

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14629

研究課題名（和文）ワイヤのたるみモデルを用いた懸垂型パラレルワイヤ機構の動的制御手法の開発

研究課題名（英文）Study of Dynamic Control Method for Parallel Wire Suspending Mechanism based on Slack Model of Wire

研究代表者

遠藤 央 (Endo, Mitsuru)

日本大学・工学部・講師

研究者番号：50547825

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では作業や工場などで用いられる懸垂型パラレルワイヤ機構に着目し、ワイヤのたるみを含んだ設計論・制御理論の構築を目的とし、ワイヤたるみのモデル化、および、それを能動的に活用した制御手法の研究に取り組んだ。研究期間内に、力学的/幾何学的なワイヤたるみの発生条件についてのモデルを構築した。また、ワイヤたるみの動的モデルを構築し、それを利用した制御手法を提案、シミュレーションにより有効性を確認した。加えて、この制御手法を実機で実現するためのワイヤリール機構を設計・製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来研究では、高剛性、高精度かつ作業範囲が広い、過拘束型と呼ばれる物体を四方八方からワイヤで拘束する機構を主に対象としている。しかし、現実の作業や工場では物体をワイヤで過拘束することは少なく、上部から複数のワイヤで懸垂する懸垂型が一般的である。本申請課題では、例の少ない懸垂型機構の理論を構築したことに学術的かつ社会的に意義がある。また、従来のパラレルワイヤ機構で一般的であった物体の幾何学的位置決めではなく、力の釣り合いに着目した新しい力学的動的な位置決め手法は、従来のパラレルワイヤ機構の制御の根本的な概念から違う新しい手法であり、学術的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, focusing on a CSPM i.e. cable-suspended parallel mechanism, for achieving construction of theories for design and control of a CSPM, modeling of sagging of a cable and a control method utilizing cable-sagging have been researched. Result of the study, conditions for a cable sagging were discovered. Additionally, a dynamical model of a cable sagging was constructed. Utilizing models, a control method was proposed and valued by simulations. Furthermore, wire-reel mechanisms were designed and developed to realize the control method.

研究分野：ロボット工学，制御工学，システム制御，システムインテグレーション

キーワード：パラレルワイヤ機構 懸垂型パラレルワイヤ機構 マニピュレーション ロボット 位置決め制御 モデルベース制御 ワイヤリール機構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究に関連する国内外の動向および位置づけ

東京ゲートブリッジ工事に例を見る、複数クレーンやワイヤロープを多重に使う相掛けと呼ばれる施工例が増えてきた。現状ではこれらは作業者の経験と勘によるところが大きく、自動化もしくは作業支援技術は未熟である。このような複数のワイヤを並行して用いる技術は、ロボット工学においてパラレルワイヤ機構として2000年前後に多数の研究例が報告されている。一時は研究数が減少したが、2012年にはパラレルワイヤ機構のみを対象とした国際学会(CableCon)が立ち上がるなど近年になり再び注目されている。しかし、これら従来研究は、操作対象を四方八方からワイヤで固定する過拘束型を対象とする。一方で、工事などの作業手法ではワイヤで操作対象を吊り下げる懸垂型が一般的であり、研究とのミスマッチが見られる。

(2) これまでの研究成果を踏まえた着想

申請者は懸垂型パラレルワイヤ機構を研究してきた。従来の過拘束型の研究を応用し、作業空間解析や力センサへの応用などの基礎技術の研究および実証を進めている。また、ため池底質除去システムや太陽電池パネル検査システムへ応用し、実地で実験している。

これら研究の過程で、従来の過拘束型の理論は懸垂型においては有効でないことが確認された。一例としてパラレルワイヤ機構用いた力センサでは、過拘束型機構において操作対象に加わる力をワイヤ張力より算出できるとされる。しかし、懸垂型では理論的には解けるが、実験的には全く理論通りにならない結果が得られた。そのほかの理論についても同様な事例を確認できたため、本研究では運動/計測中の懸垂型機構を計測・観察したところ、容易にワイヤがたるむことが確認できた。

従来研究ではワイヤがたるまないことを前提とし理論を構築している。そして、その前提を実現するため、ワイヤがたるみづらい過拘束型機構を用いる。一方で、懸垂型機構では容易にワイヤがたるむため、前提条件が崩れ、理論通りの結果が得られないと考えられる。そこで申請者は、懸垂型機構を用いるためにはワイヤのたるみを含んだ設計論、制御理論が必要であると考えた。

