọng ảnh hưởng lớn đến vùng không gian phía dưới các điểm mắc cáp cố định, tải trọng càng nhỏ thì vùng không gian hoạt động phía dưới càng nhỏ và ngược lại; Thứ 2 là các giới hạn của lực căng cáp ảnh hưởng lớn đến kích thước vùng làm việc, thông thường khoảng giới hạn lực căng cáp càng lớn thì không gian hoạt động càng lớn do không gian nghiệm được mở rộng. Đây cũng là cơ sở để tính toán chọn lựa cấu hình CDPR, công suất cơ cấu chấp hành với các điều kiện về tải trọng, cấu không gian hoạt động cho trước. Kết quả này được áp dụng vào việc xây dựng cấu hình, tối ưu không gian hoạt động và xây dựng vùng an toàn cho việc điều khiển CDPR thực nghiệm trong các ứng dụng khác nhau.

CHƯƠNG 4: THIẾT KẾ GIẢI THUẬT TÍNH TOÁN BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH VỚI LỰC CĂNG CẤP VÀ ĐỘ VỖNG CẤP

4.1 Giới thiệu

Chương 4 trình bày các nội dung và các thành phần dùng để tính toán bài toán động học nghịch tích hợp giải thuật xác định lực căng cáp và độ võng cáp cho OC-CDPR. Mô hình tính toán này được minh họa trên **hình 4.1**, trong đó các bài toán cần giải quyết để xây dựng giải thuật tính toán bài toán động học nghịch OC-CDPR bao gồm giải thuật xác định phân phối lực căng cáp, đầu vào của giải thuật này là vị trí đầu công tác và ma trận cấu trúc, phương trình cân bằng lực, đặc tính truyền động, kết quả tính toán là véc tơ lực căng cáp theo các tiêu chuẩn tối ưu cho trước, kết quả này cùng với mô hình động học nghịch – ma trận cấu trúc là đầu vào của giải thuật xác định độ võng cáp, với thành phần là các phương trình phi tuyến, kết quả tính toán của bước này chiều dài cáp có bù võng cáp, kết quả này cùng với lực căng cáp, mô hình động lực học sẽ được tích hợp vào bộ điều khiển OC-CDPR.



Hình 4.1: Bài toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp

Nội dung chi tiết chương 4 bao gồm xây dựng các giải thuật được thiết kế để xác định lực căng cáp, kết quả tính toán được phân tích và sử dụng để xây dựng giải thuật tính toán độ võng cáp dựa trên phương trình cấp xích của Irvin [91], giải thuật vùng tin cậy được sử dụng để tính toán độ võng cáp, kết quả tính toán này được sử dụng để xây dựng giải thuật tính toán độ võng cáp mới được phát triển dựa trên kỹ thuật tính toán mềm ANFIS với các điều kiện biên cụ thể cho cấu hình OC-CDPR, trong đó có 3 giải thuật tính toán phân phối lực căng cáp được phân tích. Các giải thuật xác định lực căng cáp và độ võng cáp được sử dụng để xây dựng giải thuật tính toán bài toán động học nghịch cho CDPR, sau đó được mô phỏng để tính toán

quỹ đạo khớp cho cấu hình CDPR trong đề tài, kết quả mô phỏng được phân tích và đánh giá trước khi tích hợp vào bộ điều khiển của CDPR.

4.2 Xác định phân phối lực căng cáp

Phần này trình bày nghiên cứu, thiết kế các giải thuật phân phối lực căng cáp cho các CDPR thừa ràng buộc với các điều kiện biên cụ thể. Trong đó giải thuật tối ưu hóa tuyến tính, tối ưu hóa phi tuyến, phân phối lực dạng đóng được thiết kế để xác định phân phối lực căng cáp với các tiêu chí tối ưu cho các hàm mục tiêu linh hoạt. Mục tiêu của phần này là chọn ra được một giải thuật xác định phân phối lực căng phù hợp với từng yêu cầu thiết kế cụ thể với các tiêu chí tối ưu. Các tiêu chí để đánh giá một giải pháp phân phối lực căng cáp là khả năng đáp ứng tiêu chuẩn tối ưu và các điều kiện biên, sự liên tục của lực căng cáp theo quỹ đạo, thời gian tính toán và khả năng bao phủ không gian làm việc, thứ tự ưu tiên các tiêu chí này được chọn tùy theo từng ứng dụng cụ thể. Kết quả tính toán được mô phỏng trên một số cấu hình OC-CDPR, qua đó đánh giá sự phù hợp với ứng dụng của đề tài và khả năng mở rộng của các phương pháp cho các cấu hình khác.

Việc tìm giải pháp phân phối lực căng cáp cho các OC-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 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:

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

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 ($n \times 1$) véc tơ của lực và mô men 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. Các vấn đề quan trọng để tính toán giải pháp phân phối lực căng của CDPR là:

- o Có ít nhất một nghiệm τ thỏa mãn phương trình (4.1) cho một tư thế nhất định? Điều kiện này cũng được áp dụng để xác định không gian làm việc của CDPR.

- o Phương án xác định giải pháp phân phối lực căng sao cho tổng lực căng của cáp là nhỏ nhất (ví dụ: cho mục đích giảm tiêu thụ điện năng).

- o Phương án xác định các giải pháp phân phối lực căng cáp liên tục dọc theo quỹ đạo (ví dụ: cho mục đích điều khiển lực).

- o Phương án xác định các giải pháp phân phối lực căng cáp an toàn (ví dụ: cho mục đích ổn định hệ điều khiển, tránh chùng cáp hoặc quá tải động cơ truyền động bộ phân phối cáp).

Trong phần này, giải pháp phân phối lực căng cáp được thiết kế cho các OC-CDPR dựa trên các thuật toán tối ưu hóa bậc 1 - Dual Simplex Algorithm - DSA [120, 122, 123], tối ưu hóa bậc 2 - Quadratic Programming - QPA[78-79], và giải thuật phân phối lực căng cáp ở dạng đóng – Force Distribution in Closed Form – FDCF [70-71]. Đóng góp chính của phần này là việc xây dựng giải thuật phân phối lực căng cáp DSA và QPA thỏa mãn các điều kiện biên và các tiêu chuẩn tối ưu cho trước với các biến phụ cải tiến cho việc chọn lựa xu hướng phân phối lực căng. Giải thuật tham khảo FDCF được sử dụng để so sánh và phân tích kết quả với DSA và QPA, cũng như làm giải pháp thích hợp cho bộ điều khiển thời gian thực với các điều kiện điều khiển cho trước. Kết quả của các giải thuật này được tổng hợp và đánh giá, cho thấy sự ảnh hưởng đến các bài toán quan trọng là tính toán độ võng cáp, thiết kế bộ điều khiển. Ngoài ra giải thuật phân phối lực căng cáp dạng đóng FDCF cũng được thử nghiệm và phân tích theo các chỉ tiêu đánh giá như độ liên tục, thời gian tính toán, và độ bao phủ không gian hoạt động, để so sánh ưu nhược điểm và khả năng áp dụng cùng với 2 giải thuật được xây dựng.

4.2.1 Thuật toán đơn giản kép - Dual Simplex Algorithm (DSA) cho bài toán tối ưu hóa tuyến tính (Quy hoạch tuyến tính).

Kết quả nghiên cứu trong phần này được áp dụng cho một CDPR có 6 DOF truyền động bởi 8 dây cáp có cấu hình dạng treo. Với ứng dụng này, vận tốc di chuyển là nhỏ vì vậy các lực tác động lên MP được biểu diễn dưới dạng tĩnh, tuy nhiên, giải thuật này vẫn có thể áp dụng cho các lực động. Phương trình cân bằng của MP có thể được sử dụng để tính lực căng cáp τ_i , với một vị trí khả thi cho trước, chúng ta có thể thu được vô số nghiệm, hoặc tồn tại vô số các kết hợp hợp lệ cho τ , có nghĩa là trong trường hợp này, có nhiều tổ hợp phân phối lực căng cáp thỏa mãn các điều kiện cân bằng tại một vị trí nhất định vì số lượng cáp nhiều hơn số bậc tự do. Để có thể chọn được một giải pháp mong muốn trong số các giải pháp khả thi này, các kỹ thuật toán học được sử dụng, mục đích là để tìm ra một giải pháp duy nhất, bài toán này có thể được giải tương tự một bài toán tìm điểm tối ưu theo các ràng buộc tuyến tính. Trường hợp cần tìm các bộ nghiệm lực căng cáp của CDPR thỏa mãn phương trình cân bằng lực (4.1) với yêu cầu tổng giá trị của các lực căng cáp là nhỏ nhất, bài toán giải pháp phân phối lực căng trở thành một bài toán tối ưu hóa tuyến tính. Hệ phương trình (4.1) sẽ được viết lại dưới dạng các ràng buộc tối ưu và hàm mục tiêu (cost function) được mô tả theo bài toán tối ưu hóa tuyến tính như sau.

$$\text{Tìm cực tiểu hàm mục tiêu } \mathbf{F} = \mathbf{c}^T \boldsymbol{\tau} \quad (4.2)$$

với các ràng buộc

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{w}_p \quad (4.3)$$

$$\mathbf{0} \leq \boldsymbol{\tau}_{\min} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \quad (4.4)$$

Đây là một bài toán tối ưu hóa tuyến tính điển hình, có nhiều phương pháp để giải quyết. Trong nghiên cứu này, giải thuật Dual Simplex được sử dụng để tìm các hệ nghiệm thỏa mãn các điều kiện ràng buộc. Các phương trình (4.2 - 4.4) sẽ được giải với các điều kiện tối ưu hóa tuyến tính, với $\mathbf{c} = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m]^T \in \mathbb{R}^m$ là ma trận hệ

số hàm mục tiêu, được xác định dựa vào mức độ ảnh hưởng của các dây cáp với điều kiện thiết kế cụ thể, trong trường hợp mức ảnh hưởng là như nhau thì các hệ số trong ma trận \mathbf{c} là bằng nhau và bằng 1; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_m]^T$ là véc tơ lực căng cáp tương ứng với véc tơ biểu diễn các biến tối ưu với điều kiện ($\boldsymbol{\tau} > 0$); $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ là ma trận cấu trúc của CDPR; $\mathbf{w}_p = -\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ biểu diễn ngoại lực tác dụng; Hệ phương trình (4.3) có dạng tương đương với các ràng buộc hệ phương trình tuyến tính và τ_{min} và τ_{max} giới hạn trên và giới hạn dưới của lực căng cáp.

Giải thuật Dual Simplex được sử dụng để tìm một giải pháp phân phối lực căng $\boldsymbol{\tau}$ sao cho hàm số (4.2) có giá trị nhỏ nhất và thỏa mãn các ràng buộc (4.3) và các điều kiện biên (4.4) (**phần 3.7 chương 3**). Trong nghiên cứu này, ma trận \mathbf{A} có hạng n ($n = 6 < m = 8$). Đặt ma trận \mathbf{B} là ma trận cơ bản được tạo thành bởi 6 cột độc lập tuyến tính của ma trận \mathbf{A}^T và ma trận \mathbf{N} là một ma trận không cơ bản chứa hai cột còn lại của ma trận \mathbf{A} . Véc tơ nghiệm $\boldsymbol{\tau}$ được chia thành 2 phần, $\boldsymbol{\tau}_B = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6)^T$ và $\boldsymbol{\tau}_N = (\tau_7, \tau_8)^T = \mathbf{0}$, được gọi là nghiệm “cơ bản” và “không cơ bản” tương ứng. Véc tơ hệ số hàm mục tiêu $\mathbf{c}^T = [\mathbf{c}_B \ \mathbf{c}_N]$ cũng được chia thành 2 phần cơ bản \mathbf{c}_B và không cơ bản \mathbf{c}_N liên quan đến các nghiệm $\boldsymbol{\tau}_B$ và $\boldsymbol{\tau}_N$. Giải sử \mathbf{u} là nghiệm đối ngẫu của ma trận cơ bản \mathbf{B} , ta có $\mathbf{A}^T\mathbf{u} \leq \mathbf{c}$ và $\mathbf{u}^T = \mathbf{c}^T\mathbf{B}^{-1}$. Do đó các ràng buộc đẳng thức của bài toán \mathbf{P} được thỏa mãn, vì

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} + \mathbf{N}\cdot\mathbf{0} = \mathbf{b} \quad (4.5)$$

và điều kiện bù yếu (*complementary slackness*) cũng được thỏa mãn, vì

$$(\mathbf{c} - \mathbf{A}^T\mathbf{u})^T\boldsymbol{\tau} = \mathbf{c}^T\boldsymbol{\tau} - \mathbf{u}^T\mathbf{A}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{c}^T\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} - \mathbf{c}^T\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} = 0 \quad (4.6)$$

Trong trường hợp này, nếu $\boldsymbol{\tau}_B \geq \mathbf{0}$ thì $\boldsymbol{\tau}$ là nghiệm tối ưu của \mathbf{P} và tất cả các điều kiện của Định lý 4 đều được thỏa mãn. Nếu chỉ có một phần tử mang giá trị âm trong $\boldsymbol{\tau}_B$, nó sẽ bị loại bỏ bằng cách thay đổi ma trận cơ bản \mathbf{B} , do đó làm giảm tính bất khả thi của bài toán nguyên thủy \mathbf{P} . Quy trình này được lặp lại cho đến khi tất cả các phần tử trong $\boldsymbol{\tau}_B$ không âm. Đây là lợi thế của thuật toán đơn giản kép.

Trong trường hợp điều khiển Robot di chuyển với vận tốc và gia tốc chậm, bỏ qua hiệu ứng động lực học, véc tơ ngoại lực $\mathbf{w}_p = -\mathbf{b}$ có thể biểu diễn dưới dạng đơn giản sau:

$$\mathbf{w}_p = \begin{bmatrix} F_p \\ M_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Với m là tổng khối lượng của bộ di động, g là gia tốc trọng trường.

Với ma trận cấu trúc $\mathbf{A} = \mathbf{J}^T$ (\mathbf{J} là ma trận Jacobian) được xác định trong (3.17), thuật toán DSA được sử dụng để tìm tập hợp lực căng $\boldsymbol{\tau}$ thỏa mãn các điều kiện tối ưu với các ràng buộc về cấu trúc cáp. Kết quả của phần này, được sử dụng làm đầu vào của quá trình tính toán chiều dài cáp, có tính đến độ võng của cáp cho CDPR ứng dụng cho việc thử nghiệm độ chính xác vị trí với 8 cáp — 6 DOF.

4.2.2 Phân phối lực căng cáp với thuật toán tối ưu hóa bậc 2 (Quy hoạch bậc 2 - Quy hoạch toàn phương) - Quadratic programming - QPA [78-79]

4.2.2.1 Thiết kế giải thuật

Tương tự như Linear programming, một dạng bài toán Quadratic Programming – tối ưu hóa bậc 2 cơ bản được đề xuất và ứng dụng để thiết kế giải thuật phân phối lực căng cáp cho CDPR với các điều kiện ràng buộc linh hoạt về độ cứng của cơ hệ. Để dễ dàng theo dõi, giải thuật này được trình bày trên một CDPR phẳng dạng thừa ràng buộc 3 DoF và có thể áp dụng cho các CDPR có số bậc tự do và số lượng cáp lớn hơn. Đã có nhiều nghiên cứu và thử nghiệm để so sánh tính hiệu quả giữa quy hoạch tuyến tính và quy hoạch bậc hai, kết quả tính toán của quy hoạch bậc hai được ưa chuộng hơn trong một số trường hợp bởi vì đảm bảo được tính liên tục của hệ thống. Điểm mới của giải thuật này so với các nghiên cứu trước là có thể lựa chọn được xu hướng phân phối lực căng thông qua một biến mục tiêu $\boldsymbol{\tau}^*$. Phương trình tối ưu chứa các biến biến bù s và các đại lượng phân phối lực căng cáp có dạng như sau.

$$\text{Tối thiểu hóa: } \mathbf{s}^T \mathbf{D}_1 \mathbf{s} + (\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^*)^T \mathbf{D}_2 (\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^*) \quad (4.8)$$

$$\text{Thỏa mãn các điều kiện: } \begin{aligned} \mathbf{A}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{s} &= \mathbf{w}_p \\ \underline{\boldsymbol{\tau}} &\leq \boldsymbol{\tau} \leq \bar{\boldsymbol{\tau}} \end{aligned}$$

Để thuận lợi cho việc biểu diễn và trình bày, một quy trình tính toán tối ưu hóa bậc 2 có điều kiện được thiết kế cho một OC-CDPR có 3 bậc tự do truyền động bởi 4 cáp có dạng như sau:

$$\text{với } \mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]; \mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{12} & 0 \\ 0 & 0 & d_{13} \end{bmatrix}; \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} d_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} \end{bmatrix}; \quad (4.9)$$

Với $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4]^T$, \mathbf{D}_1 và \mathbf{D}_2 là các ma trận trọng số được biểu diễn ở dạng ma trận chéo, và $\boldsymbol{\tau}^*$ là giá trị mục tiêu cho lực căng cáp, giá trị này quyết định độ căng cao hay thấp của phân phối lực các dây cáp.

- Khi chọn $\boldsymbol{\tau}^* \leq \underline{\boldsymbol{\tau}}$, ta sẽ đạt được phân phối lực căng cáp với công suất nhỏ. Lực căng được chọn có xu hướng bám giới hạn dưới của lực căng tối thiểu.
- Khi chọn $\boldsymbol{\tau}^* = \frac{\underline{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\boldsymbol{\tau}}}{2}$, ta sẽ đạt được phân phối cáp lý tưởng với công suất và độ cứng ở mức trung bình.
- Khi chọn $\boldsymbol{\tau}^* \geq \bar{\boldsymbol{\tau}}$ sẽ dẫn đến phân phối lực căng với độ cứng cao nhất. Lực căng được chọn có xu hướng bám giới hạn trên của lực căng tối đa.

Độ lớn của các giá trị bên trong \mathbf{D}_1 nên được chọn lớn hơn các giá trị bên trong \mathbf{D}_2 . Trong mỗi lần tính toán để tối ưu phân phối lực căng, sẽ luôn tính ra được giá trị của các biến biến bù, các biến này mong muốn là luôn tiến về không, tuy nhiên thực tế chúng ta sẽ dễ dàng làm điều đó bằng việc chọn các giá trị bên trong ma trận trọng số \mathbf{D}_1 và \mathbf{D}_2 .

Bài toán tối ưu bậc hai (4.8) có thể được khai triển thành:

Tối thiểu hóa:

$$\mathbf{f}_{\min} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{12} & 0 \\ 0 & 0 & d_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau^* \\ \tau_2 - \tau^* \\ \tau_3 - \tau^* \\ \tau_4 - \tau^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau^* \\ \tau_2 - \tau^* \\ \tau_3 - \tau^* \\ \tau_4 - \tau^* \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

hoặc tìm:
$$\mathbf{f}_{\min} = s_1^2 d_{11} + s_2^2 d_{12} + s_3^2 d_{13} + \tau_1^2 d_{21} + \tau_2^2 d_{22} + \tau_3^2 d_{23} + \tau_4^2 d_{24} + 4\tau^{*2} - 2\tau^* (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \quad (4.11)$$

Thỏa mãn:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 \mathbf{u}_{1x} + \tau_2 \mathbf{u}_{2x} + \tau_3 \mathbf{u}_{3x} + \tau_4 \mathbf{u}_{4x} + s_1 = \mathbf{F}_x \\ \tau_1 \mathbf{u}_{1y} + \tau_2 \mathbf{u}_{2y} + \tau_3 \mathbf{u}_{3y} + \tau_4 \mathbf{u}_{4y} + s_2 = \mathbf{F}_y + \mathbf{P} \\ \tau_1 d_1^x \mathbf{u}_{1y} + \tau_1 d_1^y \mathbf{u}_{1x} + \tau_2 d_2^y \mathbf{u}_{2x} - \tau_2 d_2^x \mathbf{u}_{2y} - \tau_3 d_3^x \mathbf{u}_{3y} - \tau_3 d_3^y \mathbf{u}_{3x} - \tau_4 d_4^y \mathbf{u}_{4x} \\ \quad + \tau_4 d_4^x \mathbf{u}_{4y} + s_3 = \mathbf{M}_z \\ \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \{\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4\} \leq \bar{\boldsymbol{\tau}} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Đặt $\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7 \quad x_8]^T = [s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad \tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4 \quad 1]^T$

Từ đó, bài toán tối ưu có thể biểu diễn bằng:

$$\mathbf{f}_{\min} = x_1^2 d_{11} + x_2^2 d_{12} + x_3^2 d_{13} + x_4^2 d_{21} + x_5^2 d_{22} + x_6^2 d_{23} + x_7^2 d_{24} + x_8^2 4\tau^{*2} - 2\tau^* (x_4 + x_5 + x_6 + x_7) \quad (4.13)$$

Thỏa mãn:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_4 \mathbf{u}_{1x} + x_5 \mathbf{u}_{2x} + x_6 \mathbf{u}_{3x} + x_7 \mathbf{u}_{4x} + x_1 = \mathbf{F}_x \\ x_4 \mathbf{u}_{1y} + x_5 \mathbf{u}_{2y} + x_6 \mathbf{u}_{3y} + x_7 \mathbf{u}_{4y} + x_2 = \mathbf{F}_y + \mathbf{P} \\ x_4 d_1^x \mathbf{u}_{1y} + x_4 d_1^y \mathbf{u}_{1x} + x_5 d_2^y \mathbf{u}_{2x} - x_5 d_2^x \mathbf{u}_{2y} - x_6 d_3^x \mathbf{u}_{3y} - x_6 d_3^y \mathbf{u}_{3x} \\ \quad - x_7 d_4^y \mathbf{u}_{4x} + x_7 d_4^x \mathbf{u}_{4y} + x_3 = \mathbf{M}_z \\ x_8 = 1 \\ \underline{\boldsymbol{x}} \leq \{x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7\} \leq \bar{\boldsymbol{x}} \end{array} \right. \quad (4.14)$$

Cuối cùng, ta có thể biểu diễn bài toán tối ưu hóa ở dạng ma trận tổng quát như sau:

Tối thiểu hóa:

$$\mathbf{f}_{\min} = \mathbf{X}^T \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4T^{*2} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2\tau^* \\ -2\tau^* \\ -2\tau^* \\ -2\tau^* \\ 0 \end{bmatrix}^T \mathbf{X} \quad (4.15)$$

Thỏa mãn:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_{1x} & u_{2x} & u_{3x} & u_{4x} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u_{1y} & u_{2y} & u_{3y} & u_{4y} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1^x u_{1y} + d_1^y u_{1x} & d_2^y u_{2x} - d_2^x u_{2y} & -d_3^x u_{3y} - d_3^y u_{3x} & d_4^x u_{4y} - d_4^y u_{4x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y + P \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

và

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} \leq \begin{bmatrix} -\bar{\tau} \\ -\bar{\tau} \\ -\bar{\tau} \\ -\bar{\tau} \\ \bar{\tau} \\ \bar{\tau} \\ \bar{\tau} \\ \bar{\tau} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

4.2.2.2 Kết quả tính toán

Thuật toán tối ưu hóa bậc 2 được mô phỏng trên C DPR phẳng 3 bậc tự do được truyền động bởi 4 cáp như **hình 4.2**, thông số đầu vào được cho trên **bảng 4.1**.

Bảng 4.1: Thông số kỹ thuật của C DPR phẳng

Kích thước khung cố định (Dài x rộng)	1 x 1 (m)
Kích thước bệ di động (Dài x rộng)	0.2 x 0.05 (m)
Lực căng dây	$\tau_{\max} = 30(\text{N})$, $\tau_{\min} = 1(\text{N})$

- Chọn thông số lực căng mong muốn lần lượt ở mức:

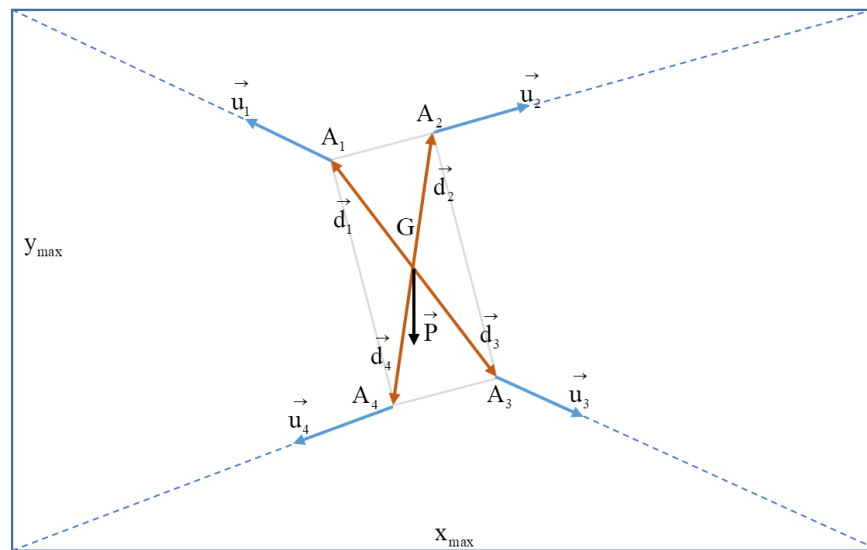
1. Trường hợp độ cứng cao: $\tau^* = \tau_{\max}$

2. Trường hợp độ cứng trung bình: $\tau^* = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$

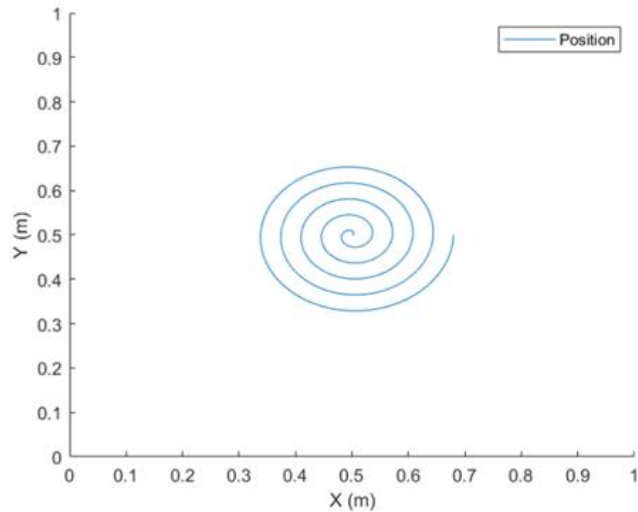
3. Trường hợp độ cứng thấp: $\tau^* = \tau_{\min}$

- Chọn vị trí bắt đầu của E-E: $x_G = 0.5 \text{ cm}$, $y_G = 0.5 \text{ cm}$, $\theta = 0^0$
- Giả sử ta đặt ngoại lực tác động lên E-E như sau: $F_x = 0 \text{ (N)}$, $F_y = 0 \text{ (N)}$,
 $M_z = 0 \text{ (Nm)}$
- Chọn khối lượng của bộ chứa E-E : $m = 1 \text{ (kg)}$ lúc này ta có $P = mg = 9.81 \text{ N}$
($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)
- Thiết lập thông số tính toán cho giải thuật Tối ưu hóa bậc 2: $D_{11}=1e10$,
 $D_{12}=1e10$, $D_{13}=1e10$, $D_{21}=1$, $D_{22}=1$, $D_{23}=1$, $D_{24}=1$

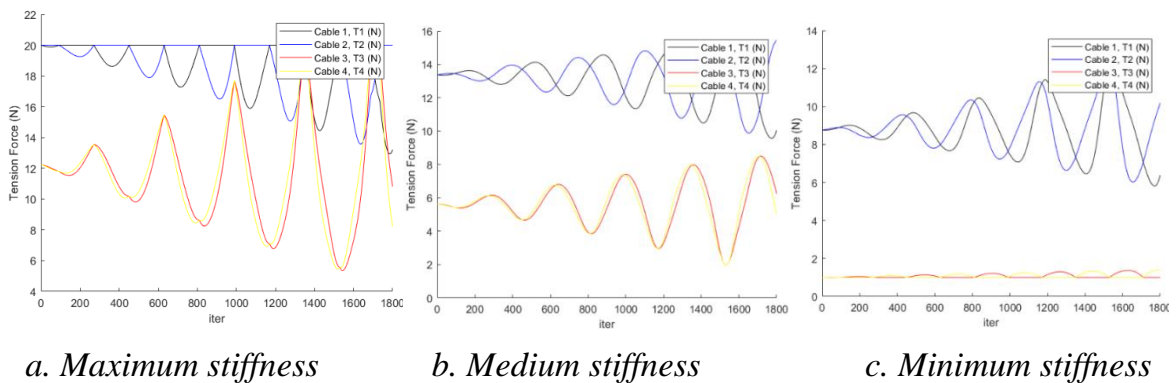
Sau khi chọn được các thông số cần thiết cho thuật toán, ta dùng công cụ hỗ trợ MATLAB để thực hiện giải thuật tối ưu hóa bậc 2 dành cho CDPD với các tùy chọn xu hướng phân phối lực căng cáp. Động học nghịch mong muốn sẽ tạo ra đường đi của MP dưới dạng một vòng xoắn ốc với điểm bắt đầu từ tâm đi ra xa (**Hình 4.3**). Cùng với mỗi bước di chuyển của MP, lực căng của cáp cũng được mô phỏng theo **Hình 4.4**. Ngoài ra, để kiểm tra độ chính xác của thuật toán, chúng ta cũng sẽ xuất các giá trị ngoại lực (**Hình 4.5**) theo vị trí của E-E.



Hình 4.2: Cấu hình CDPD phẳng



Hình 4.3: Quỹ đạo xoắn ốc tính toán



a. Maximum stiffness

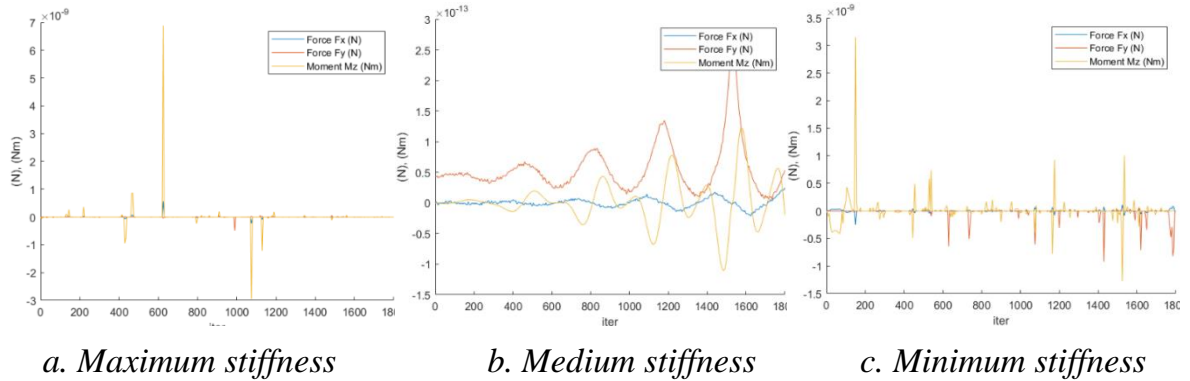
b. Medium stiffness

c. Minimum stiffness

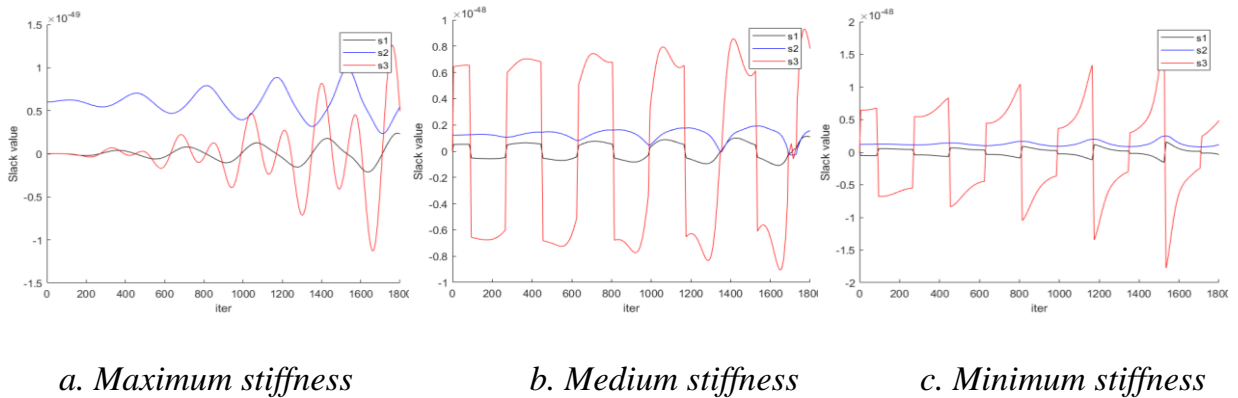
Hình 4.4: Phân phối lực căng cáp

Sau khi quan sát kết quả tính toán từ mô phỏng, lực căng mong muốn có được từ giải pháp độ cứng tối đa (**Hình 4.4-a**), mỗi sợi cáp sẽ tạo ra lực căng có xu hướng tiếp cận giá trị cực đại quy định (20N). Tương tự như trường hợp khi lực căng mong muốn có xu hướng đạt đến độ cứng tối thiểu (**Hình 4.4-c**), cáp số 2 và 3 tuân tự đạt giá trị tối thiểu (1N) trong khi cáp số 1 và 2 có xu hướng giữ lực vừa phải. Trong **Hình 4.4-b**, lực căng mong muốn được đặt ở mức độ cứng trung bình dẫn đến tất cả các dây cáp có xu hướng đứng ở lực căng vừa phải nhưng cũng không có dây nào đạt mức tối đa hoặc tối thiểu như trong các trường hợp trước. Kết quả thu được từ mô phỏng là rõ ràng và có thể khẳng định rằng các giá trị mong muốn của lực căng ảnh hưởng đến độ cứng của cơ cấu, đồng thời cũng ảnh hưởng đến mức tiêu thụ năng lượng và công suất cho CDPR được điều khiển. Tùy vào

mục đích sử dụng có thể lựa chọn lực căng dây mong muốn để đảm bảo hiệu quả sử dụng năng lượng, độ cứng của cơ hệ hoặc lực căng an toàn.



Hình 4.5: Ngoại lực tác động



Hình 4.6: Kết quả các biến bù

Hình 4.3 cho thấy quá trình thiết kế chuyển động xoắn ốc cho MP được mô phỏng cho ba trường hợp có độ cứng mong muốn khác nhau, tất cả các giá trị của ngoại lực luôn dao động quanh giá trị 0 với biên độ vô cùng nhỏ (có thể quan sát trên **Hình 4.5**) so với giá trị ban đầu là $F_x = 0$ (N), $F_y = 0$ (N), $M_z = 0$ (Nm), có thể thấy kết quả hoàn toàn phù hợp với điều kiện ban đầu, các dao động nhỏ là do sự tồn tại của các biến bù (Slack variable) sẽ tạo ra sự dao động không đáng có này. Đồng thời giá trị của các biến bù vô cùng bé (**Hình 4.6**) cho thấy chúng hầu như không ảnh hưởng đến cân bằng tĩnh của cấu trúc CDPR. Như vậy kết quả mô phỏng giải thuật **hình 4.4** trên một quỹ đạo tổng quát **hình 4.3** cho thấy giải thuật đã đạt được các mục tiêu phân phối lực căng cáp có dạng liên tục, và có thể chọn được độ cứng của cơ hệ thông qua các xu hướng phân bố lực căng, trong khi vẫn đảm bảo

các phương trình cân bằng tĩnh và động học luôn được giữ nguyên khi áp dụng giải thuật này.

4.2.3 Giải thuật tính toán phân phối lực căng cáp dạng đóng - Forces Distribution in Closed-Form (FDCF) [70-71]

Tối thiểu hóa lực căng cáp của thuật toán tối ưu hóa bậc 1 DSA có một ưu điểm là giảm thiểu tiêu thụ điện năng của hệ thống. Điều này rất quan trọng đối với một số ứng dụng đòi hỏi thời gian làm việc dài và tải trọng lớn như tạo mẫu nhanh, in 3D xây dựng, di chuyển các vật thể lớn qua khoảng cách lớn. Nhưng hạn chế của phương pháp này là lực căng cáp không liên tục dọc theo quỹ đạo chuyển động, gây khó khăn cho việc điều khiển CDRP. Trong khi đó, giải thuật tối ưu hóa bậc 2 QPA cho kết quả tính toán lực căng có dạng liên tục theo quỹ đạo thiết kế, điều này cho phép triển khai các ứng dụng cần tốc độ di chuyển nhanh. Tuy nhiên 2 phương pháp này là 2 phương pháp tối ưu lặp, thời gian tính toán lớn là một vấn đề khi ứng dụng điều khiển thời gian thực, do đó một giải thuật tính toán không lặp dạng đóng FDCF được tham khảo để tìm phân phối lực căng cáp, với thời gian tính toán nhanh phù hợp với các ứng dụng điều khiển thời gian thực [70-71]. Trong phần này, FDCF được triển khai với $p = 2$ được sử dụng để phân phối lực căng của cáp. Cơ sở của giải pháp này dựa trên việc chia véc tơ lực căng thành 2 phần.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_A + \boldsymbol{\tau}_v \quad (4.17)$$

với $\boldsymbol{\tau}_A = (\boldsymbol{\tau}_{\min} + \boldsymbol{\tau}_{\max})/2$ là giá trị trung bình của giá trị tối đa và tối thiểu lực căng, $\boldsymbol{\tau}_v$ là một véc tơ lực ngẫu nhiên. Thay phương trình (4.17) vào (4.1) ta được.

