

令和 4 年 10 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04044

研究課題名(和文) 高強度化学繊維ワイヤ駆動系設計論の構築とプロペラ自重補償型超軽量アームへの適用

研究課題名(英文) Establishment of design theory for tendon-driven mechanism using synthetic fiber ropes, and its application to ultra light weight arm with gravity compensation by propellers

研究代表者

遠藤 玄 (Endo, Gen)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：70395135

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、高強度化学繊維ワイヤの(1)摩擦熱に対する耐久性、(2)繊維原糸の編み方による出力最大化、(3)ロープ径のスケールビリティの3点を検討した。さらに高強度化学繊維ワイヤを用いてプロペラで自重を補償する超軽量アームの実現可能性について検討した。全長12.4 m、質量19.2 kgの超軽量長尺アームの浮上に成功するとともに、より剛性の高い機構構成法を新たに提案し、試作機によりその有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学繊維ロープの基礎特性について3つの観点から検討を行った。現在データと取りまとめ中であり、まとまり次第順次論文化し、公知化してゆく予定である。このような基礎的データはロボット工学のみならず汎用的な機械設計の指針となり得る。また従来の金属製ワイヤロープでは実現しえないロボット機構を創出することが出来る可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In this project, we studied basic properties of synthetic fiber ropes such as (1) durability against heat due to friction, (2) structure of synthetic fiber rope that maximizes output power of the wire-driven system, (3) scalability of the diameter of the synthetic fiber rope. Additionally, we investigated a feasibility of a super lightweight, super long reach articulated manipulator driven by thrusters using a wire-pulley parallel link mechanism. A 12.4-meters long, 19.2 kg weight prototype model succeeded to float in the air. Moreover, we proposed a new mechanical structure which achieve higher rigidity around the longitudinal axis, and demonstrated its effectiveness by experiments with a prototype model.

研究分野：ロボット工学

キーワード：高強度化学繊維 ワイヤ駆動 マニピュレータ 自重補償

## 1. 研究開始当初の背景

ワイヤーロープによる駆動は(1)動力源と離れた場所を駆動できる(2)極めて大きい変位を生成できる(3)異なるプリー径・動滑車を用いれば力や速度を変換できる(減速機になる)(4)複数の従動軸を同時に駆動できる(5)安価である、といった他の機構では代替できない特異な機能性を有する。

従来、駆動用ロープとして用いられてきたのは鋼鉄製のワイヤーロープであり、日本工業規格(JIS)や各種法令においてエレベータ、航空機など用途ごとに破断荷重や耐久性の試験方法、設計上の安全率が規定されている。

一方、近年、アラミド・高密度ポリエチレン・ポリアリレート・PBOなど軽量かつ高強度の化学繊維が開発され、釣糸や船舶係留用ロープ、防弾チョッキなどに実用化されている。ロープ繊維の最小単位である原糸と比較した場合、例えばPBO繊維はステンレスに比して引張強度では2.1倍、縦弾性係数はほぼ同等かそれ以上でありながら、密度はわずか1/5であり、**単位質量あたりの強度ではステンレスを遥かに凌ぐ物性値**である。もしロボットの関節やクレーンなどに代表される機構駆動系に**化学繊維を用いることが出来れば従来にない著しく軽量・コンパクト・高耐荷重の駆動機構が実現出来る**。実際に申請者らが開発した全長2.4mの多関節マニピュレータ、1.36m/sの速さで歩行可能な四脚歩行ロボットを図1、2に示す。

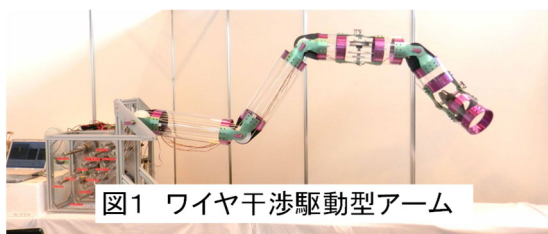


図1 ワイヤ干渉駆動型アーム



図2 四脚歩行ロボット  
TITAN-XIII

ところが実際に設計してみると化学繊維ロープに対しては、金属製ロープのような工業規格や汎用的な設計指針は存在しておらず、最も基本的な特性である繰返し曲げに対する耐久性ですら未知であった。また原糸・ロープメーカから提供されるカタログ値は実験条件などが各々異なり、比較することが困難であった。すなわち化学繊維ワイヤを駆動機構として用いるための基礎的な知見は圧倒的に不足している現状では、**金属製ワイヤを実用的に代替可能かは明らかではない。**