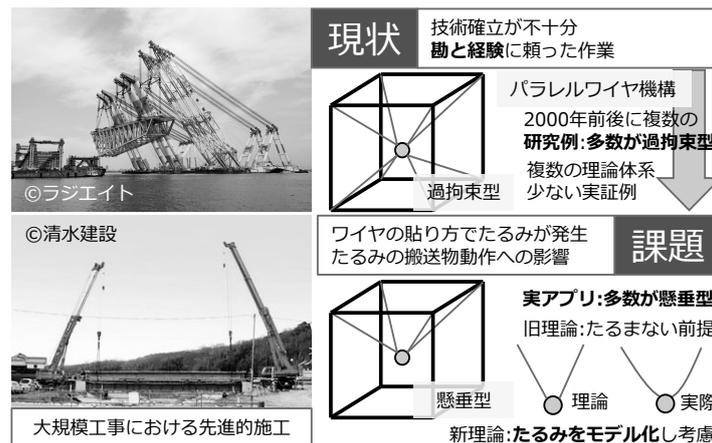


図1 学術的背景

2. 研究の目的

近年作業例が増えている懸垂型パラレルワイヤ機構によるあやつりは、研究例が少ない。申請者もこれまでに懸垂型パラレルワイヤ機構を実システムに応用してきた。その過程でワイヤのたるみにより理論通りの結果が得られないことが明らかになった。

そこで本研究では、ワイヤのたるみをモデル化する。また、実験を通してモデルを同定、検証する。構築したモデルをもとに、たるみの発生条件を検討する。最終的には従来技術の適用可否を実験より明らかにし、たるみを積極的に利用し、懸垂型機構においてけん玉やブランコのような動的な物体のあやつりに取り組む。これら技術はクレーン作業などに応用可能である。

3. 研究の方法

本研究では懸垂型パラレルワイヤ機構への、設計論や制御理論など従来研究の応用、ならびに巧みなあやつりを目的とし、以下の4つの研究に取り組む。

(1) 懸垂型パラレルワイヤ機構動作時のワイヤの挙動の解析・モデル化

懸垂型機構が動作しているとき、ワイヤがどのように動き、たるむかを計測する。得られた結果と、たるみを含むワイヤの物理式をマッチングし、モデルを構築する。

(2) 多次元物理量解析に基づく、ワイヤたるみ発生条件の調査

操作対象物を多様な静的/動的状態に設定し、そのときのワイヤの挙動とワイヤに加わる張

力, 操作対象物に発生する力を計測する. 得られた情報より懸垂型機構においてたるみが発生する条件を, 多様な物理量から検討し明らかにする.

(3) 過拘束型パラレルワイヤ機構理論の懸垂型パラレルワイヤ機構での検証

従来研究の過拘束型機構を対象とした設計論, 制御理論を構築した懸垂型機構へ適用する. 得られるワイヤの幾何学的・力学的情報に基づき, 応用の可否を明らかにする.

(4) たるみを積極的に用いた物体の運動制御 (図2)

上記のたるみ発生条件と, たるみ中のワイヤ挙動モデルをフィードフォワード的に用いることで, たるみを積極的に用いた物体のあやつり手法を構築する. 具体的にはけん玉のように物体を瞬間的に無拘束状態してダイナミックに操ることや, ブランコのようにスイングすることで機構的には実現不可能な速度の実現を目指す.

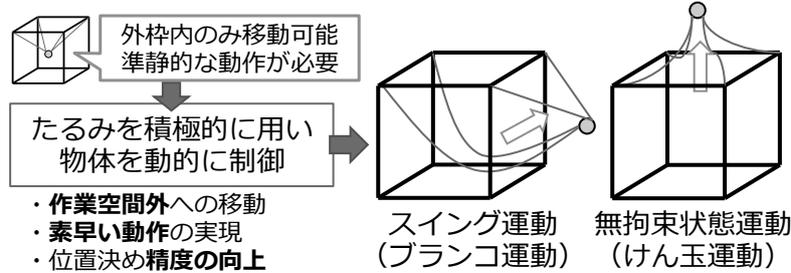


図2 たるみを積極的に用いた物体の運動制御

4. 研究成果

(1) ワイヤたるみの発生条件の力学的検討

本申請課題ではパラレルワイヤ機構におけるワイヤたるみの発生条件を明らかにするために, 単純なパラレルワイヤ機構においてワイヤ張力と懸垂物にかかる力の関係を力学的にモデル化し, 解析した. 解析の結果, 懸垂物を固定したワイヤ全てを張っていない状態, すなわち, いずれかのワイヤの張力が 0 になる状態においてワイヤのたるみが発生する結果が得られ, これをもとにワイヤがたるまない状態を理論的に明示化し, それを実験により検証した. 図3に検証に用いたモデルを示し, そのモデルにおいて理論的に解析したワイヤが張る/たるむ状態の境界を図4に示す. また, 理論的に解析した結果を図5に示す実験装置により図6に代表される結果により検証した.