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\tau}_A + \boldsymbol{\tau}_v) = -\mathbf{w}_p \quad (4.18)$$

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\tau}_v = -\mathbf{w}_p - \mathbf{A}\boldsymbol{\tau}_A \quad (4.19)$$

Sự phân phối lực căng là liên tục dọc theo quỹ đạo của MP nếu nó gần với véc tơ $\boldsymbol{\tau}_A$ sử dụng p -norm với $(2 \leq p \leq \infty)$ [32, 80]. Để cải thiện độ ổn định của CDRP, giải pháp là chọn lực căng gần với giá trị trung bình của $\boldsymbol{\tau}_{\min}$ và $\boldsymbol{\tau}_{\max}$, mục đích là để

điều khiển lực căng của cáp không tiếp cận hoặc vượt quá giới hạn lực của cơ cấu truyền động hoặc giới hạn dưới của lực căng của cáp. Phương pháp được đề xuất là chuyển đổi bài toán từ việc tìm nghiệm của lực căng dương trong các dây cáp sang tìm nghiệm có bình phương nhỏ nhất (least-square solution) thỏa mãn phương trình (4.1). Ở đây, tiêu chuẩn Euclide ($p = 2$) được sử dụng để xác định nghiệm bình phương nhỏ nhất τ_A trong phương trình (4.19) đối với τ_v . Điều này có thể được thực hiện bằng ma trận giả nghịch đảo được sử dụng cho ma trận có nhiều cột hơn hàng. Nếu A^+ là giả nghịch đảo của A , thì:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \quad (4.20)$$

Nhân cả 2 vế với phương trình (4.19) bởi A^+ , ta được

$$\tau_v = A^+ (-w_p - A\tau_A) \quad (4.21)$$

Thế công thức (4.21) vào phương trình (4.17) thì thu được

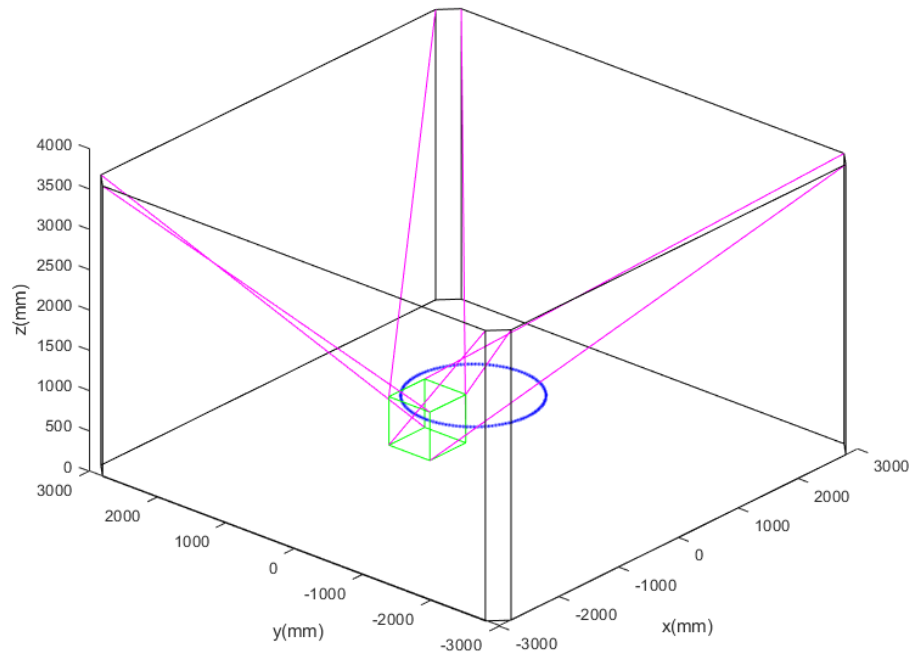
$$\tau = \tau_A - A^+ (w_p + A\tau_A) \quad (4.22)$$

Công thức (4.22) được sử dụng để tính phân phối lực căng cáp với các thông số đầu vào là các lực tác động bao gồm lực trọng trường, vị trí và hướng của bộ di động, kết quả tính toán sẽ được thảo luận và phân tích ở phần sau.

4.2.4 Kết quả và thảo luận

4.2.4.1 Mô phỏng kết quả tính toán

Để đánh giá kết quả tính toán, 3 giải thuật phân phối lực căng được mô phỏng trên cấu hình CDPR 6 bậc tự do được truyền động bởi 8 cáp, cấu hình mắc cáp được thiết kế như **hình 4.7**, các thông số kỹ thuật được liệt kê trong **bảng 4.2**. Chương trình tính toán mô phỏng được thiết lập theo thời gian, các quỹ đạo mô phỏng được tính toán, trong đó các bài toán động học được giải và tính các ma trận đầu vào của 2 giải thuật, các quỹ đạo được chia thành nhiều điểm nút, số lượng điểm nút được chọn dựa trên độ chính xác mong muốn của quỹ đạo thiết kế.



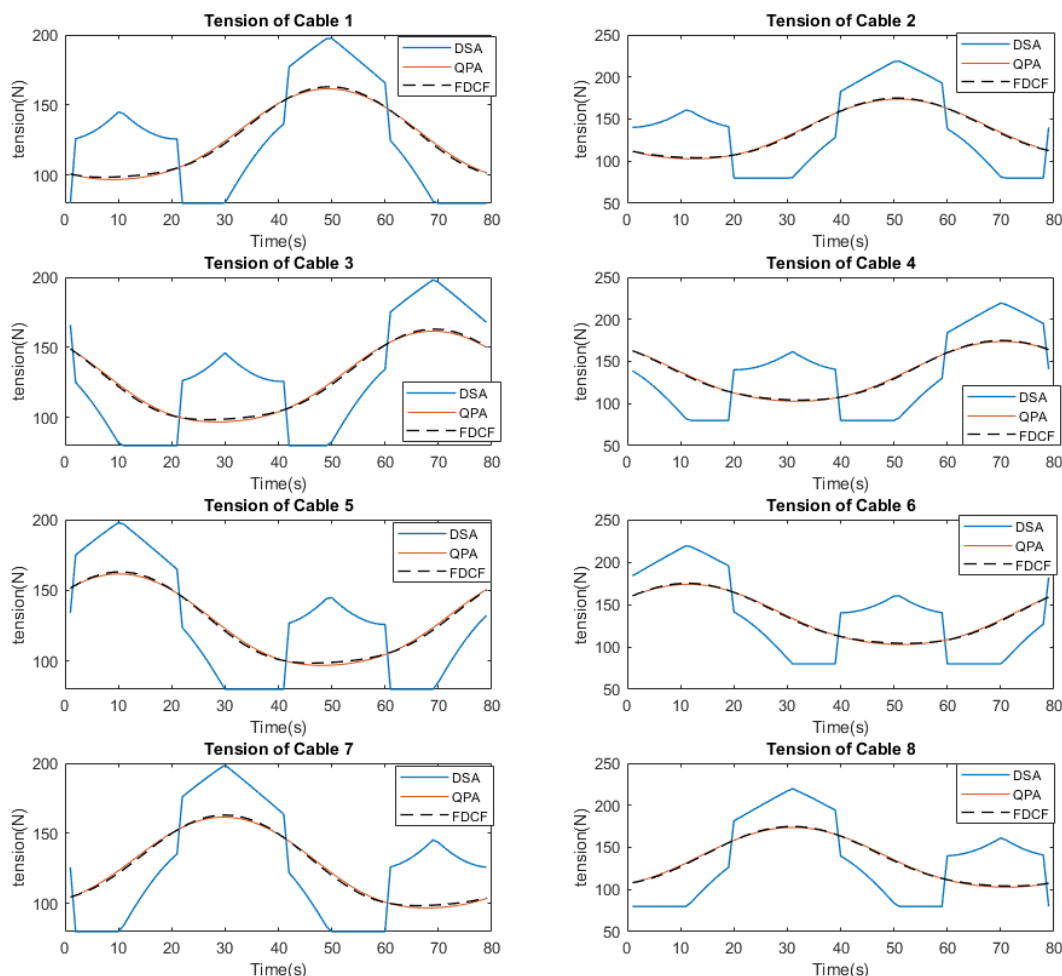
Hình 4.7: Cấu hình CDPR mô phỏng và quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm

Bảng 4.2: Thông số kỹ thuật của CDPR phẳng

Thông số kỹ thuật	
Số bậc tự do	6 (3 xoay, 3 tịnh tiến)
Số lượng cáp	8
Kích thước khung cố định (m)	$6 \times 6 \times 3$
Kích thước bệ di động (m)	$0.6 \times 0.6 \times 0.6$
Tải trọng	80 kg
Không gian làm việc $L \times W \times H$ (m)	$5 \times 5 \times 2.5$
Khối lượng riêng tuyến tính của cáp (kg/m)	0.1543
Đường kính cáp (mm)	5

Hình 4.8 là kết quả tính toán phân phối lực căng cáp theo quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm trong mặt phẳng XY với $Z = 800$ mm. Kết quả cho thấy giải thuật phân phối lực căng DSA – tối ưu hóa tuyến tính cho phân phối lực căng với tổng lực căng là nhỏ nhất, nhược điểm của phương pháp này là lực căng cáp có thay đổi đột ngột ở một số điểm nút, có thể gây khó khăn cho quá trình điều khiển hoặc gây rung động MP, phương pháp này thường chỉ được áp dụng với các ứng dụng có vận tốc rất thấp. Trong khi đó, giải thuật phân phối lực căng QPA – Tối ưu hóa bậc

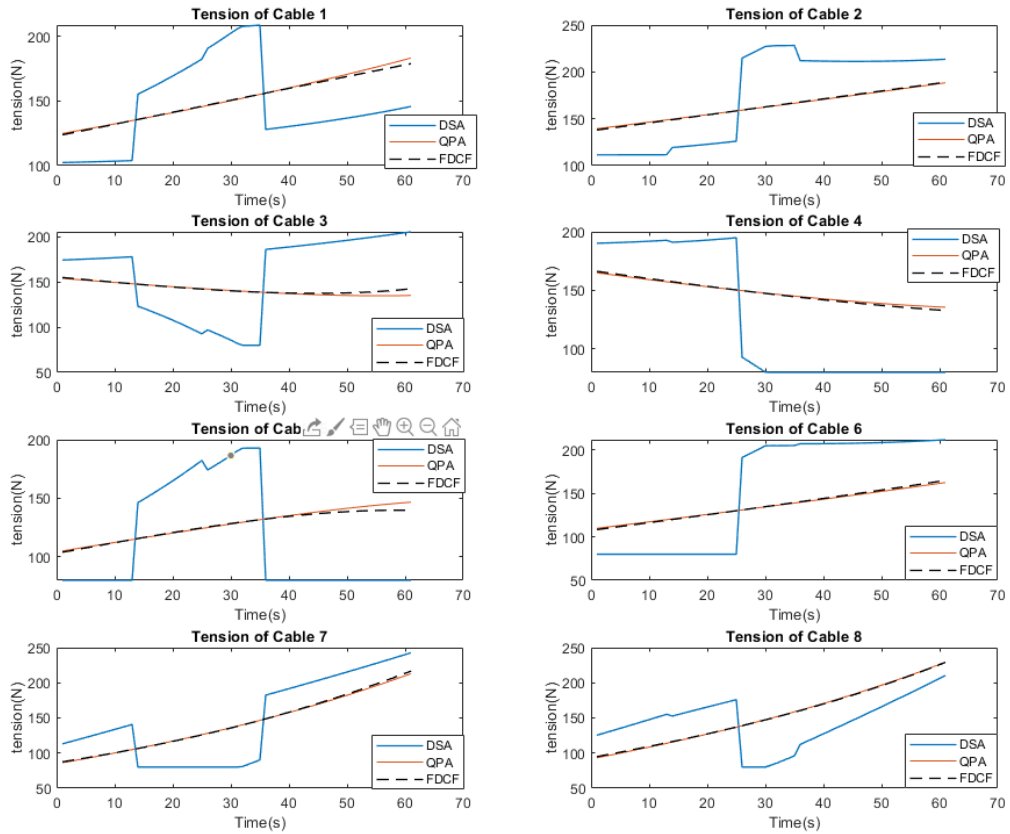
2 và dạng đóng - FDCF cho kết quả tính toán với các phân phối lực căng liên tục theo quỹ đạo khớp, tất cả lực căng đều nằm trong giới hạn lực căng yêu cầu, hai phương pháp này phù hợp với các ứng dụng cần điều khiển CDPR với tốc độ cao, hạn chế rung động trong quá trình điều khiển.



Hình 4.8: Kết quả tính toán lực căng quỹ đạo hình tròn

Hình 4.9 là kết quả tính toán phân phối lực căng cáp theo quỹ đạo đường thẳng trong không gian theo phương trình tham số thời gian (4.17) với các góc nghiêng của bộ di động tương ứng là α , β , γ , đồ thị cho thấy trong trường hợp quỹ đạo thiết kế có góc MP thay đổi theo thời gian, phân phối lực căng cáp có thay đổi tuy nhiên hình dáng đường phân phối lực căng vẫn tương đồng với phân phối lực căng trong trường hợp quỹ đạo góc bộ di động cố định.

$$\begin{cases} t = [0; 60] \\ z = 500 + 20t & x = -400 + 20t & y = -800 + 20t \\ \alpha = 5 + t/6 & \beta = t/6 & \gamma = -5 + t/6 \end{cases} \quad (4.23)$$



Hình 4.9: Kết quả tính toán lực căng quỹ đạo đường thẳng

Bảng 4.3: So sánh đặc tính của 3 giải thuật phân phối lực căng

Các tiêu chí đánh giá	DSA	QPA	FDCF
Mức độ đáp ứng hàm mục tiêu và các điều kiện biên	Tốt	Tốt	Khá
Liên tục theo quỹ đạo điều khiển	Kém	Tốt	Tốt
Khả năng bao phủ không gian hoạt động	Tốt	Tốt	Trung bình
Thời gian tính toán	Trung bình	Khá	Tốt

Phân phối lực căng theo giải thuật QPA và FDCF vẫn bám theo quỹ đạo và có dạng liên tục, trong khi DSA cho kết quả không liên tục và có một số điểm nút lực căng cấp thay đổi đột ngột với giá trị lớn. Một phát hiện thú vị là hai giải thuật QPA và FDCF có dạng phân phối lực căng có dạng gần giống nhau theo dọc quỹ đạo

thiết kế, sự khác biệt tăng dần khi quỹ đạo thiết kế tiến đến vùng biên không gian hoạt động, mặc khác giải thuật FCDF sẽ cho không gian làm việc nhỏ hơn so với DSA và QPA do điều kiện giới hạn lực căng, do đó, tùy theo cấu hình cụ thể mà bộ điều khiển phải xác định trước các ràng buộc khi sử dụng FCDF.

Bảng 4.3 là tổng hợp kết quả so sánh các chỉ tiêu thiết kế của 3 giải thuật xác định độ võng cấp đã được phân tích, các mô phỏng được thực hiện trên máy tính với cấu hình Intel Corei5 9300H CPU 2.4GHz 16GB Ram. Đối với tiêu chí thời gian tính toán, khi thực hiện tính toán cùng một quỹ đạo hình tròn, giải thuật DSA tính trong vòng 0.0068s, giải thuật QPA là 0.0036s và FDCF là 0.0002875s, kết quả này cho thấy tốc độ tính toán của QPA tốt hơn DSA nhưng vẫn chậm hơn nhiều so với FCDF, do đó FCDF có thể sử dụng cho các ứng dụng đòi hỏi điều khiển thời gian thực như cấu hình mô phỏng chuyển động được mô phỏng ở phần thực nghiệm với khu vực làm việc nhỏ hơn so với QPA và DSA.

4.2.4.2 Thảo luận

Thuật toán tối ưu hóa tuyến tính DSA, thuật toán tối ưu hóa bậc hai QPA và thuật toán phân phối lực căng dạng đóng - FDCF tính toán phân phối lực căng cấp cho CDPR đã được xây dựng và phân tích chi tiết để giải bài toán phân phối lực căng cấp. Thuật toán tối ưu hóa tuyến tính DSA cho kết quả phân phối lực căng với tiêu chí năng lượng tiêu thụ nhỏ nhất, phù hợp cho các cấu hình CDPR ứng dụng nặng vật nặng với vận tốc thấp, kết quả mô phỏng cho thấy có nhiều điểm nút lực căng cấp thay đổi đột ngột, có thể gây rung động cơ cấu trong quá trình điều khiển với vận tốc lớn. Thuật toán tối ưu hóa bậc 2 QPA có tính đến việc điều chỉnh giá trị và độ cứng của cơ cấu thông qua các giá trị mục tiêu có thể được chọn tùy theo yêu cầu điều khiển, đây là điểm mới của phương pháp này, phương pháp này cho phân phối lực căng có dạng liên tục theo quỹ đạo khớp. Thuật toán phân phối lực căng dạng đóng FDCF có thể chọn lựa xu hướng phân phối giá trị lực căng có thời gian tính toán nhanh cho kết quả lực căng cấp có dạng liên tục. Quá trình tính toán được mô phỏng thành công trên MATLAB với các quỹ đạo cơ bản có tính đến sự thay đổi của các góc chỉ phương MP theo thời gian, kết quả về lực căng cấp và các giá trị

liên quan đến các thuật toán này là phù hợp và chính xác dựa trên nền tảng lý thuyết phân tích. Với kết quả này, có thể áp dụng thuật toán phân phối lực căng bằng giải thuật tối ưu hóa bậc hai QPA cho các CDPR với các cấu hình khác nhau bằng cách thay đổi điều kiện bài toán tối ưu, ma trận tham số và ma trận cấu trúc trong bài toán tối ưu phân phối lực căng cấp. Tuy nhiên có một nhược điểm là khối lượng tính toán sẽ tăng lên đáng kể do mô hình toán phức tạp, đặt biệt đối với CDPR có số lượng dây cáp và số bậc tự do lớn. Do đó giải thuật này phù hợp với bài toán lập quỹ đạo cho các CDPR không đòi hỏi đáp ứng thời gian thực. Đối với giải thuật phân phối lực căng ở dạng đóng FDCF, ưu điểm lớn nhất của giải thuật này là dạng lực căng liên tục gần giống QPA với tốc độ tính toán nhanh, phù hợp với các yêu cầu điều khiển theo thời gian thực, do đó, trong các giải thuật tính toán động học nghịch có tính đến độ võng cáp, mục tiêu điều khiển và cấu hình của ứng dụng là một trong những điều kiện cần thiết để chọn một giải thuật phân phối lực căng phù hợp. Hơn nữa, kết quả tính toán lực căng cấp còn là đầu vào của giải thuật tính toán độ võng cáp, do đó phần sau sẽ phân tích kỹ hơn sự ảnh hưởng của giải thuật phân phối lực căng cấp đến giải thuật tính toán độ võng cáp.

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

Chỉ tiêu thiết kế của giải thuật tính toán độ võng cáp là độ chính xác tính toán, thời gian tính toán và khả năng áp dụng cho các cấu hình CDPR khác nhau. Trong phần này, mô hình cáp xích của Irvine được sử dụng để xây dựng mô hình võng cáp cho CDPR, sau đó mô hình này sẽ được giải bằng giải thuật vùng tin cậy, kết quả của giải thuật vùng tin cậy sẽ được sử dụng làm giá trị tham chiếu cho việc xây dựng 2 giải thuật dự đoán độ võng cáp dựa trên kỹ thuật tính toán mềm và các giải pháp phân phối lực căng trong mục 3, các kết quả tính toán sẽ được mô phỏng và đánh giá dựa vào các tiêu chí là độ chính xác tính toán, thời gian tính toán và khả năng áp dụng cho các cấu hình CDPR khác nhau. Đóng góp chính của phần này là tính toán bài toán xác định độ võng cáp cho OC-CDPR với các phân phối lực căng

cùng một đoạn cáp. Trong **Hình 4.10**, gốc của hệ trục cục bộ sẽ được đặt tại điểm mắc cáp cố định B. Như vậy, biến s nằm trong khoảng $[0 \ L_S]$, lưu ý $s(s = 0) \equiv A$ và $s(s = L_S) \equiv B$.

Với $\tau(N)$ là lực căng cáp tại điểm mắc cáp trên bề di động M với các thành phần trên phương X và Z là τ_x và τ_z , $\tau_s(N)$ là lực căng cáp tại điểm G trên dây cáp, ρ_L (kg/m) là khối lượng riêng trên một đơn vị chiều dài của vật liệu làm cáp. Hình dạng của dây cáp phải thỏa mãn ràng buộc hình học sau:

$$\left(\frac{dx_G}{dp}\right)^2 + \left(\frac{dz_G}{dp}\right)^2 = 1 \quad (4.24)$$

Phương trình cân bằng lực tại điểm G đối với đoạn dây cáp giữa điểm G và điểm M có thể viết như sau:

$$\tau_s \left(\frac{dx_G}{dp}\right) = \tau_{sx} = \tau_x \quad (4.25)$$

$$\tau_s \left(\frac{dz_G}{dp}\right) = \tau_{sz} = \tau_z + \rho_L g(s - L_S) \quad (4.26)$$

Lực căng dây tại điểm G được coi là thỏa mãn định luật Hooke:

$$\tau_s = EA \left(\frac{dp}{ds} - 1\right) \quad (4.27)$$

Từ các công thức (4.24), (4.25), (4.26), lực căng cáp tại điểm G có thể được biểu diễn bằng:

$$\tau_s = \sqrt{\tau_x^2 + [\tau_z + \rho_L g(s - L_S)]^2} = \sqrt{\tau_{Gx}^2 + \tau_{Gz}^2} \quad (4.28)$$

Từ công thức (4.24) và (4.27), ta được

$$\frac{dx_G}{ds} = \frac{dx_G}{dp} \frac{dp}{ds} = \frac{\tau_x}{\tau_s} \left(\frac{\tau_s}{EA} + 1\right) \quad (4.29)$$

Thế phương trình (4.28) vào (4.29), ta được:

$$\frac{dx_G}{ds} = \frac{\tau_x}{EA} + \frac{\tau_x}{\sqrt{\tau_x^2 + [\tau_z + \rho_L g(s - L_S)]^2}} \quad (4.30)$$

Áp dụng phương pháp tính tương tự cho trục z, ta thu được:

$$\frac{dz_G}{ds} = \frac{dz_G}{dp} \frac{dp}{ds} = \frac{\tau_z}{\tau_s} \left(\frac{\tau_s}{EA} + 1 \right) = \frac{\tau_z + \rho_L g(s + L_S)}{EA} + \frac{\tau_z + \rho_L g(s + L_S)}{\sqrt{\tau_x^2 + [\tau_z + \rho_L g(s - L_S)]^2}} \quad (4.31)$$

Sau khi tích phân phương trình (4.30) và (4.31) với điều kiện biên $x(0) = 0$ và $z(0) = 0$, biên dạng cáp võng ở trạng thái tĩnh có thể được biểu diễn dưới dạng sau:

$$x(s) = \frac{\tau_x s}{EA} + \frac{|\tau_x|}{\rho_L g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z + \rho_L g(s - L_S)}{\tau_x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z - \rho_L g L_S}{\tau_x} \right) \right] \quad (4.32)$$

$$z(s) = \frac{\tau_x s}{EA} + \frac{\rho_L g}{EA} \left(\frac{s^2}{2} - L_S s \right) + \frac{1}{\rho_L g} \left[\sqrt{\tau_x^2 + [\tau_z + \rho_L g(s - L_S)]^2} - \sqrt{\tau_x^2 + (\tau_z - \rho_L g L_S)^2} \right] \quad (4.33)$$

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} \quad (4.34)$$

Mô hình cáp võng từ (4.32) đến (4.34) xem xét cả độ cứng do võng và độ cứng dọc trục. Nó mô tả cấu hình cáp tĩnh với một hệ phương trình phi tuyến. Từ phương trình từ (4.32) đến (4.34), với các điều kiện biên dây cáp không dẫn $E \rightarrow \infty$, biên dạng cáp võng sau khi đơn giản hóa như sau **[91,113,119]**.

$$x_m = \frac{|\tau_x|}{\rho_L g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z}{\tau_x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{\tau_z - \rho_L g L}{\tau_x} \right) \right] \quad (4.35)$$

$$z_m = \frac{1}{\rho_L g} \left[\sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} - \sqrt{\tau_x^2 + (\tau_z - \rho_L g L)^2} \right] \quad (4.36)$$

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_z^2} \quad (4.37)$$

với ρ_L là khối lượng riêng trên một đơn vị chiều dài của vật liệu làm cáp, và g là gia tốc trọng trường.

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 bề 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 lực căng cáp được sử dụng làm đầu vào của mô hình văng cáp (4.35–4.37), đây là một hệ phương trình 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 Vùng tin cậy [128] được sử dụng để giải hệ phương trình biểu diễn độ văng cáp (4.35 – 4.37). 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 véc tơ \mathbf{x} , mục tiêu của thuật toán này là tìm một véc tơ \mathbf{x} làm cho tất cả $F_i(x)$ tiến về 0. Trong trường hợp này, mô hình cáp văng (4.35 – 4.37) được viết lại thành:

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

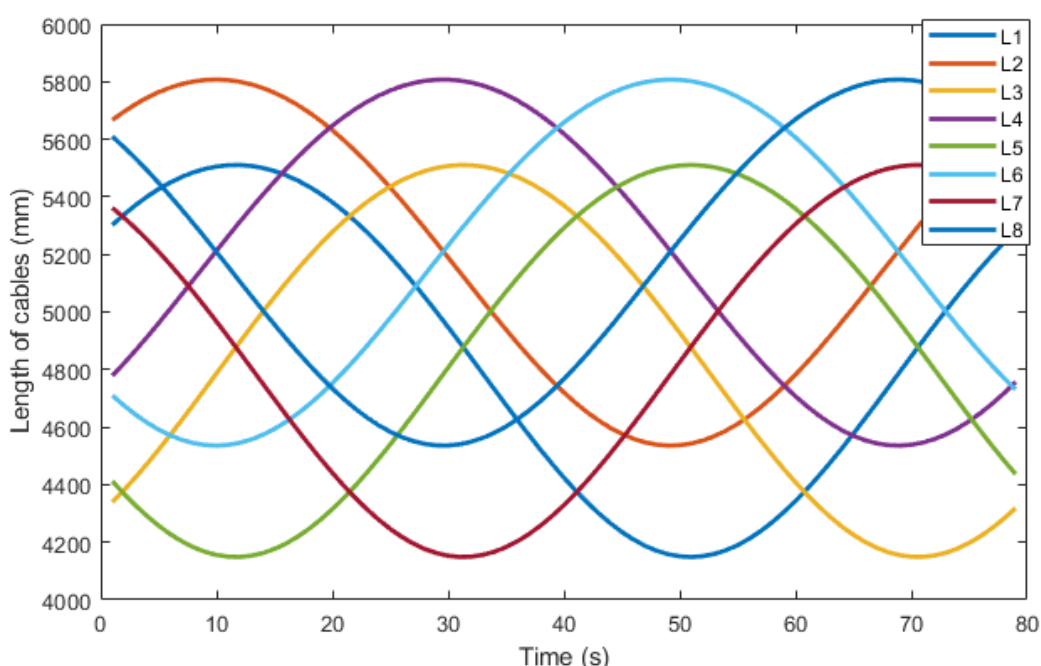
với $x = [\tau_x \quad \tau_z \quad L]$, $n = 3$

4.3.2 Tính toán độ văng cáp bằng giải thuật vùng tin cậy

Phần này sẽ áp dụng giải thuật vùng tin cậy (mục 3.8 – chương 3) để tính độ văng cáp theo mô hình cáp xích (4.38). Thuật toán này sẽ đưa ra một tập nghiệm cho mỗi điều kiện đầu vào (τ, X_m, Z_m) với độ chính xác tại nghiệm yêu cầu $f(x) < e^{-10}$.

Hình 4.7 mô tả cấu trúc của Robot trong ứng dụng này, với quỹ đạo vòng tròn là $r = 0,8$ (m); đường tròn nằm trên mặt phẳng XY với $z = 800$ mm, và được chia thành nhiều điểm nút. Trong trường hợp tổng quát là chưa biết vùng không gian hoạt động của CDPR, một thuật toán được thiết kế để kiểm tra xem các tọa độ này có nằm trong vùng làm việc của CDPR hay không, 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 phối lực căng cáp tương ứng, với giả thuyết là đầu công tác chuyển động chậm, bỏ qua các tác động

của gia tốc và moment quán tính của cơ hệ. Thuật toán DSA 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 trên và dưới cho trước; Giới hạn dưới của lực căng được lựa chọn dựa trên các điều kiện ràng buộc về lực tác động, độ cứng vững và sự ổn định của bộ di động, giới hạn trên của các lực căng được lựa chọn dựa trên giới hạn công suất của động cơ. Sau đó thuật toán vùng tin cậy 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.

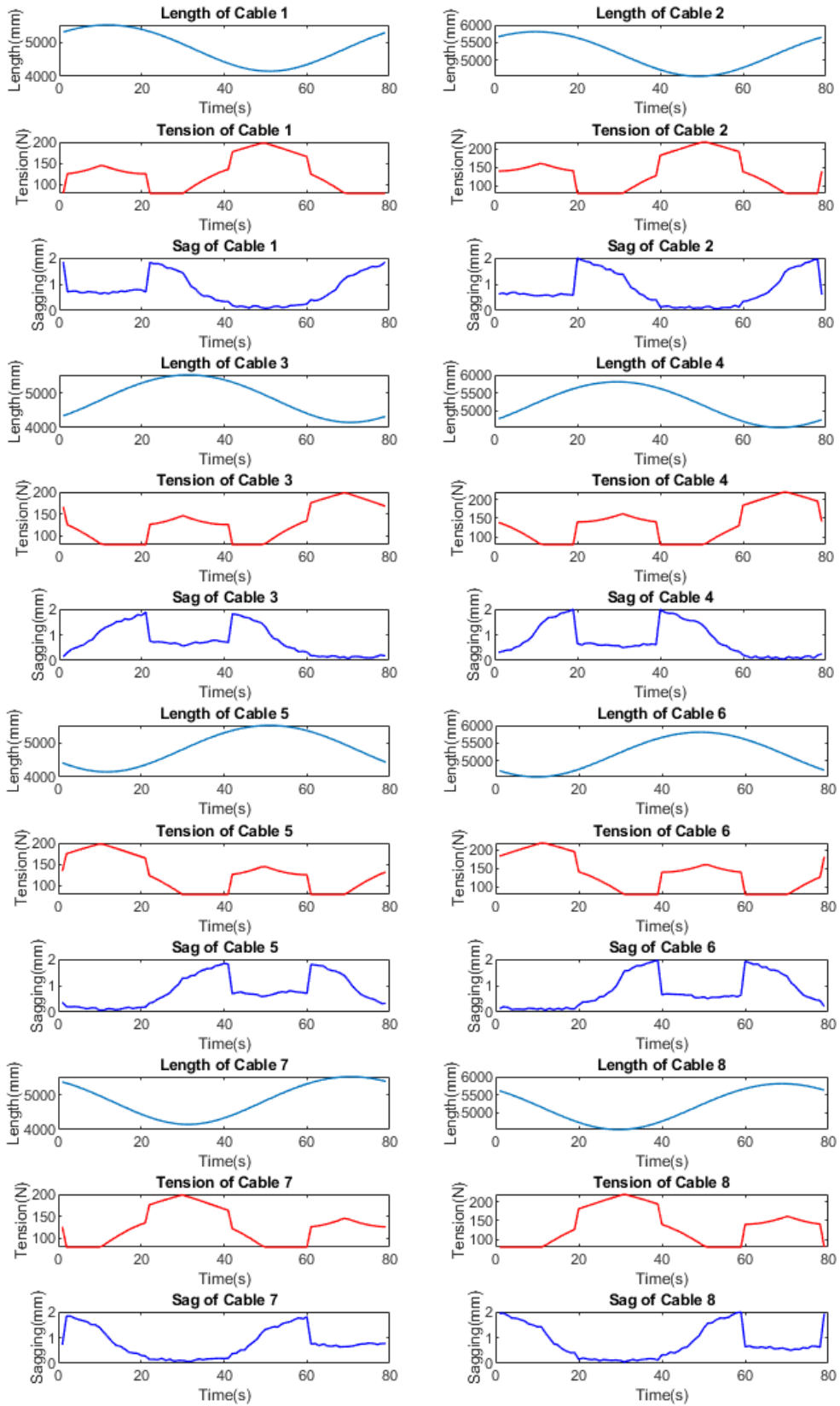


Hình 4.11: Đáp ứng 8 cáp truyền động cho nội suy đường tròn $r = 0.8m$

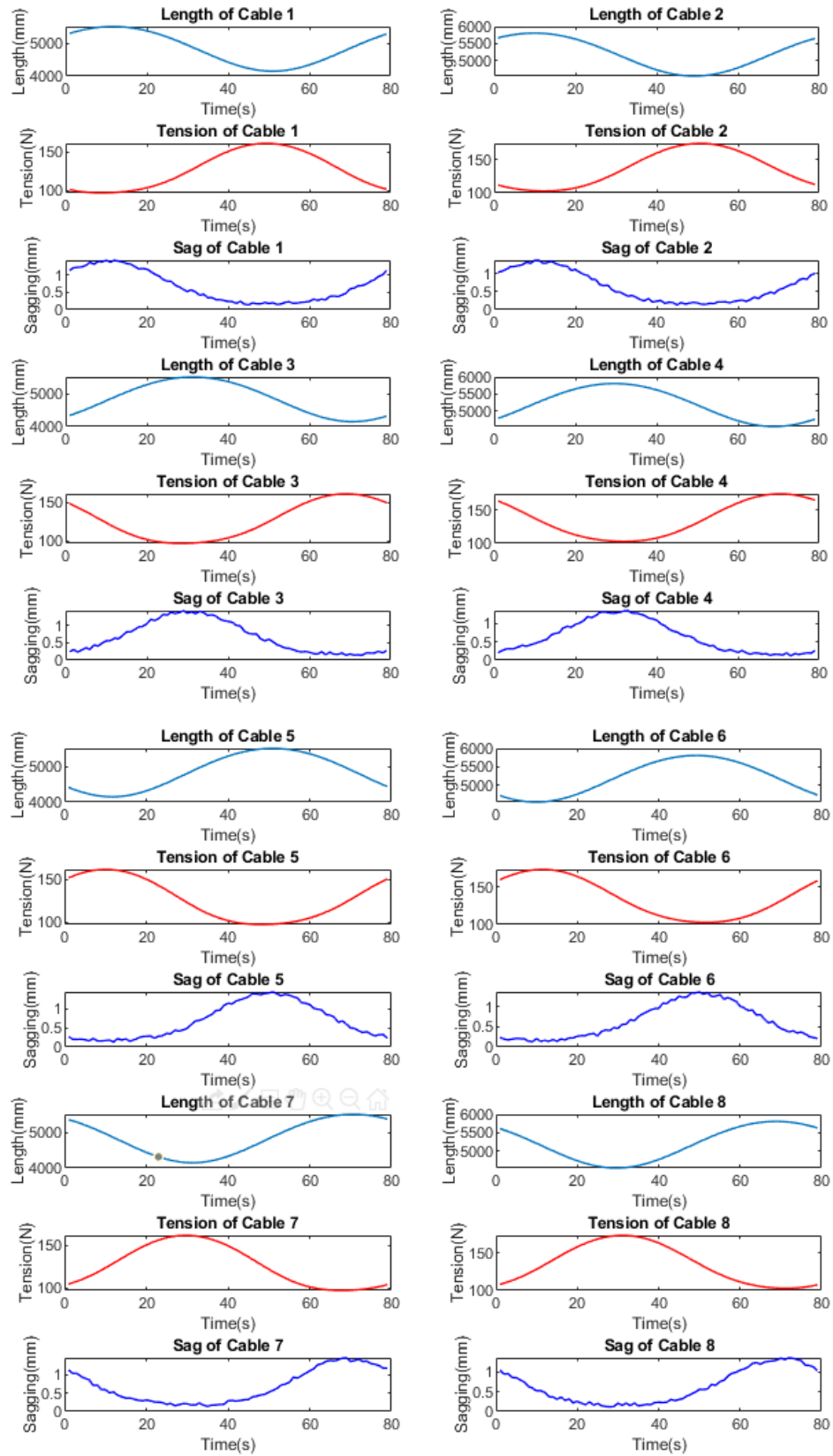
Hình 4.11 cho thấy chiều dài của 8 sợi cáp tương ứng quỹ đạo nội suy đường tròn bán kính 0,8m, quỹ đạo khớp tính toán có dạng liên tục, cho thấy tất cả các điểm nút đều nằm trong WFW với chiều dài cáp thay đổi từ 4000mm đến 6000 mm. **Hình 4.12** cho thấy mối liên hệ giữa chiều dài cáp lý thuyết, lực căng cáp và độ dài hiệu chỉnh cho độ võng của 8 cáp trong quỹ đạo nội suy đường tròn với giải thuật tối ưu hóa bậc 1 DSA cho phân phối lực căng cáp. Chiều dài hiệu chỉnh (bù) của mỗi cáp có mối liên hệ với lực căng và chiều dài của cáp, trong trường hợp này, vì cáp không đàn hồi nên độ dài hiệu chỉnh luôn dương, cáp càng dài và trọng lượng cáp càng lớn thì độ võng của cáp càng lớn. Đối với lực căng của cáp, khi lực căng

càng lớn thì độ võng của cáp càng nhỏ, kết quả phân tích cho thấy giải thuật tính toán này cho kết quả phù hợp, có thể áp dụng để tính toán các thông số điều khiển cho các bộ điều khiển từ phân phối cáp. Lực căng của tất cả các cáp được duy trì bằng hoặc lớn hơn giới hạn dưới τ_{\min} là 80N và nhỏ hơn giới hạn trên τ_{\max} được đặt ở 800N. Trong quỹ đạo này, chiều dài hiệu chỉnh võng cáp nằm trong khoảng từ 0mm đến tối đa là 2mm.

