

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21818

研究課題名（和文）無音駆動する液冷人工筋ロボットハンド

研究課題名（英文）Silent Driven Robotic Hand using Liquid-Cooled Artificial Muscle Actuators

研究代表者

田原 健二（Tahara, Kenji）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：80392033

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：人工筋肉で駆動するシリコン充填指について、人の指と同様の構造である外在筋と内在筋の役割を各筋肉に持たせる事で、液冷を活かしながら可動範囲を拡張することを実現した。人工筋肉は同じ特性のものを作成することが難しいが、機能に違いを持たせた複数筋による駆動により、各筋肉の特性を活かした構造とすることができる。人工筋単体では大出力・大変位は難しいが、複数を組み合わせる事で利用範囲が拡大できる。シリコンオイルにより冷却性が上がるだけでなく、高分子のみで作成した指の摩擦低減効果もあり、液冷ハンドの可能性を示すことができた。無音動作する指はほとんどないので、全く新しいロボットハンドの構築方法が提案できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当初の目的であった無音で艶めかしく駆動する高分子のみで構成された指を構築し、それらを複数用いたハンドによる物体把持を実現することができた。シリコンオイルによって冷却性が上がるだけでなく、高分子のみで作成した指の摩擦を低減する効果もあり、液冷ハンドの可能性を示すことができたと考えている。特に、無音動作する指はこれまでほとんどないので、全く新しいロボットハンドの構築方法が提案できたと考えている。今後、人の生活空間で駆動するロボットに対するアプローチの1つとして社会的意義は高いと思われる。一方、学術的意義として高分子人工筋肉の液冷駆動（シリコンオイル）の有効性を示すことができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：We developed an artificial finger filled with silicone and driven by artificial muscles, mimicking the roles of extrinsic and intrinsic muscles found in human fingers. This design expands the range of motion and takes advantage of liquid cooling. Creating identical artificial muscles presents challenges, but by using multiple muscles with different functionalities, we can exploit their unique properties. While individual muscles may struggle with high output and large displacements, combining them broadens their utility. Additionally, silicone oil improves cooling efficiency and reduces friction in the finger made of high polymers, demonstrating the potential of a liquid-cooled hand. Our research introduces a groundbreaking approach to constructing a silent-operating robot hand.

研究分野：ロボティクス

キーワード：人工筋肉 液冷 高分子 無音

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人の手のようなロボットハンドは、現在も世界中で研究されているが、未だ人の手のように艶めかしい動きができるロボットハンドはない。もちろん、そもそも人間の制御戦略が不明であり、どのように物体を把持・操作しているのか未だベールに包まれていることが大きな要因の一つではあるが、ハードウェアとして人の手のように柔らかく、軽く、音もせず滑らかに駆動する人工の手が作られていないこと}が、大きな要因の一つとして存在する。一方で、これまでの産業用ロボットは、位置や速度に対する制御性能が重要で、固く、早く、正確な動きを行う事が大前提で設計されてきた。しかし、人に近いところで稼働するロボットは、精度がある程度担保された上でソフトロボットのような軽く、柔らかく、静かなエンドエフェクタが必要となるが、既存のロボットデバイス開発の延長線上にそれらは無く、これまでとは全く違うコンセプトでの設計指針や哲学が必要となる。

2. 研究の目的

近年、柔軟材料を積極利用したソフトロボティクスと呼ばれる分野が注目されている。高分子材料等の柔軟材料が入手しやすくなり、また、3D プリンタ等の普及もあって、加工も容易になってきた事が要因の一つとなっている。それらの技術を利用することで、これまで困難であった軽く柔らかい生物模倣的なロボットシステムの実現可能性が広がっており、特に人の生活環境内で稼働するロボットや、人と協業できる作業ロボットに対する期待が大きくなっている。一方で、人の生活環境内はもちろん、産業界においても人と協業できるロボットはほとんど無く、人間の手が必要とされている作業は数多く存在する。例えば、農作物や鮮魚、お惣菜などの食品は未だ人の手で選別や箱詰めが行われており、そういった場面で利用できる柔らかく軽量のエンドエフェクタなどのロボットシステムが望まれている。しかし現状、人の手のように柔軟軽量で汎用的なエンドエフェクタは未だ登場していない。その理由は様々あるが、その一つは、人のような艶めかしい運動を無音で実現できるようなハードウェアが無いことが挙げられる。

3. 研究の方法

本研究で開発する多指ハンドは、具体的には、光造形型 3D プリンタで造形された骨格をシリコーンゴムで包み込み、その内部に液状シリコーンが充填されたロボットハンドである。また、その駆動源として、液状シリコーンが満たされた内部に、ナイロン糸人工筋肉アクチュエータを浸ける形で埋め込む}ことで、掌内部に駆動源が全て搭載された形とする。すなわち、本研究で提案する多指ハンドは、3D プリンタで造形された樹脂の骨格、表皮をシリコーンゴムで覆われ、かつその内部に液状シリコーンが充填されており、駆動源としてナイロン糸人工筋肉アクチュエータが埋め込まれた、ほぼ高分子材料だけで全体が構成された柔らかく軽く、無音で動作する多指ロボットハンドシステムとなる。

