

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420214

研究課題名(和文) 高強度化学繊維を用いたワイヤ駆動系の基礎的検討と六脚一腕作業移動ロボットへの適用

研究課題名(英文) Basic investigation of high strength synthetic fiber ropes for wire driven system and its application to arm equipped hexapod robot

研究代表者

遠藤 玄 (Endo, Gen)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70395135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットなどの機構駆動系に高強度化学繊維を用いることが実的に可能か、検討を行った。プーリに架け渡す際の伝達効率や、曲げによる強度の低下、繰り返し曲げに対する耐久性、端部の固定方法などを実験によって計測し、諸特性を明らかにした。その結果、プーリの伝達効率は極めて高いこと、金属製ロープと同様に曲げにより強度低下を起こすこと、繰り返し曲げでは金属製ワイヤを超える耐久性がある素材があること、実用的な端部固定法などを明らかにした。また高強度化学繊維を用いて農場モニタリング用六脚一腕ロボット、原発用長尺多関節アームおよび軽量4足歩行ロボットを開発し高強度化学繊維が実用的な駆動系になり得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated high tensile strength synthetic fiber ropes for a robot joint driving mechanism. We measured and investigated (1)transmission efficiency when a synthetic fiber rope is wound around a pulley, (2)strength reduction due to sharp bending, (3)strength degrade due to repetitive bending and (4)terminal fixation method. We showed that (1)transmission efficiency is very high, (2)strength reduction occurs in case of synthetic fiber ropes similar to a metal rope, (3)some material demonstrate higher repetitive endurance compared with a stainless rope, and (4)mechanical design of practical fixation method which can achieve sufficient fixation strength. We also developed an arm equipped hexapod robot for agricultural field, a long-reach multi-joint arm for decommissioning task and a sprawling-type lightweight quadruped. These robots prove the synthetic fiber rope can be used for practical robotic system.

研究分野：知能機械システム

キーワード：化学合成繊維 ロボット ワイヤ 駆動機構

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)減速機構になる(4)複数の軸を回転できる(5)安価になり得る、などの特徴がある。従来はワイヤの素材として金属が用いられており、ステンレスワイヤなどがロボットの関節を動かすために用いられてきた。一方、近年、アラミド・超高分子量ポリエチレン・ポリアリレート・PBOなどのいわゆる「スーパー繊維」と呼ばれる軽量かつ高強度の新しい化学合成繊維が開発され、釣り糸や船のもやい、登山用ロープ、防弾チョッキなどに実用化されている。例えばPBO繊維は、金属に比して2倍以上の引張強さでありながら重さはわずか5分の1である。よってもしこれらの繊維がロボットの駆動機構に使えば、より軽量で強度の高い関節機構が実現できる。

このような背景から、従来さまざまな試作検討が行われてきたが、その多くは特定のロボットのための製作を目的としたものであったり、場当たりの設計であったりして、一般的で様々なロボットに適用できるような基本的な設計指針がなかった。

2. 研究の目的

本研究は、ロボットなどの機構駆動系に高強度化学繊維を用いることが可能かを、基礎的特性試験から実ロボットシステムの構築まで行うことで検証するものである。基礎的特性試験では、(1)プーリにロープを架け渡す際の力の伝達効率、(2)プーリによる曲げとロープ強度の関係、(3)繰り返し曲げを受ける際のロープの耐久性、(4)コンパクトでありながら端部を十分な力で固定できる方法を検討し設計指針を確立する。

実ロボットシステムとしては、(5)農場モニタリングのための六脚一腕ロボット、(6)原発用長尺多関節アームおよび(7)軽量4足歩行ロボットを開発し、その運動性能を実験により確かめることで、化学繊維ロープを用いた駆動系の実用性を検証する。

3. 研究の方法

(1)伝達効率の計測は、複数プーリに化学繊維ロープを巻きかけ、ロープの端部に異なる重さの重りを吊るし、ロープが動き出すときの2つの重りの質量の差を測定した。

(2)様々な直径のプーリにロープを巻きかけて端部を固定し、引張試験機にてロープが破断する荷重を計測した。

(3)航空機用ワイヤーロープ(JIS G 3535)規格に従った試験機を開発し、7万回の繰り返し曲げ試験を行い、その後引張試験機で破断荷重を計測した。

(4)結び・カシメ・縫製などの様々な固定方法で端部を固定し、引張試験機で固定力を計測した。

上記の結果を踏まえて、実ロボットシステム

(5)(6)(7)を構成し、ロボットシステムとしての評価を行う。

4. 研究成果

(1)力の伝達効率

クレーンなどの設計では、プーリを一つ経由するごとに伝達される力は2~5%低下することを見込むように設計指針が示されている。線径0.85mmの超高分子量ポリエチレンロープを直径170mm、内径20mm、外径32mmのボールベアリングにて軸着されているプーリに巻きかけた場合の効率を図1に示す。この結果から、プーリを4つ経由する場合でも、力の伝達効率は99.5%以上であり、本実験条件では極めて高い伝達効率であることが明らかになった。原発用の超長尺多関節アームでは将来的に15個のプーリを經由することを想定しているが、その場合であっても効率は99%となることが実験結果から予想される。