Hình 4.13 cho thấy mối liên hệ giữa chiều dài cáp lý thuyết, lực căng cáp và độ dài hiệu chỉnh cho độ võng của 8 cáp trong quỹ đạo nội suy đường tròn với giải thuật tối ưu hóa bậc 2 - QPA cho phân phối lực căng cáp. Tương tự như trường hợp phân phối lực căng cáp bằng giải thuật tối ưu hóa bậc 1 DSA, lực căng cáp nằm trong giới hạn cho trước và chiều dài hiệu chỉnh (bù) của mỗi cáp có mối liên hệ với lực căng và chiều dài của cáp và luôn luôn dương, cáp càng dài và lực căng cáp càng nhỏ thì độ võng cáp càng lớn. Kết quả phân tích cho thấy giải thuật tính toán này cho kết quả lực căng cáp và độ võng cáp có dạng liên tục theo quỹ đạo thiết kế, đây là một ưu điểm so với phương pháp phân phối lực căng bằng tối ưu hóa bậc 1 DSA nên có thể áp dụng để tính toán các thông số điều khiển cho các bộ điều khiển từ phân phối cáp tốc độ cao. Trong trường hợp này, chiều dài hiệu chỉnh võng cáp nằm trong khoảng từ 0 mm đến tối đa là 2 mm. Đối với hai cấu hình này, khi lực căng của cáp lớn hơn 300N thì chiều dài hiệu chỉnh độ võng cáp tiến về tiến về 0 mm. Các giá trị nghiệm của giải thuật vùng tin cậy cho sai số nghiệm $f(x)$ nằm trong khoảng $[e^{-13} \ e^{-20}]$. Theo kết quả tính toán và mô phỏng, để bộ di động di chuyển 5mm thì các dây cáp thay đổi chiều dài từ 1mm, do đó chiều dài bù cáp từ 2mm có thể cải thiện đáng kể độ chính xác của CDPR. Với cấu hình đang xét, một số điểm có độ võng cáp lên đến 16mm, do đó việc bù độ võng cáp sẽ tác động rất đáng kể đến độ chính xác vị trí của CDPR.



Hình 4.12: Độ võng, lực căng và chiều dài của cáp khi nội suy đường tròn với phân phối lực căng theo tối ưu hóa bậc 1 DSA



Hình 4.13: Độ võng, lực căng và chiều dài của cáp khi nội suy đường tròn với phân phối lực căng theo tối ưu hóa bậc 2 QPA

4.4 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS

Dựa trên mô hình dây đàn hồi để tính toán độ võng của cáp Irvine [91], trong đó ảnh hưởng của độ đàn hồi và khối lượng cáp được kết hợp trong mô hình tính toán. Một nghiên cứu của Kozak [113] cho thấy kết quả phân tích mô hình tĩnh của CDPR kích thước lớn với ảnh hưởng của khối lượng cáp, do độ võng của cáp, chuyển vị tĩnh của cáp đàn hồi đồng đều cũng được sử dụng để tính toán ma trận động học và độ cứng nghịch đảo của CDPR. Nghiên cứu này có thể được áp dụng không chỉ để xác định không gian làm việc với độ võng của cáp mà còn để thiết kế các CDPR kích thước lớn. Nicolas Riehl và cộng sự [93] đã nghiên cứu vấn đề ảnh hưởng của khối lượng cáp đối với mô hình động học nghịch và thuận của các CDPR bị ràng buộc (số DOF bằng số cáp dẫn động). Động học nghịch và thuận của 3 DOF CDPR được điều khiển bởi 3 dây cáp được tính toán dựa trên mô hình dây xích đàn hồi do Irvine mô tả, nghiên cứu này chỉ ra rằng đối với các CDPR chịu tải cao hoặc không gian làm việc lớn, ảnh hưởng của khối lượng cáp lên độ võng của cáp và độ chính xác của CDPR là đáng kể, do đó, cần phân tích khi thiết kế và điều khiển robot để đạt được độ chính xác mong muốn. Marc Gouttefarde và cộng sự [97] đã giới thiệu một phân tích tĩnh đơn giản hóa mới của CDPR, với giả thuyết rằng cáp có đặc tính không đàn hồi và khối lượng không đáng kể được sử dụng để truyền động cho CDPR, mô hình cáp này có nguồn gốc từ mô hình cáp võng của Irvine, được gọi là phương trình cáp xích, với giả thiết rằng độ võng của cáp là nhỏ, tuy nhiên cần phải làm rõ phạm vi hiệu quả của phương pháp được đề xuất trong bài báo để áp dụng cho các cấu hình Robot cụ thể. Merlet [129] đã áp dụng thuật toán Phân tích khoảng (Interval Analysis algorithm) để giải bài toán động học của CDPR có xét đến độ võng của cáp ở trạng thái tĩnh, thuật toán đã được thực nghiệm trên 8 cáp CDPR và đạt kết quả tốt. Phan Gia Luan và cộng sự [119] đã phát triển một quy trình mới để tạo ra các mô hình động học bán tĩnh và nghịch cho CDPM có tính đến độ võng của cáp bằng cách sử dụng cả phương pháp phân tích và thử nghiệm, mô hình này chỉ hợp lệ cho CDPR làm việc ở tốc độ thấp và gia tốc nhỏ.

Vấn đề xác định võng cấp của Robot song song điều khiển bằng cấp CDPR rất phức tạp, bởi vì một số mô hình tính toán độ võng của cáp dựa trên phương trình cáp xích nổi tiếng của Irvine đã được nghiên cứu, nhưng thời gian và hiệu quả tính toán là một vấn đề cần giải quyết. Hiện tại, vẫn chưa có mô hình toán học đơn giản nào để tính độ võng của cáp bằng cách xem xét tất cả các điều kiện liên quan do độ phức tạp và tính phi tuyến của mô hình độ võng của cáp, bao gồm nhiều biến số chi phối và ảnh hưởng của chúng đến độ chính xác vị trí của CDPR. Các nghiên cứu mới [121-123] đã sử dụng mạng nơ ron để tính toán bài toán động học nghịch với độ võng cáp với các cấu hình và ràng buộc cụ thể, tuy kết quả cần được thực nghiệm và phân tích sâu hơn, các nghiên cứu này cho thấy kỹ thuật tính toán mềm có tiềm năng ứng dụng vào việc giải quyết bài toán động học của CDPR có tính đến độ võng cáp. 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 xấp xỉ các hàm phi tuyến, phát hiện các yếu tố phi tuyến trực tiếp trong hệ thống tính toán, đặc điểm này có thể phù hợp với 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 vùng tin cậy Trust Region Dogleg (TRDA) [124] dựa trên hai thuật toán phân phối lực căng của cáp là DSA và QPA. Dữ liệu về độ võng của cáp thu được từ ANFIS và thuật toán QPA được so sánh và phân tích bằng các yếu tố thống kê của các đánh giá bao gồm sai số bình phương trung bình gốc (Root Mean Square Error – RMSE), hệ số tương quan (Correlation Coefficients – CC) và chỉ số phân tán (Scatter Index – SI). 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. Qua các phân tích cho thấy độ võng cáp phụ thuộc trực tiếp vào lực căng cáp, do đó việc xác định lực căng cáp có ý nghĩa quan trọng trong bài toán xác định độ võng cáp. Trong phần này, hai thuật toán DSA [71, 120] và QPA [71, 70] được sử dụng để xác định phân phối lực căng cáp của CDPR. Tiếp theo, các dữ liệu phân

phối lực căng cáp với bài toán động học vị trí tương ứng được sử dụng để tính độ võng của cáp dựa trên mô hình độ võng của cáp của Irvine. Cuối cùng, kết quả tính toán của mô hình độ võng cáp sẽ được sử dụng để xây dựng mô hình ANFIS dự đoán độ võng cáp cho CDPR, trong đó dữ liệu đầu vào là vị trí và hướng của MP. Kết quả tính toán cho thấy các mô hình ANFIS này phù hợp để dự đoán độ võng của cáp của các CDPR lớn nhằm giảm thời gian tính toán để xác định độ võng của cáp trong các trường hợp cụ thể. Kết quả từ các thí nghiệm và mô phỏng này được trình bày và phân tích trong các phần sau.

4.4.1 ANFIS

Hiện nay, các kỹ thuật tính toán mềm (Soft Computing Techniques - SCT) đã được sử dụng để xây dựng các giải pháp cho nhiều vấn đề trong các ngành khoa học kỹ thuật như Robot di động [130], Robot công nghiệp [131-132], trong đó, cấu trúc mạng nơ-ron mờ thích nghi (Adaptive neuro fuzzy inference system - ANFIS) là một trong những thuật toán hữu ích của SCT thường được sử dụng để tính toán động học và quy hoạch quỹ đạo của robot, Refaai [131] ứng dụng ANFIS để tính toán động học nghịch của cánh tay robot 5 bậc tự do, mô hình này đã được xây dựng dựa trên dữ liệu thu được từ bài toán động học thuận. Narayan et.al [132] đã phát triển một phương pháp tạo quỹ đạo cho Robot công nghiệp dạng nối tiếp không gian 5 DOF dựa trên ANFIS. Thông qua các kết quả phân tích ứng dụng và dạng của các bài toán phi tuyến có thể áp dụng hệ mạng nơ-ron mờ thích nghi và kết quả khảo sát các nghiên cứu về độ võng cáp ứng dụng cho CDPR, phần này mô tả ứng dụng của cấu trúc ANFIS để dự đoán độ võng của cáp truyền động dựa trên kết quả của các kết quả tính toán động học cáp theo phương trình cáp xích, bài toán động học nghịch và bài toán phân phối lực căng CDPR. ANFIS được cấu trúc dựa trên hệ thống suy luận mờ Takagi-Sugeno, Roger Jang là một trong những người đầu tiên phát triển cấu trúc ANFIS, kiến trúc ANFIS có thể được sử dụng để xác định các thành phần phi tuyến trực tuyến trong hệ thống điều khiển hoặc các mô hình dự đoán các bài toán phi tuyến như động học Robot [133]. ANFIS là sự kết hợp của hệ thống suy luận mờ (FIS - fuzzy inference system) với cơ chế học tập của

mạng nơ-ron nhân tạo trong việc xác định các hàm liên thuộc hoặc các luật mờ từ dữ liệu huấn luyện, do đó, có thể tạo mô hình ANFIS từ một biểu diễn phi tuyến của hệ thống dựa trên khả năng học từ dữ liệu đào tạo của ANFIS. Trong phần tiếp theo, mô hình ANFIS được sử dụng để xác định các luật mờ và các hàm liên thuộc đầu vào để đạt được các ánh xạ đầu vào - đầu ra mong muốn.

Cấu trúc ANFIS bao gồm năm lớp [133], giả sử rằng hệ mờ có p đầu vào là x_i , $i = 1, \dots, p$ và đặt $O_{l,i}$ lần lượt là đầu ra của nút i trong lớp l tương ứng. Tất cả các nút trong lớp 1 đều là các nút thích nghi dạng nút vuông (adaptive nodes).

$$O_{1,i} = N_i(x_i) \quad i = 1, \dots, p \quad (4.39)$$

Các hàm nút N_1, N_2, \dots, N_k có vai trò giống như hàm liên thuộc $\mu(x)$ của hệ mờ, và k biểu thị số lượng nút của mỗi đầu vào. Các hàm liên thuộc (Membership Functions - MF) có nhiều dạng khác nhau, trong đó MF dạng hình chuông là sự lựa chọn thông dụng.

Tất cả các nút của lớp 2 đều là nút hình tròn (nút cố định - fixed nodes). Đầu ra $O_{2,i}$ trong lớp này là kết quả của hàm AND cho tất cả các tín hiệu đầu ra của lớp 1. Mỗi đầu ra nút của lớp này đại diện cho cường độ của quy tắc suy luận (firing strength)

$$O_{2,i} = M_l(x_l)M_j(x_j) \quad (4.40)$$

Lớp 3 cũng chứa các nút cố định và đầu ra của lớp này sẽ được gọi là cường độ của quy tắc suy luận chuẩn hóa được sử dụng để xác định tỷ lệ cường độ của quy tắc suy luận của quy tắc thứ i bằng cách tổng hợp tất cả các quy tắc này.

$$O_{3,i} = \frac{O_{2,i}}{\sum O_{2,i}} \quad (4.41)$$

Lớp 4 chứa các nút thích nghi (adaptive nodes) và được sử dụng để thực hiện hệ mờ Sugeno, lớp này thực hiện tích hợp tổng của các biến đầu vào x_1, x_2, \dots, x_p và hệ số hằng c_1, c_2, \dots, c_p , từ đầu ra của các quy tắc IF-THEN.

$$O_{4,i} = O_{3,i} \sum_{j=1}^p (P_j x_j + c_j) \quad (4.42)$$

Trong đó c_1, c_2, \dots, c_p và P_1, P_2, \dots, P_p là tập tham số của lớp này, còn được gọi là tham số hệ quả.

Lớp 5 chứa một nút hình tròn, nút đơn này dùng để tính đầu ra bằng cách tính tổng tất cả các tín hiệu đầu vào, đây là bước giải mờ được thực hiện theo phương pháp bình quân trọng số.

$$O_{5,i} = \sum_i O_{4,i} \quad (4.43)$$

Mô hình ANFIS ở trên có thể cập nhật các tham số bằng cách sử dụng quy trình giảm độ dốc (gradient descent procedure). Một số cấu trúc ANFIS có rất nhiều kiểu FIS và các phương pháp giải mờ có thể được tìm thấy trong nghiên cứu của Jang (1993) [133]. Trong phần này, độ võng của cáp được dự đoán bằng mô hình mờ Sugeno bậc nhất.

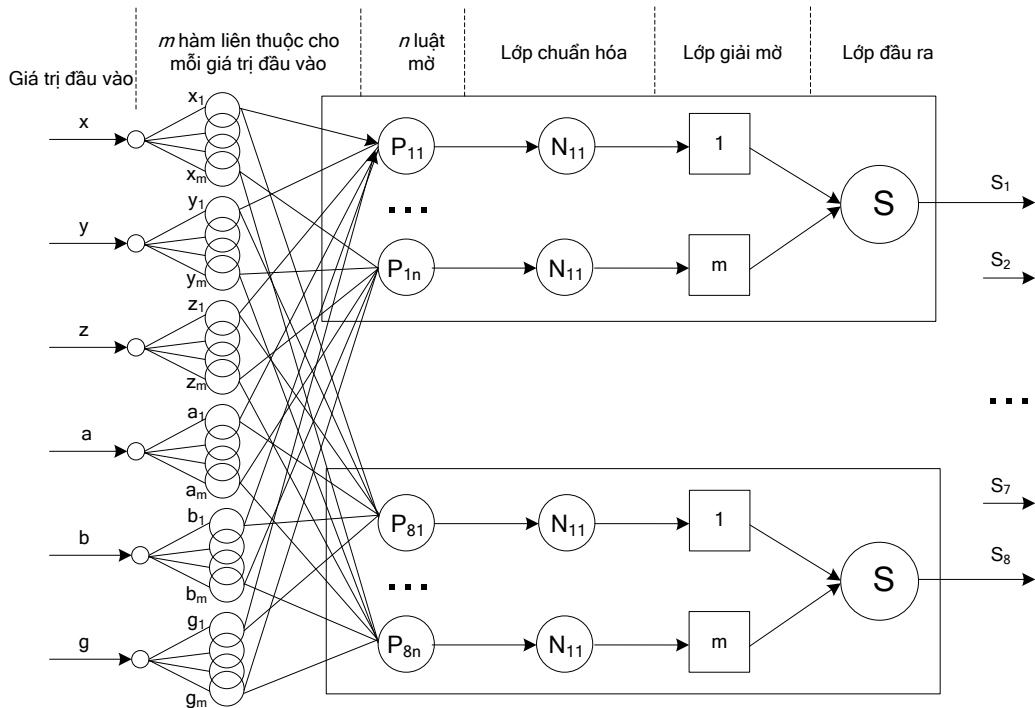
4.4.2 Giải thuật xác định độ võng cáp dựa trên ANFIS [124]

Theo kết quả tính toán các phần trên, mô hình tính toán độ võng của cáp có dạng phi tuyến cao do các ràng buộc động lực học và điều kiện cân bằng của hệ thống. Bài toán tính toán độ võng cáp cho CDPR là một hệ thống nhiều đầu vào và nhiều đầu ra, để giải quyết vấn đề tính toán cáp được trình bày trong nghiên cứu này, một giải thuật dự đoán độ võng cáp dựa trên ANFIS - Cable Sagging Prediction Algorithm based on ANFIS (CSPA) - 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 4.14**. Véc tơ 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 cáp theo các ràng buộc và phần tính toán chương 3 và 4, mô hình Sugeno với 64 luật mờ và các hàm liên thuộc Gaussian (GMF) được sử dụng để cấu trúc ANFIS. Trong nghiên cứu này, sáu đầu vào được trình

bày bởi 2 GMF và các hàm liên thuộc được xác định bởi phương trình (4.44). Số lượng các hàm liên thuộc của mỗi ANFIS đã được thiết lập theo thử nghiệm.

$$\mu_{A_i}(x; c_i, \sigma_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (4.44)$$

Trong đó x là đầu vào của nút i , các GMF được xác định bởi hai tham số tiền đề (c_i, σ_i) ; c_i là tâm của GMF và σ_i là chiều rộng của GMF. Hình dạng của GMFs phụ thuộc vào giá trị của các tham số tiền đề này với giá trị nhỏ nhất bằng 0 và lớn nhất bằng 1.



Hình 4.14: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp

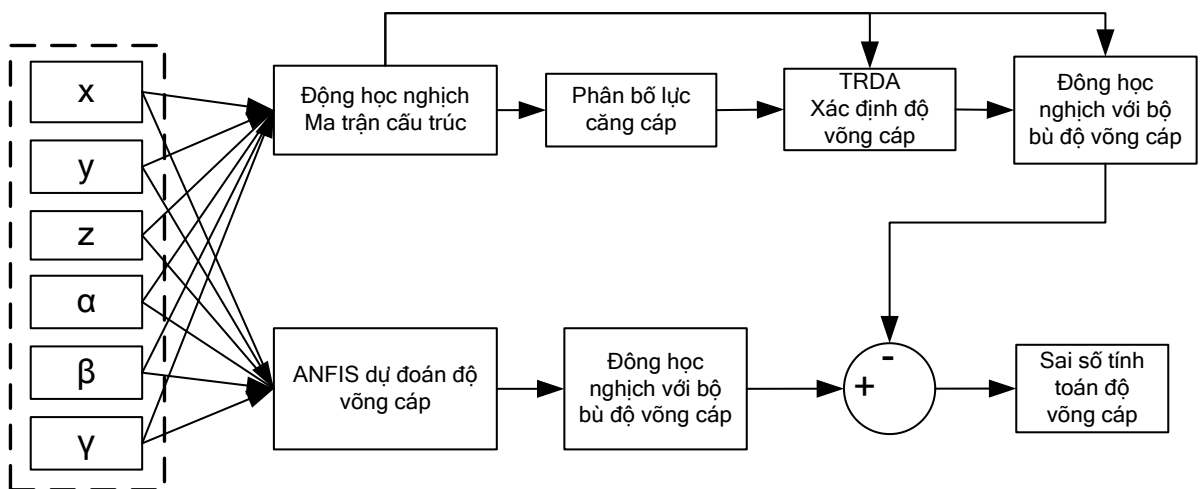
Cấu trúc ANFIS các pha i ($1, \dots, 8$) là một cấu trúc mạng nơron mờ thích nghi nhiều lớp, lớp 1 có 3 nút đầu vào bao gồm các hàm liên thuộc Gaussian, lớp này được sử dụng để chuyển các giá trị đầu vào sang các giá trị ngôn ngữ, trong đó các giá trị đầu vào là tọa độ Descartes của các tư thế của CDPR. Tọa độ vị trí MP và độ võng của cáp được sử dụng làm dữ liệu huấn luyện ANFIS, trong đó 6 tọa độ thể hiện vai trò vị trí MP làm đầu vào và độ võng của cáp là đầu ra tương ứng cho ANFIS. Thuật toán hybrid được sử dụng trong quá trình huấn luyện để điều chỉnh

trọng số và khởi tạo cơ sở quy tắc mờ, thuật toán này sẽ dừng khi sai số huấn luyện bằng sai số thiết lập hoặc số vòng lặp hiện tại vượt quá giá trị thiết lập. Các tham số hệ quả của các hàm luật mờ được điều chỉnh tự động bằng phương pháp Least Square của thuật toán học lai - Hybrid learning algorithm [131,133].

4.4.3 Mô phỏng kết quả tính toán

4.4.3.1 Mô hình tính toán

Trong phần này, các thí nghiệm được thực hiện trên các CDPR dạng thừa ràng buộc, các thông số của Robot được trình bày trong **bảng 4.3**. Quy trình tính toán sai số của độ võng cấp giữa phương pháp số và CSPA được miêu tả trong **hình 4.15**, mỗi tư thế của MP là đầu vào cho quá trình tính toán. Đối với phương pháp số, 6 đầu vào bao gồm vị trí và hướng của MP được sử dụng để tính toán chiều dài các biến khớp và ma trận cấu trúc của CDPR, các dữ liệu này là đầu vào cho giải thuật phân phối lực căng cáp, từ kết quả phân phối lực căng cáp và chiều dài cáp truyền động, giải thuật TRDA được sử dụng để tính độ võng cấp tương ứng.



Hình 4.15: Mô hình tính toán sai số độ võng cấp giữa phương pháp số và ANFIS

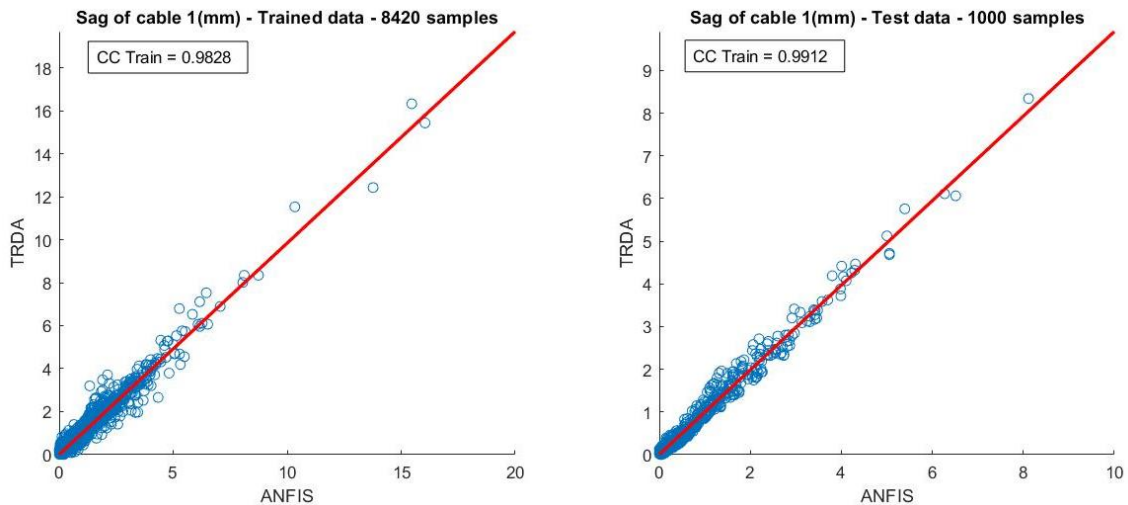
Phương pháp dự đoán độ võng cấp bằng ANFIS sử dụng trực tiếp các dữ liệu vị trí và hướng của MP để tính toán độ võng cấp, điều này làm giảm thời gian tính toán, sai số giữa 2 phương pháp được phân tích dữ liệu độ võng của 8 cấp được tính bởi TRDA và CSPA được so sánh bằng hệ số tương quan (correlation coefficient - CC).

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{TRi} - \bar{S}_{TR})(S_{ANi} - \bar{S}_{AN})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{TRi} - \bar{S}_{TR})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ANi} - \bar{S}_{AN})^2}} \quad (4.45)$$

Trong đó S_{TRi} và S_{ANi} lần lượt đại diện cho độ võng được tính toán bằng phương pháp số và được dự đoán bằng ANFIS, \bar{S}_{TR} và \bar{S}_{AN} là giá trị trung bình của các mẫu độ võng được tính toán và dự đoán, n biểu thị số lượng mẫu. Giá trị CC càng cao thì sự phù hợp của kết quả từ mô hình dự đoán với phương pháp tính toán càng tốt. Để đánh giá chính xác, chỉ số phân tán (scatter index - SI) và sai số bình phương trung bình (root-mean-square error - $RMSE$) cũng được áp dụng với các phương trình sau.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{S}_{TR}} \quad (4.46)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{TRi} - S_{ANi})^2} \quad (4.47)$$



Hình 4.16: So sánh độ võng của cáp 1 được tính bởi ANFIS và TRDA

Dữ liệu thử nghiệm và dữ liệu đã huấn luyện thu được bằng quy trình ở **hình 4.15** và dữ liệu độ võng của 8 dây cáp được thu thập trong toàn bộ không gian làm việc khả thi của CDPR với đặc điểm kỹ thuật trong **Bảng 4.4**. Hơn 8000 vị trí của MP đã được thu thập bằng bài toán động học nghịch có độ võng cáp với giải thuật

vùng tin cậy, số lượng mẫu huấn luyện được chọn dựa vào thực nghiệm và kết quả đánh giá các ràng buộc để đảm bảo được độ tin cậy của mô hình được xây dựng.

Bảng 4.4: Thông số kỹ thuật của CDPR

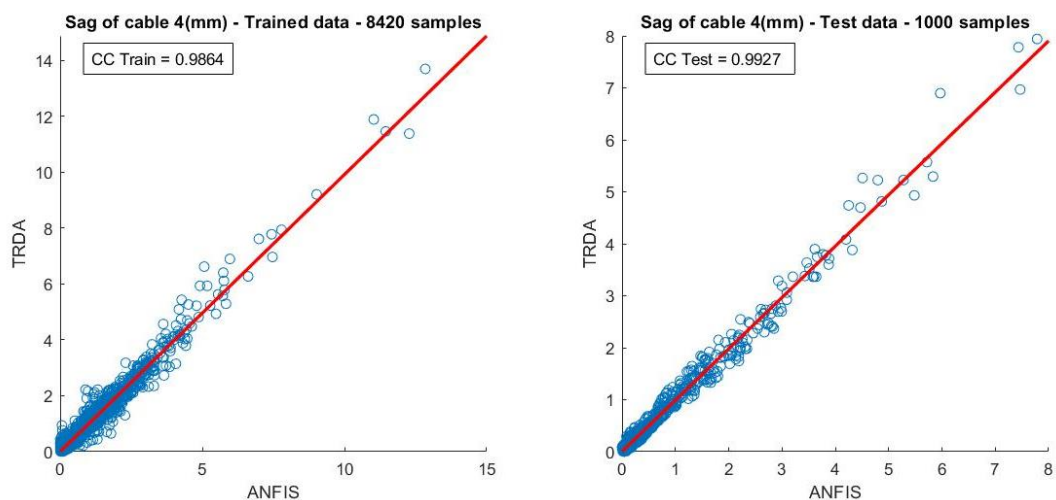
Số bậc tự do	6 (3 xoay, 3 tịnh tiến)
Số lượng cáp	8
Kích thước khung cố định (m)	$6 \times 6 \times 3$
Kích thước bộ di động (m)	$0.4 \times 0.4 \times 0.6$
Tải trọng	80 kg
Không gian làm việc L x W x H (m)	$5 \times 5 \times 2.5$
Khối lượng riêng tuyến tính của cáp (kg / m)	0.1543
Đường kính cáp (mm)	5

Đối với mỗi vị trí cụ thể của MP, một tập hợp lực căng đã được tính toán bằng 2 giải thuật DSA và QPA. Kết quả của bài toán động học nghịch và lực căng cáp tương ứng được sử dụng làm đầu vào của thuật toán vùng tin cậy TRDA để tìm ra 8 chiều dài tương ứng của cáp có tính đến độ võng của cáp. Nhìn chung, độ võng của cáp là một hàm phụ thuộc vào chiều dài cáp, lực căng của cáp và vị trí của cáp trong không gian.

Bảng 4.5: Giải thuật CSPA với hệ số tương quan của tám dây cáp

Cable i	Trained data			Test data		
	CCtrain	RMSE	SI	CCtest	RMSE	SI
1	0.9828	0.1348	0.3644	0.9912	0.1203	0.1935
2	0.9866	0.1173	0.3348	0.9948	0.0988	0.1645
3	0.9845	0.1266	0.3417	0.9911	0.1182	0.1905
4	0.9864	0.1132	0.3244	0.9927	0.1138	0.1891
5	0.9834	0.1279	0.3478	0.9908	0.1220	0.1948
6	0.9877	0.1105	0.3176	0.9909	0.1286	0.2132
7	0.9803	0.1403	0.3832	0.9903	0.1276	0.2039
8	0.9829	0.1297	0.3740	0.9922	0.1223	0.2019

Bảng 4.5 cho thấy dữ liệu thử nghiệm và dữ liệu đào tạo được sử dụng để tính toán các phép đo thống kê, 8420 mẫu dữ liệu cho đào tạo và 1000 mẫu dữ liệu cho thử nghiệm được sử dụng để phân tích dữ liệu thu được giữa TRDA và CSPA, cả hai mô hình đều được xây dựng dựa trên giải thuật tính toán lực căng QPA, tất cả các mô hình CSPA cho 8 cấp cho thấy dữ liệu đào tạo có CC cao hơn 0,9800 và đối với dữ liệu thử nghiệm thì CC cao hơn 0,9900. RMSE tương ứng nhỏ hơn 0,1403 và 0,1286 đối với dữ liệu đào tạo và dữ liệu kiểm tra, trong khi SI nhỏ hơn 0,3832 và 0,2132 đối với dữ liệu được đào tạo và dữ liệu kiểm tra. **Bảng 4.5, hình 4.16 và hình 4.17** cho thấy sai số của các mô hình CSPA phù hợp để dự đoán độ võng của cáp với tất cả các hệ số tương quan đều cao hơn 0,98. Quy trình thực hiện tương tự cho mô hình CSPA với giải thuật phân phối lực căng cấp DSA.

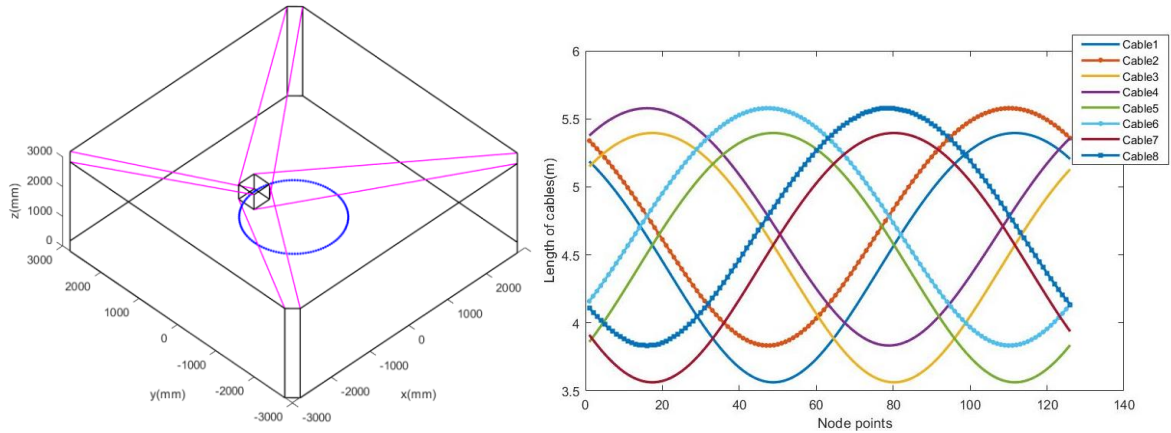


Hình 4.17: So sánh độ võng của cáp số 4 được tính bởi CSPA và TRDA

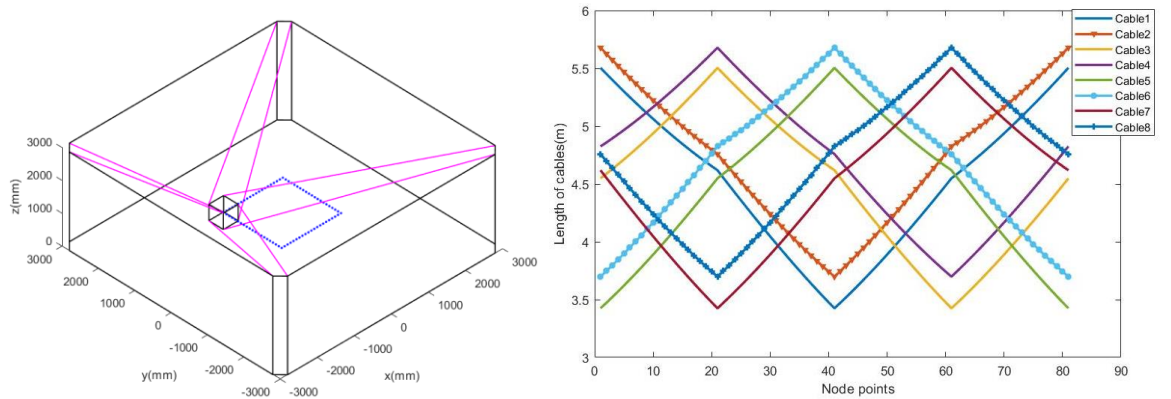
4.4.3.2 Mô phỏng tính toán cho các quỹ đạo điều khiển

Tiếp theo, các quỹ đạo điều khiển Robot di chuyển theo các đường cơ bản được tính toán bằng cả 2 phương pháp TRDA và CSPA với 2 phương pháp tính lực căng cấp là DSA và QPA để đánh giá độ phản hồi và độ chính xác của giải thuật CSPA trong cả 2 trường hợp. **Hình 4.18** cho thấy quỹ đạo và đáp ứng khớp của CDPR đối với đường tròn có bán kính là 1000 (mm) và z là 1000 (mm); **Hình 4.19**

cho thấy quỹ đạo và các đáp ứng khớp của CDRP đối với đường đi hình vuông với cạnh 1600 (mm) và z là 1050 (mm).