これまで、指や掌と言った構造材に樹脂などの高分子材料を利用した多指ハンドはいくつか提案されているが、アクチュエータなどの駆動源までを高分子で構成されたものはほとんど無い。また、構造内部に液状シリコーンが充填されているため、関節部分に金属ベアリングなどを用いる必要がなく、緩いはめ込み関節とすることで、液状シリコーンが関節内部に入り込み、関節軸が液内で浮いた形で動作するため、摩擦も少なく滑らかに動作する。さらに、外側の硬化したシリコーンゴムが全体形状を緩やかに保ちながら適度な粘弾性を生むため、それが人の手指に類似した艶めかしい運動を生み出す。

一方、埋め込まれたナイロン糸人工筋肉アクチュエータは、2014 年に Haines らによって提案されたナイロン糸を捻った状態でヒートセットすることにより作成されるアクチュエータであり、熱によって収縮する。熱を加える手段として、ナイロン糸の周りを銀などの金属でコーティングされたものを利用するか、もしくは電熱線を巻き付け、それら金属部分に導電させることで発生するジュール熱によってナイロン糸を加熱する方法が一般的である。しかし、空気中での加熱は局所的な熱だまりを作ってしまう場合があり、大電流を流した場合、部分的な過度の加熱によってナイロン糸が溶融してしまう可能性がある。本研究では、ナイロン糸人工筋肉アクチュエータが液状シリコーンに浸かっている状況での加熱となるため、エネルギー効率は下がるが、熱の人工筋肉への伝わり方が空気中と大きく異なり、均一にナイロン糸に加わるため、大きな電流を加えることが可能となり、それによって収縮速度が大幅に向上する。すなわち、液状シリコーンが充填された多指ロボットハンドへの適用により、収縮速度を大幅に上げることができ、また、液状シリコーンが冷却剤としての役割も果たすことから、冷却時における自然長への戻り速度も同時に大幅に向上するため、液状シリコーン充填多指ハンドと非常に相性の良いアクチュエータと言うことができる。液状シリコーン充填多指ハンドの作成方法は、鈴木(分担者)が提案している感光性樹脂によるシリコーンゴムの硬化阻害を利用した手法}を用いる。本手法は、感光性樹脂を用いた光造形型 3D プリンタで成型した骨格に、シリコーンゴムによる皮膜を生成させる際、感光性樹脂とシリコーンゴムの相性により、シリコーンゴムが完全に硬化せず部分的に液状のまま残る硬化阻害が発生する。これにより、樹脂と硬化したシリコーンゴム表皮との間に未硬化の液状シリコーンが入り込んだ多指ハンドを作成することができる。

本研究では人工指内部にナイロン系人工筋肉アクチュエータを埋め込む事を試みる。田原（代表者）は、ナイロン系人工筋肉アクチュエータを液状シリコンに浸した状態で駆動することで、空気中より 4~5 倍の速度で収縮することを基礎実験で既に確認している。埋め込み方法としては、3D プリントで造形した後、ナイロン系人工筋肉アクチュエータを必要な箇所に搭載し、その後、シリコンゴムでコーティングするという順番で作業を行う。すなわち、人工筋肉の配置と埋め込み、それらの制御は田原（代表者）が主に担当し、液状シリコン充填多指ハンドの設計・製作については鈴木（分担者）が主に担当する。

4. 研究成果

人工筋によって駆動される二本指ロボットを作成し、空中駆動において軽量物を把持・姿勢制御を実現した。作成した二本指ロボットは、3D プリントを利用して作成した軽量・コンパクトなロボットハンドであり、人工筋肉を設置するために内部に穴が空いている構造となっている。また、利用した人工筋肉は一関節につき二本の拮抗駆動とし、劣駆動ではなく全関節に駆動自由度を持つ。

ヒトの手指構造を機械的に再現する場合、剛性材料（骨格）と柔軟材料（表皮）のハイブリッド構造が考えられるが、構造部品同士が摺動する際に、柔軟材料の凝着によるクーロン摩擦が力の伝達効率や制御性を低下させる問題がある。この問題に対して、表皮形成時に骨格との境界の適所に液状層を発生させることで凝着を抑制し、ロボット指の機能を向上させることを実現した。

境界の液状層の摩擦特性への影響を調査した。異なる法線荷重および滑り速度における摩擦係数を実験により測定した結果、液状層を発生させた場合は動摩擦係数が約 10 分の 1 に低減し、特に滑り開始直後に大きな摩擦力を発生させる凝着の影響を大幅に抑制できることを確認した。

