

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14631

研究課題名（和文）自己修復性保護膜による腱駆動機構の長寿命化に関する研究

研究課題名（英文）Study on the longevity of tendon drive mechanism by self-repairing protective layer

研究代表者

長濱 峻介（Naghama, Shunsuke）

早稲田大学・理工学術院・次席研究員（研究院講師）

研究者番号：70754745

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットの腱駆動機構のワイヤの破断要因である摩耗と衝撃に対処することで、腱駆動機構を長寿命化する技術の開発を行った。摩耗に対しては、循環系を用いて液体供給を行い、ワイヤの周囲に保護膜を形成することで摩耗を抑制する技術の開発を行った。提案機構をロボットハンドに導入した評価実験を行い、摩耗の抑制効果を確認した。また、衝撃に対しては、ワイヤの間に加熱により修復が可能なユニットを導入し、そのユニットが優先的な破壊されることでワイヤを保護する技術の開発を行った。直動運動によりワイヤを牽引するアクチュエータユニットに提案機構を導入し、衝撃力によるワイヤの破断が抑制されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の身体に着想を得たロボットの腱駆動機構は、ロボットの手などの小型化には必要不可欠な技術である。一方で、腱駆動機構に使用されるワイヤは細く、摩耗や衝撃により容易に破断してしまう。本研究は、ワイヤの破断を抑制し、腱駆動機構の長寿命化を実現したものである。意義としては、（1）動物の腱の潤滑機構に着想を得て循環系による物質供給によりワイヤを摩耗から保護する技術を実現したこと、および（2）衝撃による破壊後に自動で破壊箇所を修復する技術を実現したことが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：By addressing wear and impact, which is a factor in breaking the wires of the robot's tendon drive mechanism, the technology to extend the service life of tendon was developed. For a breakage by wear, a protective layer is formed around the wire by supplying fluid through a circulation system to prevent wear. The evaluation experiment was conducted by installing the proposed mechanism in a robot hand, and the effect of wear suppression was confirmed. For a breakage by impact, a unit that can be repaired by heating is introduced between the wires. We developed a technique to protect the wire by the preferential destruction of the self-repairable unit. The proposed mechanism is introduced into the actuator unit, which pulls the wire by linear motion. It was confirmed that wire breakage was suppressed with our mechanism.

研究分野：ロボティクス

キーワード：自己修復 腱駆動機構

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

腱駆動機構は、モータの配置を自由にでき、ロボットのハンドやアームの小型化・低慣性化ができる反面、摩耗により腱の破断が容易に起こるため長時間の使用には向かない。腱の破断に対処するために、腱駆動に冗長な本数の腱を持たせることで、1つの腱が破断した際に他の腱で代替する手法が研究されている。しかしながら、これらの手法は根本的な解決手段にはなっておらず、理想的には腱そのものが破断しないことが求められる。

2. 研究の目的

本研究では、腱駆動機構の腱（ワイヤ）の寿命を延ばす手法を構築する。腱の破断の原因は、主にワイヤが構造部材に擦れることにより生じる摩耗と、腱に衝撃力が加わることによる破断が存在する。そこで、本研究では（1）腱の摩耗を防ぐ手法の構築、（2）衝撃による腱の破断を防ぐ方法の構築を行う。

3. 研究の方法

（1）腱の摩耗を防ぐ方法としては、保護膜を腱駆動のワイヤの周りに構築することで、摩耗を抑制することを試みた。保護膜は、腱への液体の供給により形成する。本研究では、液体の供給が可能な腱駆動機構の開発を行い、ワイヤの摩耗の抑制効果を確認した。

（2）衝撃による腱の破断を防ぐ方法としては、腱駆動機構の腱の一部を修復可能な材料で構成した自己修復ユニットに置き換え、ユニットの破壊後に修復する手法を構築した。自己修復ユニットが腱よりも先に破壊するように強度を設定することで腱の破断を防ぐアクチュエータユニットの開発を行い、衝撃によるワイヤの破断の抑制効果を確認した。