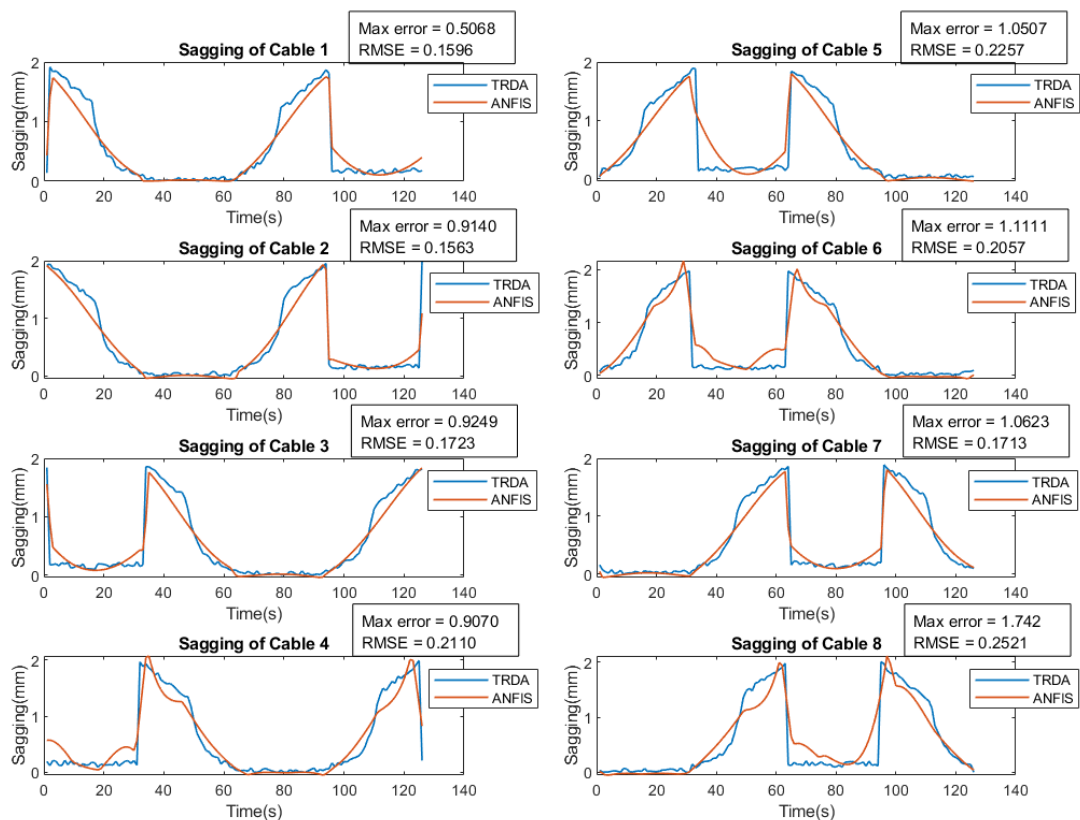
Hình 4.18: Quỹ đạo và đáp ứng khớp của đường tròn $r = 1000$ (mm), $z = 1000m$



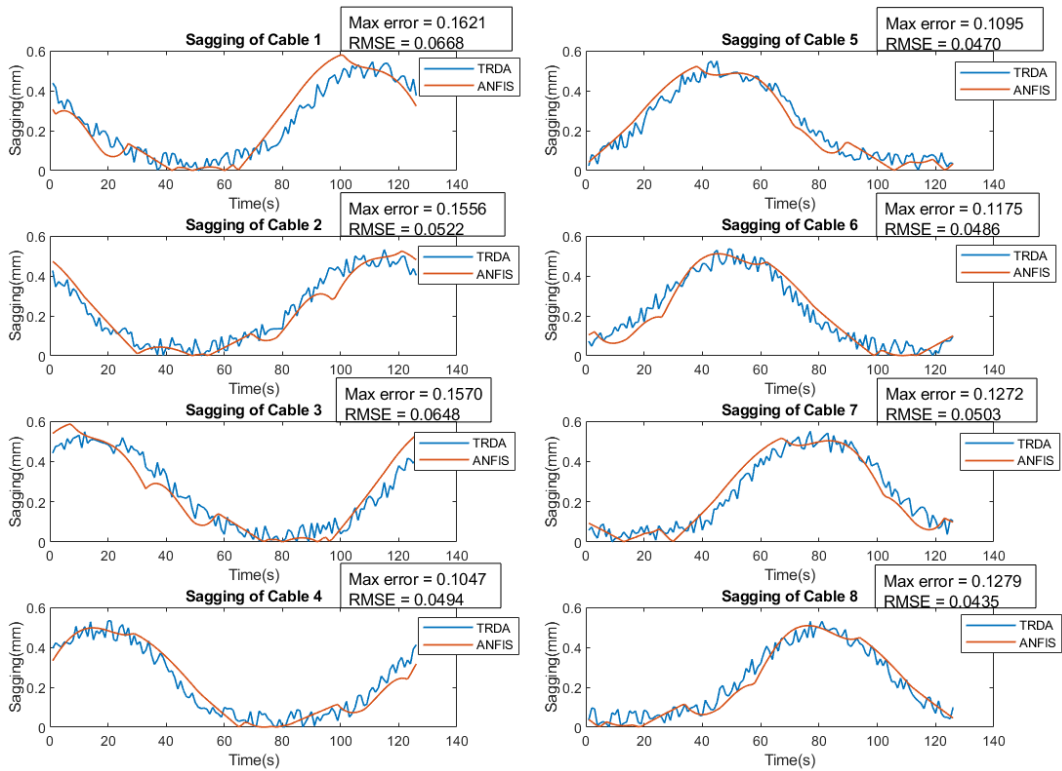
Hình 4.19: Quỹ đạo và phản ứng khớp của hình vuông góc 1600mm, $z = 1050mm$

Một thuật toán thực hiện kiểm tra xem các điểm này có nằm trong vùng làm việc của CDRP hay không (thỏa mãn phương trình cân bằng (4.1)). Nếu quỹ đạo khả thi, dữ liệu tọa độ này sẽ được đưa vào thuật toán để tìm lực căng cáp tương ứng. Trong mô phỏng tính toán, DSA hoặc QPA được sử dụng để tìm tập hợp lực căng, với điều kiện lực căng phải nằm trong vùng giới hạn quy định, giới hạn dưới của lực căng được lựa chọn dựa trên các điều kiện cân bằng, đảm bảo độ cứng và ổn định của bộ chuyển động, giới hạn trên của bộ căng được lựa chọn dựa trên công suất của động cơ, tiếp theo, thuật toán vùng tin cậy TRDA và CSPA được sử dụng để tính chiều dài cáp truyền động dựa vào bào toán động học nghịch CDRP, có tính đến độ võng của cáp. Hình 4.20 cho thấy kết quả tính toán độ võng của 8 sợi cáp khi Robot

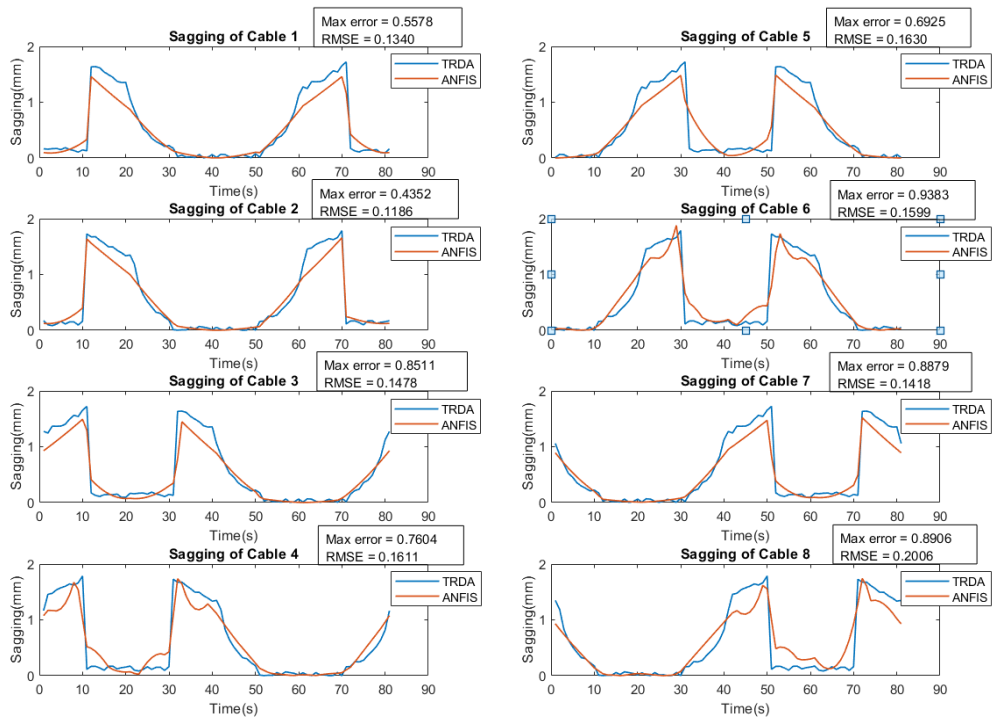
di chuyển dọc theo đường tròn đường kính 2m với cao độ $z = 1\text{m}$, quỹ đạo mô phỏng có dạng liên tục có nghĩa là tất cả các điểm nút đều nằm trong WFW và chiều dài cáp thay đổi từ 3400 mm đến 5700 mm với 126 điểm nút. Độ võng của cáp được tính toán bằng hai phương pháp: TRDA và CSPA dựa trên thuật toán DSA để giảm thiểu tổng lực căng của CDPR. TRDA tạo ra đường biểu diễn độ võng cáp với sự nhấp nhô, trong khi đường 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 sai số 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 có sự thay đổi lớn về giá trị lực căng cáp.



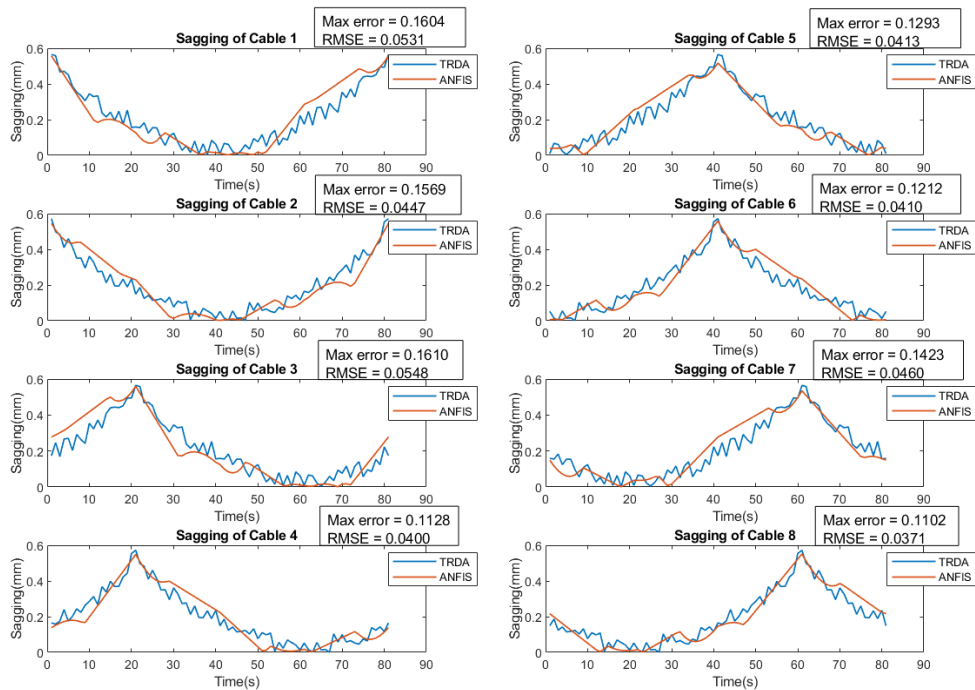
Hình 4.20: Độ võng 8 cáp quỹ đạo đường tròn bán kính 1000mm-DSA



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



Hình 4.22: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình vuông cạnh 1600mm-DSA



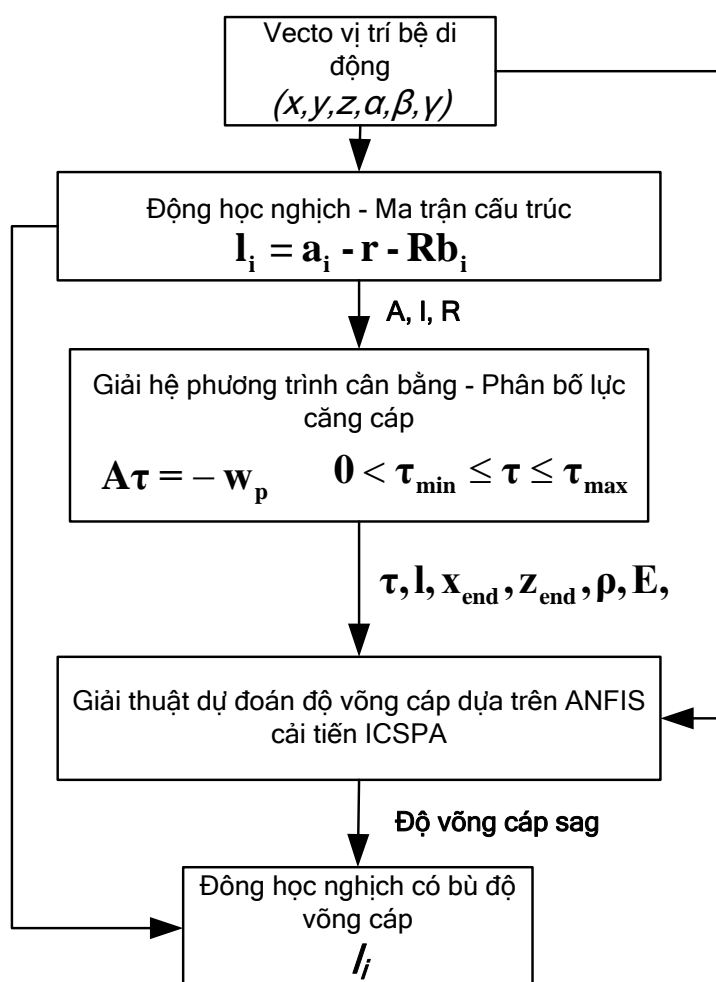
Hình 4.23: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình vuông cạnh 1600mm-QPA

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 tại $z = 1000\text{m}$, 126 điểm nút, độ võng của cáp được tính toán bằng hai phương pháp TRDA và CSPA dựa trên giải thuật phân phối lực QPA. Tương tự như hình 4.20, 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 CSPA 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 0,1621 mm theo quỹ đạo này với RMSE tối đa chỉ 0,0668 mm. 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 và 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 giải thuật CSPA cho kết quả với độ chính xác ổn định, 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 τ_{\min} đặt ở 80N và nhỏ hơn giới hạn trên τ_{\max} , đặt ở 800 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).

Hình 4.22 và **hình 4.23** cho kết quả tương tự đối với quỹ đạo hình vuông cạnh 1600mm trong mặt phẳng XY với $z = 1050\text{mm}$. Sai số tối đa và RMSE tương ứng là 0,9383mm và 0,2006 đối với giải thuật CSPA dựa trên DSA lớn hơn nhiều so với kết quả tính toán của giải thuật CSPA dựa trên QPA với kết quả sai số tối đa = 0,1610mm và $\text{RMSE} = 0,0548$, kết quả này cũng cho thấy độ ổn định của giải thuật tính toán độ võng cáp CSPA.

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



Hình 4.24: Bài toán động học nghịch với lực căng cáp và độ võng cáp với giải thuật xác định độ võng cáp ICSPA

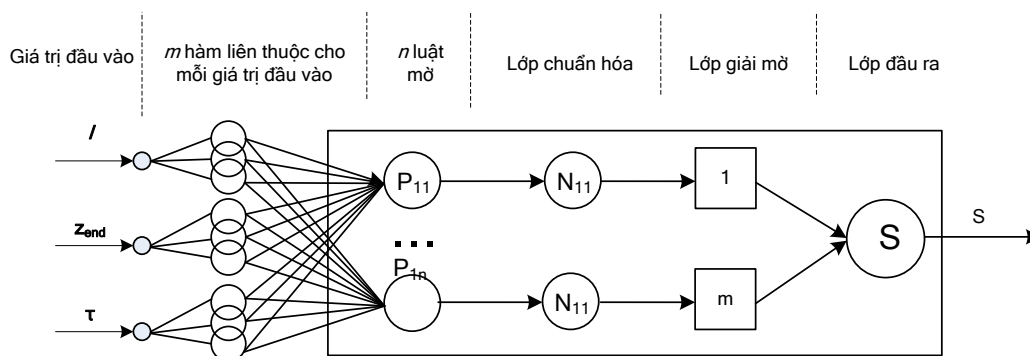
Giải thuật CSPA cho kết quả dự đoán độ võng cáp có độ chính xác cao so với giá trị tham chiếu là giải thuật TRDA, điều này cho thấy kỹ thuật tính toán mềm ANFIS là phù hợp để phát triển các mô hình tính toán độ võng cáp cho các CDPR. Tuy nhiên một bất lợi của giải thuật CSPA là chỉ áp dụng cho từng giải pháp phân phối 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 phối lực căng cáp, giải thuật xác định độ võng cáp TRDA và mô hình ANFIS. Giải thuật ICSPA được trình bày trên **hình 4.24**, dữ liệu đầu vào mô hình dự đoán độ võng cáp bao gồm tọa độ dây cáp trong hệ trục cục bộ được chuyển đổi từ tọa độ đầu công tác thông qua bài toán động học nghịch của CDPR, giá trị phân phối lực căng cáp và các thông số kỹ thuật của cáp truyền động. Giải thuật này sẽ được thiết kế thử nghiệm theo từng nhóm dây cáp, với các giới hạn về thông số dây cáp và lực căng như trên **bảng 4.6**.

Bảng 4.6: Thông số đầu vào của giải thuật ICSPA

Thông số kỹ thuật thiết kế	
Chiều dài cáp truyền động	20.000 mm
Chiều cao tối đa khung cố định	12.000 mm
Giới hạn lực căng cáp	[80 1000] N
Đường kính cáp truyền động	5 mm
Khối lượng riêng cáp (kg/m ³)	5760

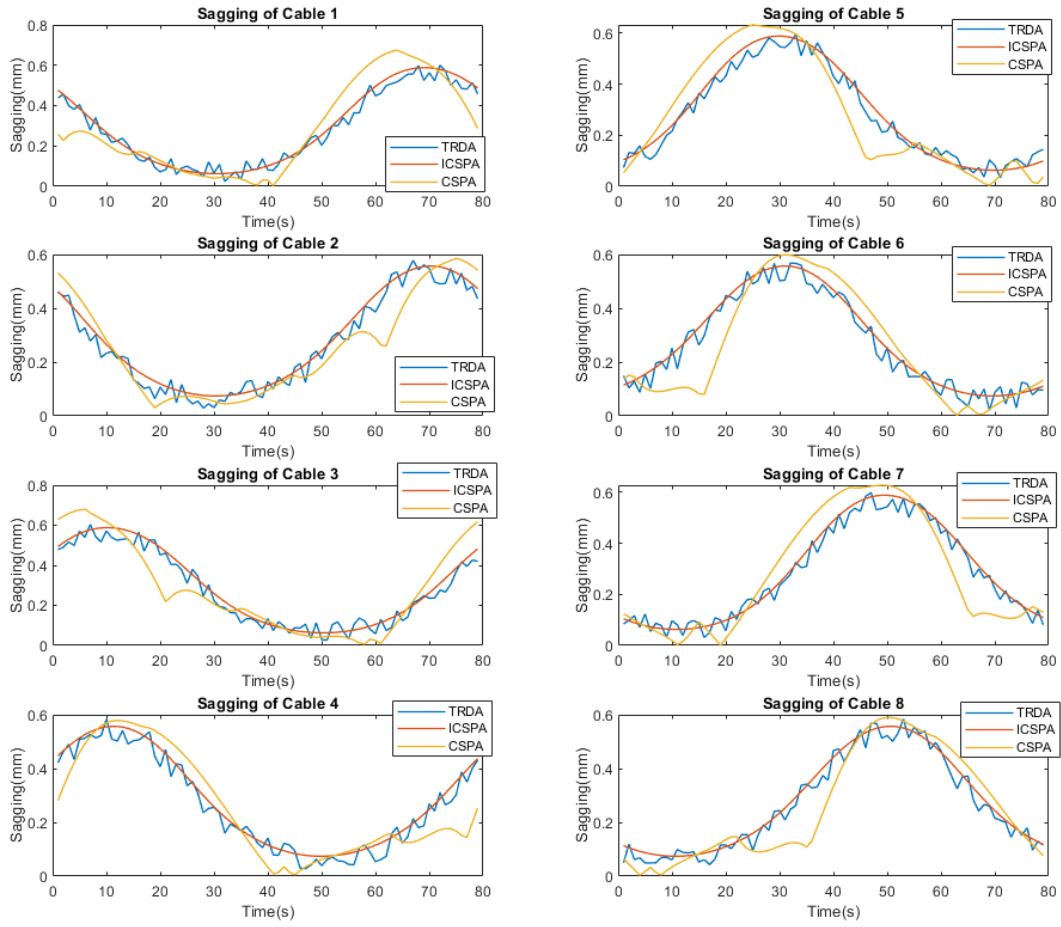
Các qui trình lấy mẫu và xây dựng mô hình dự đoán ICSPA tương tự như CSPA, **hình 4.25** cho thấy điểm khác nhau giữa ICSPA và CSPA là dữ liệu đầu vào gồm 4 biến là chiều dài cáp l , tọa độ z_{end} của điểm mắc cáp di động, lực căng cáp t

và đường kính cáp d . Các thông số này là kết quả của các bài toán động học nghịch, phân phối 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.

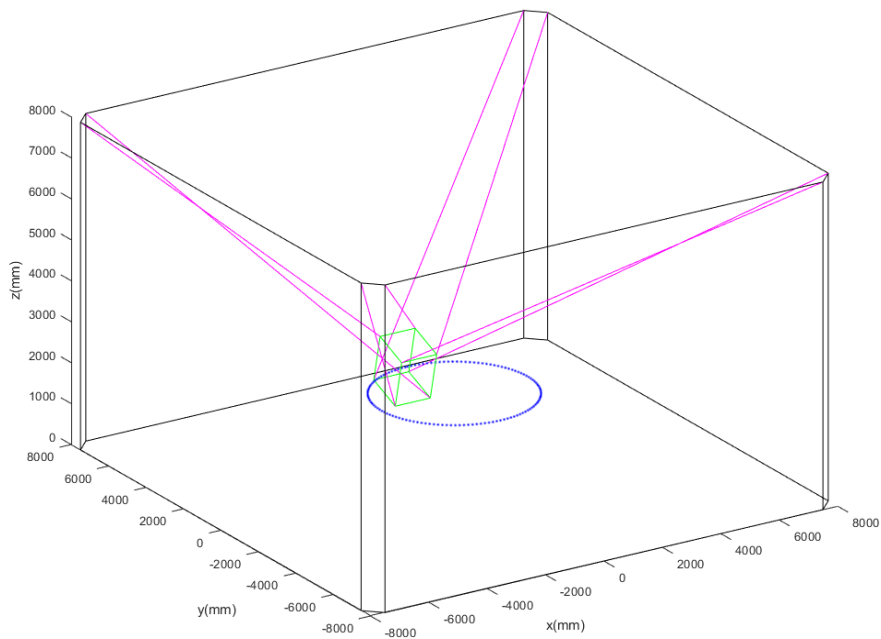


Hình 4.25: Kiến trúc ANFIS được đề xuất để dự đoán độ võng của cáp

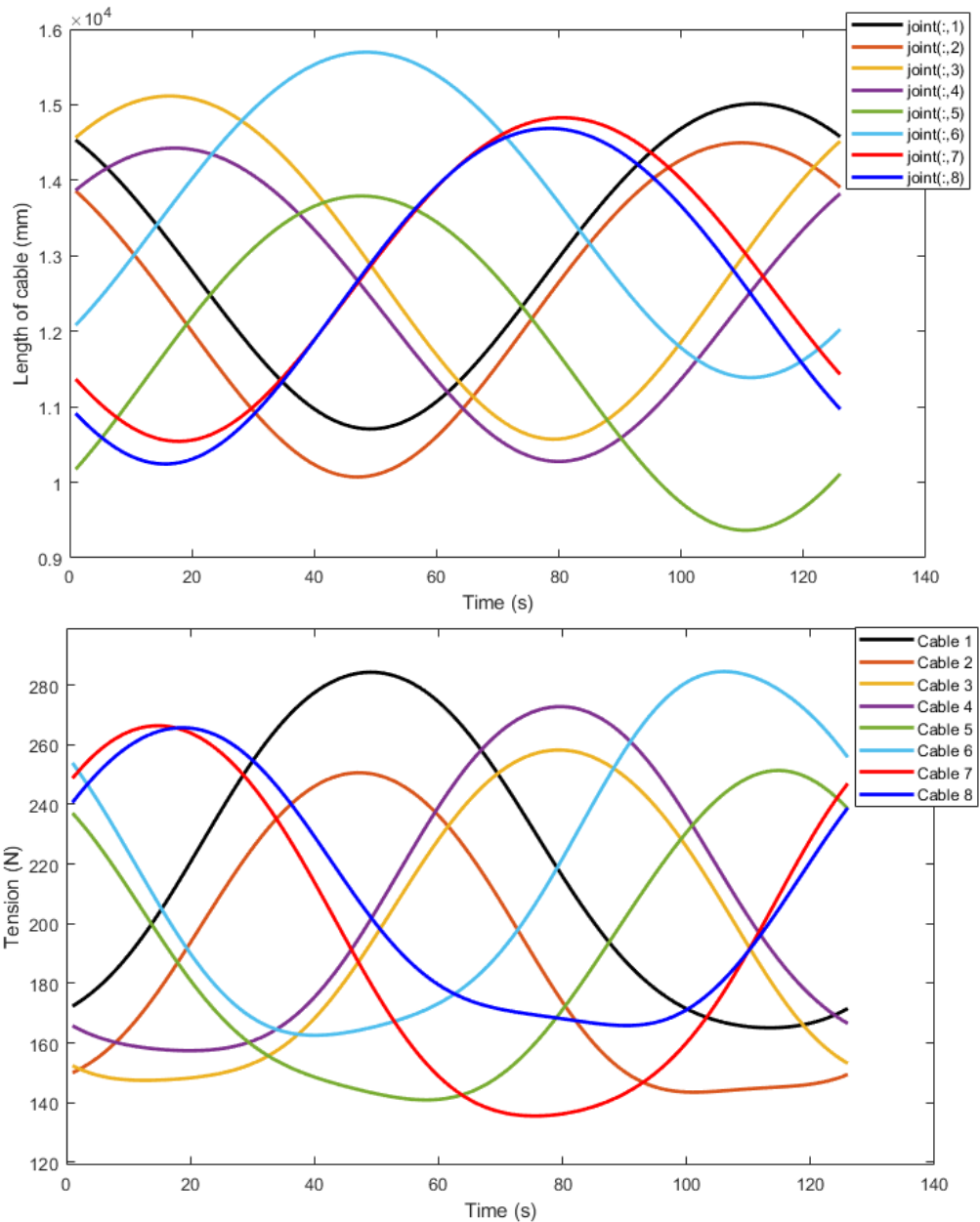
Hình 4.26 biểu diễn kết quả tính toán độ võng cáp bằng 3 phương pháp TRDA, CSPA và ICSPA theo quỹ đạo đường tròn đường kính 1600mm với thông số CDPR được cho trên **bảng 4.3**. Kết quả cho thấy đáp ứng độ võng cáp theo ICSPA có độ chính xác cao hơn phương pháp CSPA, tiệm cận các giá trị của giải thuật 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. Tiếp theo, để kiểm nghiệm khả năng tính toán của giải thuật ICSPA với các cấu hình CDPR và giải thuật phân phối lực căng khác nhau, ICSPA được sử dụng để tính độ võng cáp của CDPR có kích thước lớn hơn, với thông số kỹ thuật và cấu hình được biểu diễn trên **hình 4.27**. CDPR có kích thước bao là $16 \times 16 \times 8$ m, với bộ di động có khối lượng 80kg và kích thước là $1 \times 1 \times 1$ m, quỹ đạo thiết kế là một hình tròn có đường kính lớn đến 5m ở cao độ $z = 2$ mm với góc nghiêng theo trục x là 5 độ.



Hình 4.26: Độ võng 8 cáp quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm



Hình 4.27: Cấu hình CDPR kích thước lớn thực hiện quỹ đạo đường tròn

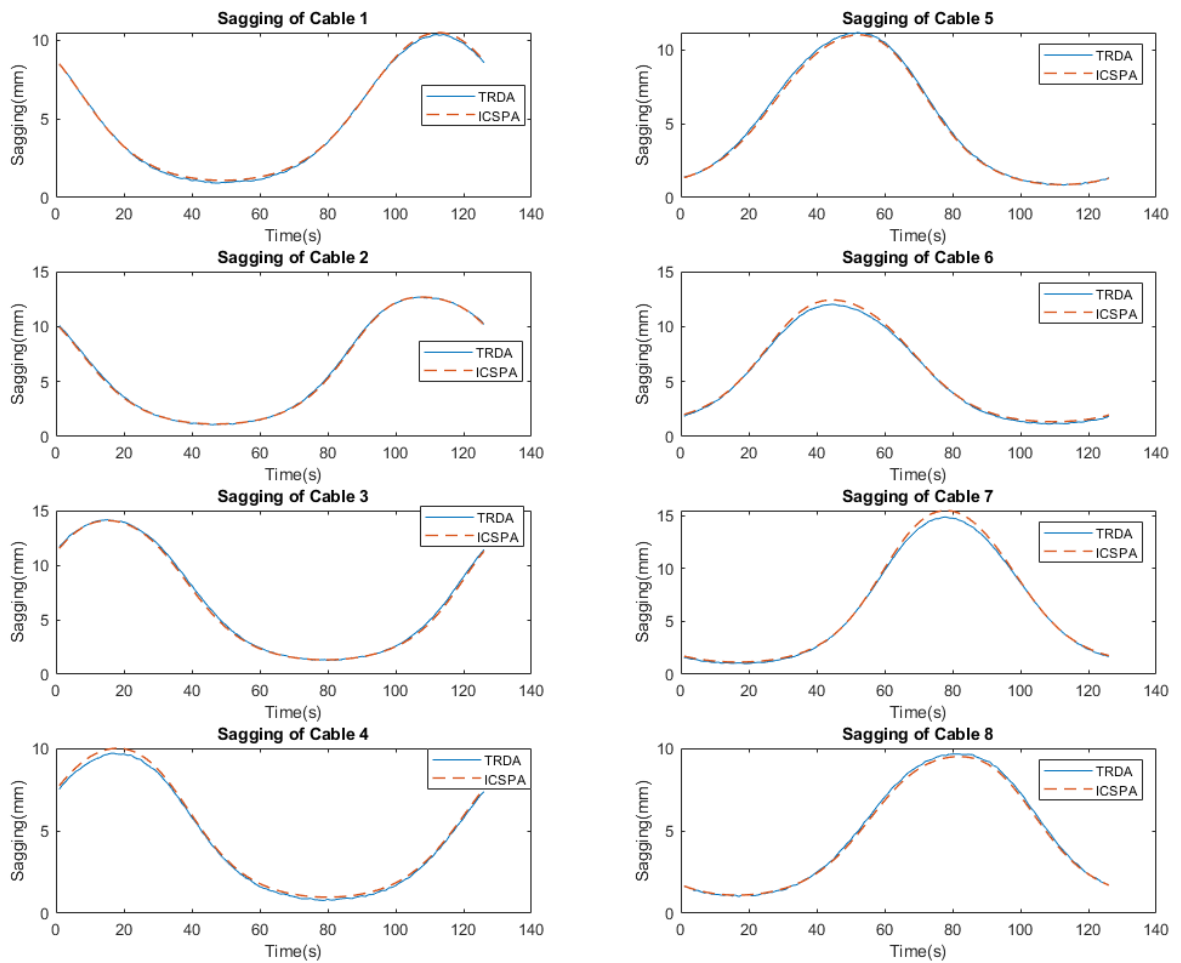


Hình 4.28: Đáp ứng khớp và phân phối lực căng CDPR với quỹ đạo đường tròn

Hình 4.28 là đáp ứng khớp và phân phối lực căng dọc theo quỹ đạo thiết kế, kết quả cho thấy chiều dài các dây cáp truyền động nằm trong khoảng từ 9m đến 16m, lực căng dao động từ 130N đến 290N, các giá trị này đều nằm trong giới hạn tính toán, các lực căng cáp được tính bằng giải thuật FCDF có dạng liên tục dọc theo quỹ đạo điều khiển. Kết quả tính toán độ võng cáp được thể hiện trên **hình 4.29**, các giá trị độ võng cáp tính bằng ICSPA bám rất tốt các giá trị độ võng cáp tính bởi giải

thuật vùng tin cậy, các giá trị độ võng cáp 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 cáp tăng lên rất nhiều. So với kết quả tính toán với cấu hình CDPR **bảng 4.4**, khi chiều dài dây cáp dao động từ 4000mm đến 6000mm, nếu lực căng cáp trên 200N thì độ võng cáp nhỏ hơn 0.6mm, trong khi đó, trường hợp cáp dài từ 9000mm đến 16000mm, lực căng cáp lớn hơn 200N nhưng độ võng cáp đều lớn hơn 1mm, cụ thể với cáp có chiều dài 15m và lực căng cáp 140N thì độ võng cáp lên đến 15mm, nếu chiều dài cáp là 10m và lực căng cáp khoảng 250N thì độ võng cáp khoảng 2mm. Điều này cho thấy tính phi tuyến của mô hình tính toán độ võng cáp với phương trình cáp 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 thực nghiệm rất tốt, phù hợp cho việc ứng dụng để dự đoán độ võng của cáp truyền động cho các CDPR có kích thước lớn.

Về chỉ tiêu thời gian tính toán, 3 giải thuật xác định độ võng cáp được thực hiện trên cùng một điều kiện đầu vào với thông số thiết bị mô phỏng: Processor: Intel® Core™ i5-9300H CPU @ 2.40GHz; Installed Memory (RAM): 16.0GB; Software: Matlab 2019^a, kết quả tính toán được trình bày trên bảng 4.7. Kết quả cho thấy giải thuật CSPA và ICSPA có thời gian tính toán nhỏ hơn rất nhiều so với giải thuật ICSPA, thời gian tính toán của giải thuật CSPA bằng 0.08% (giảm 99.92%) so với TRDA do giải thuật này không cần tính toán phân phối lực căng, và các bài toán động học vị trí để tính độ võng cáp, trong khi đó thời gian tính toán của giải thuật ICSPA bằng 0.6% (giảm 99.4%) so với TRDA, thời gian tính toán ICSPA lớn hơn CSPA là do trong giải thuật tính toán phải giải bài toán động học nghịch và giải thuật phân phối lực căng cáp FCDF), điều này cho thấy hiệu quả của 2 giải thuật CSPA và ICSPA về mặt thời gian tính toán đã vượt mục tiêu đề ra.



Hình 4.29: Độ võng 8 C DPR kích thước lớn với quỹ đạo đường tròn

Bảng 4.7: So sánh thời gian thực hiện của 3 giải thuật xác định độ võng cáp

Quỹ đạo thực nghiệm	TRDA	CSPA	ICSPA
Tính độ võng cáp cho quỹ đạo hình tròn đường kính 1600mm với 126 điểm nút.	8.3279s	0.0064s	0.0486s
Tính độ võng cáp cho quỹ đạo đường thẳng từ điểm A (-400, -800, 500) đến điểm B(800, 400, 1100) với 61 điểm nút.	6.4728s	0.0049s	0.0392s

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 tính toán độ võng cáp và độ chính xác dự đoán với các cấu hình C DPR 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 phối lực căng cũng như bất kỳ cấu hình C DPR 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 phối lực căng cụ thể và một cấu hình C DPR cho trước, điều này gây khó khăn khi thay đổi cấu hình C DPR cũng như giải pháp phân phối 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 phối 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 C DPR, giải thuật phân phối lực căng cáp khác nhau với các điều kiện biên về kích thước C DPR, 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.

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

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 phối lực căng cáp	Tất cả	Theo từng giải thuật cho trước	Tất cả
Khả năng áp dụng cho các cấu hình C DPR khác nhau	Tất cả	Theo từng cấu hình cho trước	Tất cả

4.5 Kết luận

Kết quả mô phỏng tính toán cho thấy 2 mô hình dự đoán độ võng cấp CSPA và ICSPA dựa trên ANFIS và thuật toán tổng hợp lực căng QPA hoặc FDCF cho độ chính xác tốt hơn so với thuật toán DSA khi ứng dụng tính toán cùng một 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. Đặc biệt tính liên tục của độ võng cấp theo quỹ đạo thiết kế 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 cấp CSPA phụ thuộc vào phương pháp tính toán phân phối 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, điều này chỉ cho phép xây dựng giải thuật xác định độ võng cấp CSPA cho từng CDPR có thông số cụ thể, trong khi đó, mô hình ICSPA có thể áp dụng cho bất kỳ cấu hình CDPR nào và có thể áp dụng cho các phương pháp phân phối lực căng khác nhau trong giới hạn về chiều dài cáp và lực căng cáp cho trước. Đóng góp thứ 1 trong nghiên cứu này là mô hình dự đoán độ võng cấp CSPA dựa trên ANFIS được xây dựng dựa trên hai giải thuật phân phối lực căng là DSA và QPA cho ra các sai số khác nhau, mô hình ANFIS CSPA cho phản hồi tốt hơn với giải thuật phân phối lực căng cáp QPA do tính liên tục của độ căng cáp, dữ liệu được lấy trên toàn bộ không gian làm việc của cấu hình CDPR đã phân tích với số lượng lớn mẫu nên hạn chế ảnh hưởng của độ không đảm bảo của dữ liệu đầu vào, điều này đã được kiểm chứng thông qua kết quả tính toán của mô hình ANFIS cho số lượng dữ liệu thử nghiệm là 1000 mẫu ngẫu nhiên. Đóng góp thứ 2 là giải thuật xác định độ võng cấp ICSPA cũng dựa trên ANFIS được cải tiến với việc thay đổi phương pháp tính toán dữ liệu đầu vào, giải thuật này được ứng dụng tính toán và so sánh với giải thuật CSPA, kết quả cho thấy ICSPA cho kết quả dự đoán chính xác và

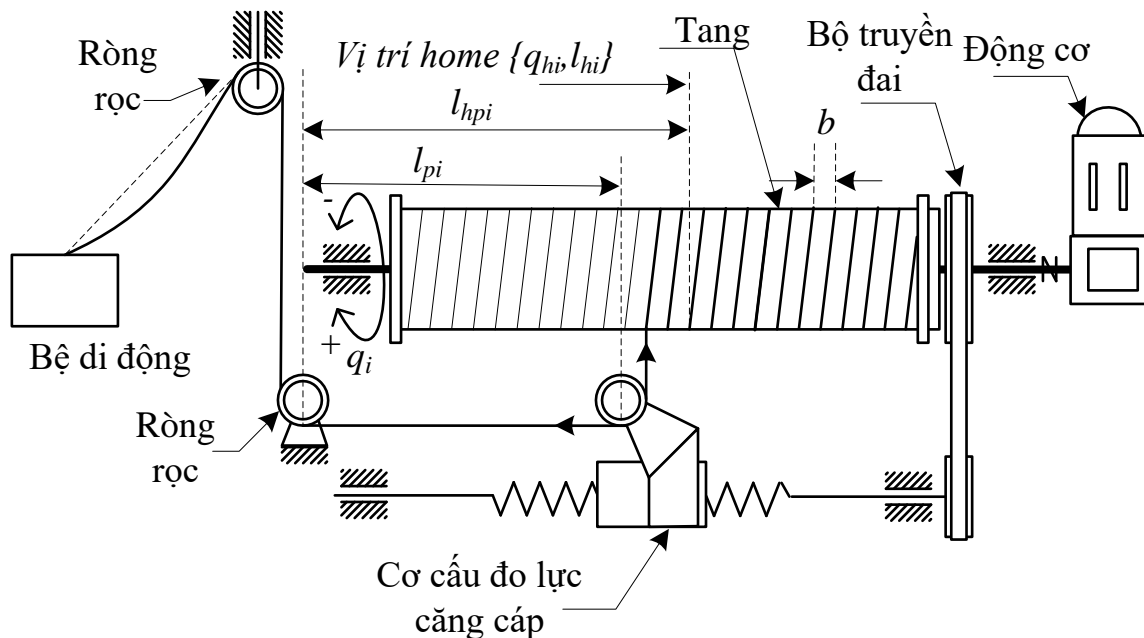
liên tục hơn CSPA, đặt biệt là ICSPA có thể ứng dụng cho bất kỳ cấu hình CDPR cũng như bất kỳ giải thuật phân phối lực căng nào với các điều kiện biên về chiều dài cáp và lực căng cáp cho trước. Như vậy, kết quả tính toán mô phỏng cho thấy sự phù hợp của 2 mô hình CSPA và ICSPA dựa trên ANFIS được xây 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

5.1 Giới thiệu

Chương 5 trình bày quá trình tích hợp các kết quả tính toán động học nghịch, động lực học, không gian hoạt động, phân phối lực căng cáp và tính toán độ võng cáp vào bộ điều khiển cho C DPR với các thành phần chính như bộ tời phân phối cáp, có cấu đo lực căng cáp. Đóng góp chính của phần này là mô hình đàn hồi của các cơ cấu truyền động đã được xây dựng và tích hợp vào bộ điều khiển nhằm cải thiện độ chính xác của C DPR. Các kết quả tính toán được thực nghiệm để đánh giá các đặc tính của hệ thống như độ chính xác, độ cứng và không gian làm việc của hệ thống trong khi làm việc. Hệ thống được thực nghiệm với tác vụ di chuyển các vật nặng dạng hình khối cho các ứng dụng di chuyển vật liệu. Hệ thống cũng được thay đổi để thực nghiệm ứng dụng mô phỏng chuyển động theo thời gian thực, qua đó đánh giá đáp ứng của các mô hình toán đã xây dựng.

5.2 Mô hình truyền động của C DPR



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

Robot song song truyền động bằng cáp có nhiều ưu điểm so với các Robot liên kết cứng truyền thống về tải trọng, tốc độ, cấu trúc và không gian hoạt động. Tuy

nhiên, việc điều khiển CDPR gặp nhiều khó khăn do độ chính xác bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như:

- Đặc tính một chiều của dây cáp truyền động (chỉ hoạt động với lực căng dương) nên việc định vị bộ di động khá phức tạp.
- Các mô hình phi tuyến liên quan đến độ võng cáp và lực căng cáp ảnh hưởng đến độ chính xác vị trí của CDPR.
- Thời gian tính toán các quỹ đạo chuyển động với các ràng buộc phức tạp.