凝着および動摩擦係数の低減による効果を非線形有限要素解析により評価した。3D プリントで造形した骨格とシリコンゴムによる表皮からなる関節構造モデルを作成し、材料間の境界における拘束条件として、実験から得られた液状層の有無による 2 通りの動摩擦係数による摩擦拘束を設定した。この結果、液状層を発生させることで関節屈曲時の表皮の相当ひずみが低減されることを確認し、小さな駆動力で関節を屈曲可能であることを示した。

ナイロン系人工筋肉アクチュエータの性能をある程度担保した安定な人工筋肉アクチュエータ作成方法の確立と、それを多関節構造体に組み込むための指先構造の設計、およびシリコンゴムを用いた袋状の人工皮膚とその内部に注入するシリコンオイルの粘度設定などを行った。ナイロン系人工筋肉は、作成時のパラメータが多く、また、バラツキが大きいため、同じ性能のものを複数作成することが困難であったが、安定に作成可能なパラメータを選択することで、ある許容範囲内で一定の性能を持つ人工筋肉アクチュエータを作成可能な方法を確立した。

指単体を設計・製作し、単体での指先位置・姿勢制御を実現するための制御手法について構築を行った。当初は紫外線硬化型の 3D プリントの硬化阻害による指の構築を行っていたが、設計自由度が少ないことから、完全に内部骨格と外部柔軟皮膚を別々に設計し、最終的にそれらを組み合わせる指を構築する手法により作成した。指の位置・姿勢検出については、外部からの視覚センサによって指先位置・姿勢を実時間検出する手法を導入し、それらを用いた指先角度フィードバック制御により、ナイロン系人工筋肉を複数埋め込んだ多関節指の位置・姿勢制御を実現した。

複数の人工筋肉を指内に埋め込み、人の指と同様の構造である外在筋と内在筋と同様の役割をそれぞれの筋肉に持たせる事で、液冷による冷却を活かしながら、可動範囲を拡張することを実現した。人工筋肉は同じ特性のアクチュエータを作成することが難しいが、今回のように機能に違いを持たせた複数筋による駆動方法を用いる事で、各筋肉それぞれの特性を活かした構造とすることができる。人工筋肉単体では大きな力や変位を出力することが難しいが、複数を組み合わせる事で、利用範囲が拡大可能となる。

境界の液状層の摩擦特性への影響を調査し、異なる法線荷重および滑り速度における摩擦係数を実験により測定した結果、液状層を発生させた場合は動摩擦係数が約 10 分の 1 に低減し、特に滑り開始直後に大きな摩擦力を発生させる凝着の影響を大幅に抑制できることを確認した。

研究期間全体を通して、高分子のみで構成される指を構築し、また、それらを複数用いたハンドによる物体把持も実現することができた。シリコンオイルによって冷却性が上がるだけでなく、高分子のみで作成した指の摩擦を低減する効果もあり、液冷ハンドの可能性を示すことができたと考えている。特に、無音動作する指はこれまでほとんどないので、全く新しいロボットハンドの構築方法が提案できたと考えている。

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 井上翔太, 栗原晟汰, 鈴木陽介, 渡辺哲陽, 辻徳生
2. 発表標題 シリコーンゴムの硬化阻害を用いた柔軟関節メカニズムにおける機構 挙動の評価
3. 学会等名 SI2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎 政仁, 田原 健二
2. 発表標題 釣糸人工筋肉を用いた多関節ロボット指の姿勢制御
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木陽介, 井上翔太, 栗原晟汰, 西村齊寛, 辻徳生, 渡辺哲陽
2. 発表標題 シリコーンゴムの硬化阻害を利用したソフトロボット構成法に関する実験的検討（剛性材料 柔軟材料間の拘束状態が関節構造の挙動に得たる影響の調査）
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤晃平, 鈴木陽介
2. 発表標題 シリコーンゴムの硬化阻害を利用したソフトロボット指の開発（硬化阻害の発生条件の調査およびロボット指機構の設計）
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川辺空雅, 鈴木陽介, 西村齊寛, 辻徳生, 渡辺哲陽
2. 発表標題 釣糸人工筋肉の液中での駆動特性の調査
3. 学会等名 SI2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 雉本幹哉, 鈴木陽介, 田原健二
2. 発表標題 ナイロン系人工筋肉で駆動する高分子ハンド
3. 学会等名 ROBOMECH2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本修平, 有田輝, 田原健二
2. 発表標題 内在筋と外在筋を模した油冷ナイロン系人工筋肉ロボット指
3. 学会等名 ROBOMECH2023
4. 発表年 2023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
研究分担者	鈴木 陽介 (Suzuki Yosuke) (20582331)	金沢大学・フロンティア工学系・助教 (13301)	

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
---------	---------