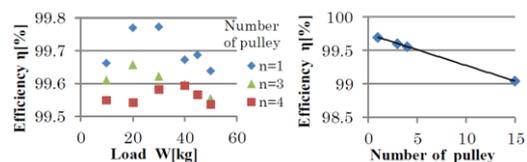


図1 プーリの張力伝達効率

(2)プーリによる曲げとロープ強度

直径2mmの化学繊維ロープを、6~100mmの範囲の様々なプーリに巻きかけ、両端を固定し引張試験機で引っ張ることで、破断時の荷重を計測した。比較対象としてステンレスワイヤーロープでも同様の実験を行った。プーリ直径をD、ロープ直径をdとし、その比をD/dと記した場合の測定結果を図2に示す。化学繊維ロープはしなやかに曲げられることから、小さなプーリに対しても強度低下が起こらないと予想していたが、結果はステンレスワイヤとほぼ同様の傾向を示すことが明らかになった。この結果から強度低下が起きないプーリ径はロープ径のおよそ19倍程度である。最も急峻な曲げである「結び」を作ると、その強度は半分以下になることを示している。

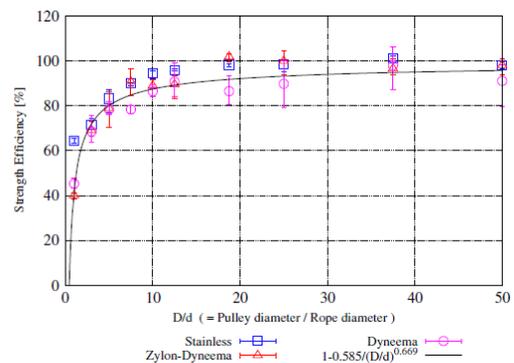


図2 D/d と強度低下

(3) 繰り返し曲げに対するロープの耐久性
 航空機用のワイヤーロープについて日本工業規格 (JIS G 3535) に準拠した繰り返し曲げ試験機を製作した (図 3)。図中、赤線・青線で表されるようにロープが巻きかけられ、耐久試験用プーリ (直径 24mm) を通過する際に繰り返し急峻な曲げを受ける。リニアアクチュエータを左右に往復させ 7 万回の繰り返し曲げを行う。1 回の試験に要する時間はおよそ 10 時間で、一度に 4 つの試料を得ることが出来る。繰り返し曲げ後に引張試験を行い、破断荷重を計測した。繰り返し曲げを受ける前の強さを 100 とした場合の結果を図 4 に示す。比較対象のステンレスロープではほとんど強度低下が起こらないのに対し、超高分子量ポリエチレンロープ (Dyneema) はわずかに低下することが明らかになった。一方 PBO 繊維を芯線とするロープ (Zylon-Dyneema) では大きく強度が低下することが分かった。なお超高分子量ポリエチレンロープの最大引張荷重は 420kgf であり、若干の強度低下を見込んでなお、ステンレスロープ 340kgf より高い強度である。