4. 研究成果

（1）液体を内部で循環可能な腱駆動機構を有するロボットの指の開発を行った（図1）。まず、3Dプリンタを用いてロボットの指を作成した。指の構造内部には、液体と腱（ワイヤ）を通すための穴を開けた。その穴に腱駆動機構のワイヤを通し、末端を指の先端に固定した。モータが駆動し、ワイヤに張力がかかることで、指が運動する。機構を往復運動させるために1対のワイヤの屈曲側のワイヤにはプーリーを介して560gの錘を接続し、伸展側のワイヤにはモータを接続した。そして、ポンプに接続されたチューブを指の構造に接続し、ワイヤを保護する液体を循環させる。指の根元は、潤滑液を貯蔵する部分となっており、潤滑液がポンプにより指の先端から吸い込まれた際に機構内部に潤滑液を供給する役割を担っている。液体を循環することにより、ワイヤに液体が供給され摩耗を抑制される。また、液体をロボット内部に密閉し漏れを防ぐために、機構全体を柔軟性のある皮膚で覆った。

この装置を用いて、提案手法の摩耗抑制効果を確認した。液体潤滑が摩耗に与える影響を見るために、潤滑液を循環させる場合と潤滑液を使用しない場合でのワイヤが破断するまでの屈伸回数の比較を行った。潤滑液として水と油の2種類を実験では用いた。実験において、モータを低速で駆動することにより錘の振動を抑制し、ワイヤにかかる荷重を安定させた。

図2に実験の結果を示す。何も循環させない場合に比べて、水を循環させた場合で約2.5倍、潤滑油を循環させた場合で約3.5倍程度屈伸回数が大きくなった。実験の結果から、液体によるワイヤの潤滑が提案機構により行われ、摩耗が抑制されていることを確認した。また、指を伸展させる際に必要となるモータに流れる平均の電流値が、潤滑なしだと450 mAだったのに対し、水とオイルを循環させた場合はそれぞれ368 mA、330 mAであった。このことから、腱駆動機構の指が伸展するときに必要な張力は、潤滑液のない場合と比べ潤滑液を循環させた場合の方が小さくなっていることが分かる。

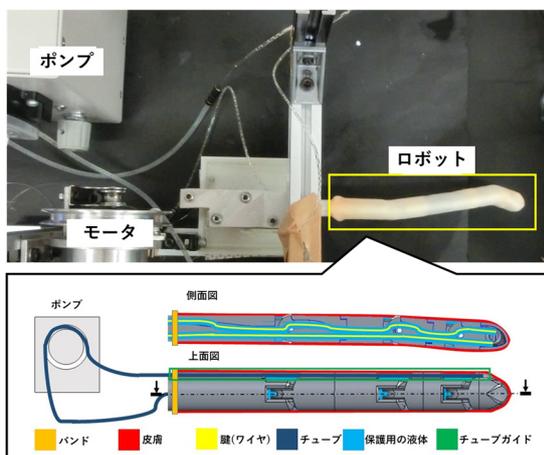


図1 液体を内部で循環可能な機構

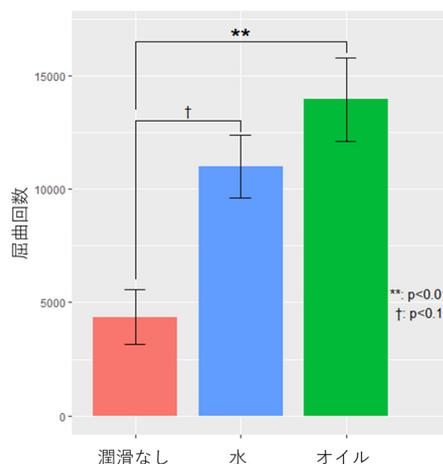


図2 摩耗試験の実験結果

潤滑液のない場合と比べ潤滑液を循環させた場合の方が小さくなっていることが分かる。

(2) 熱可塑性樹脂を用いた自己修復するアクチュエータユニットを提案した。本研究で開発したアクチュエータユニットの概要図を図3に示す。開発した機構の大きさは、211[mm]×31[mm]×35[mm]である。提案するユニットは、モータ、ボールネジ、修復部分の順で直列に接続される直動機構となっている。また腱駆動機構に接続する場合、ワイヤはワイヤ装着機構を介して修復機構に直列に接続される。