## 2. 研究の目的

本研究の目標は、**化学繊維ワイヤによる駆動系を設計するための、客観的かつ汎用的な設計指針を確立すること**である。端的に言えば機械工学便覧に掲載されることを目標としている。従来の化学繊維ワイヤを用いた機構は経験則あるいは試行錯誤的に設計され、実用化に必須の耐久性や安全率については検証されなかった。それゆえ、従来研究のほとんどは実験室レベルに留まっている。本研究は化学繊維ワイヤそのものの物性値から把握し、より包括的かつ公平なデータを提供する。この結果は**化学繊維ワイヤ駆動系をもつすべての研究の礎となる**。また計測比較は特定のメーカではなく、公平中立性をもつ学術研究機関こそが行うべきものである。一見地味な基礎的検討であるが、本研究は化学繊維ワイヤによる駆動系を真に実用化可能な技術に昇華するために欠くことが出来ない基礎研究である。

さらに本研究により化学繊維が金属製ワイヤを代替できることが明らかになればロボット機構のみならずクレーンやロープウェーなど多くの既存の産業用機器に対し新たな選択肢を提示することができる。化学繊維の製造技術において日本は世界のトップレベルであり、世界の先陣を切って**化学繊維ロープの新たな応用先を展開し需要を創出していく**ことは産業的見地からも重要である。

## 3. 研究の方法

本研究の概要を図3に示す。

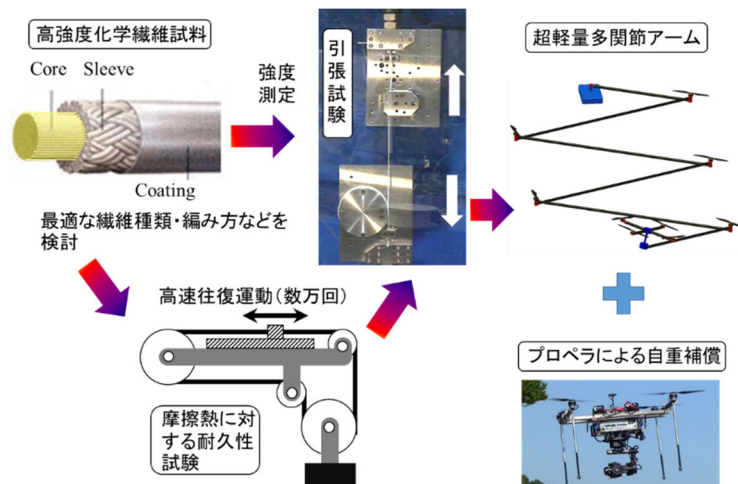


図3 本研究の概要

現在までに基盤(C)25420214において、 $\Phi 2\text{mm}$ のロープを対象として、静的曲げによる強度低下、繰り返し曲げに対する耐久性、端部固定法、プーリの効率について実験的に明らかにしている。本研究では、以下の3項目を検討する。

- (1) 摩擦熱に対する耐久性
- (2) 繊維原糸とその編み方による出力最大化
- (3) ロープ径のスケラビリティ

(1)今までに開発した繰り返し曲げ耐久性試験機を図4に示す。上部に設置されたりニアアクチュエータによりロープをテストプーリ上に繰り返し往復運動させ、この部分の破断強度を計測することで耐久性を評価する。本試験機はISO2020-2, JIS3535に準拠しており金属製ロープと公平な比較を行うことが出来る。本装置を改良し高速駆動した場合の屈曲部の摩擦熱を計測するとともにロープの強度低下を引張試験により評価する。(2)機械出力は張力と速度の積で表されることから、より大出力を伝達するには高張力かつ高速が望ましいが、これらは(1)の熱への耐久性の観点からトレードオフであると考えられる。様々な繊維原糸を用いて製紐法(編み方)を変化させて試験を行うことで最大出力を伝達することの出来るロープ構成法を確立する。(3)さらに従来は直径2mmのロープのみで行っていた特性試験を1mm~6mmまで幅を広げて行うことで、汎用性があるか確認する。