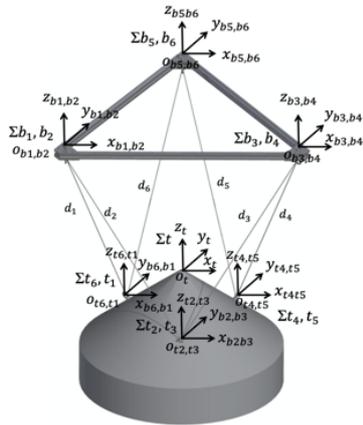


図3 ワイヤたるみ検証モデル

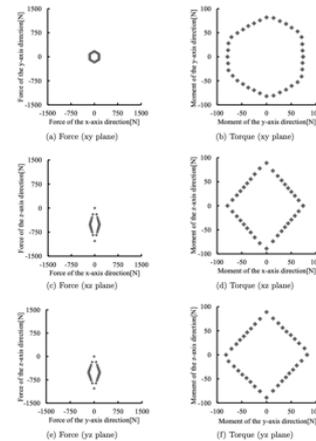


図4 理論解析結果

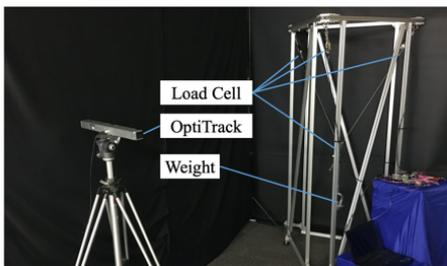


図5 検証実験装置

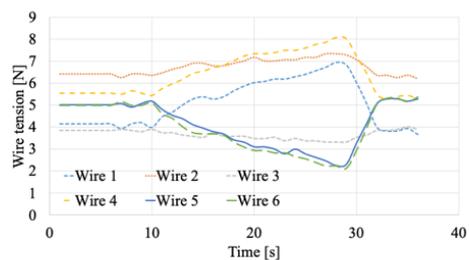


図6 検証実験結果

## (2) ワイヤたるみの発生状況の幾何学的検討

次に、幾何学的に発生したたるみの状況を考察するための理論構築と実験による検証を実施した。懸垂物の幾何学的位置とワイヤのたるみ幾何学的の関係を示すために、ロボットの多指ハンド等で用いられていた Form-Closure / Force-Closure と呼ばれる概念を応用した。これは、多指ハンドの各指が物体を把持したときに物体が固定されるか否かを幾何学的 / 力学的に議論するものである。これを懸垂物が空間に固定できるか否かの議論に拡張する。これにより、懸垂物とワイヤの固定位置に基づき、ワイヤたるみの発生を判定する条件式を構築した。また、図7に示す実験システムを構築し、光学的手法により構築した理論を検証した。

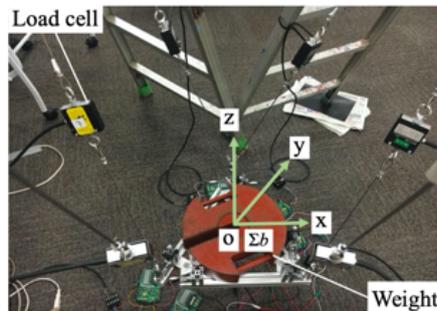


図7 たるみの発生確認のための実験装置

## (3) ワイヤにたるみが発生したときのワイヤ経路の検討

実際にワイヤがたるんだときのワイヤが描く曲線についてモデル化した。モデルは建築等において吊橋等の懸垂型の大規模建造物においてたるみの曲線を設計するために用いられる Catenary 曲線を応用し、モデルを構築した。また、これを検証するために高輝度反射マーカを用いたモーションキャプチャシステムで撮影可能なワイヤを開発し、検証実験を実施した。図8に実験装置を示し、図9に結果を示す。図からわかるように多少の誤差はあるが、概ね実際の曲線を近似できるモデルが構築できた。