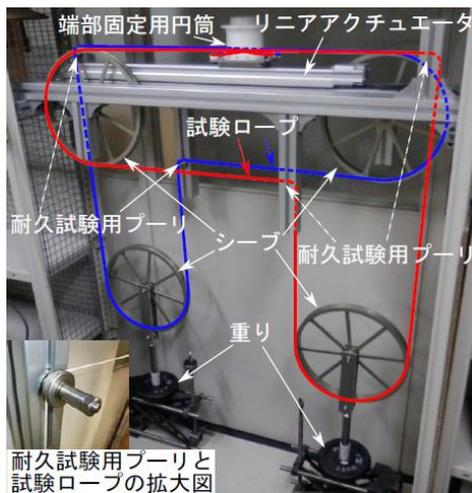


図 3 繰り返し曲げ試験機

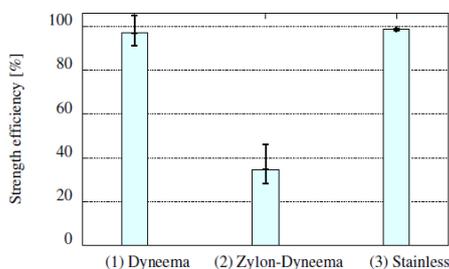


図 4 耐久試験後の強度低下

(4) 端部固定法

端部を固定する方法として、①金属部材でロープを挟み込みねじで締めこむ方法②端部で輪を作るように結びを作る方法③端部

を折り返しカシメる方法④端部を折り返し縫う方法を検討した。それぞれ引張試験を行い、ロープ破断荷重を 100 とした場合の強度を調べた。その結果、強度は④③②①の順で高いことが明らかになった。しかしながら、③④の方法はそれぞれメーカーに依頼して加工を施さねばならず、全長を実験的に求めつつロープを張る場合などには適用できない。また伸びが生じた場合も対応できない。そこで、図 6 に示す新たな固定法を開発した。これは円柱状の部材にロープを巻き付けることでオイラーのベルトの定理を利用して摩擦力を向上する方法で、PBO 繊維では最も強度の高かった④とほぼ同様の 84% の固定力を実現した。

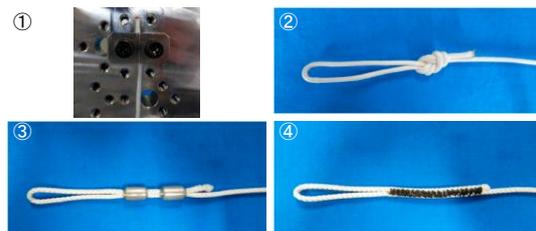


図 5 端部固定法

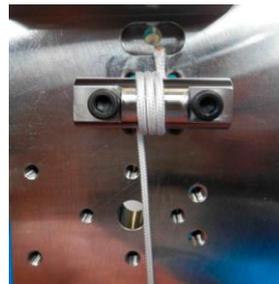


図 6 提案する新たな固定法

(5) 農場モニタリングのための六脚一腕ロボット

農場をモニタリングし作物の育成状況などを把握する遠隔操作可能な六脚一腕ロボットを試作している。外観を図 7 に示す。各脚の伸縮で 6 自由度、3 脚ごとを組にしたベース部の旋回・並進に 2 自由度、アーム部に 3 自由度の合計 11 自由度を有している。このうちアーム部の旋回と肩関節を除く 9 自由度は高強度化学繊維ワイヤにより駆動されている。インターネットを経由し、世界中どこからでも操作可能なインターフェースにより、遠隔地から農場を詳細に観察することが可能である。実際、当該研究期間においてアーム手先部に顕微カメラを装着し作物の詳細を撮影する実験に成功した。またアーム肘部に採用したワイヤ駆動機構は数か月に亘り張力調整を行わずに駆動が可能であり、実用性が確かめられた。



図7 農場モニタリング用六脚一腕ロボット

(6) 原発用長尺多関節ロボット

福島第一原発の廃止措置では、高放射線下で作業することの出来る長尺のロボットアームが求められている。狭い入り口から進入し原発内部の狭隘な環境を調査・作業するためには、蛇のような細長い形態が有効であるが、アーム長が長くなればなるほど、アームを支える根元部分に生じる自重トルクが増大する。これらの自重トルクをプーリ配置とワイヤの取り回し経路を工夫することで、装備したモータのトルクを重ね合わせることが出来ることが知られている。さらに、アーム部分にはモータやその制御基板などを含まないことから、放射線に対しても高い耐性が期待できる。

図8に試作機を示す。本研究の成果に基づき、強度低下を起こさないプーリ径が選定されている。また本研究で検討した端部の固定法を採用している。試作機の基本的動作を確認するとともに各関節の位置制御精度を実験的に検証した。

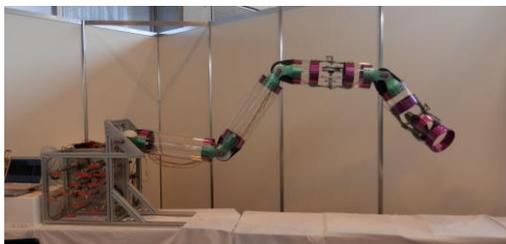


図8 原発用長尺多関節ロボット

(7) 軽量4足歩行ロボット

脚を昆虫のように横に張り出した4足歩行ロボットは、哺乳類のように体幹真下に足が延びる形態に比べて、重心位置を低くすることができ、支持脚多角形も大きくとることが出来ることから、不整地での安定性が高い。

一方で歩行速度やエネルギー効率が低くなるというデメリットがあった。この課題を解決するため、高強度化学繊維を用いた関節駆動系により脚機構の小型軽量化を検討した。図9に開発した4足歩行機械 TITAN-XIII の概観を示す。腿関節と膝関節の駆動に超高分子量ポリエチレンロープを採用している。また化学繊維ロープは金属製ロープに比してしなやかに曲がることから、より直径の小さいプーリに巻き付けることが可能であり、1段で減速比 8.5 を実現できる新たなプーリ配置法を提案し、その動作を確認した。