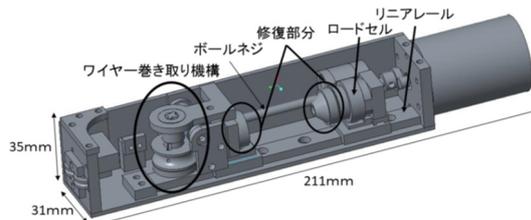


図3 アクチュエータユニット

次に修復部分の構成図を図4に示す。熱可塑性樹脂は、モータ側の接着部品と、ワイヤ側の接着部品の間に入挿される。提案機構では、この熱可塑性樹脂がワイヤよりも先に破断することでワイヤを保護する。また、破断した樹脂の修復時には熱可塑性樹脂を溶解させるため修復動作時に高温となる。そこで高温となる部分の熱を断熱素材により遮断することで機構全体が高温となることを防いでいる。修復機構の加熱にはセラミック製のヒーターを用いた。ボールねじと修復機構の間にはロードセルが接続されており、アクチュエータ部分の負荷を測定することができる。

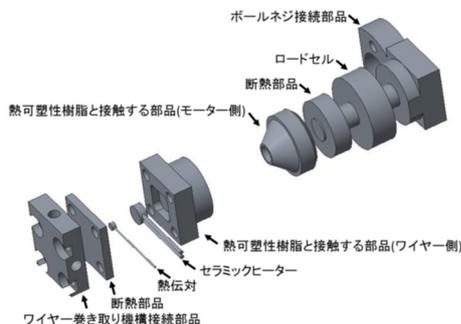


図4 修復部分の構成

機構が正常に動いている状態から、過負荷により破断した後に再動作するまでの修復処理の流れを3つの段階に分けて説明する(状態1~3, 図5)。

状態1：機構が正常に動作可能な状態である(図5. A)。状態1では熱可塑性樹脂が修復機構を結合している状態となっている。そのため、モータの動力がボールねじを介して伝えられるため、直動運動が可能となる。腱駆動機構に適応する場合には、ワイヤを取り付け、直動運動で牽引することで駆動することができる。

状態2：過負荷により修復機構が破壊した状態である(図5. B)。腱駆動機構に適用した場合、力はワイヤを介して修復機構に伝達される。伝達された力により修復機構の熱可塑性樹脂が優先的に破壊されることで、衝撃荷重のエネルギーを吸収するとともに、修復機構が物理的に2つに切り離される。これにより、ワイヤや修復機構以外の機械要素にかかる負荷を緩和する。提案機構には、ロードセルが搭載されており修復機構が破壊したことを検知すると修復処理動作を開始する。

状態3：破壊した修復機構を修復する状態である(図5. C)。修復処理では、最初に破断面同士を、ボールねじを駆動して接触させる。このとき、提案機構の直動運動する部分がリアアールにより拘束されているため、破断面を接触させるだけで破壊部分の位置決めが可能である。破断面を接触させた後、修復機構をヒーター(7.6 W)により加熱することで熱可塑性樹脂を溶解し、破壊部分を修復する。加熱中はモータを駆動して破断面同士を圧着し、熱溶解性樹脂を破断面に均一に接触させることで、高い修復率を実現する。

図6に破断後に修復処理を行った実験の結果を示す。修復時の加熱時間に応じて修復後の破壊強度はバラついているが、6分加熱の条件が安定した強度を示す条件となった。

研究全般では腱駆動機構を長寿命化させる要素技術の開発を行った。これらの手法の評価のために購入した実験機材を、センサやアクチュエータ、材料の研究の評価でも用いて、いくつかの研究成果を挙げた。