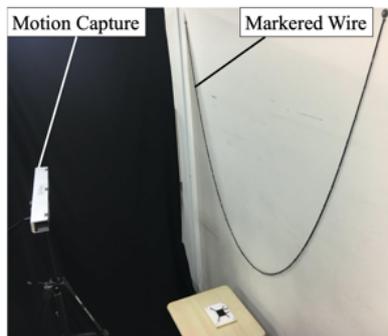


図8 たるみ形状実験

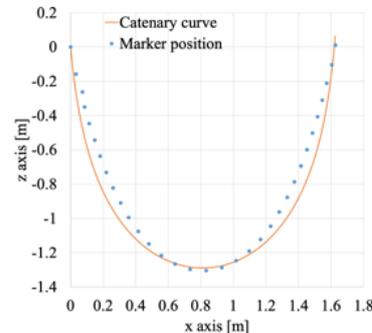


図9 たるみモデルの検証

## (4) たるみを応用した物体の動的操りが可能な平行ワイヤ機構のためのワイヤリール装置

本申請課題では、ワイヤのたるみの発生条件および発生後のワイヤの挙動についてのモデルを能動的に用いて、たるみを活用した物体の操りを目的としている。従来の平行ワイヤ機構を用いた操りのためのシステムは、一般的に操り対象物の目標位置を決め、その位置を実現可能な各ワイヤの長さを幾何学的に算出し、ワイヤ長さを制御できるワイヤリール装置によりワイヤ長さを実現することで位置決めする。一方で、平行ワイヤ機構により動的に物体を操る場合、ワイヤにより対象物に加わる力を操作し、物体の位置や速度を制御することが望まれる。したがって、従来のワイヤリール装置では位置の次元で制御するため、動的操りが実現できない。

そこで、ワイヤ張力が操作可能なワイヤリール機構を研究した。図10, 11, 12に開発したワイヤリール機構を示す。全てのワイヤリール機構において、ワイヤの重畳による巻き上げ半径の変化や、リール上でのワイヤ引き出し位置によるワイヤ長さの変化が発生しないよう、同一のピッチを持つスパイラルプーリとボールねじを用いた機構を採用している。図10に示すワイヤリール機構ではワイヤリールにベルト・プーリ機構で直結したモータをトルク制御することで、ワイヤリール軸まわりのトルクを操作し、ワイヤ張力を調整することをコンセプトとしている。本システムによりワイヤ張力の調整を実現した。しかし、高い懸垂容量を得るためにモータにギアヘッドを用いているため、バックドライバビリティが得られず、0近傍のワイヤ張力が実現できない。ワイヤのたるみはワイヤ張力が0の状態が発生するため、たるみを能動的活用した位置決めが困難であることがわかった。

それを受け、図11, 12に示すワイヤ張力を機械的に操作できるリール機構を提案、開発した。

図 11 に示すリール機構は市販の釣用電動リールを用い、機械的クラッチの滑り状態、いわゆる半クラッチの状態を作り出し、クラッチの摩擦を調整することで高い懸垂容量を持ちながらトルク 0 近傍においても力を調整可能にした。しかし、モータ自体は常に最大容量で回転させるためエネルギー効率が悪い。そこで、図 12 に示す、カウンタウェイトを利用したリール機構を開発した。この機構ではワイヤリールおよびカウンタウェイトは、その軸回りをフリーに回転する。ワイヤリールとカウンタウェイトの相対角度をカウンタウェイトに搭載したサーボ系により制御し、環境に対してのカウンタウェイトの角度を調整することでリール軸回りのトルクを制御する。これらの機構によりワイヤの張力を 0 近傍から最大容量までの制御を実現した。