さらに得られた結果を用いて、化学繊維ワイヤ駆動の軽量性を最大限に活かした設計例として、超軽量長尺多関節アームを開発する。化学繊維ロープの軽量性と、近年発展が目覚ましいドローン技術によるプロペラ自重補償機構とを組み合わせることで、**世界最長となる20m以上のロボットアームの開発に挑戦する。**長尺化に伴う大きな自重トルクを各節に配置したプロペラで補償するとともに、各関節を化学繊維ワイヤで駆動する。アクチュエータはすべて基部に設置することで、極めて軽量かつ長尺のロボットアームが構成可能である。本アームは圃場の農薬散布や橋梁点検に应用することを想定している。

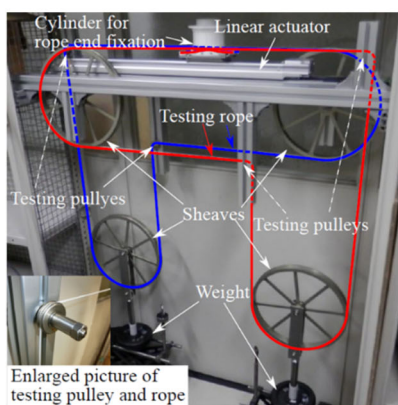


図4 耐久性試験機



図5 異なる素材の試験ロープ

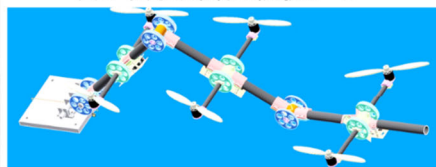


図6 超軽量アーム試作機

## 4. 研究成果

### (1) 摩擦熱に対する耐久性

図4に示す繰り返し曲げ耐久性試験機を用いて試験を実施した。屈曲部の摩擦熱の発生の違いを計測するために金属製(アルミ、ステンレス)、樹脂製(POM)のテストプーリを作成し樹脂製ロープ(ダイニーマ、ザイロン、ベクトラン製)の繰り返し曲げ耐久性試験を実施した(図7)。またプーリ径を変えた試験、ロープの掃引速度を変えた試験を実施した。試験中は熱画像の撮影を実施し摩擦熱の発生を記録した。

熱画像は図8のように繰り返し曲げ耐久性試験中のプーリ部及びその周辺のロープを撮影した。この画像の様にテストプーリ及びロープそれぞれに摩擦熱が発生していることが判った。図9は図8と異なった材質のテストプーリでの繰り返し曲げ耐久性試験中の熱画像であり、テストプーリ及びロープでの摩擦熱の発生その伝達が異なることが判った。これら熱画像よりロープの材質とテストプーリの材質の組み合わせにより、屈曲部のロープ及びテストプーリの温度は大きく異なることが判った。これは摩擦熱の発生及び伝達がロープ、テストプーリそれぞれの材質の比熱の影響を受けているものである。(なお掃引速度を増加し高速での試験を実施した場合は摩擦熱の増大により繰り返し曲げ耐久性試験中のロープの破断などが多く発生し体系的な結果は得られなかった。)繰り返し曲げ耐久性試験後の試験片は引張強度測定を実施した。