Dựa vào các kết quả tính toán và mô hình hóa CDPR trong chương 3 và chương 4, 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.

5.3 Tính toán chiều dài cáp do biến dạng của hệ thống phân phối cáp

Hình 5.1 cho thấy sơ đồ của cơ cấu phân phối cáp truyền động, chiều dài cáp được xác định bởi các tham số thiết kế tương ứng và tọa độ của bộ di động. Chiều dài của cáp được đo từ encoder, để xác định chiều dài cáp, một vị trí cố định trong không gian làm việc CDPR được lấy làm chuẩn với các chiều dài cáp được xác định trước, có thể coi đây là vị trí Home với các tham số ban đầu $\{q_{hi}, l_{hi}\}$. Từ vị trí này, chiều dài tuyệt đối của l_i cáp $\{i=1, \dots, n\}$ tương ứng với góc quay của động cơ q_i (radian) có thể được tính theo công thức sau:

$$l_i - l_{hi} = (q_i - q_{hi}) \left(k_{wi} + \frac{b}{k_{mi}} \right) = (q_i - q_{hi}) k_{ci} \quad (5.1)$$

$$k_{wi} = \frac{\sqrt{\pi^2 d_{bi}^2 + b^2}}{k_{mi}} \quad (5.2)$$

$$q_i - q_{hi} = \frac{(l_i - l_{hi}) k_{mi}}{k_{wi} k_{mi} + b} \quad (5.3)$$

trong đó l_i : chiều dài không quán trên tang của cáp thứ i

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

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

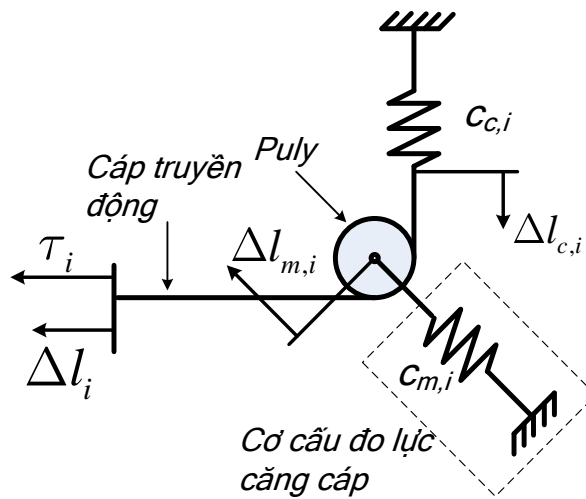
d_{bi} : đường kính bước trống của tời thứ i ,

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

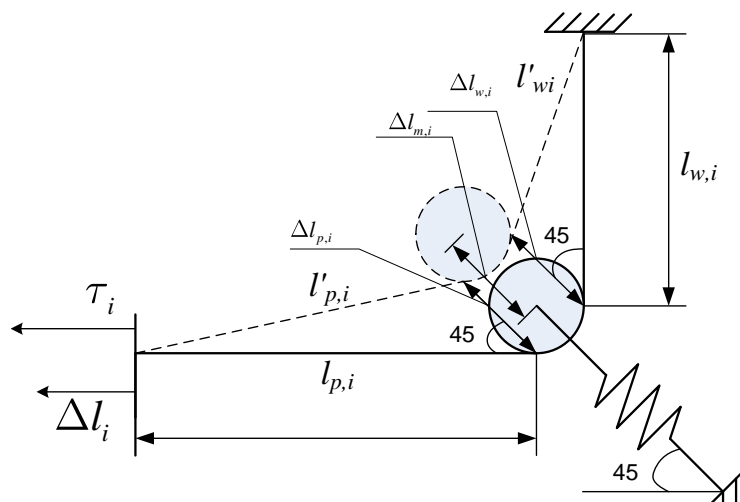
q_{hi} : góc quay động cơ tại vị trí ban đầu

b : chiều rộng của mỗi rãnh trên tang cuốn cáp (mm)

Trong bài toán động học vị trí của CDPR, độ đàn hồi của cơ cấu truyền động và dây cáp ảnh hưởng trực tiếp đến vị trí điều khiển của bộ di chuyển, vì vậy cần xây dựng mô hình đàn hồi dựa trên kết cấu của CDPR để tăng độ chính xác của hệ thống. Độ đàn hồi của cơ cấu phân phối cáp tập trung ở cáp truyền động và cơ cấu đo lực căng cáp, để đơn giản hóa mô hình tính toán, mô hình đàn hồi của cáp và cơ cấu đo lực căng cáp được biểu diễn dưới dạng mô hình lò xo tuyến tính trong **hình 5.2** và **hình 5.3**.



Hình 5.2: Mô hình đàn hồi của hệ thống phân phối cáp



Hình 5.3: Mô hình đàn hồi của thiết bị đo lực căng cáp

Từ mô hình đàn hồi của thiết bị đo lực căng cáp trên **hình 5.3**, ta có được:

$$\Delta l_i = \Delta l_{c,i} + l_{pi} - l'_{pi} + l_{wi} - l'_{wi} \quad (5.4)$$

$$\Delta l_{c,i} = l_i - l_{0i} = \frac{\tau_i}{c_{c,i}} \quad (5.5)$$

Công thức (5.4) biểu thị độ dài bù của cáp do tính đàn hồi của cáp và bộ truyền động, trong đó $\Delta l_{c,i}$ - độ giãn dài của cáp thứ i - được tính từ lực căng của cáp và độ cứng của cáp thứ i theo công thức (5.5).

$$c_{c,i} = \frac{EA}{l_{0i}} = \frac{EA}{l_i - \Delta l_{c,i}} = \frac{EA}{l_i}, \quad \Delta l_{c,i} \ll l_i \quad (5.6)$$

Công thức (5.6) được sử dụng để tính độ cứng của cáp truyền động, trong đó E là môđun Young và A là tiết diện của cáp. Trong trường hợp này, vì $\Delta l_{c,i} \ll l_i$ nên $\Delta l_{c,i}$ bị bỏ qua. Từ **hình 5.3**, các thành phần liên quan đến biến dạng của thiết bị đo lực căng $l_{pi}, l'_{pi}, l_{wi}, l'_{wi}$ của phương trình (5.4) có thể được tính toán, giả sử rằng $\Delta l_{m,i}$ nhỏ.

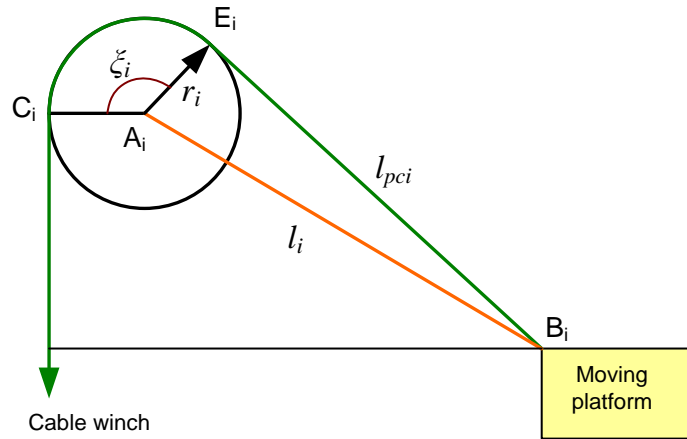
$$l'_{pi} = (l_{pi}^2 + \Delta l_{m,i}^2 - 2l_{pi}\Delta l_{m,i} \cos \frac{\pi}{4})^{1/2} = (l_{pi}^2 + \Delta l_{m,i}^2 - \sqrt{2}l_{pi}\Delta l_{m,i})^{1/2} \quad (5.7)$$

$$l'_{wi} = (l_{wi}^2 + \Delta l_{m,i}^2 - 2l_{wi}\Delta l_{m,i} \cos \frac{\pi}{4})^{1/2} = (l_{wi}^2 + \Delta l_{m,i}^2 - \sqrt{2}l_{wi}\Delta l_{m,i})^{1/2} \quad (5.8)$$

$$\Delta l_{m,i} = \Delta l_{p,i} = \Delta l_{w,i} = \frac{\sqrt{2}\tau_i}{c_{m,i}} \quad (5.9)$$

$$l_{pi} = l_{hpi} + (q_i - q_{hi}) \frac{b}{2\pi} + \Delta l_i \quad (5.10)$$

Trong hệ thống truyền động cho CDPR, kích thước của pully dẫn hướng tại điểm mắc cáp cố định ảnh hưởng đến độ chính xác của bài toán động học ngược, các điểm neo cáp tại bộ di chuyển được coi là cố định, điểm mắc cáp tại khung Robot không cố định và phụ thuộc vào kích thước pully, vị trí của MP và góc tiếp xúc của cáp trên pully như trên **Hình 5.4**. Cách tính mô hình pully động học cho CDPR được tham khảo trong [14].



Hình 5.4: Mô hình tính toán ảnh hưởng pully truyền động

$$l_{pci} = l_i + r_i \xi_i \quad (5.11)$$

trong đó l_{pci} chiều dài cáp có tính đến bù bán kính puli, r_i bán kính puli, ξ_i góc quán của cáp trên puli thứ i .

5.4 Tích hợp bài toán động học nghịch với độ võng cáp vào bộ điều khiển vị trí

Bộ điều khiển được xây dựng để điều khiển CDPR thực nghiệm với 8 cơ cấu chấp hành theo quỹ đạo thiết kế, trong đó, các bài toán lập quỹ đạo, động học, động lực học, phân phối lực căng cáp, tính toán độ võng cáp được giải cho từng bộ phân phối cáp, mối liên hệ của các bài toán này, đặc biệt là 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 như **Hình 5.5** với các thông số như sau:

- Kích thước tổng thể $6m \times 6m \times 3.5m$ ($L \times W \times H$);
- Không gian làm việc là $32 m^3$;
- Bộ di động hình hộp được cấu hình ở dạng treo có kích thước có thể thay đổi được và trọng lượng tối đa $M = 100$ kg;
- CDPR 6-DOF với véc tơ tọa độ Descartes tâm bộ di động $\mathbf{x} = \{x, y, z, \varphi, \theta, \psi\}$ (quy ước theo góc XYZ Euler);
- 8 cơ cấu phân phối cáp chấp hành có tọa độ khớp (vị trí góc của động cơ) ký hiệu $\mathbf{q}_i = \{q_1, \dots, q_8\}$;
- $\tau_{min} = 80$ N giới hạn dưới lực căng cáp để đảm bảo cáp không bị chùng và

$\tau_{max} = 800$ N giới hạn trên lực căng cáp tính theo khả năng tối đa của cơ cấu chấp hành.

Véc tơ chiều dài cáp $l \in R^m$ (m) và vận tốc dài của cáp $\dot{l} \in R^m$ (m/s) được đo gián tiếp bằng encoder của động cơ servo, các tời được đặt trên mặt đất và các điểm kéo cáp gắn đỉnh của khung đế cao 3.6 mét. Mối quan hệ giữa góc quay động cơ thứ i và chiều dài cáp tương ứng được tính theo công thức (5.1) đến (5.11). Đối với CDPR này, $k_{mi} = 30$, $d_{bii} = 100$ mm và $b = 5$ mm giống nhau cho tất cả các tời.

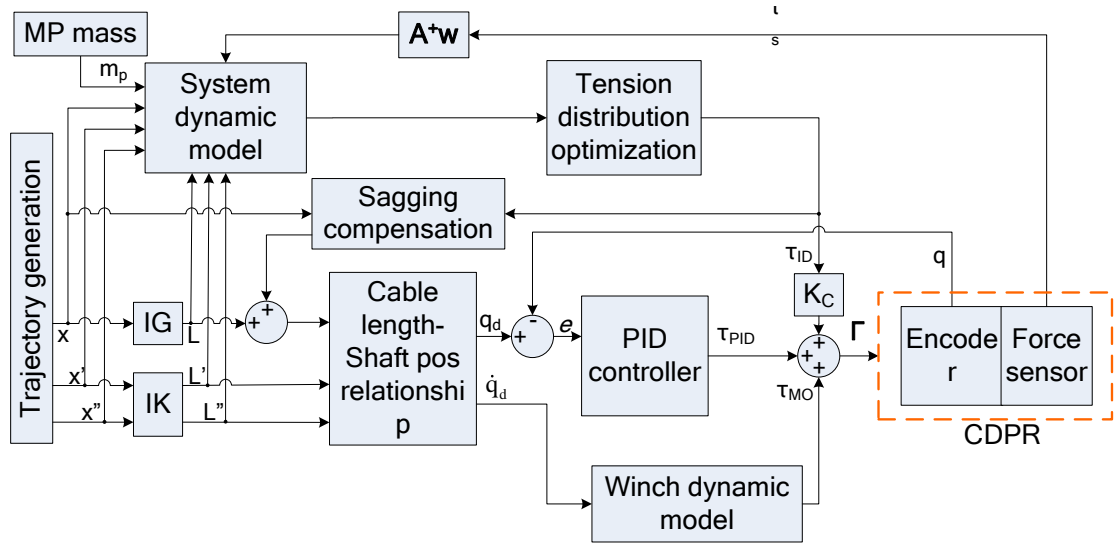


Hình 5.5: Mẫu CDPR được chế tạo

Từ bài toán động lực học được biểu diễn trong công thức (3.20 - 3.25), mô hình động lực học của động cơ truyền động cơ cấu phân phối cáp được biểu diễn theo công thức sau [134-135].

$$\Gamma_m = \mathbf{I}_m \ddot{q} + \mathbf{F}_v \dot{q} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{q}) + \mathbf{K}_c \tau \quad (5.12)$$

trong đó $\mathbf{I}_m \in R^{m \times m}$ là ma trận biểu diễn quán tính của động cơ, tang quán cáp và các bộ phận quay khác, $\mathbf{F}_v \in R^{m \times m}$ và $\mathbf{F}_s \in R^{m \times m}$ là ma trận đường chéo của hệ số ma sát nhớt và ma sát khô tương ứng, $\mathbf{K}_c = \text{diag}(k_{c1}, \dots, k_{c8}) \in R^{m \times m}$ là ma trận hệ số truyền động bao gồm tỷ số truyền hộp giảm tốc, đường kính tang và bước trống (công thức 5.1 đến 5.3), và $\Gamma_m \in R^m$ là véc tơ mômen của động cơ truyền động.



Hình 5.6: Cấu trúc mô hình điều khiển cơ cấu phân phối cáp

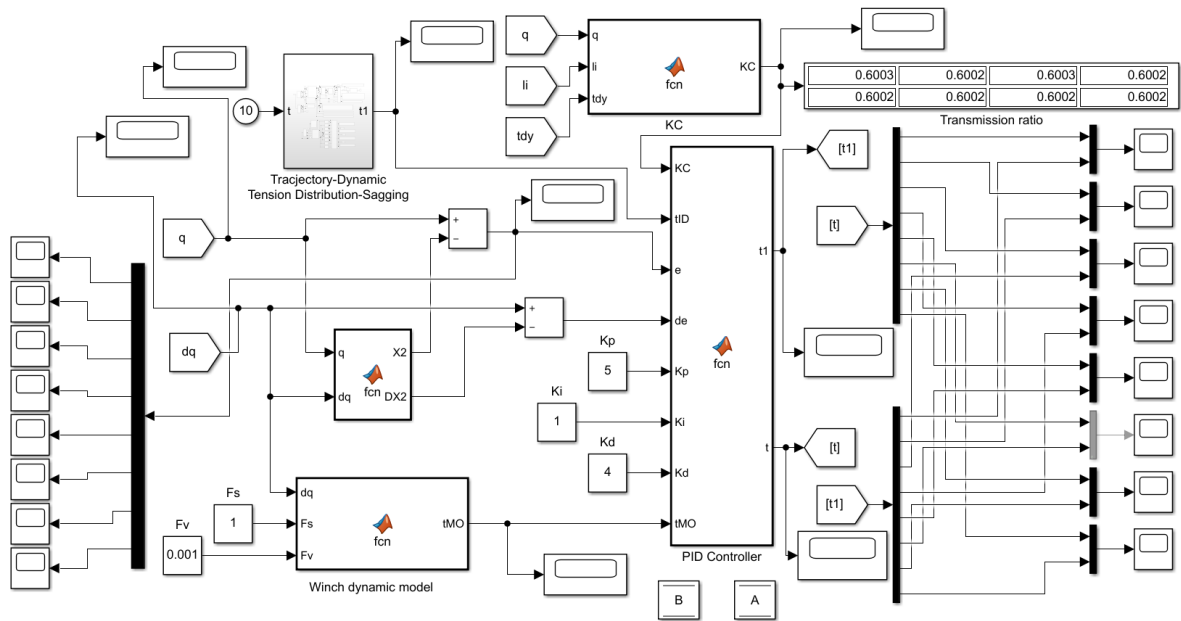
Cấu trúc của mô hình điều khiển của một cơ cấu phân phối cáp (được xem như 1 khớp) được miêu tả trên **hình 5.6**, đây là cấu hình điều khiển theo không gian khớp thường được sử dụng cho robot với đầu vào là quỹ đạo điều khiển, và đầu ra là tín hiệu điều khiển cho các động cơ truyền động cho các khớp. Cấu hình này được xây dựng trên các bài toán động học và động lực học bao gồm bài toán phân phối lực căng và tính toán độ võng cáp. Khối động lực học được sử dụng để tính toán tín hiệu điều khiển bù trừ nhiễu (feedforward) cho bộ điều khiển do lực kéo và lực ma sát tác dụng lên từng trục động cơ [134-135]. Khối động lực học hệ thống dựa trên phương trình (3.20), trong đó phân phối lực căng cáp τ_{ID} thu được từ giải thuật trong chương 4, kết hợp với mô hình động lực học (3.20) và (5.12), mô hình điều khiển có thể được viết lại như sau:

$$\Gamma_m = \tau_{PID} + \mathbf{F}_v \dot{q} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{q}) + \mathbf{K}_C \tau_{ID} \quad (5.13)$$

$$\tau_{PID} = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5.14)$$

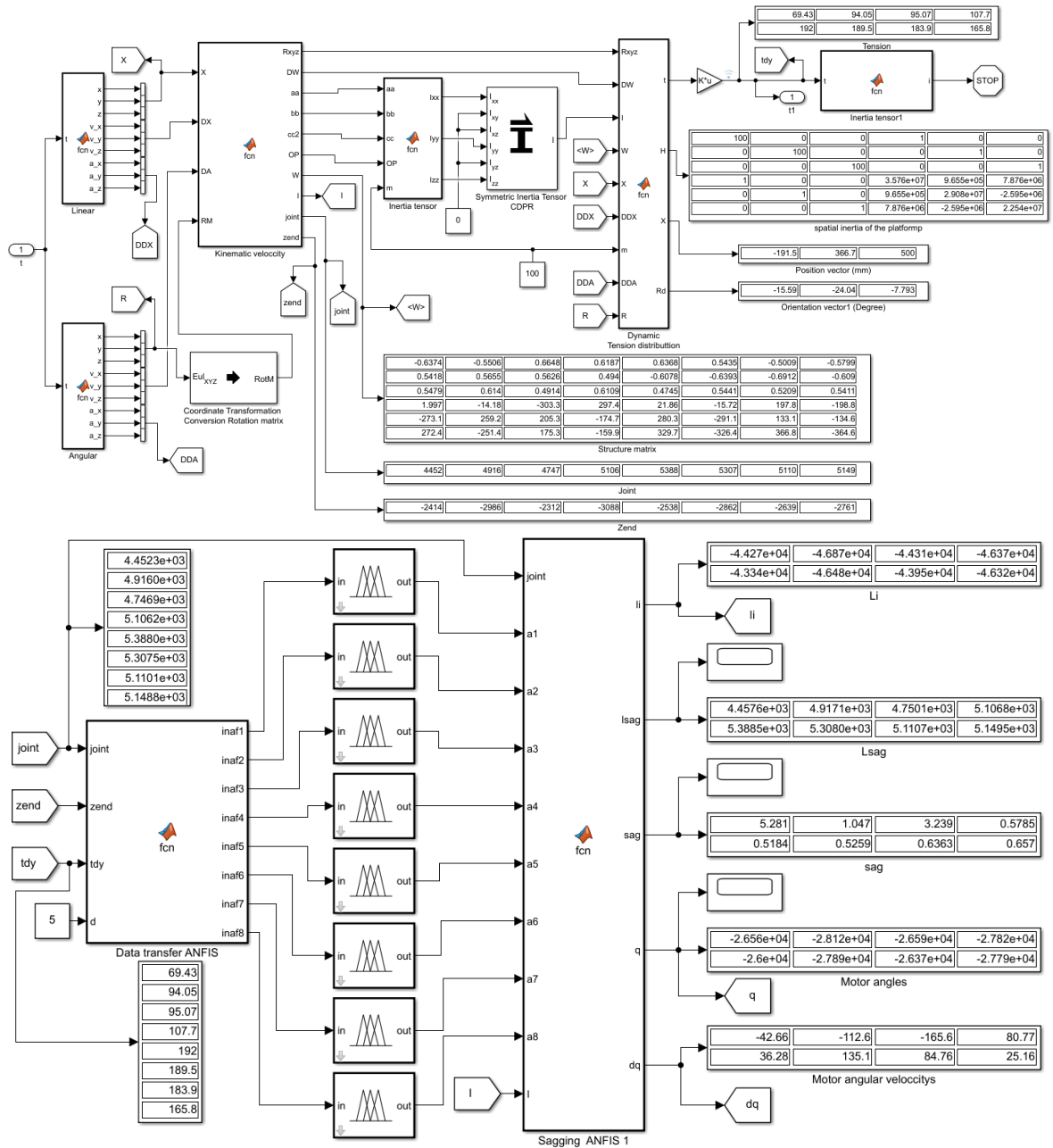
trong đó K_P , K_I , K_D , là các ma trận hệ số điều khiển PID kích thước 8×8 xác định dương theo đường chéo. τ_{PID} là đầu ra được tăng cường với thành phần feedforward τ_{ID} được tạo ra bởi khối dynamic (3.20) và giải thuật phân phối lực căng cáp. Cuối cùng, mô hình động lực học của động cơ được bù bằng cách sử dụng tín hiệu feedforward thứ 2 τ_{MO} từ khối Winch Dynamic Model được thêm vào véc tơ mô-

men xoắn động cơ Γ . Các giá trị hệ số PID đã được điều chỉnh bằng thực nghiệm để đạt được hiệu quả điều khiển mong muốn.



Hình 5.7: Cấu trúc mô hình điều khiển CDRP

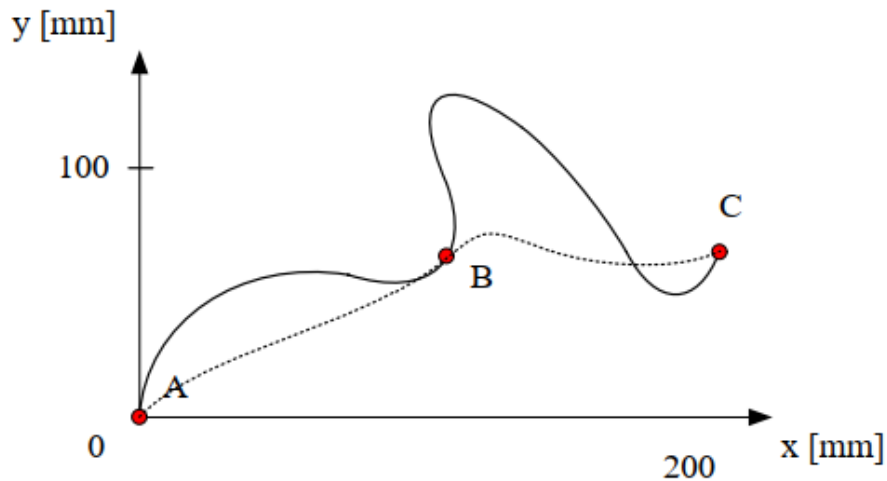
Hình 5.7 là cấu trúc các thành phần mô hình điều khiển được thiết lập trên Matlab simulink, mô hình này bao gồm các khối đã tính toán trong các chương trước. Khối Winch Dynamic model được thiết lập từ phương trình (5.12) với các thành phần ma sát trong bộ tời phân phối cáp. Khối PID controller là bộ điều khiển vị trí với mô hình toán (5.13) và (5.14). Khối Quỹ đạo – Động lực học – Phân phối lực căng cáp – tính toán độ võng cáp (Trajectory – Dynamic - Tension Distribution - Sagging) – **Hình 5.8** – 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 phối lực căng cáp và tính toán độ võng cáp. Khối Tensor quán tính (Inertia tensor) và ma trận Tensor quán tính (Symetric inertia tensor) CDRP là các thành phần trong bài toán động lực học CDRP. 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 5.8: Khối Quỹ đạo – Động lực học – Phân phối lực căng cáp- Tính toán độ võng cáp (Trajectory-Dynamic-Tension Distribution - Sagging)

Mô hình tính toán độ võng cáp được tích hợp trong khối Quỹ đạo – Động lực học – Phân phối lực căng cáp – Tính toán độ võng cáp. Trong đó khối “Data Transfer to ANFIS” dùng để tổng hợp đầu các dữ liệu đầu vào được tính toán bởi các khối khác bao gồm các tọa độ chuyển đổi từ quỹ đạo đầu vào, chiều dài cáp, lực căng cáp và đường kính cáp. Đầu ra của khối này là đầu vào của mô hình ANFIS song song tính toán độ võng cáp đã được xây dựng ở chương 4. Kết quả tính toán

của mô hình ANFIS được xử lý để chuyển đổi ra các giá trị chiều dài cấp điều khiển có tính đến độ võng cấp bằng khối “Sagging ANFIS 1”, khối này cũng tính toán góc quay và vận tốc động cơ tương ứng với chiều dài cấp cần điều khiển. Khi sử dụng các phương trình chuyển động của Robot, chúng ta có thể xác định vị trí của Robot dựa vào các biến khớp, hoặc ta có thể xác định các biến khớp dựa vào vị trí và hướng của bộ di động. Việc lập đường đi và quỹ đạo có liên quan đến cách mà Robot di chuyển từ vị trí này sang vị trí khác với một thuật toán cho trước, có rất nhiều phương pháp lập trình cho bài toán này với mục đích là tạo quỹ đạo di chuyển giữa các đoạn nhỏ được chia trước, giữa các quỹ đạo theo đường thẳng, hoặc các quỹ đạo tuần tự. Việc lập đường đi và quỹ đạo yêu cầu phải sử dụng cả bài toán động học nghịch, động học vận tốc và động lực học của Robot, đường đi được định nghĩa là một chu trình quỹ đạo tuần tự của Robot độc lập với biến thời gian. Vì thế, nếu Robot đang ở điểm A di chuyển qua điểm B rồi lại sang điểm C như **hình 5.9**, thì đoạn đường di chuyển từ A đến B và đến C là một đường đi. Ngược lại, quỹ đạo lại liên quan đến đường di chuyển của Robot nhưng có kèm theo biến thời gian, ví dụ như trong bài toán điều khiển, bất kể khi nào đạt được vị trí B và C, thì đường đi là như nhau. Trong khi đó, dựa vào bài toán vận tốc và gia tốc, các điểm B và C có thể đạt được vào các thời điểm khác nhau, tạo nên các quỹ đạo khác nhau. Do đó, trong điều khiển chính xác, ta sẽ chọn phương án giải bài toán quỹ đạo với hàm vị trí, vận tốc và gia tốc theo biến thời gian. Quỹ đạo là một đường đi mà vật thể di chuyển trong không gian, trong lĩnh vực Robot, vật thể có thể là đầu công tác của một dạng Robot nối tiếp hay song song, quỹ đạo điều khiển có thể được biểu diễn bằng phương pháp hình học, phương pháp toán học, hoặc dưới dạng sự thay đổi tọa độ của đối tượng theo thời gian. Có một vài thông số cần xác định khi tạo quỹ đạo cho Robot, lấy ví dụ, nếu quỹ đạo di chuyển là tuyến tính, bậc 3 hay bậc 5, ta cần xác định các thông số như vận tốc đầu, vận tốc cuối, vận tốc tối đa... Sau đó, quỹ đạo di chuyển của Robot sẽ được tính toán thông qua quá trình nội suy, như vậy, quỹ đạo của Robot phải bao gồm các thông số vận tốc, gia tốc và vị trí.



Hình 5.9: Các đường đi của Robot

5.5 Thực nghiệm và đánh giá

Phần trên đã tổng hợp các kết quả tính toán vào việc thiết kế bộ điều khiển cho CDPR, trong đó, mô hình đàn hồi của các bộ phận truyền động và cơ cấu đo lực căng cáp đã được xây dựng dựa trên đặc điểm cấu tạo và thiết kế của bộ phân phối cáp, đây là một điểm nghiên cứu mới nhằm nâng cao độ chính xác của cơ cấu truyền động ứng với cấu hình thiết bị cụ thể. Mô hình điều khiển CDPR là một bộ điều khiển phức tạp bao gồm nhiều bài toán tích hợp như động học, động lực học, cân bằng lực, phản hồi lực căng cáp và có bù độ võng cáp, kết quả này đã được xây dựng mô phỏng trên phần mềm để đánh giá đáp ứng, trước khi triển khai trên bộ điều khiển của CDPR thực nghiệm. Các thực nghiệm được tiến hành để đánh giá các đặc tính của hệ thống như độ chính xác, độ cứng và không gian làm việc của hệ thống trong khi làm việc với các giải thuật phân phối lực căng và tính toán độ võng cáp. Hệ thống được thực nghiệm với tác vụ di chuyển các vật nặng dạng hình khối cho các ứng dụng di chuyển vật liệu để đo độ chính xác vị trí và hướng của bộ di động ở trường hợp không có bù và có bù độ võng cáp trong bài toán động học nghịch, hệ thống cũng được thay đổi để thực nghiệm ứng dụng mô phỏng chuyển động theo thời gian thực, qua đó đánh giá đáp ứng của các mô hình toán đã xây dựng ở chương 4.

5.5.1 Tổng quát về CDPR thực nghiệm

Hình 5.10 mô tả tổng quan về CDPR đã hoàn thiện, bốn tủ điện được bố trí như trong ảnh, trong đó có hai tủ gần bàn điều khiển, nơi đặt PC và chỗ ngồi của người điều khiển, hai tủ còn lại ở hai góc, các dây điện được cố định dọc theo khung cách mặt đất 40 cm ở dưới cùng của khung cố định.

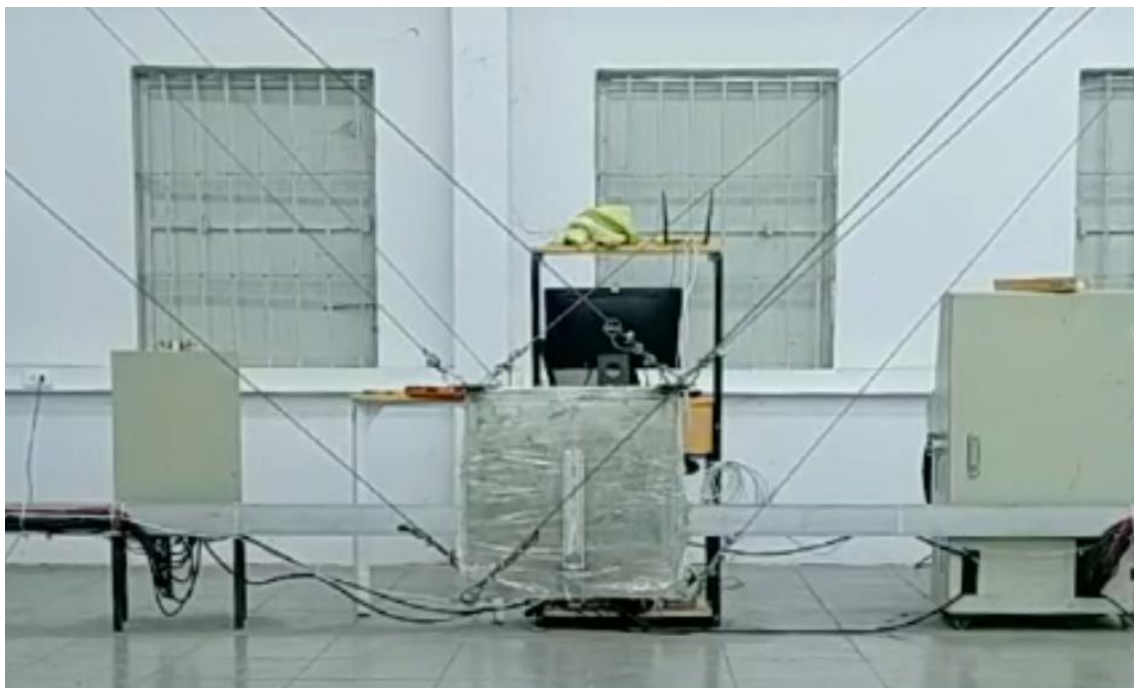


Hình 5.10: CDPR được chế tạo cho thực nghiệm

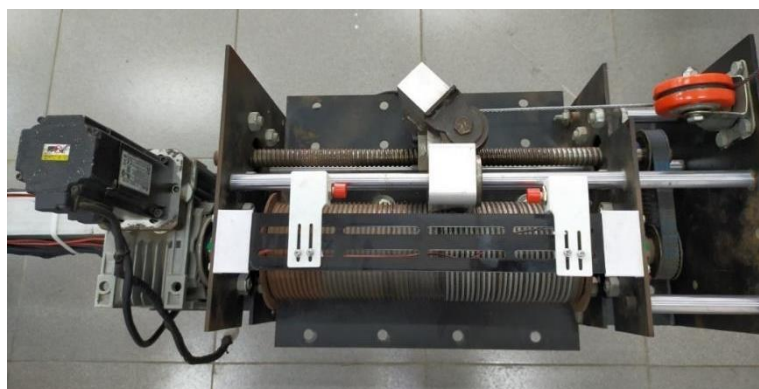
Bảng 5.1: Thông số kỹ thuật CDPR

Kích thước khung cố định (LxWxH)	6180×6180×3500 mm
Kích thước bệ di động (LxWxH)	500×500×400 mm
Không gian hoạt động khả thi	4000×4000×2000 mm
Giới hạn góc quay	$x - y: \pm 30^0; z: \pm 20^0$
Giới hạn lực căng cáp	[40-800] N
Số lượng cáp	8
Số bậc tự do	6
Vận tốc tối đa	760 mm/s
Gia tốc tối đa	7 m/s ²
Tải trọng tối đa	150 kg

Bộ di động là một khối bê tông được đặt trong khung thép có khối lượng 80kg như **hình 5.11**. Trên khung thép là các tai để mắc dây cáp truyền động. Các thông số kỹ thuật của CDPR được trình bày trong **bảng 5.1**.



Hình 5.11: Bộ di động và khối bê tông tải



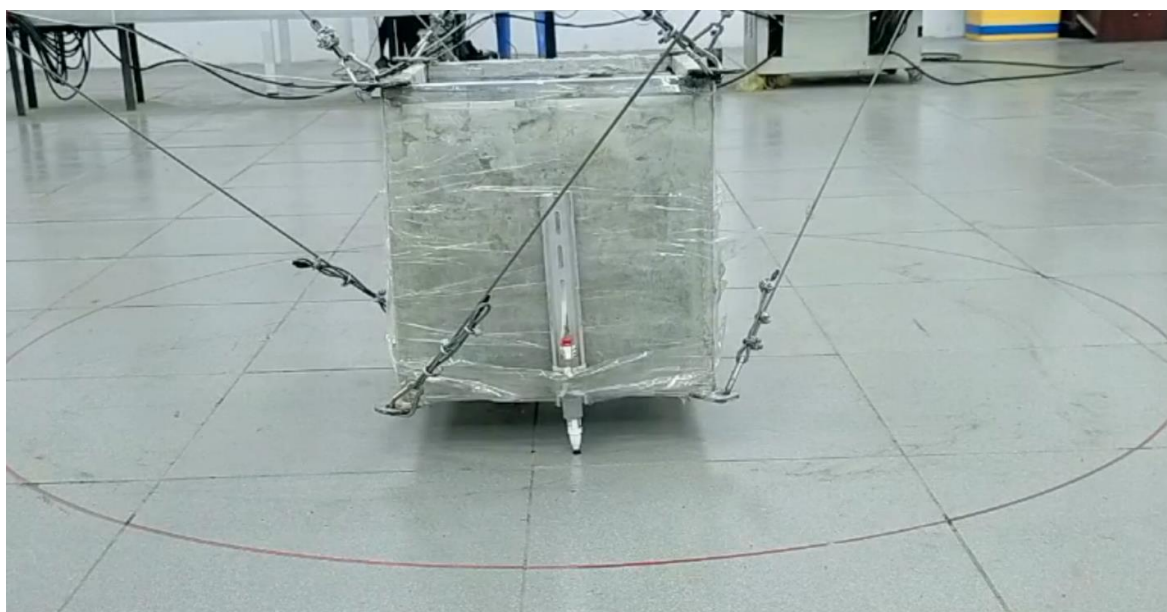
Hình 5.12: Cơ cấu phân phối cáp truyền động

Hình 5.12 mô tả thiết bị phân phối cáp đã hoàn thiện với mô hình điều khiển (5.12 - 5.14) và bài toán chuyển từ vị trí đầu công tác về góc quay và vận tốc động cơ (5.1 – 5.11), cơ cấu giám sát giới hạn của bộ phân phối là thanh dẫn cáp di chuyển theo thanh trượt cho đến khi nó chạm đến các cảm biến tiệm cận. Do các rãnh cắt dọc theo chiều dài của tang cuốn nên vị trí của các cảm biến giới hạn có thể thay đổi linh hoạt, trong hoạt động thực tế, kết cấu chắc chắn và ổn định, khi nhận

được tín hiệu, động cơ servo sẽ dừng ngay lập tức, đảm bảo rằng cơ cấu giá cảm biến giới hạn không bị hư hỏng.