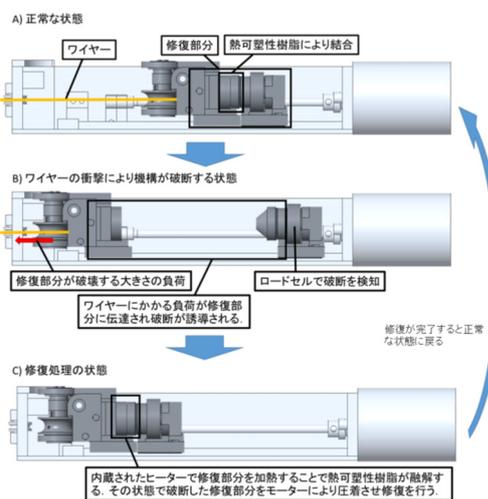


図5 修復部分の修復プロセス

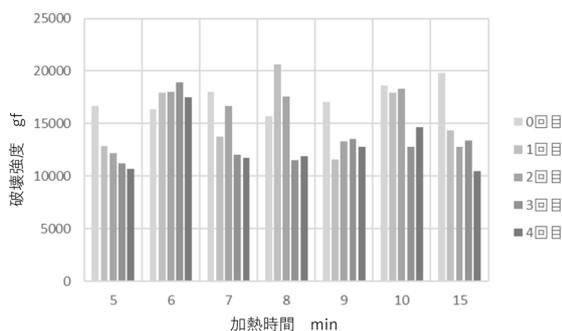


図6 修復実験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

1. 著者名 菅野重樹, 長濱峻介	4. 巻 69
2. 論文標題 スマート社会を支える基盤技術 ソフトロボティクスと材料	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 441-446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Shota Miyake, Shunsuke Nagahama, Shigeki Sugano	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a tendon-driven mechanism with liquid circulation system for improving wear resistance	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2017 IEEE International Conference on	6. 最初と最後の頁 1670-1675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ROBIO.2017.8324658	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 Shusuke Nagahama, Kayo Migita, Shigeki Sugano	4. 巻 -
2. 論文標題 Synthesis of High-strength and Electronically Conductive Triple Network Gels with Self-healing Properties by the Restraint Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanotechnology (IEEE-NANO), 2017 IEEE 17th International Conference on	6. 最初と最後の頁 752-754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/NANO.2017.8117472	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 -

〔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 NAGAHAMA, Shunsuke; MIGITA, Kayo; SUGANO, Shigeki
2. 発表標題 Synthesis and Characterization of Conductive Gel with Multiple Reversible Bonds
3. 学会等名 日本化学会 第99春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 MIGITA, Kayo; NAGAHAMA, Shunsuke; SUGANO, Shigeki
2. 発表標題 Evaluation of the strength and the shape retaining property of the hydrogel functionalized by the constraint method
3. 学会等名 日本化学会 第99春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ズヤーリッチ和樹, 長濱峻介, 菅野重樹
2. 発表標題 複数のねじれ紐式アクチュエータを用いた分散・協調駆動システムの開発
3. 学会等名 第19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 2018年

1. 発表者名 三宅章太, 長濱峻介, 菅野重樹
2. 発表標題 自己修復する腱駆動アクチュエータユニットの開発
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅章太, 長濱峻介, 菅野重樹
2. 発表標題 ワイヤーへの液体潤滑剤の供給機能を有する腱駆動機構の開発
3. 学会等名 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 右田かよ, 長濱峻介, 菅野重樹
2. 発表標題 Agar/HPAAm/PPy トリプルネットワークゲルを用いた自己修復する変位センサの提案
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三宅章太, 長濱峻介, 菅野重樹
2. 発表標題 液体循環により耐摩耗性を向上させた腱駆動機構の開発
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----