これらの結果からプーリの材質および樹脂製ロープの材質の差により異なった量の摩擦熱が発生し、それに伴い破断強度の変化が生じることが明らかになった。



図7 耐久性試験中のプーリ部

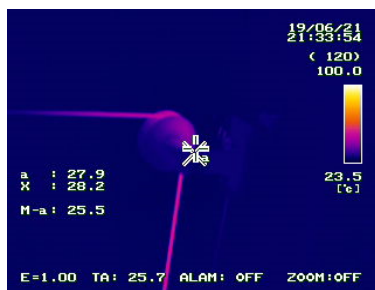


図8 熱画像1

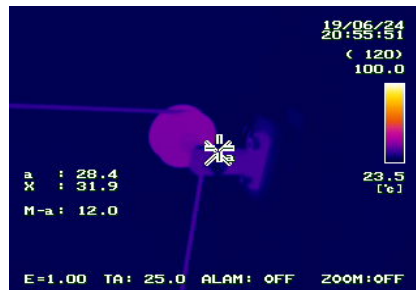


図9 熱画像2

### (2) 繊維原系とその編み方による出力最大化

ロープによる駆動は繰り返し曲げを受けることから、その屈曲耐久性が、駆動機構が破損に至るまでの間に出しうる仕事の最大値を規定することとなる。繊維原系の構成法によって屈曲耐久性がどのように変化するのか、ポリアリレート繊維ロープについて系統的に調べた。ロープを構成するストランド数・編み方(丸打ち・角打ち)、複数潤滑剤の検討を行うことで、従来に比して2倍の屈曲耐久性をもつロープの構成法を明らかにした。しかしながら製紐条件などに大きく依存して強度が変化することが分かり、一般化するには至らなかった。

加えて軽作業マニピュレータを用いて化学繊維ワイヤ駆動系の繰り返し駆動耐久実験を行い、芯糸をPBO繊維、側糸を高密度ポリエチレン繊維で構成したロープを用いた場合、軽荷重であれば100万回の駆動が可能であることを明らかにした。

### (3) ロープ径のスケラビリティ

申請者らはこれまで主に直径2mmのロープを用いて化学繊維ロープによる駆動系の開発及び化学繊維ロープの特性の研究を行ってきた。これまでの研究からロープの引張強度測定には端部固定法及びオイラーのベルトの定理を利用して摩擦力を増大させた機構が重要であることが判っている。一方、ロープの直径を増加させた場合、その強度はその構成する繊維の量により強度が増加し、理論的にはロープの断面積に比例すると考えられる。このため、これまで直径2mmの引張強度測定に使用していた治具では、直径がより太く引張強度が高いロープの引張強度測定においては、端部固定力や構造的な強度が十分でなく測定が実施できない。従って、新たな治具の開発を行ったうえで、引張強度測定を実施した(図10)。

使用したロープは通常販売品(ハヤミ工産製)の樹脂製ロープ(ダイニーマ、ザイロン、ベクトラン)の直径2mm~6mmの物を使用した。従来の治具を使用して直径2mm及び3mmのロープの引張強度測定を実施し、新規の治具を使用して直径4mm及び5mmのロープの引張強度測定に成功した。一方直径6mmのロープに関しては、新規治具においても端部固定部の強度が不十分であったので、さらなる治具改良が必要なことが判った。実験の結果から、直径2mm~5mmのロープで

は半径の二乗に比例して引張強度が増加しないことが明らかとなった。

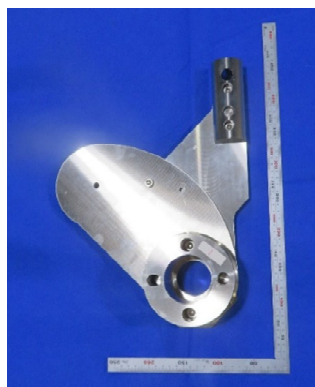


図 10 太径ロープ用治具



図 11 新規開発治具による引張強度測定

#### (4) 超軽量長尺多関節アームへの適用

まず従来から検討している、炭素繊維強化プラスチック製の細径パイプによる平行リンク機構による構成を長尺化することを検討した。従来は、1ユニット当たり 2.2 m であったのに対し、これを 4.0 m にまで延長するとともに、自重補償用プロペラの配置や制御系を改良することで、全長 12.4 m、質量 19.2 kg の超軽量長尺多関節アームを構成した。福島県楡葉町の遠隔技術開発センターにて実験を実施し、全体を浮上させることに成功した (図 12)。

一方で、関節角度の制御は安定せず、所望の関節角度を維持することが困難であることが明らかとなった。その理由の一因は、細径パイプによる平行リンク機構がアーム長軸周りのねじれに弱く、プロペラが傾くためである。これを機構的に抑制するため、太径パイプを用い、内部に化学繊維ロープとプリーを用いた等価平行リンク機構を導入した (図 13)。これにより大幅に機構剛性を向上することが出来た。全長 3 m、質量 2.9 kg の 2 節モデルを試作し、浮上実験に成功するとともに、安定した関節角度制御を実現することが出来た (図 14)。さらに目標タスクに応じてプロペラ配置や関節角度を最適化する数値計算手法も開発した。