Phân tích toán không gian hoạt động và phân phối 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 bệ di động di chuyển đến các điểm nằm ở giới hạn bị ràng buộc.

5.5.2 Thiết lập thực nghiệm



Hình 5.13: Thiết lập vị trí ban đầu

Việc thiết lập vị trí góc sẽ khó khăn hơn vì hệ thống này được vận hành bằng dây cáp. Đầu tiên, hai sợi dây không co giãn được nối theo đường chéo của khung cố định vào bốn góc của hệ thống; khi chiếu lên mặt phẳng, giao điểm là vị trí có giá trị trục x và trục y bằng 0 – **Hình 5.13**. Đặt khung chuyển động trên các vật có chiều cao bằng nhau, chẳng hạn như các thanh thép hộp. Sau đó, các dây cáp được điều chỉnh để mỗi cặp có lực căng tương đối khoảng 20-30 N cho mỗi dây cáp theo bài toán phân phối lực căng, điều này tạo ra đủ ứng suất trong các dây để bệ di động không tiếp xúc với mặt đất khi các thanh đỡ được tháo ra. Đo khoảng cách giữa mặt

phẳng cơ sở và khung chuyển động, tiếp theo sử dụng phần mềm để thiết lập vị trí trục Z cho khung chuyển động. Sau đó, các dây cáp phải được điều chỉnh để phù hợp với các giá trị đã tính toán, tiếp tục đo khoảng cách trục Z và điều chỉnh cáp cho đến khi chúng đạt yêu cầu.

5.5.3 Thực nghiệm độ chính xác vị trí theo quỹ đạo

Trong phần trên, mô hình động học - động lực học với độ võng cáp đã được giới thiệu để tính toán bài toán vị trí, vận tốc và gia tốc cho các bộ chuyển động. Tuy nhiên, sẽ có những sai số liên quan trong quá trình xây dựng phần cứng, khiến quỹ đạo thực tế khác với quỹ đạo được tính toán, mặt khác, phần tính toán lý thuyết có những yếu tố chưa giải được và gần đúng nên còn nhiều hạn chế, kết quả của các nghiên cứu sẽ cho thấy các đáp ứng của hệ thống và tính toán về độ đúng đắn của mô hình đã được xây dựng. 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 CDPR vẽ các quỹ đạo cơ bản như đường thẳng hoặc đường tròn với các góc nghiêng bằng không trên mặt phẳng nền 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 có độ võng cáp và không có độ võng cáp.

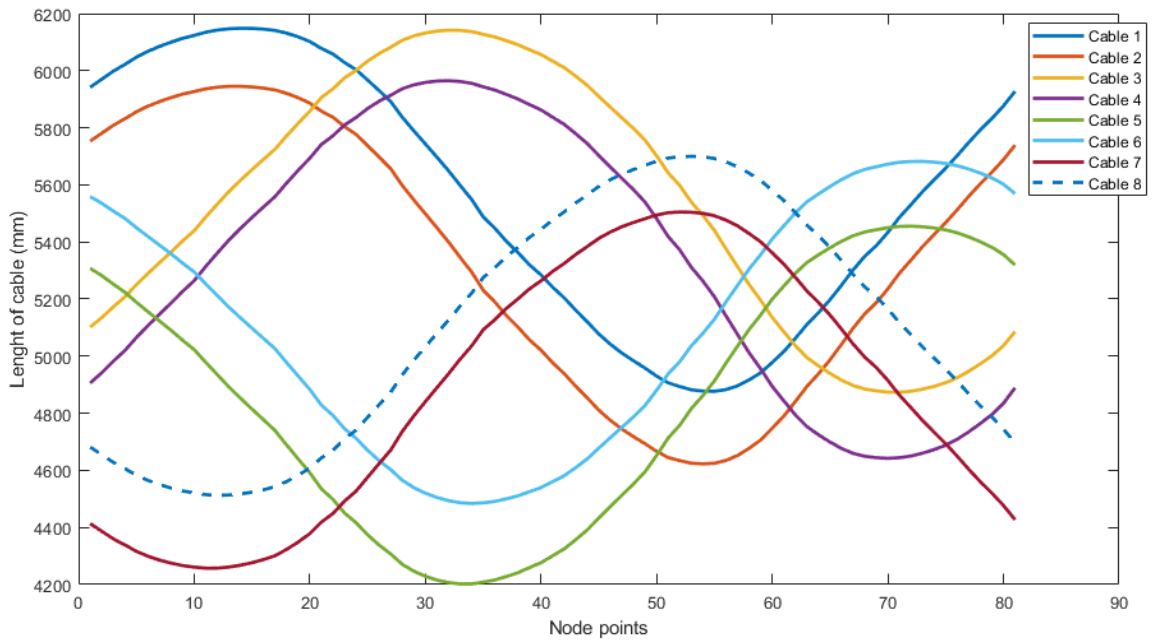


Hình 5.14: Kiểm tra độ chính xác vị trí với quỹ đạo hình tròn đường kính 1.6m

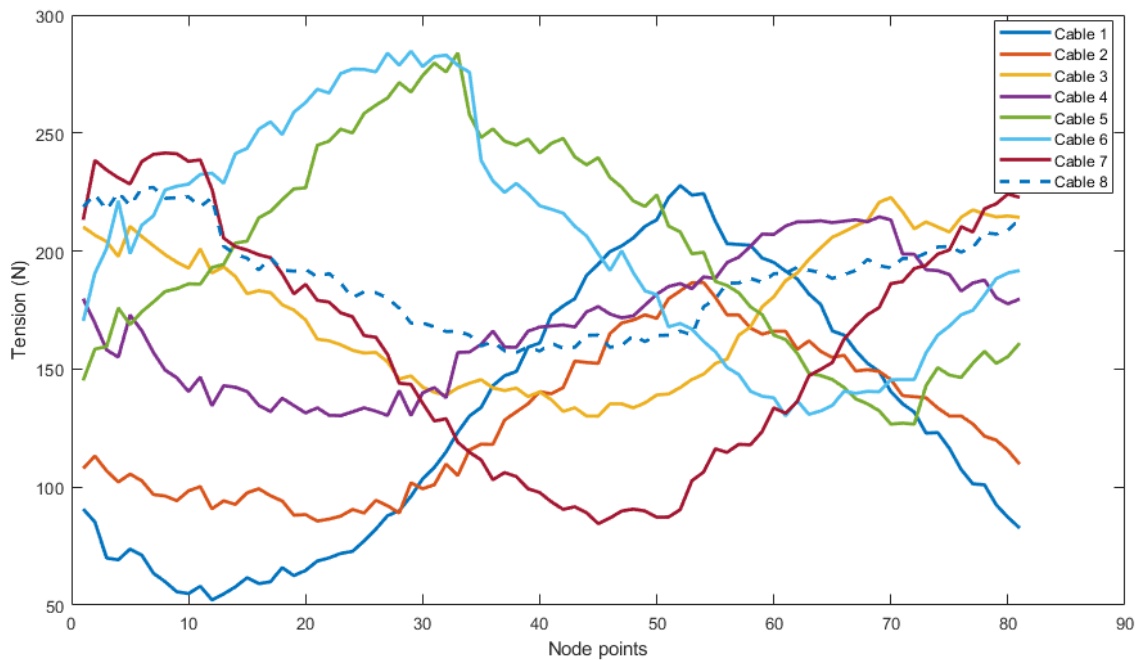
Hình 5.14 và 5.15 là kết quả thực nghiệm đo độ chính xác vị trí của CDPR với thiết bị đo là thước dây, thước kẹp, cho CDPR vẽ hai quỹ đạo khác màu chồng lên nhau, màu đỏ là quỹ đạo không có bù độ võng cáp, màu xanh là quỹ đạo có bù độ võng cáp, sau đó đo độ lệch giữa 2 quỹ đạo theo phương X, Y so với quỹ đạo thiết kế để đánh giá độ chính xác vị trí của 2 trường hợp.



Hình 5.15: Kiểm tra độ chính xác với quỹ đạo hình tròn đường kính 1.6m với 2 trường hợp



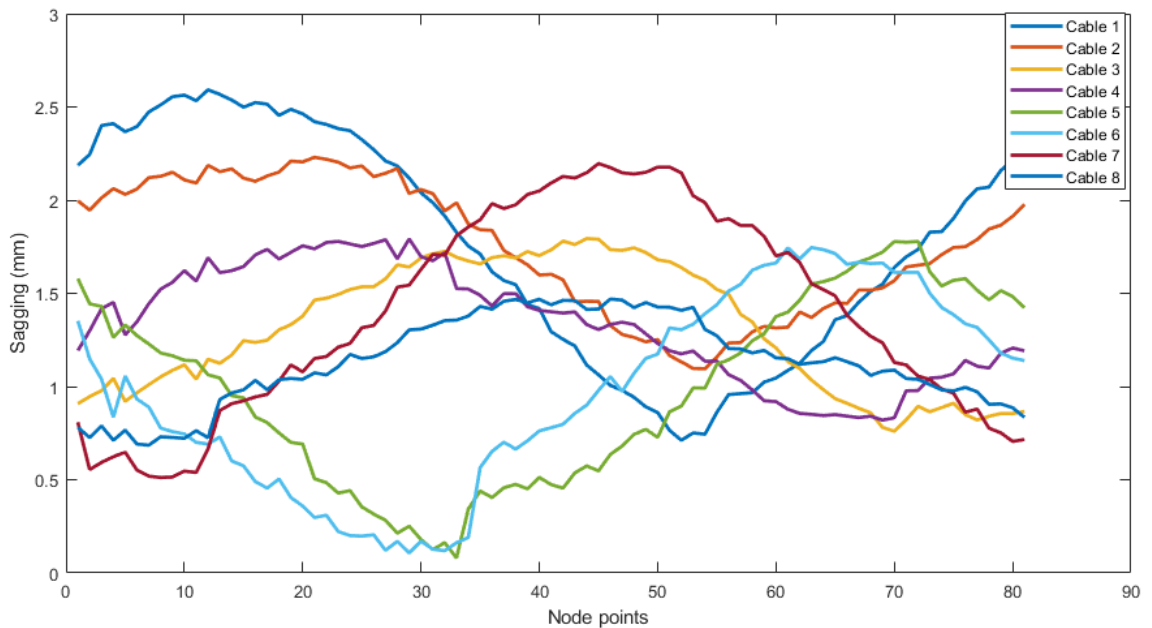
Hình 5.16: Giá trị các biến khớp phản hồi về BDK theo quỹ đạo đường tròn



Hình 5.17: Giá trị các lực căng cáp phản hồi về BDK theo nội suy đường tròn

Hình 5.16 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 5.17** 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 phận phối cấp, các lực căng cáp thay đổi trong khoảng từ 50N đến 300N, dạng của lực căng cáp liên tục theo

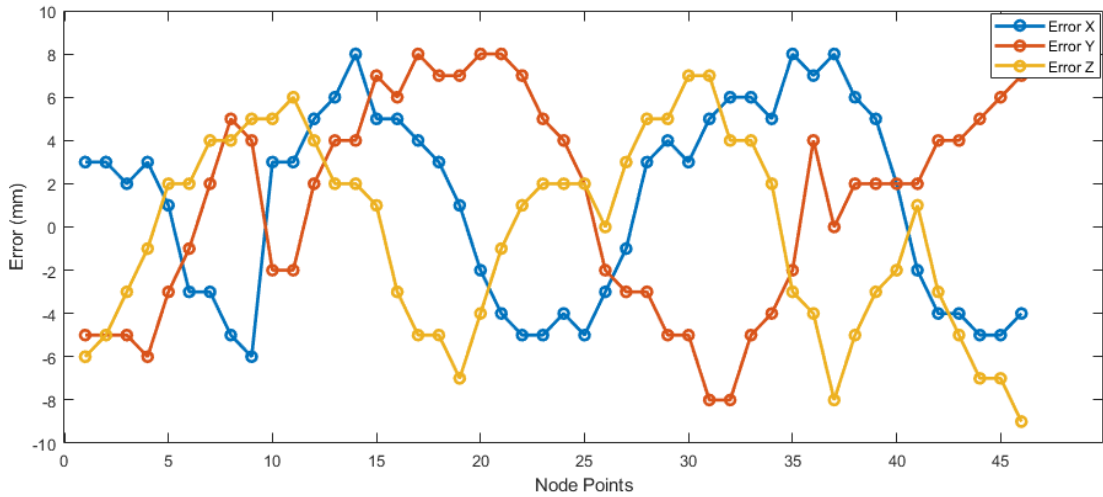
quỹ đạo khớp, điều này phù hợp với kết quả tính toán ở các chương trước, lực căng cáp ổn định cũng cho thấy sự phù hợp của giải thuật điều khiển đã thiết kế, đây là kết quả quan trọng trong việc điều khiển CDPR. Kiểm soát lực căng trong giới hạn cho trước đảm bảo độ cứng vững, độ chính xác của cơ cấu, 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, việc kiểm soát tốt lực căng cáp còn đảm bảo an toàn cho cơ cấu chấp hành trong trường hợp quá tải. **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.



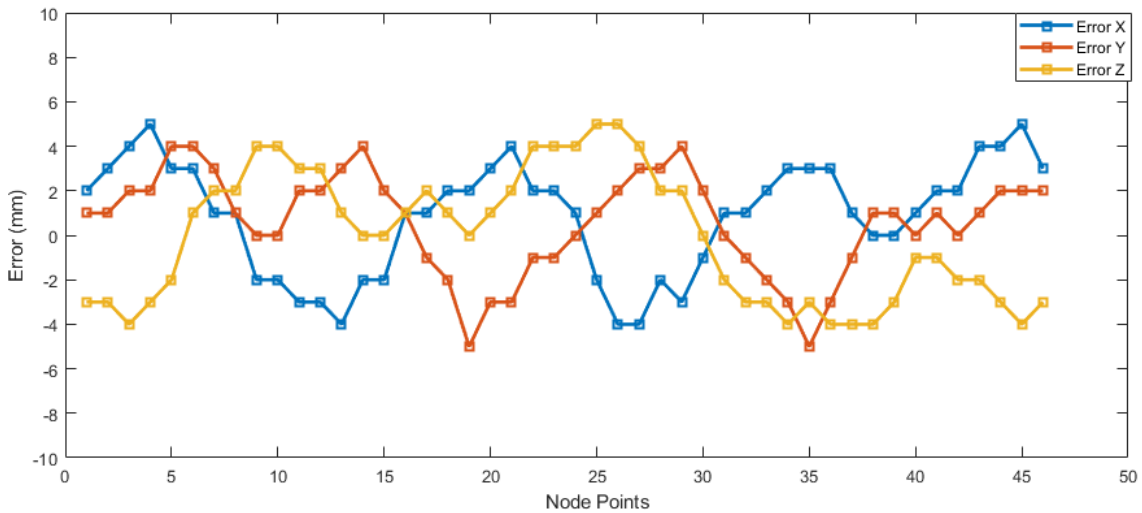
Hình 5.18: Giá trị bù độ võng cáp theo nội suy đường tròn

Hình 5.19 cho thấy sai số vị trí tại các điểm nút trong trường hợp không tính đến độ võng cáp dao động trong khoảng $\pm 8\text{mm}$, **hình 5.20** là sai số vị trí trong trường hợp có tính đến độ võng cáp dao động trong khoảng $\pm 5\text{mm}$, 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, với kết quả mô phỏng trong chương

4, khi mở rộng kích thước CDPR với chiều dài cáp tăng hơn 10m, độ võng cáp có thể tăng đến hơn 15mm với các điều kiện hoạt động tương đương, điều này cho thấy ảnh hưởng của độ võng cáp đến độ chính xác vị trí của CDPR càng lớn khi chiều dài cáp truyền động càng tăng.



Hình 5.19: Kết quả đo độ chính xác vị trí không bù độ võng cáp



Hình 5.20: Kết quả đo độ chính xác vị trí có bù độ võng cáp

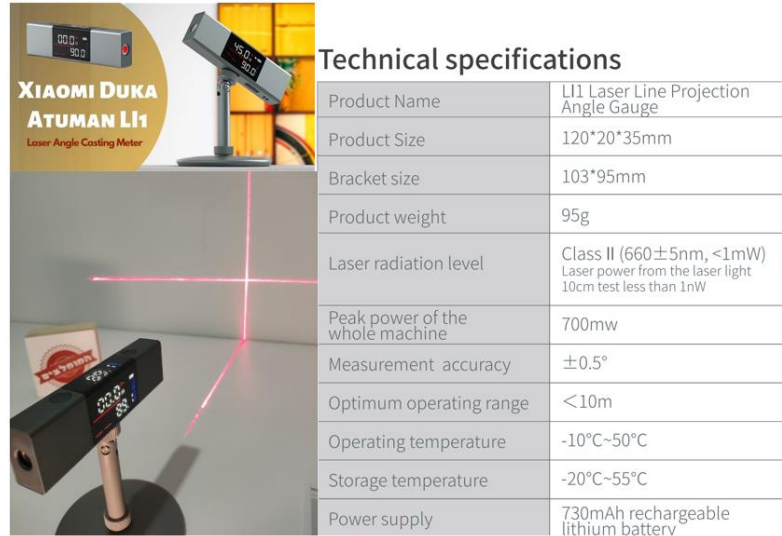
5.5.4 Thực nghiệm đo vị trí trong không gian và độ song phẳng

Thử nghiệm này được thực hiện đo vị trí trong không gian và độ song phẳng trong hai trường hợp không có bù và có bù độ võng cáp theo quỹ đạo điểm nút cho trước với thông số kỹ thuật của CDPR như trên bảng 5.2. Mục tiêu của thí nghiệm là xác minh độ chính xác của hệ thống cơ học, dữ liệu thực nghiệm sẽ được đo ở trạng thái tĩnh tại các điểm nút do giới hạn của kỹ thuật đo, thiết bị đo góc chuyên

dụng Atuman LI1 và thông số kỹ thuật được sử dụng như **hình 5.21**, thiết bị này sẽ đo 2 góc nghiêng theo 2 trục x và y , ngoài ra còn có hệ thống định vị 3 chiều bằng tia laser cho phép xác định các điểm nút và góc quay theo phương z một cách nhanh chóng với độ ổn định và chính xác cao hơn phương pháp chiếu trọng lực truyền thống. Mô hình đo thực nghiệm vị trí và góc được thiết lập như trên **hình 5.22**, thiết bị đo góc được đặt trên bệ di động, một tấm bảng phẳng được dựng thẳng đứng để xác định vị trí tọa độ theo phương x (x_{Ai}) và phương z (z_{Ai}) với hình chiếu 2 chiều của nguồn phát laser từ thiết bị đo góc, tọa độ theo phương y (y_{Ai}) sẽ được xác định bằng một nguồn phát laser khác chiếu xuống mặt phẳng nền, tia laser trên mặt phẳng nền từ thiết bị đo góc sẽ cho phép đo được góc lệch theo phương z (γ_{Ai}) bằng thước đo độ, xác góc chỉ phương theo 2 trục x, y (α_{Ai}, β_{Ai}) sẽ được đọc trực tiếp từ thiết bị đo góc. Do điều kiện thiết bị đo, thực nghiệm được chia thành 2 phần, phần 1 là đo vị trí các điểm nút và độ song phẳng của MP ứng với các vị trí điểm nút có các góc chỉ phương đều bằng không, tập hợp các vị trí được chọn đo thử nghiệm được lấy ngẫu nhiên từ không gian làm việc khả thi và được liệt kê trong **bảng 5.3**. CDPR được lập trình để di chuyển qua nhiều nút với hệ thống điều khiển, MP sẽ dừng lại ở 17 điểm nút để thực hiện các phép đo, kết quả thí nghiệm được trình bày trong **bảng 5.3**, phương trình (5.15) được sử dụng để tính toán các sai số.

Bảng 5.2: Thông số kỹ thuật CDPR

Kích thước khung cố định (LxWxH)	6180×6180×3500 mm
Kích thước bệ di động (LxWxH)	985×935×1401 mm
Không gian hoạt động khả thi	3000×3000×1900 mm
Giới hạn góc quay	$x - y: \pm 40^0; z: \pm 30^0$
Giới hạn lực căng cáp	[40-800] N
Số lượng cáp	8
Số bậc tự do	6
Vận tốc tối đa	760 mm/s
Gia tốc tối đa	7 m/s ²
Tải trọng tối đa	100 kg



Hình 5.21: Thiết bị đo góc và xác định vị trí bằng laser



Hình 5.22: Bố trí thiết bị đo góc và laser

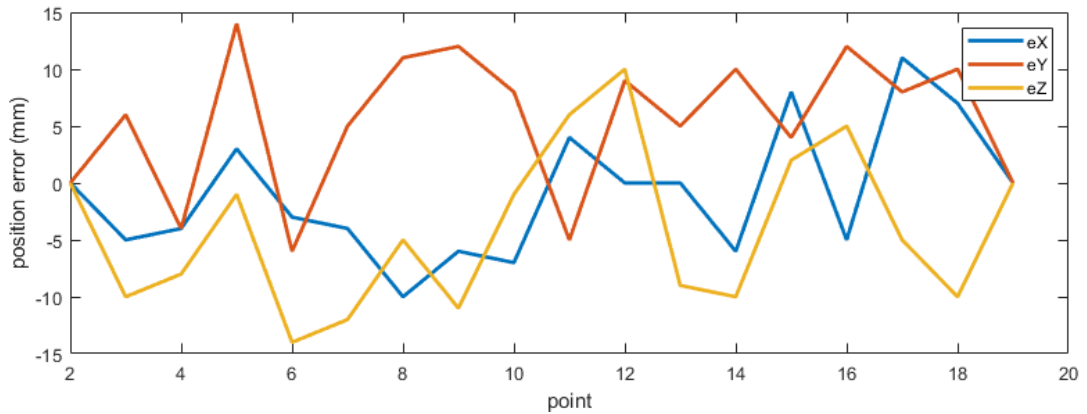
$$\begin{bmatrix} Ex_i & Ey_i & Ez_i & E\alpha_i & E\beta_i & E\gamma_i \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{Di} & y_{Di} & z_{Di} & \alpha_{Di} & \beta_{Di} & \gamma_{Di} \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} x_{Ai} & y_{Ai} & z_{Ai} & \alpha_{Ai} & \beta_{Ai} & \gamma_{Ai} \end{bmatrix}^T \quad (5.15)$$

CDPR được điều khiển đi qua 17 điểm để đo vị trí và sự lệch hướng, CDPR bắt đầu di chuyển và kết thúc ở điểm $P_0 = [0,0,200,0,0,0]^T$. Bảng 5.2 là tổng hợp kết quả đo thực nghiệm, trong đó các tọa độ điểm nút được đánh dấu thông qua điểm định vị bằng tia laser trong mặt phẳng thẳng đứng để đo tọa độ theo phương x và phương z , và tia laser chiếu xuống mặt phẳng nền để đo tọa độ theo phương y ,

sau đó các điểm đánh dấu được đo lại bằng thước dài. Các giá trị góc quay theo phương x và phương y được đọc trực tiếp từ thiết bị đo góc, góc quay theo trục z được đo bằng thước đo độ với vết của tia laser chiếu xuống nền. Kết quả thực nghiệm trong 2 trường hợp không có bù độ võng cáp (**hình 5.23**) và không có độ võng cáp (**hình 5.24**) cho thấy sai số vị trí được cải thiện rõ rệt ở hầu hết các điểm nút, các sai số ở trường hợp không bù độ võng cáp có xu hướng tăng lên khi tọa độ MP ra xa gốc tọa độ, do lúc này sự chênh lệch lực căng cáp chiều dài cáp sẽ tăng lên giữa các dây cáp truyền động, gây ra độ võng cáp lớn hơn ở một số cáp so với các vị trí trung tâm, nơi lực căng cáp và chiều dài các cáp gần bằng nhau. **Hình 5.25** cho thấy các giá trị lực căng cáp tại các điểm nút, các điểm càng xa gốc tọa độ thì giá trị lực căng chênh lệch giữa các dây cáp càng lớn, do đó độ võng cáp của một số cáp có xu hướng tăng lên, gây nên sai số lớn ở các điểm xa điểm gốc tọa độ.

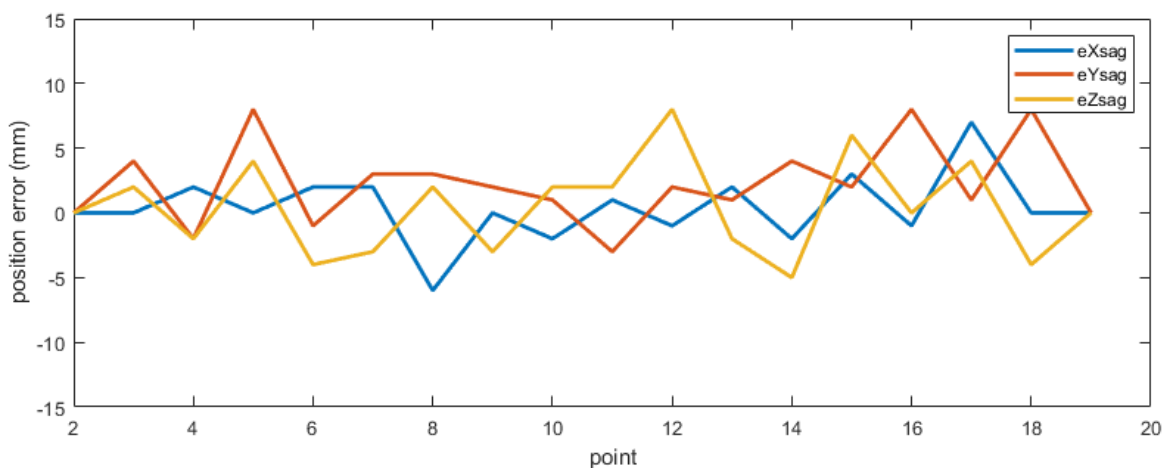
Bảng 5.3: Kết quả thực nghiệm sai số vị trí với 17 điểm nút

	Tọa độ tham chiếu						Tọa độ đo - không bù độ võng cáp						Tọa độ đo - có bù độ võng cáp					
	X	Y	Z	R _x	R _y	R _z	X	Y	Z	R _x	R _y	R _z	X	Y	Z	R _x	R _y	R _z
P0	0	0	200	0	0	0	0	0	200	0,0	0,0	0	0	0	200	0	0	0
P1	0	0	500	0	0	0	-5	6	490	0,0	-0,1	0	0	4	502	0	0,1	0
P2	300	0	200	0	0	0	296	-4	192	0,0	-0,1	0	302	-2	198	0	0,1	0
P3	-300	200	500	0	0	0	-297	214	499	-0,8	0,3	0	-300	208	504	0	0,1	0
P4	300	100	300	0	0	0	297	94	286	0,0	-0,2	0	302	99	296	0	0,1	0
P5	400	300	600	0	0	0	396	305	588	0,0	0,7	0	402	303	597	0	0,1	0
P6	-100	-200	800	0	0	0	-110	-189	795	0,0	0,4	0	-106	-197	802	0	0,1	0
P7	450	-200	800	0	0	0	444	-188	789	1,1	1,1	0	450	-198	797	0	0,1	0
P8	-450	-200	800	0	0	0	-457	-192	799	-0,6	-0,4	0	-452	-199	802	0	0,1	0
P9	0	0	100	0	0	0	4	-5	106	0,0	-0,1	0	1	-3	102	0	0,1	0
P10	-470	-300	300	0	0	0	-470	-291	310	-0,7	-0,6	0	-471	-298	308	0	-0,1	0
P11	350	400	600	0	0	0	350	405	591	0,7	0,8	0	352	401	598	-0,6	-0,1	0
P12	100	200	820	0	0	0	94	210	810	0,0	0,4	0	98	204	815	0	0,1	0
P13	-400	600	150	0	0	0	-392	604	152	-0,7	1,1	0	-397	602	156	0	0,4	0
P14	200	-600	400	0	0	0	195	-588	405	0,6	-1,1	0	199	-592	400	0	-0,7	0
P15	-300	1000	600	0	0	0	-289	1008	595	0,0	1,8	0	-293	1001	604	0	0,5	0
P16	150	800	700	0	0	0	157	810	690	0,0	1,5	0	150	808	696	0	0,4	0
P0	0	0	200	0	0	0	0	0	200	0,0	0,1	0	0	0	200	0	0,1	0

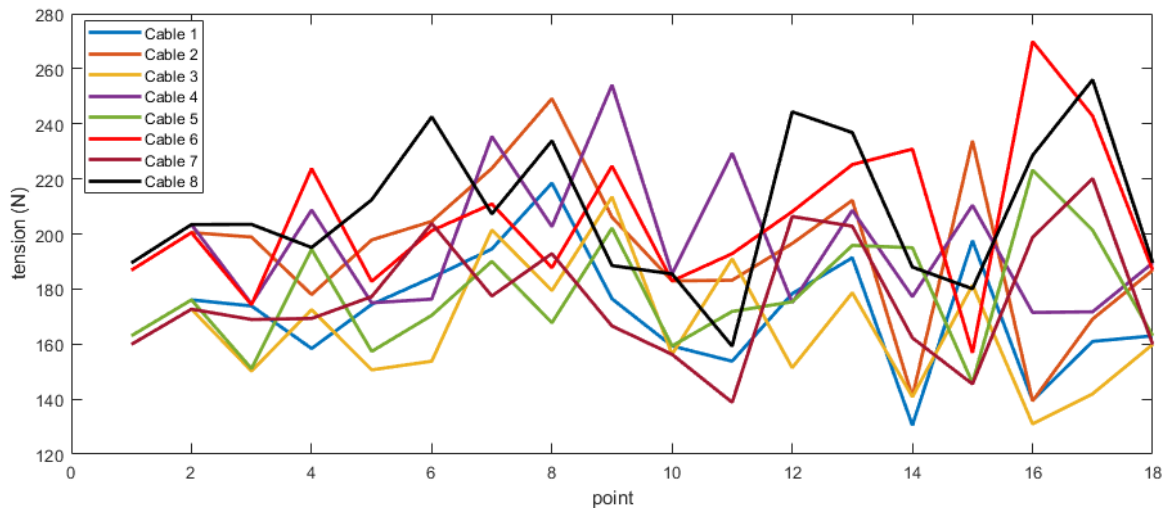


Hình 5.23: Sai số vị trí trường hợp không bù độ võng cáp

Bảng 5.3 cũng cho thấy sai số góc nghiêng cả hai trường hợp có võng cáp và không có võng cáp tại các điểm thực nghiệm đều nhỏ hơn 2^0 , do sai số góc quay quanh trục z nhỏ hơn 1^0 nên không thể đo bằng thước đo độ, kết quả này cho thấy độ song phẳng của bộ di động trong quá trình di chuyển giữa các tọa độ điểm là rất tốt với sai số rất nhỏ trong cả hai trường hợp điều khiển có bù và không có bù độ võng cáp, trong đó, độ chính xác góc quay của trường hợp có bù độ võng cáp (sai số $\pm 0.7^0$) có xu hướng nhỏ và ổn định hơn trường hợp không có bù độ võng cáp (sai số $\pm 1.8^0$), sai số hướng trong trường hợp không có bù độ võng cáp có xu hướng tăng ở những vị trí xa gốc tọa độ. Ngoài ra, sai số vị trí và hướng của CDPR còn có thể bắt nguồn từ các nguyên nhân sau: độ chính xác của kết cấu cơ khí, kích thước lớn của Robot, sai số điều khiển, sai số cơ cấu chấp hành, sai số cơ cấu phân phối cấp, sự không đồng nhất cấp, và đặc biệt là sai số của phương pháp đo và thiết bị đo.



Hình 5.24: Sai số vị trí trường hợp có bù độ võng cáp



Hình 5.25: Lực căng cáp dọc theo quỹ đạo điểm

Bảng 5.4: Kết quả thực nghiệm sai số góc quay với 17 điểm nút

Tọa độ tham chiếu						Góc đo không bù độ võng cáp			Góc đo có bù độ võng cáp			Sai số góc không bù độ võng cáp			Sai số góc có bù độ võng cáp		
X	Y	Z	R _x	R _y	R _z	R _x	R _y	R _z	R _x	R _y	R _z	eR _x	eR _y	eR _z	eR _x	eR _y	eR _z
0	0	500	-5	3	2	-5,8	3,1	2	-5,5	3	2	-0,8	0,1	0	-0,5	0	0
300	0	200	5	-5	0	5,3	-5,5	0	4,6	-4,4	0	0,3	-0,5	0	-0,4	0,6	0
-300	200	500	-10	0	0	-12,3	-0,6	0	-10,5	-0,1	0	-2,3	-0,6	0	-0,5	-0,1	0
300	100	300	0	10	0	0,0	10,8	0	-0,6	10,1	0	0,0	0,8	0	-0,6	0,1	0
400	300	600	0	0	10	0,0	0,5	10	-0,6	-0,1	10	0,0	0,5	0	-0,6	-0,1	0
-100	-200	800	8	3	0	8,4	2,1	0	8	3,6	0	0,4	-0,9	0	0	0,6	0
450	-200	800	12	6	0	14,1	5,0	0	11,7	6,3	0	2,1	-1,0	0	-0,3	0,3	0
-450	-200	800	6	12	-5	6,6	14,1	-5	5,9	12,6	-5	0,6	2,1	0	-0,1	0,6	0
0	0	100	2	2	2	2,2	2,6	2	1,6	2,5	2	0,2	0,6	0	-0,4	0,5	0
-470	-300	300	-15	5	0	-17,2	5,4	0	-15,4	4,8	0	-2,2	0,4	0	-0,4	-0,2	0
350	400	600	0	-5	-5	0,0	-4,4	-5	0	-5,3	-5	0,0	0,6	0	0	-0,3	0
100	200	820	3	10	0	3,9	11,7	0	2,4	10,4	0	0,9	1,7	0	-0,6	0,4	0
-400	600	150	1	1	1	0,0	2,4	1	0,8	1,1	1	-1,0	1,4	0	-0,2	0,1	0
200	-600	400	5	20	0	6,5	20,8	0	4,2	20,7	0	1,5	0,8	0	-0,8	0,7	0
-300	1000	600	-5	-5	0	-6,2	-3,0	0	-5,4	-5,8	0	-1,2	2,0	0	-0,4	-0,8	0
150	800	700	16	5	0	18,0	6,7	0	15,8	4,9	0	2,0	1,7	0	-0,2	-0,1	0

Thực nghiệm thứ 2 sẽ cho robot chạy theo các tọa độ từ P0 đến P16 với các góc chỉ phương bất kỳ. Bảng 5.4 là kết quả thực nghiệm đo góc nghiêng theo 3 phương xyz theo tọa độ thực nghiệm 1, do định vị từ tia laser không sử dụng được trong việc đo vị trí trong trường hợp có góc nghiêng theo 3 trục, nên thực nghiệm

này chỉ đo sai số góc theo 3 trục và không đo sai số vị trí. Kết quả cho thấy sai số góc nghiêng trong trường hợp không bù độ võng cáp dao động trong khoảng $\pm 2.2^\circ$ và độ lệch góc có xu hướng tăng lên ở những vị trí xa góc tọa độ. Trong trường hợp có bù độ võng cáp, sai số góc nghiêng là $\pm 0.8^\circ$ và không phụ thuộc vào vị trí điều khiển. Tương tự, độ lệch góc theo phương z trong trường hợp cũng nhỏ hơn 2° , kết quả này và kết quả ở thực nghiệm trên cho thấy độ song phẳng của khung di động có cải thiện đáng kể trong trường hợp có bù độ võng cáp.

5.5.5 Thực nghiệm vận hành tốc độ cao cho ứng dụng mô phỏng chuyển động

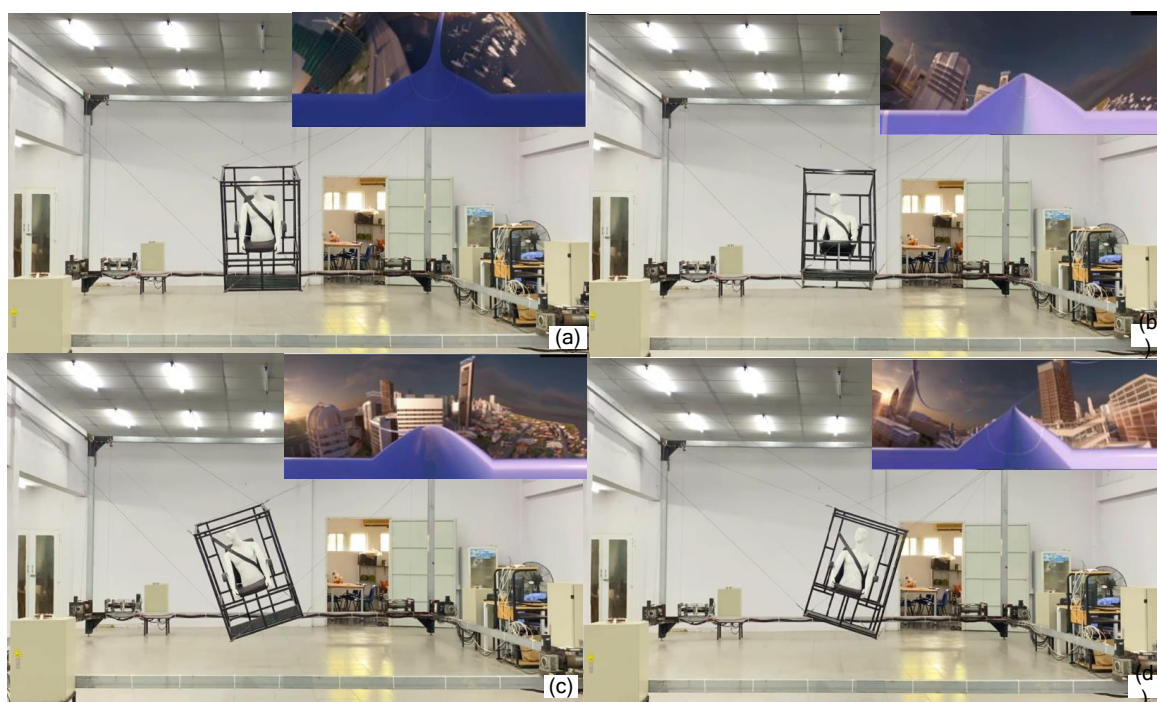


Hình 5.26: Cấu hình CDPR cho ứng dụng mô phỏng chuyển động

Để thực hiện mô phỏng chuyển động, bộ di động và cấu hình CDPR được thiết kế lại với các thông số kỹ thuật theo **bảng 5.2** và **hình 5.26**. Bên trong bộ di động là một cabin mô phỏng dành cho người sử dụng với ghế ngồi dạng ghế ô tô có dây an toàn, người chơi sẽ ngồi trong cabin với kính thực tế ảo, bộ điều khiển sẽ nhận tín hiệu chuyển đổi từ môi trường Game ảo để điều khiển bộ di động. Một cảm biến góc quay và gia tốc được đặt tại tâm chuyển động để đo góc quay của bộ di động trong quá trình thực nghiệm, kết quả được so sánh với tín hiệu nhận được từ game để đánh giá độ chính xác và đáp ứng của bộ điều khiển cho thông số góc nghiêng của

bộ di động. Cabin được điều khiển di chuyển theo trục Z, xoay theo góc Roll (xoay quanh trục Z) và góc Pitch (xoay quanh trục Y), các tọa độ còn lại là không đổi, do bộ điều khiển hoạt động ở chế độ thời gian thực, nên giải thuật FCDF được sử dụng để tính toán lực căng cáp.