構成した TITAN-XIII は、およそ 20 年前に申請者らの研究室で開発された TITAN-VIII とほぼ同様の大きさでありながら、重量はおよそ4分の1の 5.6kg、歩行速度は4倍の 1.38m/sec となる高い性能向上を達成した。また最も効率よく歩行した時のエネルギー効率は、従来の哺乳類型4足歩行ロボットと同等以上の性能であることを明らかにした。これらの性能向上はモータの出力重量比の向上や、構造部材の軽量化によるところも大きい。高強度化学合成繊維を用いたワイヤ駆動機構は脚の高速かつ高耐荷重を実現する重要なコンポーネントであり、その有効性を示すことが出来た。



図9 4足歩行機械 TITAN-XIII

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Satoshi Kitano, Shigeo Hirose, Atsushi Horigome, Gen Endo. TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. ROBOMECH Journal, 3:8, 2016. DOI: 10.1186/s40648-016-0047-1, 査読有。
2. Atsushi Horigome, Gen Endo. Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope - investigation

of strength reduction by bending and terminal fixation method. *Advanced Robotics*, Vol.30, No.3, pp.206-217, 2016, DOI: 10.1080/01691864.2015.1102649, 査読有.

3. 深津時広, 遠藤玄, 伊藤祐太, 小林一樹, 齊藤保典. 広域・精細モニタリングのための移動作業型フィールドサーバの開発. *農業情報研究*. Vol.23, No.4, pp.140-153, 2014. 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. Satoshi Kitano, Shigeo Hirose, Gen Endo, Koichi Suzumori. Trot Gait Based Feed-Forward Walking on Challenging Terrain: Case of High Step Climbing. *International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.2519-2524, 6 December 2015, China (Zhuhai).
2. Atsushi Horigome, Gen Endo, Koichi Suzumori. Strength of Synthetic Fiber Ropes Degraded by Repetitive Bending. *International Conference on Advanced Mechatronics*, 1A1-14, 5 December 2015, Japan (Tokyo).
3. Satoshi Kitano, Shigeo Hirose, Gen Endo, Koichi Suzumori. Fast Walking with Consideration of an Acceleration and a Deceleration for a Quadruped Robot, *International Conference on Advanced Mechatronics*, 1P2-15, 5 December 2015, Japan (Tokyo).
4. 堀米 篤史, 遠藤玄, 鈴森康一. 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第二報: 繰り返し曲げが引張強度に与える影響. *ロボティクスメカトロニクス講演会*, 2A1-Q08, 2015. 5. 17, (京都)
5. 北野智士, 広瀬茂男, 遠藤玄, 鈴森康一. 軽量 4 足歩行ロボット TITAN-XIII の開発 第 2 報: 加減速を考慮した前後揺動型間歇トロットによる高速歩行. *ロボティクスメカトロニクス講演会*, 2A1-Q08, 2015. 5. 17, (京都)
6. Atsushi Horigome, Hiroya Yamada, Gen Endo, Shin Sen, Shigeo Hirose, Edwardo F. Fukushima. Development of a Coupled Tendon-Driven 3D Multi-Joint Manipulator. *International Conference on Robotics and Automation*, pp.5915-5920, 31 May 2014, China (HongKong).

7. 深津時広, 遠藤玄, 伊藤祐太, 小林一樹, 齊藤保典. 移動型フィールドサーバによる作物の広域・詳細情報取得を目指した圃場モニタリングシステムの開発. *ロボティクスメカトロニクス講演会*, 1P2-V05, 2014. 5. 25, (富山)

8. 伊藤祐太, 深津時広, 桑原裕之, 遠藤玄, 福島 E. 文彦. 高度かつ汎用的な計測を可能とする移動型フィールドサーバの開発—軽作業用ロボットアームの開発—. *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*, pp.2675-2676, 2013. 12. 18, (神戸)

9. Satoshi Kitano, Shigeo Hirose, Gen Endo, Edwardo F. Fukushima. Development of Lightweight Sprawling-type Quadruped Robot TITAN-XIII and its Dynamic Walking. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.6025-6030, 3 November 2013, Japan (Tokyo).

10. 堀米 篤史, 山田 浩也, 広瀬 茂男, 遠藤玄, 福島 文彦. 干渉ワイヤ駆動型多関節アームの開発—6 節小型モデル機による動作実験—. *日本ロボット学会学術講演会*, 2013. 9. 4, (東京)

[その他]

ホームページ等

<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research.html>

http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research_gendo/titan13/titan13.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 玄 (ENDO, Gen)

東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 70395135

(2) 連携研究者

深津 時広 (FUKATSU, Tokihiro)

農業・食品産業技術総合研究機構・中央農業総合研究センター・主任研究員
研究者番号: 40355483