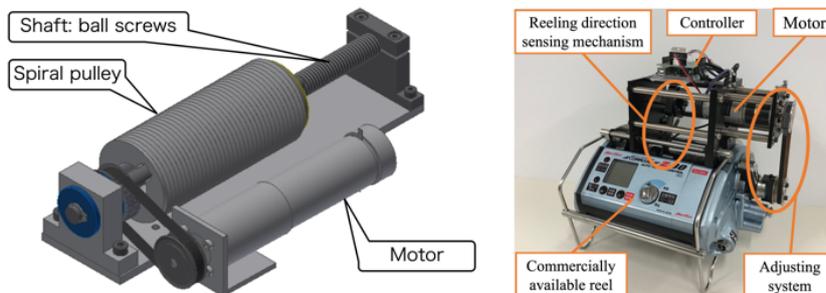


図 10 軸直結式ワイヤリール機構 図 11 クラッチ式ワイヤリール機構

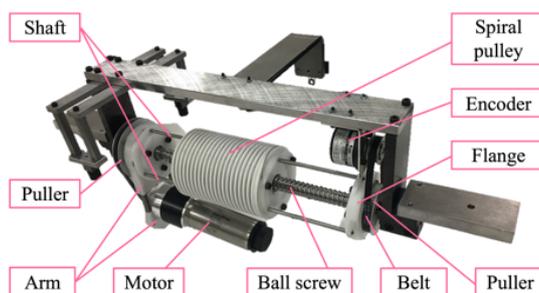


図 12 カウンタウェイト式ワイヤリール機構

#### (5) ワイヤ張力を調整する動的位置決め制御

本申請課題では、ワイヤ張力の調整を前提とした制御手法を研究した。これを通して、張力を操作し、操作対象物に発生する力を調整することで動的に位置決め制御する手法を提案し、実現した。具体的には、目標位置に操作対象物が存在するときにおける操作対象物の力の釣り合い状態に物体まわりの力、すなわち各ワイヤの張力を制御することで、目標に物体の位置が収束することを、目標位置まわりのエネルギーのポテンシャル勾配を元にして示した。また、この収束する現象を利用し、制御系を設計し、図 13 に示す平行ワイヤ機構を構築したシミュレーションにより、目標位置に収束することを確認した。図 14 にシミュレーションの結果を示す。

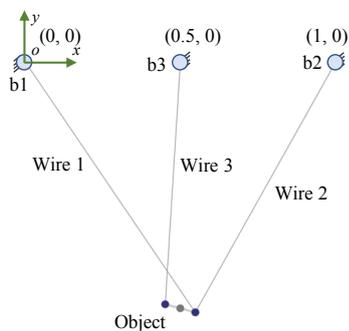


図 13 シミュレーション環境

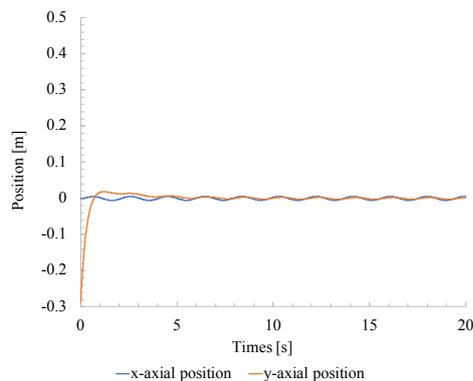


図 14 シミュレーション結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 遠藤央, 菅原雄介, 武藤伸洋, 柿崎隆夫
2. 発表標題 機械的平衡点に着目したパラレルワイヤ機構による物体の位置決め
3. 学会等名 第18回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷沢蒼太郎, 相樂森, 渡辺敦士, 遠藤央, 菅原雄介, 武藤伸洋, 柿崎隆夫
2. 発表標題 市販電動リールを活用したトルク調整式高出力ワイヤリールロボット
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 相樂森, 遠藤央, 菅原雄介, 柿崎隆夫, 武藤伸洋
2. 発表標題 懸垂型パラレルワイヤ機構における力の釣り合いと弛みの発生条件の実験的検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 相樂森, 渡辺敦士, 遠藤央, 菅原雄介, 柿崎隆夫, 武藤伸洋
2. 発表標題 市販電動リールを活用したパラレルワイヤシステムのための複数協調型ワイヤ巻取りロボットの設計
3. 学会等名 日本設計工学会2017年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 相樂森，遠藤央，菅原雄介，武藤伸洋，柿崎隆夫
2. 発表標題 懸垂型パラレルワイヤ機構による位置決めに関する研究，-ワイヤのたるみに着目した物体の状態判別-
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷沢蒼太郎，遠藤央，菅原雄介，武藤伸洋，柿崎隆夫
2. 発表標題 懸垂型パラレルワイヤ機構による位置決めに関する研究，-過拘束型/懸垂型の構成が変更可能なパラレルワイヤ実験装置-
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉澤汐理，遠藤央，菅原雄介
2. 発表標題 力学的平衡状態に着目したパラレルワイヤマニピュレーション
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----