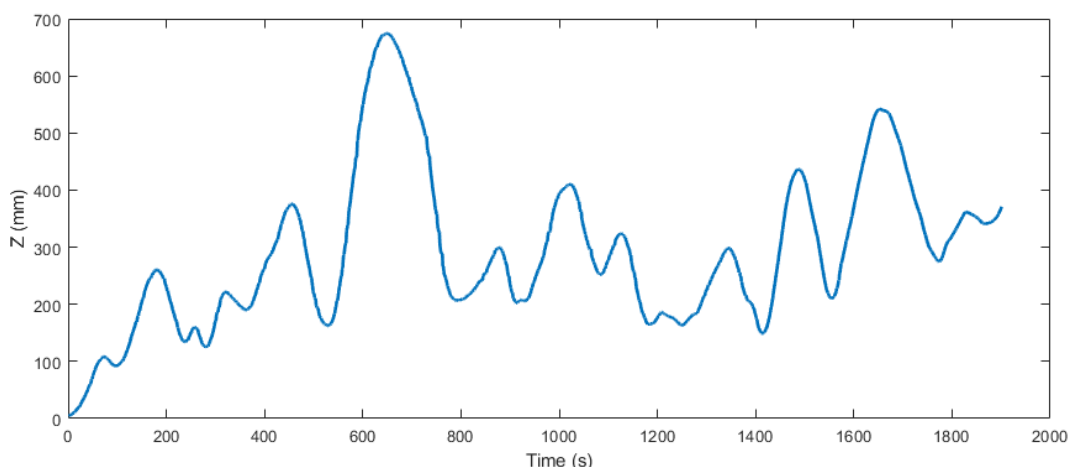
Hình 5.27 là kết quả mô phỏng chuyển động, vị trí của cabin mô phỏng được điều khiển phù hợp với tín hiệu từ Game tương ứng. **Hình 5.27 (a)** cho thấy máng trượt dốc xuống tương ứng với hướng cabin nghiêng ra phía trước (góc Pitch), **hình 5.27 (b)** cho thấy máng trượt dốc lên tương ứng với hướng cabin nghiêng ra phía sau (góc Pitch), **hình 5.27 (c)** cho thấy máng trượt dốc xuống và nghiêng sang trái tương ứng với hướng cabin nghiêng ra phía trước (góc Pitch) và nghiêng về bên phải (góc Roll), **hình 5.27 (d)** cho thấy máng trượt dốc lên và nghiêng sang phải tương ứng với hướng cabin nghiêng ra phía sau (góc Pitch) và nghiêng về bên trái (góc Roll). Như vậy, đáp ứng vị trí của cabin hoàn toàn phù hợp với tín hiệu Game.



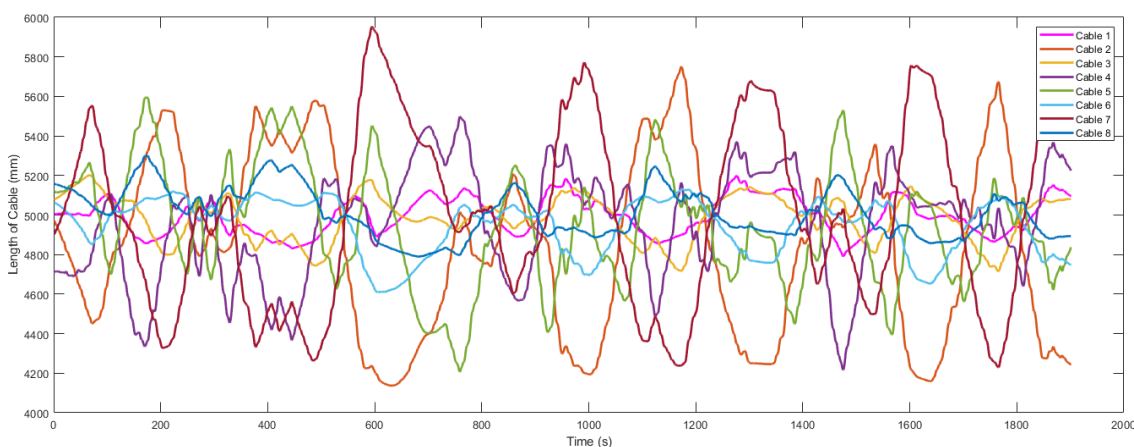
Hình 5.27: Kết quả mô phỏng chuyển động với mô hình người

Hình 5.28 và **hình 5.29** là tọa độ theo phương Z được trích xuất từ Game và phản hồi đáp ứng các biến khớp - chiều dài cáp ứng đã tính đến độ võng cáp, tọa độ theo phương Z dao động từ 0mm đến 700mm, phù hợp với dịch chuyển của

cabin và đáp ứng chiều dài của các dây cáp trong quá trình mô phỏng chuyển động. **Hình 5.30** là phản hồi lực căng cáp trong quá trình di chuyển cabine, hầu hết các giá trị lực căng đều nằm trong giới hạn phân phối lực căng cáp, tuy nhiên có một số dây cáp có lực căng nhỏ hơn giới hạn dưới là 40N ở những điểm có sự thay đổi đột ngột với giá trị lớn của tọa độ Z và các góc nghiêng, điều này cũng gây ra sai số lớn ở các góc quay theo **hình 5.31** và **hình 5.32** so với tín hiệu đặt từ Game. Các 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 phối lực căng và bù độ võng cáp hết sức quan trọng trong quá trình điều khiển CDP, 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.

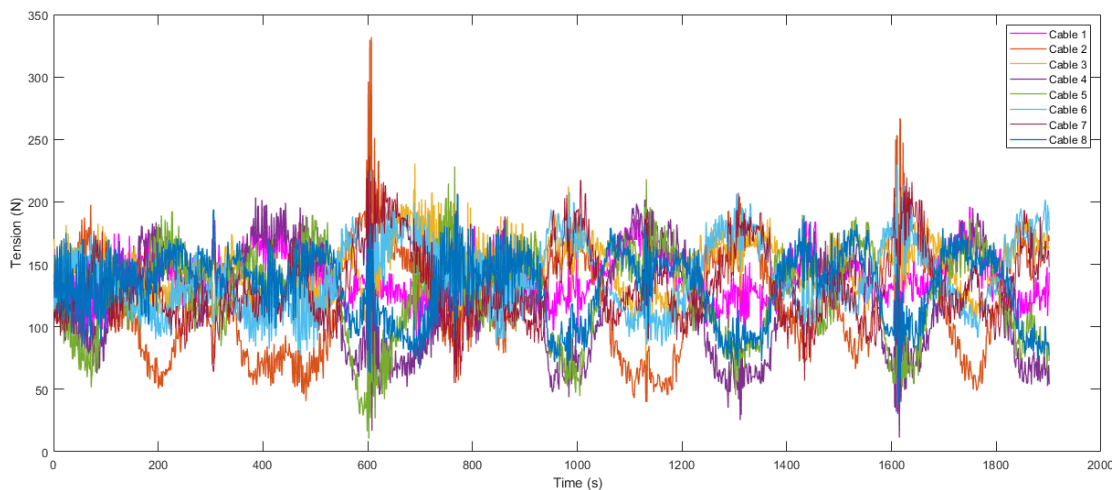


Hình 5.28: Tọa độ trục Z từ Game trong ứng dụng mô phỏng chuyển động

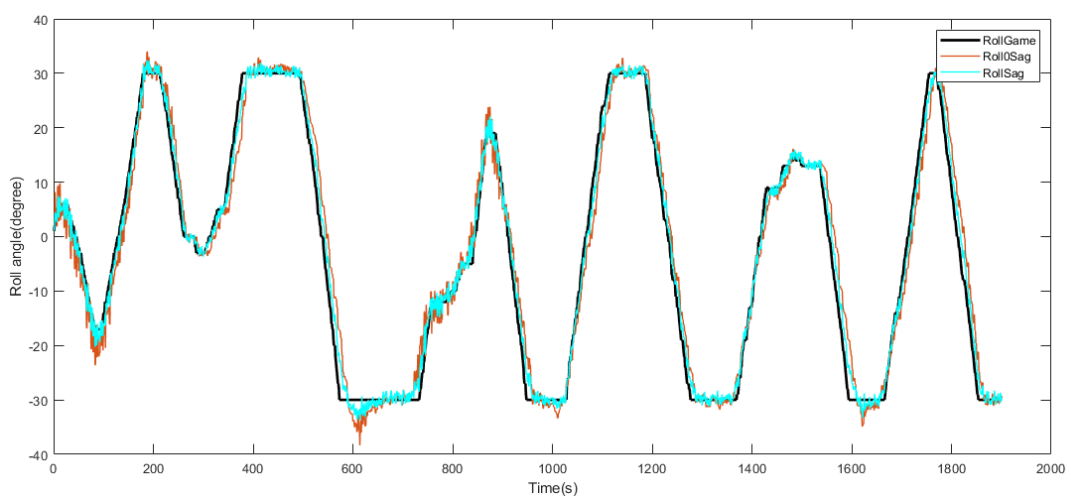


Hình 5.29: Chiều dài cáp phản hồi từ bộ điều khiển

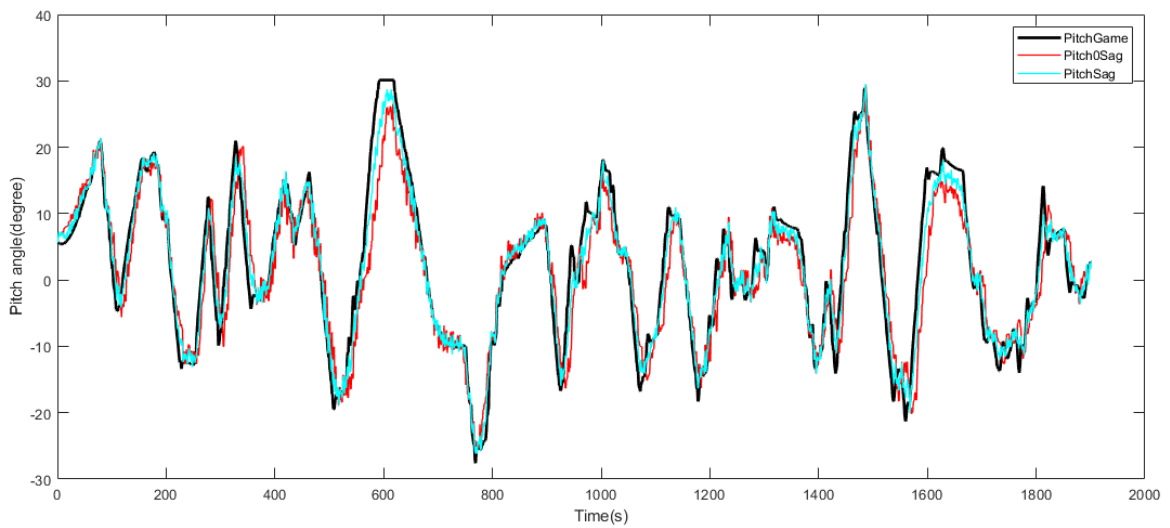
Hình 5.31 và 5.32 biểu diễn giá trị đặt góc Roll và góc Pitch từ Game và phản hồi tương ứng từ cảm biến góc nghiêng, thực nghiệm kéo dài với gần 2000 dữ liệu thu thập. Kết quả cho thấy mô hình điều khiển có tính độ võng cấp có đáp ứng tốt hơn trường hợp không có bù độ võng cấp, sai số và thời gian đáp ứng bám quỹ đạo của mô hình điều khiển có bù độ võng cấp tốt hơn trường hợp không có bù độ võng cấp, điều này cho thấy tính ổn định của hệ thống đã được cải thiện đáng kể, đảm bảo an toàn cho các ứng dụng điều khiển phức tạp. Kết quả phản hồi của góc nghiêng theo kết quả mô phỏng chuyển động cho thấy sai số góc nghiêng lớn hơn trường hợp thực nghiệm đo góc theo độ song phẳng, nguyên nhân có thể bắt nguồn từ độ trễ của bộ điều khiển và sai số thiết bị đo, đây cũng là vấn đề cần nghiên cứu trong tương lai để cải thiện thời gian đáp ứng cũng như độ chính xác của phương pháp đo.



Hình 5.30: Lực căng cáp phản hồi từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động



Hình 5.31: Phản hồi góc Roll từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động



Hình 5.32: Phản hồi góc Pitch từ bộ điều khiển trong mô phỏng chuyển động

5.6 Kết luận

Thông qua các thực nghiệm với tác vụ di chuyển các vật nặng dạng hình khối cho các ứng dụng di chuyển vật nặng cho thấy, độ chính xác vị trí của CDPR đã được cải thiện đáng kể khi áp dụng mô hình tính toán độ võng cáp, hiệu quả của mô hình sẽ tăng lên khi kích thước CDPR càng lớn do ảnh hưởng của độ võng cáp tỉ lệ thuận với không gian hoạt động. Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy lực căng cáp phản hồi về bộ điều khiển đều nằm trong vùng giới hạn, có dạng liên tục theo quỹ đạo, điều này rất quan trọng trong việc giữ ổn định bộ di động trong quá trình điều khiển, không gây ra lỗi quá tải động cơ khi cáp quá căng hoặc mất ràng buộc của một số cơ cấu chấp hành khi cáp bị chùng. Mặt khác, lực căng cáp còn ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả tính toán độ võng cáp, do đó, ổn định lực căng cáp và bù độ võng cáp cho phép điều khiển bộ di động ổn định và chính xác. Đặc biệt, độ song phẳng của bộ di động được duy trì rất tốt trong trường hợp điều khiển có bù độ võng cáp, điều này cho thấy sự phù hợp của mô hình tính toán trong chương 4. Đối với thực nghiệm ứng dụng mô phỏng chuyển động theo thời gian thực, giải thuật phân phối độ võng cáp FDCF và giải thuật xác định độ võng cáp ICSPA được sử dụng để tính toán lực căng cáp và độ võng cáp theo thời gian thực cho bộ điều khiển. Đáp ứng của hệ thống được đo thông qua cảm biến góc quay cho thấy sai số của mô hình có tính đến độ võng cáp cho đáp ứng tốt hơn mô hình không có tính đến độ võng

cáp, một kết luận quan trọng là độ võng cáp lực căng cáp có mối liên hệ tương hỗ, mô hình độ võng cáp một mặt phụ thuộc vào lực căng cáp, mặt khác mô hình độ võng cáp nâng cao độ chính xác vị trí, qua đó ổn định lực căng cáp trong quá trình điều khiển, điều này rất quan trọng cho các cấu hình CDPR thừa ràng buộc, do cấu hình này các dây cáp đòi hỏi phải được điều khiển chính xác để tránh các trường hợp cáp quá căng gây hư hỏng cơ cấu truyền động hoặc lực căng âm gây chùng cáp làm mất ổn định hệ thống, gây sai lệch vị trí và ảnh hưởng đến các cáp truyền động khác. Các thực nghiệm tiếp theo sẽ được tiến hành với các cấu hình khác nhau để đánh giá sự phù hợp của các giải thuật phân phối lực căng cáp và tính toán độ võng cáp, đặc biệt là các cấu hình lớn như CPRD kích thước 16x16x8m đã được mô phỏng trong chương 4, cấu hình này có độ võng cáp lên đến 15mm với chiều dài cáp lên đến 16m.

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. 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 giải thuật tính toán bài toán động học nghịch 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 phối lực căng cáp là DSA với mục tiêu tối ưu là tổng lực căng cáp nhỏ nhất và QPA với phân phối lực căng liên tục và chọn được xu hướng phân phối 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 cáp truyền động có kích thước lớn 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 phối 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. 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, kết quả tính toán 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 với 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 $\pm 4\text{mm}$ 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. 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 tham khảo để xây dựng các mô hình ứng dụng tính toán mềm để tính toán bài toán động học nghịch có tính đến ảnh hưởng của độ võng của cáp cho các CDPR có cấu trúc và kích thước 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 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 phối 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 Robot song song truyền động bằng cáp với các bài toán động học, động lực học, phân phối 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 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 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.

6.2 Các đóng góp về mặt khoa học

Đóng góp thứ nhất của nghiên cứu này tập trung ở việc xây dựng và phân tích 2 giải thuật xác định lực căng cáp dựa vào tối ưu hóa bậc 1 và tối ưu hóa bậc 2 với các điều kiện biên và các thành phần hỗ trợ. Tính mới thứ 2 là việc xây dựng bài toán động học nghịch với 2 mô hình tính toán độ võng cáp dựa vào mô hình ANFIS và giải thuật Vùng tin cậy, trong đó việc nghiên cứu cấu hình, xác định các thành phần đầu vào và đầu ra của 2 giải thuật dự đoán độ võng cáp CSPA và ICSPA có ý nghĩa quan trọng, cung cấp một hướng nghiên cứu mới cho việc ứng dụng các kỹ thuật tính toán mềm vào việc giải quyết các bài toán động học nghịch có tính đến độ võng cho các cấu hình CDPR khác nhau, kết quả mô phỏng cho thấy ưu điểm lớn về độ chính xác và thời gian tính toán của 2 giải thuật CSPA và ICSPA so với phương pháp số. Nghiên cứu cũng cho thấy sự ảnh hưởng của các thông số quan trọng đến việc triển khai các CDPR kích thước lớn như mối quan hệ giữa lực căng cáp, cấu hình CDPR và không gian hoạt động hay mối quan hệ giữa lực căng cáp, độ võng cáp và độ chính xác của CDPR.

6.3 Phạm vi ứng dụng của nghiên cứu

Các giải thuật xác định lực căng cáp theo DSA và QPA có thể ứng dụng cho các CDPR dạng thừa ràng buộc, với yêu cầu tối ưu theo năng lượng tiêu thụ hoặc sự liên tục của lực căng cáp. Giải thuật tính toán độ võng cáp CSPA được thiết kế cho từng cấu hình CDPR cụ thể với các giải thuật phân phối lực căng cáp tương ứng.

Giải thuật ICSPA có thể ứng dụng tính toán độ võng cấp cho bất kỳ cấu hình CDPR nào với các điều kiện biên về lực căng cáp và chiều dài cáp có thể mở rộng và có thể sử dụng cho bất kỳ giải thuật phân phối lực căng cáp nào.

6.4 Các vấn đề còn tồn tại

Giải thuật tính toán độ võng cáp CSPA 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 phối lực căng cáp tương ứng. Điều này có nghĩa là giải thuật tính toán độ võng cáp dựa vào mô hình ANFIS CSPA hiện tại chỉ áp dụng cho một loại CDPR nhất định với một phương pháp phân phối lực căng cụ thể. 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**, 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, nhưng đòi hỏi phải sử dụng một giải pháp phân phối lực căng có thời gian tính toán nhanh với các ứng dụng cần điều khiển thời gian thực vì thời gian tính toán tăng lên do yêu cầu giải các bài toán về động học CDPR và phân phối lực căng cáp trước, giải thuật ICSPA được thiết kế với điều kiện biên phù hợp cho nhiều cấu hình CDPR với một giới hạn cho trước về chiều dài cáp và lực căng cáp, do đó với các CDPR có kích thước lớn hơn thì cần xây dựng lại mô hình cho phù hợp. 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 phối 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 dự đoán độ võng của dây cáp truyền động và thực nghiệm cho các cấu hình CDPR có kích thước và tải trọng lớn hơn. 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Berti A, Merlet J-P, Carricato M. Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis. *The International Journal of Robotics Research*. 2016;35(6):723-739. doi:10.1177/0278364915595277
- [2] L. Gagliardini, S. Caro, M. Gouttefarde, P. Wenger and A. Girin, "Optimal design of cable-driven parallel robots for large industrial structures," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014, pp. 5744-5749, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907703.
- [3] Tang, Xiaoqiang. "An overview of the development for cable-driven parallel manipulator." *Advances in Mechanical Engineering* 6 (2014): 823028. DOI:10.1155/2014/823028
- [4] A. Yeshmukhametov, M. Kalimoldayev, O. Mamyrbayev and Y. Amirgaliev, "Design and kinematics of serial/parallel hybrid robot," 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Nagoya, Japan, 2017, pp. 162-165, doi: 10.1109/ICCAR.2017.7942679.
- [5] Zi, Bin, B. Y. Duan, J. L. Du, and Hong Bao. "Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot." *Mechatronics* 18, no. 1 (2008): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2007.09.004>
- [6] Heyden, T., Woernle, C. Dynamics and flatness-based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator. *Multibody Syst Dyn* 16, 155–177 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11044-006-9023-5>
- [7] Dion-Gauvin, Pascal, and Clément Gosselin. "Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable-suspended parallel mechanisms." *Mechanism and Machine Theory* 113 (2017): 158-178. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.003
- [8] Duan, B. Y. "A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis." *Mechatronics* 9, no. 1 (1999): 53-64. [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(98\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(98)00028-2)

- [9] Nan, Rendong. "Five hundred meter aperture spherical radio telescope FAST." *Science in China series G* 49, no. 2 (2006): 129-148.
- [10] Zi, Bin, Jun Lin, and Sen Qian. "Localization, obstacle avoidance planning and control of a cooperative cable parallel robot for multiple mobile cranes." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 34 (2015): 105-123. DOI:10.1016/j.rcim.2014.11.005.
- [11] Seriani, Stefano, Paolo Gallina, and A. Wedler. "A modular cable robot for inspection and light manipulation on celestial bodies." *Acta Astronautica* 123 (2016): 145-153. DOI:10.1016/j.actaastro.2016.03.020
- [12] Varela, Maria João, Marco Ceccarelli, and Paulo Flores. "A kinematic characterization of human walking by using CaTraSys." *Mechanism and Machine Theory* 86 (2015): 125-139. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.006
- [13] Y. Mao, X. Jin, G. Gera Dutta, J. P. Scholz and S. K. Agrawal, "Human Movement Training With a Cable Driven ARm EXoskeleton (CAREX)," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 84-92, Jan. 2015, doi: 10.1109/TNSRE.2014.2329018.
- [14] Pinto, Andry Maykol, Eduardo Moreira, José Lima, José Pedro Sousa, and Pedro Costa. "A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path-planning." *Autonomous Robots* 41, no. 7 (2017): 1487-1499. DOI:10.1007/s10514-016-9609-6
- [15] Barnett, Eric, and Clément Gosselin. "Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot." *Additive Manufacturing* 7 (2015): 27-44. DOI:10.1007/s41693-017-0008-0.
- [16] Hong, Huajie, Jabran Ali, and Lei Ren. "A review on topological architecture and design methods of cable-driven mechanism." *Advances in mechanical engineering* 10, no. 5 (2018): 1687814018774186. DOI:10.1177/1687814018774186.
- [17] Qian, Sen, Bin Zi, Wei-Wei Shang, and Qing-Song Xu. "A review on cable-driven parallel robots." *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 31, no. 1 (2018): 1-11. DOI:10.1186/s10033-018-0267-9

- [18] Xiong, Hao, and Xiumin Diao. "A review of cable-driven rehabilitation devices." *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* 15, no. 8 (2020): 885-897. DOI:10.1080/17483107.2019.1629110
- [19] Cong Bang Pham, Song Huat Yeo and Guilin Yang, "Workspace analysis and optimal design of cable-driven planar parallel manipulators," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004.*, Singapore, 2004, pp. 219-224 vol.1, doi: 10.1109/RAMECH.2004.1438920.
- [20] G. Yang, C. B. Pham and S. H. Yeo, "Workspace Performance Optimization of Fully Restrained Cable-Driven Parallel Manipulators," *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006*, pp. 85-90, doi: 10.1109/IROS.2006.281747.
- [21] Arsenault, Marc. "Workspace and stiffness analysis of a three-degree-of-freedom spatial cable-suspended parallel mechanism while considering cable mass." *Mechanism and Machine Theory* 66 (2013): 1-13. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2013.03.003.
- [22] Lv, Wei, Limin Tao, and Zhengnan Ji. "Sliding mode control of cable-driven redundancy parallel robot with 6 DOF based on cable-length sensor feedback." *Mathematical Problems in Engineering* 2017 (2017). DOI:10.1155/2017/1928673
- [23] MING, AIGUO, and T. Higuchi. "Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires. II: Development of a planar completely restrained positioning mechanism." *International Journal Of The Japan Society For Precision Engineering* 28, no. 3 (1994): 235-242.
- [24] Pott, Andreas. *Cable-driven parallel robots: theory and application*. Vol. 120. Springer, 2018.
- [25] Bostelman, Roger, Adam Jacoff, Nicholas Dagalakis, and James Albus. "RCS-Based RoboCrane Integration." In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems: A Semiotic Perspective*, Gaithersburg, MD. 1996.

- [26] Lytle, Alan M., and Kamel S. Saidi. "NIST research in autonomous construction." *Autonomous Robots* 22, no. 3 (2007): 211-221. DOI:10.1007/s10514-006-9003-x.
- [27] Khosravi, Mohammad A., and Hamid D. Taghirad. "Dynamic analysis and control of cable driven robots with elastic cables." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 35, no. 4 (2011): 543-557. DOI:10.1139/tcsme-2011-0033.
- [28] D. Song, L. Zhang and F. Xue, "Configuration Optimization and a Tension Distribution Algorithm for Cable-Driven Parallel Robots," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33928-33940, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841988.
- [29] Verhoeven, Richard, Manfred Hiller, and Satoshi Tadokoro. "Workspace of tendon-driven Stewart platforms: Basics, classification, details on the planar 2-dof class." In *Proceedings of the 4th International Conference on Motion and Vibration Control*, vol. 3, pp. 871-876. Switzerland: ETH Zurich, 1998.
- [30] Verhoeven, Richard, Manfred Hiller, and Satoshi Tadokoro. "Workspace, stiffness, singularities and classification of tendon-driven stewart platforms." In *Advances in robot kinematics: Analysis and Control*, pp. 105-114. Springer, Dordrecht, 1998.
- [31] Verhoeven, Richard, and Manfred Hiller. "Estimating the controllable workspace of tendon-based Stewart platforms." In *Advances in Robot Kinematics*, pp. 277-284. Springer, Dordrecht, 2000.
- [32] Verhoeven, Richard. "Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms." PhD diss., Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [33] Gouttefarde, Marc, and Cle´ment M. Gosselin. "On the properties and the determination of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms." In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 46954, pp. 337-346. 2004. DOI:10.1115/DETC2004-57127
- [34] Reddy, Madhirala Vikranth Kumar. "Orientability of the moving platform in planar cable robots." PhD diss., Master Thesis, Mechanical Engineering, Indian

Institute of Science, Bengaluru–560012, India, 2019. DOI:10.1007/978-3-030-20751-9_1

[35] Pusey, Jason, Abbas Fattah, Sunil Agrawal, and Elena Messina. "Design and workspace analysis of a 6–6 cable-suspended parallel robot." *Mechanism and machine theory* 39, no. 7 (2004): 761-778, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.010.

[36] M. Gouttefarde and C. M. Gosselin, "Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 3, pp. 434-445, June 2006, doi: 10.1109/TRO.2006.870638.

[37] A. T. Riechel and I. Ebert-Uphoff, "Force-feasible workspace analysis for underconstrained, point-mass cable robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 4956-4962 Vol.5, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1302503.

[38] Diao, Xiumin, and Ou Ma. "A method of verifying force-closure condition for general cable manipulators with seven cables." *Mechanism and Machine Theory* 42, no. 12 (2007): 1563-1576. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2007.06.008.

[39] Lim, Wen Bin, Guilin Yang, Song Huat Yeo, and Shabbir Kurbanhusen Mustafa. "A generic force-closure analysis algorithm for cable-driven parallel manipulators." *Mechanism and Machine Theory* 46, no. 9 (2011): 1265-1275. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2011.04.006.

[40] Ouyang, Bo, and Wei-Wei Shang. "A new computation method for the force-closure workspace of cable-driven parallel manipulators." *Robotica* 33, no. 3 (2015): 537-547. DOI:10.1017/S0263574714000411.

[41] Cong Bang Pham, Song Huat Yeo and Guilin Yang, "Tension analysis of cable-driven parallel mechanisms," 2005 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB, Canada, 2005, pp. 257-262, doi: 10.1109/IROS.2005.1545368.

[42] Pham, Cong Bang, Song Huat Yeo, Guilin Yang, Mustafa Shabbir Kurbanhusen, and I-Ming Chen. "Force-closure workspace analysis of cable-driven

parallel mechanisms." *Mechanism and Machine Theory* 41, no. 1 (2006): 53-69, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.04.003

[43] Azizian, Kaveh, Philippe Cardou, and Brian Moore. "Classifying the boundaries of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms by visual inspection." (2012): 024503, <https://doi.org/10.1115/1.4006520>.

[44] Pott, Andreas. "Forward kinematics and workspace determination of a wire robot for industrial applications." In *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design*, pp. 451-458. Springer, Dordrecht, 2008, DOI:10.1007/978-1-4020-8600-7_47.

[45] Pott, Andreas. "Efficient computation of the workspace boundary, its properties and derivatives for cable-driven parallel robots." In *Computational Kinematics*, pp. 190-197. Springer, Cham, 2018. DOI:10.1007/978-3-319-60867-9_22.

[46] Perreault, S., Cardou, P., Gosselin, C. M., and Otis, M. J. (July 27, 2010). "Geometric Determination of the Interference-Free Constant-Orientation Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms." *ASME. J. Mechanisms Robotics*. August 2010; 2(3): 031016. <https://doi.org/10.1115/1.4001780>

[47] Rezazadeh, S., and Behzadipour, S. (March 10, 2011). "Workspace Analysis of Multibody Cable-Driven Mechanisms." *ASME. J. Mechanisms Robotics*. May 2011; 3(2): 021005. <https://doi.org/10.1115/1.4003581>.

[48] Sheng, Z, Park, J, Stegall, P, & Agrawal, SK. "Analytic Determination of Wrench Closure Workspace of Spatial Cable Driven Parallel Mechanisms." *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 5C: 39th Mechanisms and Robotics Conference. Boston, Massachusetts, USA. August 2–5, 2015. V05CT08A048. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2015-47976>.

[49] Bruckmann, T, Mikelsons, L, Hiller, M, & Schramm, D. "Continuous Workspace Analysis, Synthesis and Optimization of Wire Robots." *Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and*

- Computers and Information in Engineering Conference. Volume 2: 32nd Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. Brooklyn, New York, USA. August 3–6, 2008. pp. 59-66. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2008-49532>
- [50] M. Gouttefarde, D. Daney and J. -P. Merlet, "Interval-Analysis-Based Determination of the Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Robots," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 1-13, Feb. 2011, doi: 10.1109/TRO.2010.2090064.
- [51] Khalilpour, Seyed Ahmad, Azadeh Zarif Loloie, Hamid D. Taghirad, and Mehdi Tale Masouleh. "Feasible kinematic sensitivity in cable robots based on interval analysis." In *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 233-249. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI:10.1007/978-3-642-31988-4_15.
- [52] Zarif Loloie, A., H. D. Taghirad, and N. N Kouchmeshky. "Interval analysis of controllable workspace for cable robots." *AUT Journal of Electrical Engineering* 45, no. 1 (2013): 1-8.
- [53] Lamine, Houssein, Sami Bennour, and Lotfi Romdhane. "Design of cable-driven parallel manipulators for a specific workspace using interval analysis." *Advanced robotics* 30, no. 9 (2016): 585-594, doi:10.1080/01691864.2016.1142897.
- [54] Merlet, Jean-Pierre. "Trajectory verification in the workspace for parallel manipulators." *The International Journal of Robotics Research* 13, no. 4 (1994): 326-333.
- [55] Pott, Andreas, and Werner Kraus. "Determination of the wrench-closure translational workspace in closed-form for cable-driven parallel robots." In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 882-887. IEEE, 2016.
- [56] Lau, Darwin, Denny Oetomo, and Saman K. Halgamuge. "Wrench-closure workspace generation for cable driven parallel manipulators using a hybrid analytical-numerical approach." (2011): 071004.
- [57] Abbasnejad, Ghasem, Jonathan Eden, and Darwin Lau. "Generalized ray-based lattice generation and graph representation of wrench-closure workspace for

- arbitrary cable-driven robots." *IEEE Transactions on Robotics* 35, no. 1 (2018): 147-161.
- [58] Zhang, Zeqing, Hung Hon Cheng, and Darwin Lau. "Efficient wrench-closure and interference-free conditions verification for cable-driven parallel robot trajectories using a ray-based method." *IEEE Robotics and Automation Letters* 5, no. 1 (2019): 8-15.
- [59] Boschetti, Giovanni, and Alberto Trevisani. "Cable robot performance evaluation by wrench exertion capability." *Robotics* 7, no. 2 (2018): 15.
- [60] Shiang, Wei-Jung, David Cannon, and Jason Gorman. "Optimal force distribution applied to a robotic crane with flexible cables." In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*, vol. 2, pp. 1948-1954. IEEE, 2000.
- [61] Pham, Cong Bang, Guilin Yang, and Song Huat Yeo. "Dynamic analysis of cable-driven parallel mechanisms." In *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.*, pp. 612-617. IEEE, 2005.
- [62] Oh, So-Ryeok, and Sunil Kumar Agrawal. "Cable suspended planar robots with redundant cables: Controllers with positive tensions." *IEEE Transactions on Robotics* 21, no. 3 (2005): 457-465.
- [63] Borgstrom, Per Henrik, Brett L. Jordan, Gaurav S. Sukhatme, Maxim A. Batalin, and William J. Kaiser. "Rapid computation of optimally safe tension distributions for parallel cable-driven robots." *IEEE Transactions on Robotics* 25, no. 6 (2009): 1271-1281.
- [64] Agahi, Maryam, and Leila Notash. "Redundancy resolution of wire-actuated parallel manipulators considering contact forces in machining applications." In *Proceedings of the CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics*. 2011.
- [65] Liu, Peng, Yuanying Qiu, Yu Su, and Jiantao Chang. "On the minimum cable tensions for the cable-based parallel robots." *Journal of Applied Mathematics* 2014 (2014).

- [66] Bruckmann, Tobias, Andreas Pott, and Manfred Hiller. "Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms." In *Advances in Robot Kinematics*, pp. 403-412. Springer, Dordrecht, 2006.
- [67] Li, Hui, Xinyu Zhang, Rui Yao, Jinghai Sun, Gaofeng Pan, and Wenbai Zhu. "Optimal force distribution based on slack rope model in the incompletely constrained cable-driven parallel mechanism of FAST telescope." In *Cable-driven parallel robots*, pp. 87-102. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [68] Bruckmann, Tobias, Christian Sturm, and Wildan Lalo. "Wire robot suspension systems for wind tunnels." *Wind tunnels and experimental fluid dynamics research* (2010): 29-50.
- [69] Côté, Alexis Fortin, Philippe Cardou, and Clément Gosselin. "A tension distribution algorithm for cable-driven parallel robots operating beyond their wrench-feasible workspace." In *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 68-73. IEEE, 2016.
- [70] Pott, Andreas, Tobias Bruckmann, and Lars Mikelsons. "Closed-form force distribution for parallel wire robots." In *Computational Kinematics*, pp. 25-34. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [71] Gosselin, Clément, and Martin Grenier. "On the determination of the force distribution in overconstrained cable-driven parallel mechanisms." *Meccanica* 46, no. 1 (2011): 3-15.
- [72] Roberts, Rodney G., Todd Graham, and Thomas Lippitt. "On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots." *Journal of Robotic Systems* 15, no. 10 (1998): 581-597.
- [73] Verhoeven, Richard, and Manfred Hiller. "Tension distribution in tendon-based stewart platforms." In *Advances in Robot Kinematics*, pp. 117-124. Springer, Dordrecht, 2002.
- [74] Hassan, Mahir, and Amir Khajepour. "Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis." *IEEE Transactions on Robotics* 24, no. 3 (2008): 736-740.

- [75] Bruckmann, Tobias, Lars Mikelsons, Manfred Hiller, and Dieter Schramm. "A new force calculation algorithm for tendon-based parallel manipulators." In 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, pp. 1-6. IEEE, 2007.
- [76] Su, Yu, Yuanying Qiu, and Peng Liu. "The continuity and real-time performance of the cable tension determining for a suspend cable-driven parallel camera robot." *Advanced Robotics* 29, no. 12 (2015): 743-752.
- [77] Cui, Zhiwei, Xiaoqiang Tang, Senhao Hou, and Haining Sun. "Non-iterative geometric method for cable-tension optimization of cable-driven parallel robots with 2 redundant cables." *Mechatronics* 59 (2019): 49-60.
- [78] Boumann, Roland, and Tobias Bruckmann. "Real-time cable force calculation beyond the wrench-feasible workspace." *Robotics* 9, no. 2 (2020): 41.
- [79] Pott, Andreas. "An improved force distribution algorithm for over-constrained cable-driven parallel robots." In *Computational Kinematics*, pp. 139-146. Springer, Dordrecht, 2014.
- [80] Mikelsons, Lars, Tobias Bruckmann, Manfred Hiller, and Dieter Schramm. "A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon-based parallel manipulators." In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3869-3874. IEEE, 2008.
- [81] Lamaury, Johann, and Marc Gouttefarde. "A tension distribution method with improved computational efficiency." In *Cable-driven parallel robots*, pp. 71-85. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [82] Gouttefarde, Marc, Johann Lamaury, Christopher Reichert, and Tobias Bruckmann. "A versatile tension distribution algorithm for n -DOF parallel robots driven by $n+2$ cables." *IEEE Transactions on Robotics* 31, no. 6 (2015): 1444-1457.
- [83] Rasheed, Tahir, Philip Long, David Marquez-Gamez, and Stéphane Caro. "Tension distribution algorithm for planar mobile cable-driven parallel robots." In *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 268-279. Springer, Cham, 2018.