今後は各節のリンク長を延長するとともに、節数を増やすことで全長 20 m を実現することが可能であると考えている。

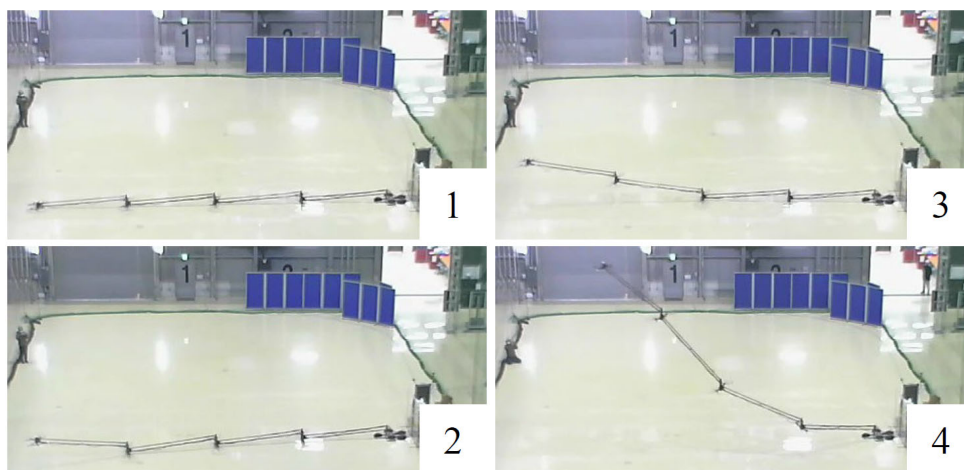


図 12 全長 12.4m の超軽量長尺多関節アームの浮上実験

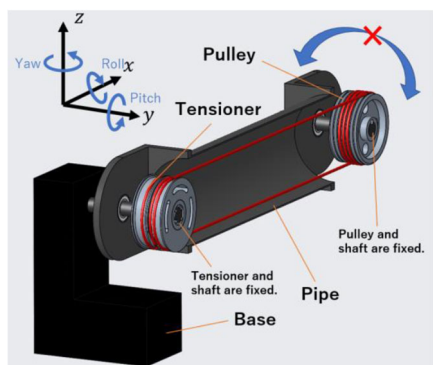


図 13 ワイヤープリー等価平行リンク機構

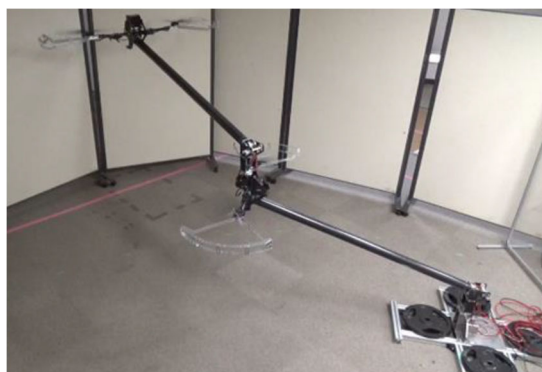


図 14 全長 3 m、2 節での関節制御実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yusuke Ueno, Tetsuo Hagiwara, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo	4. 巻 5
2. 論文標題 Development of Hiryu-II: A Long-Reach Articulated Modular Manipulator Driven by Thrusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4963 ~ 4969
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.3004775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Siyi Pan, Gen Endo	4. 巻 8
2. 論文標題 Toward mission-dependent long robotic arm enhancement: design method of flying watch attachment allocation based on thrust drivability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-021-00198-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 遠藤玄
2. 発表標題 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 – 第十報：マニピュレータ関節駆動耐久試験–
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Ueno, Tetsuo Hagiwara, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
2. 発表標題 Development of Hiryu-II: A Long-reach Articulated Modular Manipulator Driven by Thrusters
3. 学会等名 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野雄祐, 萩原哲夫, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
2. 発表標題 スラスト駆動型超長尺多関節アーム “ 飛龍-II ” の開発 -12 m試作機の浮上実験-
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中出尚宏, 難波江裕之, 鈴森康一, 萩原哲夫, 遠藤玄
2. 発表標題 スラスト駆動型超長尺多関節アーム “ 飛龍-III ” の開発 -ワイヤープリー系による平行リンク機構と中空パイプを用いたねじり剛性の向上-
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
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関