- [84] Song, Da, Lixun Zhang, and Feng Xue. "Configuration optimization and a tension distribution algorithm for cable-driven parallel robots." *IEEE Access* 6 (2018): 33928-33940.
- [85] Müller, Katharina, Christopher Reichert, and Tobias Bruckmann. "Analysis of a real-time capable cable force computation method." In *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 227-238. Springer, Cham, 2015.
- [86] Pott, Andreas. "On the limitations on the lower and upper tensions for cable-driven parallel robots." In *Advances in Robot kinematics*, pp. 243-251. Springer, Cham, 2014.
- [87] Notash, Leila. "Impact of Perturbation on Wire Tension Vector." In *Advances in Robot Kinematics*, pp. 41-49. Springer, Cham, 2014.
- [88] Su, Yu, Yuanying Qiu, and Peng Liu. "Optimal cable tension distribution of the high-speed redundant driven camera robots considering cable sag and inertia effects." *Advances in Mechanical Engineering* 6 (2014): 729020.
- [89] Rodriguez-Barroso, Alejandro, and Roque Saltaren. "Tension planner for cable-driven suspended robots with unbounded upper cable tension and two degrees of redundancy." *Mechanism and Machine Theory* 144 (2020): 103675.
- [90] Ueland, Einar, Thomas Sauder, and Roger Skjetne. "Optimal force allocation for overconstrained cable-driven parallel robots: Continuously differentiable solutions with assessment of computational efficiency." *IEEE Transactions on Robotics* 37, no. 2 (2020): 659-666.
- [91] Max Irvine, H. "Cable structures." The NTTPress (1981).
- [92] Korayem, Moharam Habibnejad, Mahdi Bamdad, and M. Saadat. "Workspace analysis of cable-suspended robots with elastic cable." In *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1942-1947. IEEE, 2007.
- [93] Riehl, Nicolas, Marc Gouttefarde, Sébastien Krut, Cédric Baradat, and François Pierrot. "Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms." In *2009 IEEE international conference on robotics and automation*, pp. 2193-2198. IEEE, 2009.

- [94] Riehl, Nicolas, Marc Gouttefarde, Cédric Baradat, and François Pierrot. "On the determination of cable characteristics for large dimension cable-driven parallel mechanisms." In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4709-4714. IEEE, 2010.
- [95] Yao, Rui, Hui Li, and Xinyu Zhang. "A modeling method of the cable driven parallel manipulator for FAST." In Cable-Driven Parallel Robots, pp. 423-436. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [96] Hui, L. I. "A giant sagging-cable-driven parallel robot of FAST telescope: its tension-feasible workspace of orientation and orientation planning." In Proceedings of the 14th IFToMM World Congress, pp. 373-381. 國立臺灣大學機械系, 2015.
- [97] Gouttefarde, Marc, Jean-François Collard, Nicolas Riehl, and Cédric Baradat. "Simplified static analysis of large-dimension parallel cable-driven robots." In 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2299-2305. IEEE, 2012.
- [98] Nguyen, Dinh Quan, Marc Gouttefarde, Olivier Company, and François Pierrot. "On the simplifications of cable model in static analysis of large-dimension cable-driven parallel robots." In 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 928-934. IEEE, 2013.
- [99] Gouttefarde, Marc, Dinh Quan Nguyen, and Cédric Baradat. "Kinetostatic analysis of cable-driven parallel robots with consideration of sagging and pulleys." In Advances in Robot Kinematics, pp. 213-221. Springer, Cham, 2014.
- [100] Nguyen, Dinh Quan. "On the study of large-dimension reconfigurable cable-driven parallel robots." PhD diss., UNIVERSITE MONTPELLIER 2, 2014.
- [101] Dallej, Tej, Marc Gouttefarde, Nicolas Andreff, Redwan Dahmouche, and Philippe Martinet. "Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots." In 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1581-1586. IEEE, 2012.
- [102] Sridhar, Dheerendra, and Robert L. Williams. "Kinematics and Statics Including Cable Sag for Large Cable-Suspended Robots." In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering

Conference, vol. 50152, p. V05AT07A075. American Society of Mechanical Engineers, 2016.

[103] Merlet, Jean-Pierre, and Julien Alexandre-dit-Sandretto. "The forward kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables." In *Cable-Driven Parallel Robots*, pp. 3-15. Springer, Cham, 2015.

[104] Merlet, Jean-Pierre. "The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results." In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1593-1598. IEEE, 2015.

[105] Merlet, Jean-Pierre. "On the inverse kinematics of cable-driven parallel robots with up to 6 sagging cables." In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4356-4361. IEEE, 2015.

[106] Merlet, Jean-Pierre. "On the workspace of suspended cable-driven parallel robots." In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 841-846. IEEE, 2016.

[107] Merlet, J-P. "An experimental investigation of extra measurements for solving the direct kinematics of cable-driven parallel robots." In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6947-6952. IEEE, 2018.

[108] Merlet, Jean-Pierre. "Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots." *Mechanism and Machine Theory* 135 (2019): 271-280.

[109] Merlet, Jean-Pierre. "Singularity of cable-driven parallel robot with sagging cables: preliminary investigation." In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 504-509. IEEE, 2019.

[110] Merlet, J. P. "The forward kinematics of the 4-1 cable-driven parallel robot with non elastic sagging cables." In *International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, pp. 98-108. Springer, Cham, 2020.

[111] Fabritius, Marc, and Andreas Pott. "An inverse kinematic code for cable-driven parallel robots considering cable sagging and pulleys." In *European Conference on Mechanism Science*, pp. 423-431. Springer, Cham, 2020.

- [112] Fabritius, Marc, and Andreas Pott. "A forward kinematic code for cable-driven parallel robots considering cable sagging and pulleys." In *International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, pp. 218-225. Springer, Cham, 2020.
- [113] Kozak, Kris, Qian Zhou, and Jinsong Wang. "Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass." *IEEE Transactions on Robotics* 22, no. 3 (2006): 425-433.
- [114] Yuan, Han, Eric Courteille, and Dominique Deblaise. "Static and dynamic stiffness analyses of cable-driven parallel robots with non-negligible cable mass and elasticity." *Mechanism and Machine Theory* 85 (2015): 64-81.
- [115] Yuan, Han, Eric Courteille, Marc Gouttefarde, and Pierre-Elie Hervé. "Vibration analysis of cable-driven parallel robots based on the dynamic stiffness matrix method." *Journal of Sound and Vibration* 394 (2017): 527-544.
- [116] Yuan, Han, Eric Courteille, and Dominique Deblaise. "Elastodynamic analysis of cable-driven parallel manipulators considering dynamic stiffness of sagging cables." In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4055-4060. IEEE, 2014.
- [117] Duan, Q. J., J. L. Du, B. Y. Duan, and A. F. Tang. "Deployment/retrieval modeling of cable-driven parallel robot." *Mathematical Problems in Engineering* 2010 (2010).
- [118] Wei, Huiling, Yuanying Qiu, and Yu Su. "Motion control strategy and stability analysis for high-speed cable-driven camera robots with cable inertia effects." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13, no. 5 (2016): 1729881416663374.
- [119] Gia Luan, Phan, and Nguyen Truong Thinh. "Empirical Quasi-Static and Inverse Kinematics of Cable-Driven Parallel Manipulators Including Presence of Sagging." *Applied Sciences* 10, no. 15 (2020): 5318.
- [120] Moussa, Karim, Eulalie Coevoet, Christian Duriez, Maxime Thieffry, Fabien Claveau, Philippe Chevrel, and Stéphane Caro. "FEM-based Dynamic Model for Cable-Driven Parallel Robots with Elasticity and Sagging." In *International*

Conference on Cable-Driven Parallel Robots, pp. 55-68. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.

[121] Gao, Feng, Lifu Gao, Daqing Wang, and Man Jiang. "Kinematics Solution of Cable-Driven Parallel Robots Considering Cable Sagging." In 2023 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA), pp. 1-8. IEEE, 2023.

[122] Yahia, Ichrak Ben, Jean-Pierre Merlet, and Yves Papegay. "Mixing neural networks and the Newton method for the kinematics of simple cable-driven parallel robots with sagging cables." In 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pp. 241-246. IEEE, 2021.

[123] Merlet, Jean-Pierre. "Advances in the use of neural network for solving the direct kinematics of CDPR with sagging cables." In International Conference on Cable-Driven Parallel Robots, pp. 30-39. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.

[124] Tho, Tuong Phuoc, and Nguyen Truong Thinh. "Analysis and Evaluation of CDPR Cable Sagging Based on ANFIS." *Mathematical Problems in Engineering* 2021 (2021).

[125] Picard, Etienne, Elias Tahoumi, Franck Plestan, Stéphane Caro, and Fabien Claveau. "A new control scheme of cable-driven parallel robot balancing between sliding mode and linear feedback." *IFAC-PapersOnLine* 53, no. 2 (2020): 9936-9943.

[126] Bertsimas, D.; Tsitsiklis, J. *Introduction to Linear Optimization*, 1st ed.; Athena Scientific: Belmont, MA, USA, 1997.

[127] Murty, K.G. *Linear Programming*, 1st ed.; Wiley: New York, NY, USA, 1983

[128] Yingliang, Z.; Chengxian, X. A new trust region dogleg method for unconstrained optimization. *Appl. Math.* 2000, 15, 83–92, doi:10.1007/s11766-000-0013-8

[129] Merlet, Jean-Pierre, "The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results," In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1593-1598. IEEE, 2015.

- [130]bs Lazreg, Malika, and Nacéra Benamrane. "Hybrid system for optimizing the robot mobile navigation using ANFIS and PSO." *Robotics and Autonomous Systems* 153 (2022): 104114.
- [131]bs Mohamad Reda A. Refaai "An Improved Inverse Kinematics Solution for a Robot Arm Trajectory Using Multiple Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems." *Advances in Materials Science & Engineering* (2022).
- [132] Narayan, Jyotindra, Ekta Singla, Sanjeev Soni, and Ashish Singla, "Adaptive neuro-fuzzy inference system–based path planning of 5-degrees-of-freedom spatial manipulator for medical applications," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 232, no. 7 (2018): 726-732.
- [133] Jang, J-SR, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23, no. 3 (1993): 665-685.
- [134] Lamaury, Johann, and Marc Gouttefarde. "Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot." In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4659-4664. IEEE, 2013.
- [135] Picard, Etienne, Elias Tahoumi, Franck Plestan, Stéphane Caro, and Fabien Claveau. "A new control scheme of cable-driven parallel robot balancing between sliding mode and linear feedback." *IFAC-PapersOnLine* 53, no. 2 (2020): 9936-9943.

CÁC BÀI BÁO KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

No	Authors	Year	Publications	Name of Journal/ Conference, publishers/ No, Vol, Page	ISSN/ ISBN	Doi/ Link	Notes
1	Article(s) in WoS-covered journal						
1.1		(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. (SCIE – Q1, IF 3.9)	Print: 1539-7734 Online : 1539-7742	https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2265452	Báo cáo tổng kết
1.2		2022	An Overview of Cable-Driven Parallel Robots: Workspace, Tension Distribution, and Cable Sagging	Mathematical Problems in Engineering, Volume 2022, Article ID 2199748, 15 pages - (SCIE - Q2, IF 1.576)	1024123X, 15635147	https://doi.org/10.1155/2022/2199748	CD tổng quan
1.3		2021	Analysis and Evaluation of CDPR Cable Sagging Based on ANFIS	Mathematical Problems in Engineering, Volume 2021, Article ID	1024123X, 15635147	https://doi.org/10.1155/2021/4776317	Chuyên đề 2

No	Authors	Year	Publications	Name of Journal/ Conference, publishers/ No, Vol, Page	ISSN/ ISBN	Doi/ Link	Notes
				4776317, 20 pages - (SCIE - Q3, IF 1.576)			
2	Article(s) in Scopus-covered journal						
2.1		2022	Sagging Cable Analysis and Evaluation of 4-degree-of- freedom Cable Robot Using Adaptive Neural Fuzzy Algorithm	International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 11, No. 2, pp. 73-78, February 2022. (SCOPUS - Q3, IF 1.012)	2278- 0149	DOI: 10.18178/i jmerr.	Chuyê n đề 2
2.2		2022	A Study of Tension Distribution for Control of Planar Cable Driven Parallel Robot Using Quadratic Programming Algorithm	International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 11, No. 7, July 2022 - (SCOPUS - Q3, IF 1.012)	2278- 0149	DOI: 10.18178/ij merr	Chuyê n đề 1

No	Authors	Year	Publications	Name of Journal/ Conference, publishers/ No, Vol, Page	ISSN/ ISBN	Doi/ Link	Notes
3 Article(s) in Viet Nam journal							
3.1		2023	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	ISSN: 2615-9740		Chuyên đề 2
3.2		2024	Thiết Kế và Tính Toán Hệ Thống Phân Phối Cấp cho CDPR	Journal of Technical Education Science 19, no. SI01 (2024): 64-71.	ISSN: 2615-9740		Báo cáo tổng kết
4 Article(s) in International Conference							
4.1		2022	Design and Modeling Camera Cable Robot	Proceedings of the International Conference GTSD2022, pp. 271-281. Cham: Springer			Báo cáo tổng kết

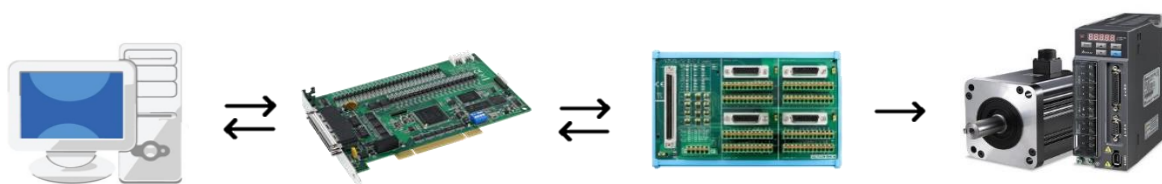
No	Authors	Year	Publications	Name of Journal/ Conference, publishers/ No, Vol, Page	ISSN/ ISBN	Doi/ Link	Notes
				International Publishing, 2022			
4.2		2022	Implementatio n of the Racing Game with the Virtual Reality and Cable Suspended Parallel Robot (CSPR)	In 2022 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 288-291. IEEE, 2022			Báo cáo tổng kết

Phụ lục 1

Bộ điều khiển – giao diện điều khiển CDPR

1. Kết quả thi công phần điện – điều khiển

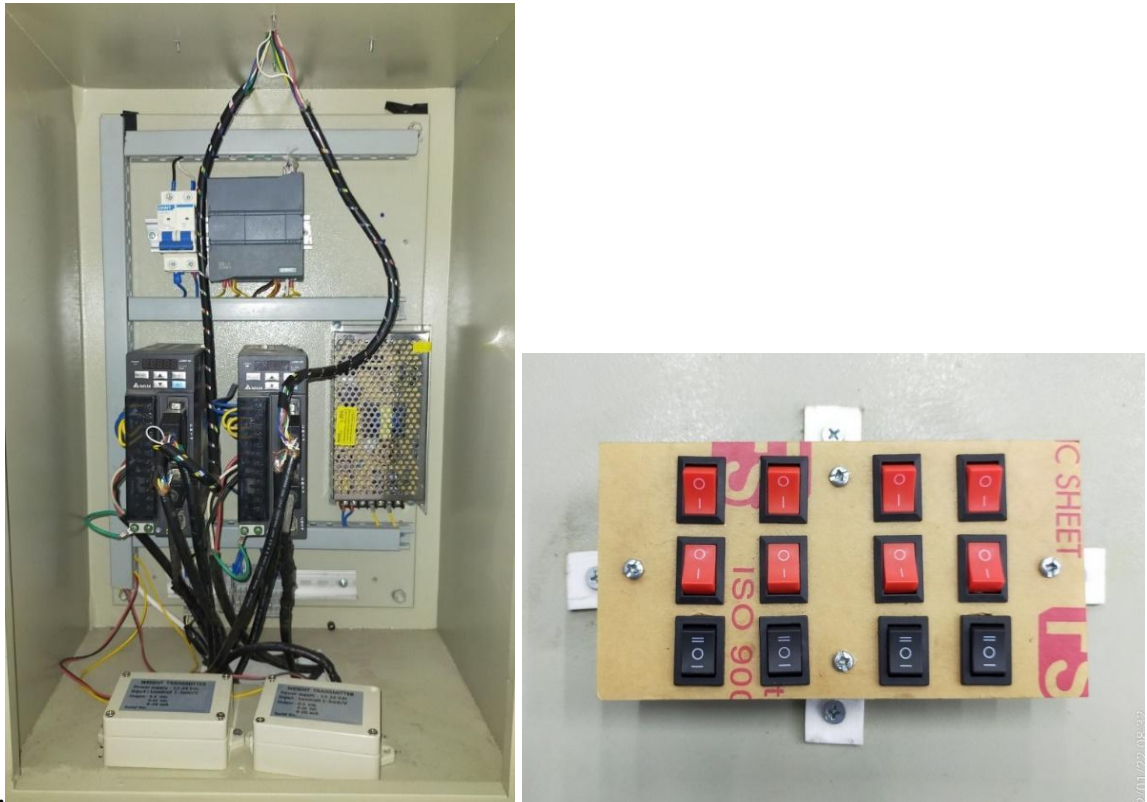
Các thiết bị phần cứng của bộ điều khiển CDPR được chỉ ra như trong **hình P.1**. Card điều khiển chuyển động PCI-1285 cắm trực tiếp vào một PC chạy hệ hành Windows được sử dụng như là bộ điều khiển chính. Các thiết bị khác như mạch kết nối trung gian ADAM-3956, bộ động cơ và drive...



Hình P.1: Sơ đồ tổng quan các thiết bị của hệ thống

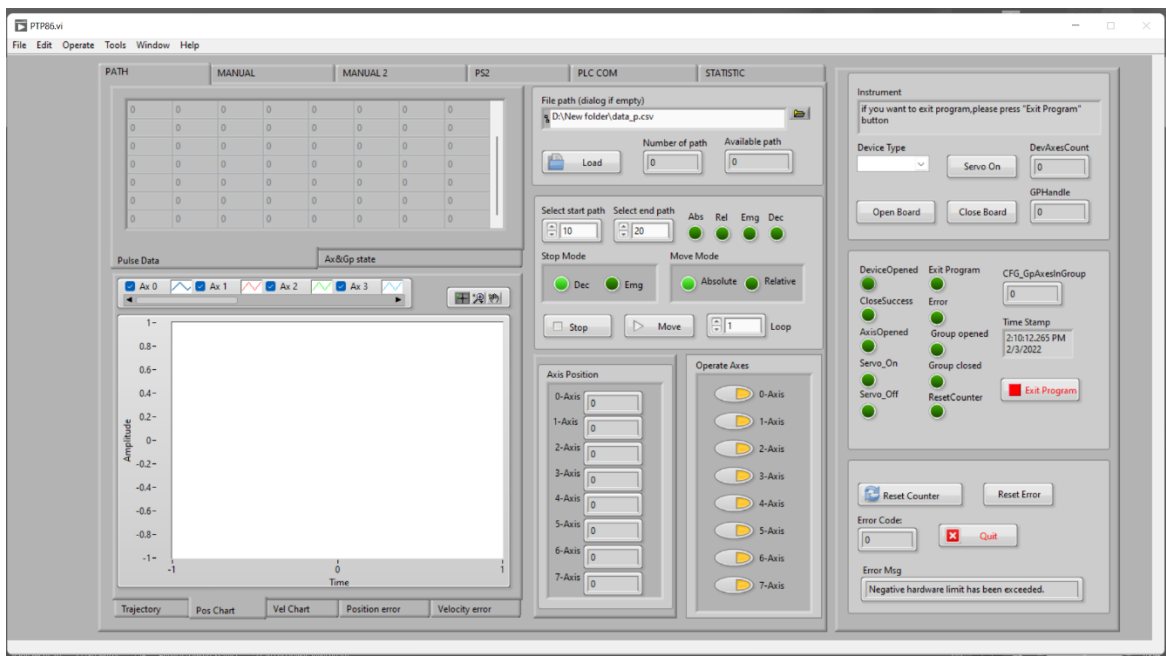
Bộ điều khiển robot song song cấu thành từ các bộ phận như máy tính bao gồm bộ xử lý trung tâm, bộ nhớ, ngoài ra còn card kết nối để làm bộ giao tiếp giữa máy tính và thiết bị ngoại vi, ở đây là các bộ điều khiển các động cơ servo cũng như các cảm biến gắn trên robot.

Bộ điều khiển trung tâm bao gồm một PC và một *motion control card* kết nối với nhau thông qua giao thức PCI. PC cung cấp cho người dùng giao diện điều khiển còn card PCI làm nhiệm vụ gửi tín hiệu điều khiển tới các thiết bị được điều khiển như servo drive. Hệ thống điều khiển được trang bị một máy tính, có khả năng kết nối với các thiết bị ngoại vi với các cổng PCI tích hợp. PC chạy trên hệ điều hành Windows 10 với 8Gb ram đủ đáp ứng cho hầu hết các phần mềm cần thiết. **Hình P.2** mô tả một trong 4 tủ điện hoàn thiện, các thiết bị điện được lắp đặt phù hợp. Mặt trên tủ điều khiển là bảng điều khiển chế độ manual động cơ servo, nó có bốn công tắc ON-OFF màu đỏ và hai công tắc ON-OFF-ON màu đen ở trên cùng của tủ điện. Từ bản điều khiển này, người vận hành có thể nhanh chóng sửa đổi các chức năng của bộ truyền động servo.



Hình P.2: Tủ điện hoàn chỉnh và các nút điều khiển AC servo

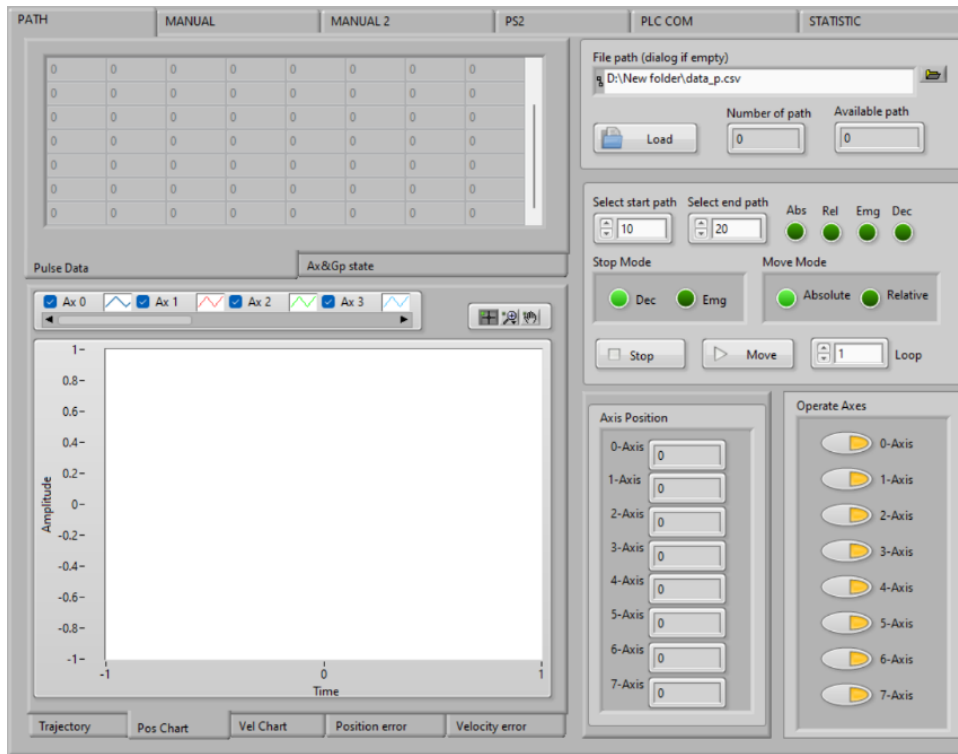
2. Thiết kế giao diện điều khiển



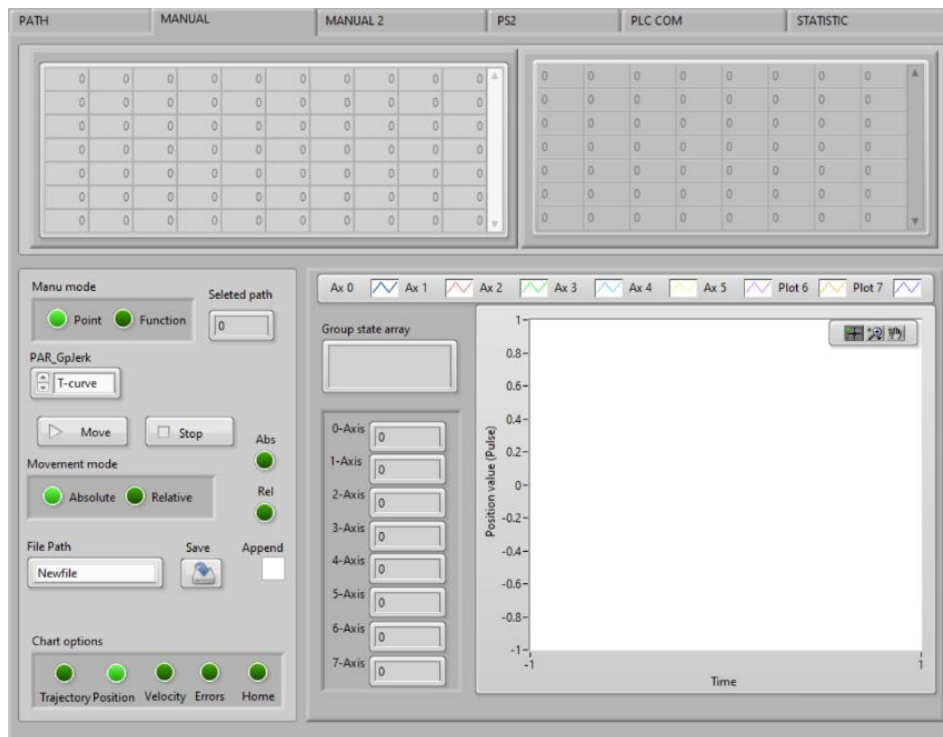
Hình P.3: Giao diện điều khiển

Hình P.3 mô tả giao diện điều khiển mặc định, bao gồm hai bố cục chính: bố cục cố định và bố cục tab. Các thao tác chính sẽ được nhóm lại thành một bố cục cố định, chẳng hạn như chọn thiết bị, bật và tắt thiết bị, tắt và bật servo, đặt lại bộ đếm, đặt lại lỗi, đèn LED trạng thái, thoát chương trình, v.v. Các phím chức năng, bảng và biểu đồ dùng để trình bày dữ liệu sẽ được sắp xếp theo nhiệm vụ của từng tab. Mọi dữ liệu khi thao tác trên từng tab sẽ được đồng bộ hóa, giúp người dùng dễ dàng quản lý và đánh giá tình trạng hoạt động của từng tab. Vị trí hiện tại của nền tảng di chuyển, chiều dài của dây cáp, quỹ đạo di chuyển mong muốn, vị trí xung hiện tại và vận tốc của các trục, sai số vị trí và vận tốc và trạng thái của các trục là những phần dữ liệu chính sẽ được đồng bộ hóa. Hơn nữa, nền là màu xám và trắng, và văn bản là màu đen, với các màu nhấn như vàng, đỏ, xanh lá cây và xanh lam để làm cho giao diện thân thiện với người dùng. Hơn nữa, phần mềm được phát triển bằng ứng dụng exe, giúp việc mở và chia sẻ ứng dụng trên các máy tính khác một cách đơn giản.

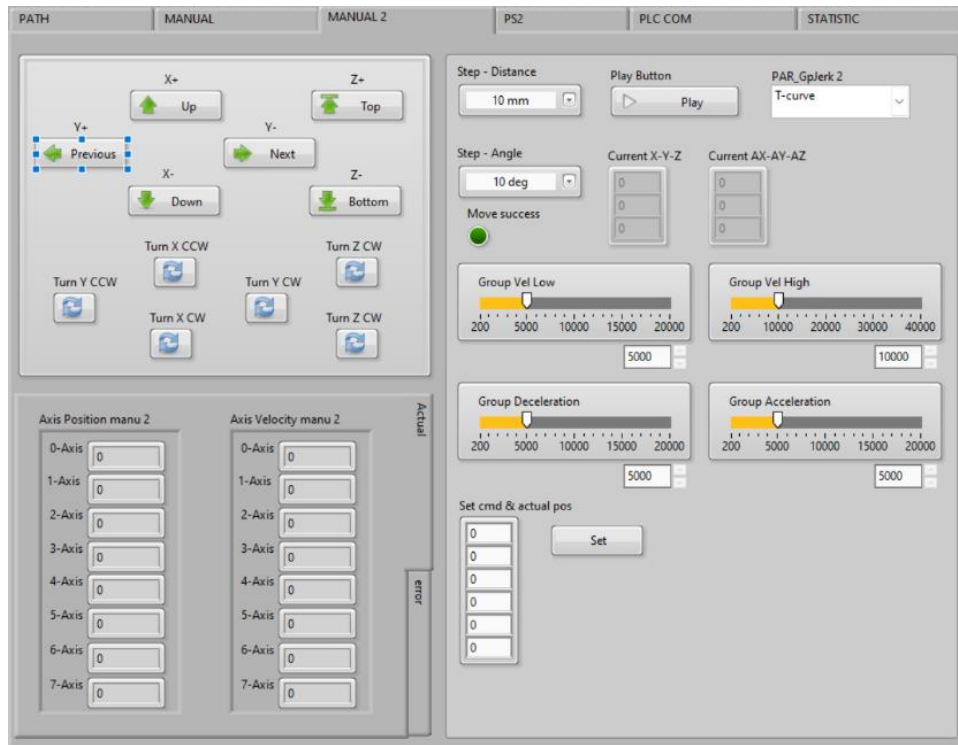
Tab PATH – **hình P.4** – là tab đầu tiên bên trái cho phép chọn số lượng trục tham gia vào chuyển động, mặc định là 8. Nhiệm vụ thứ hai là tải lên các tệp chứa dữ liệu được tạo sẵn và chọn số đường dẫn. Tiếp theo, việc tạo dữ liệu được thực hiện trong tab MANUAL **hình P.5**. Có hai phương pháp để tạo dữ liệu trong Tab, phương pháp đầu tiên là điền vào bảng tất cả các giá trị vị trí, gia tốc và vận tốc cho mỗi điểm, trong khi phương pháp thứ hai chỉ yêu cầu nhập quỹ đạo mong muốn thông qua các phương trình cho mỗi trục, sau đó máy tính sẽ thực hiện các lệnh đạo hàm để tính vận tốc và gia tốc. Tab này có một nơi để lưu các tệp dữ liệu đã tạo và có thể được mở bằng cách sử dụng tab PATH. Người dùng có thể chỉ cần điều khiển bộ di động bằng tab MANUAL 2 – **Hình P.6**, bộ di động sẽ di chuyển ngay khi bố trí các thông số xác định với 12 nút tương ứng với 3 phép tịnh tiến và 3 trục quay, cùng 4 thanh trượt để xác định vận tốc và gia tốc. Ngoài ra, có một danh sách để chọn chiều dài hoặc góc quay mỗi khi ra lệnh, cho phép người dùng thực hiện nhiều chuyển động một cách dễ dàng.



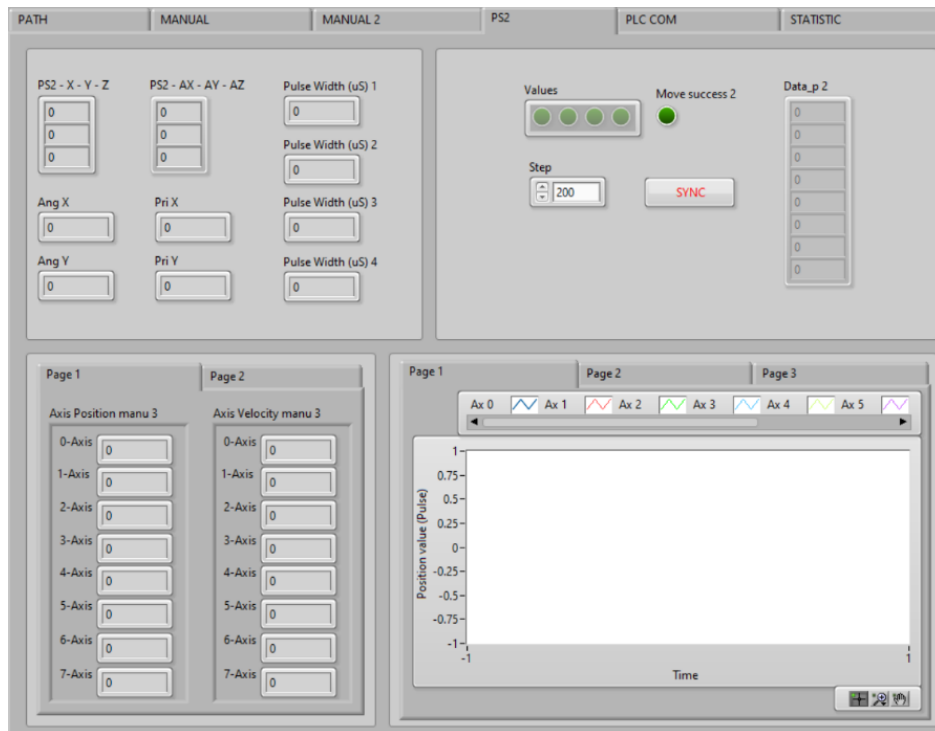
Hình P.4: Tab PATH



Hình P.5: Tab MANUAL



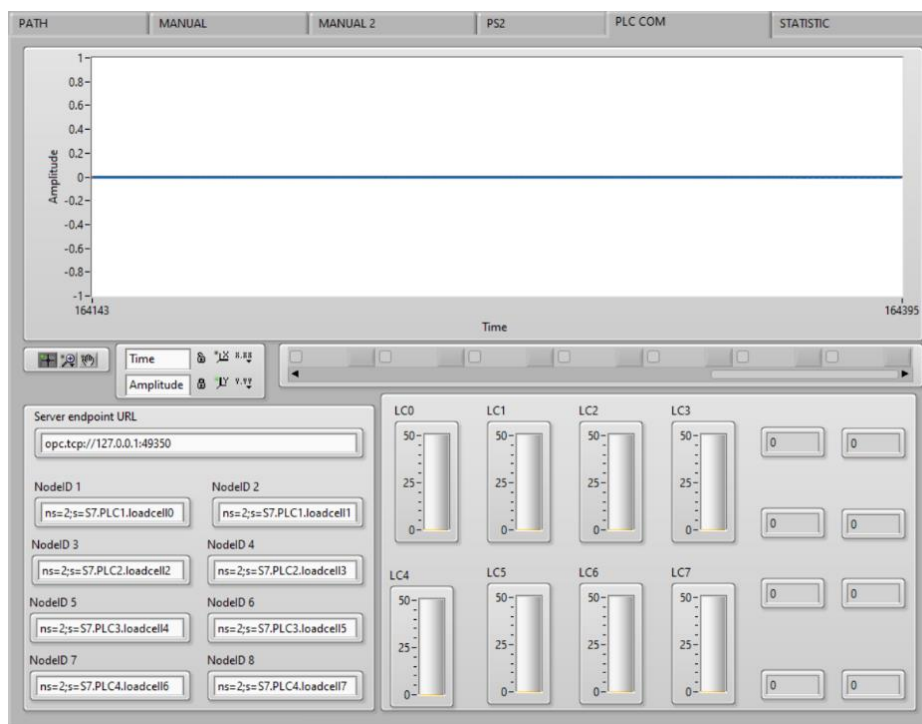
Hình P.6: Tab MANUAL 2



Hình P.7: Tab PS2

Tab PS2 **hình P.7** là tab thứ tư và nó khác với ba tab còn lại do được thiết kế thêm cho ứng dụng mô phỏng thực tế ảo. Bởi vì các lệnh được tạo ra bởi sự tương tác của người dùng với bảng điều khiển trò chơi PS2, đây là tab thực hiện phần lớn

đồ họa. Trong các tab như mảng bit, độ rộng xung, v.v., thông tin cần thiết để nhận tín hiệu từ bảng điều khiển trò chơi được cung cấp. Định dạng của tab PS2 gần giống với định dạng của tab MANUAL 2, ngoại trừ việc không có nút điều khiển nào trong giao diện. Nhiệm vụ chính của tab COM PLC, như thể hiện trong **hình P.8**, là hiển thị độ căng cáp được đo từ cảm biến loadcell. URL điểm cuối máy chủ và các nút ID cần thiết để kết nối và nhận dữ liệu từ máy chủ OPC được nhập vào góc dưới bên trái của tab. Có ba dạng hiển thị trong tab, bao gồm số, biểu đồ và chế độ bẻ, để xem và đánh giá đơn giản về lực kéo hiện tại được áp dụng cho mỗi cáp. Dữ liệu độ căng được biểu diễn chi tiết bằng cách sử dụng số thập phân, biểu đồ và dạng cột cho phép người xem nhanh chóng đánh giá hoặc định lượng độ lớn của lực, trong khi dạng biểu đồ mô tả mối quan hệ của các lực.



Hình P.8: Tab PLC COM