

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02106

研究課題名（和文）スナップモータ：撃力インタラクションによる小型軽量アクチュエーション基盤の創成

研究課題名（英文）Snap Motor: Creating a Small and Lightweight Actuation Platform by Impulse Force Interaction

研究代表者

望山 洋 (Mochiyama, Hiromi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40303333

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトロボティクスのアクチュエーション技術であるスナップモータに関する4つの課題に取り組んだ。まず、設計論のベースとなるロッド理論に基づくシミュレーション技術を発展させると共に、撃力性能を示す力積の計測技術を確立した。つぎに、スナップモータを活用した、人関節の遠隔リハビリテーション診断の応用展開の可能性を示した。また、スナップモータの平行機構で実現される面状の変形により効率よく流体を搬送する新たな拍動ポンプ、スナップシェルを開発した。さらに、スナップモータを搭載した打音検査ドローンを構築し、コンクリート不良を調べる実験を現場で行い、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で発展させた、ロッド理論に基づくシミュレーション技術は、スナップモータ以外のソフトロボティクスにも広く活用できる。この成果は、ソフトロボティクスの世界初標準テキスト「ソフトロボット学入門」で公表済みである。近日中に出版が予定されている英語版のテキストにも掲載予定であり、今後広く普及していくことが期待される。一方、老朽化したトンネルや橋梁などのコンクリート建造物の打音検査に対するロボット活用については、非常に大きなニーズがあり、スナップモータを搭載した打音検査用ドローンには、大きな期待が寄せられている。

研究成果の概要（英文）：We addressed four issues related to the snap motor, which is an actuation technology of soft robotics. First, we developed the simulation technology based on the rod theory, which provides the basis of the design of the snap motor, and established the impulse measurement technology that indicates the impact performance. Second, we showed the possibility of application development of remote rehabilitation diagnosis of human joints using snap motors. Third, we have developed a new pulsation pump, Snap Shell, which efficiently transports fluids by surface deformation realized by the parallel mechanism of snap motors. Forth, we built a hammering inspection drone equipped with a snap motor, conducted an experiment to check concrete defects at the site, and verified its effectiveness.

研究分野：ロボティクス

キーワード：アクチュエータ 撃力 ソフトロボティクス

1. 研究開始当初の背景

超スマート社会の実現のための基盤技術の一つとして、サイバー空間で生み出されたあらゆる情報や知見を、フィジカル空間に作用させるためのアクチュエータ技術が求められている[1]。フィジカル空間の代表であるヒトに装着、あるいは、自律移動ロボットに搭載して、力学的機能を発現・補完・増強させることを考えた場合、アクチュエータは小型・軽量であることが求められる。現在最も代表的なアクチュエータである電磁モータは、高速で定常回転することを得意とし、ドローンのプロペラや自律移動ロボットの車輪の駆動に活用され、ロボット自体の移動性能向上に大きく貢献した。しかし、超スマート社会に求められる諸々の力学的作業をカバーできるほどのコンパクトなアクチュエータ基盤技術には至っていない。空気圧人工筋の進化やソフトマター技術を駆使したソフトアクチュエータ等の新しい技術が出現しているが、エネルギーも含めたトータルシステムを考えると、電磁モータの利便性を越えるにはまだ相当の時間を要すると予想される。超スマート社会を支えるアクチュエータ技術に対する新たなアイデアが求められている。

既存のアクチュエータの本質的課題は、ヒトや動物が備える筋肉に比べてパワーウェイトレシオが低いことと一般的には捉えられているが、仮に筋肉と同等のパワーウェイトレシオを有するアクチュエータが実現したとしても、様々なフィジカル空間での効果的な力学的作用が直ちに保証されるわけではない。その一方で、フィジカル空間に本質的な作用を及ぼす機械は、“入力から出力に流れるパワーを一時的に保存したり、上手く分岐したり、さらに放出したりできるという機能を発揮できる点”が重要であることが指摘されている[2]。電磁モータ自体の性能が近年大幅に向上していながら、フィジカル空間での効果的な力学的機能のバリエーションが増大していないことを鑑みると、むしろアクチュエータが生み出すパワーの新しい活用法から、アクチュエータのブレークスルーを探ることは検討するに十分な価値があると考えられる。慣性力を利用して携帯端末のバイブレータとして機能している振動モータは、電磁モータをベースとした賢い機構と捉えることができる。この観点から、電磁モータをベースとした賢い機構のバリエーションを拡大することは、アクチュエータ技術に対する大きな可能性を秘めていると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フィジカル空間に有効に働きかける小型・軽量の新しいアクチュエーション基盤技術を確立し、超スマート社会の実現に貢献することである。この目的に対し、本研究では、既存の電磁モータと最新のソフトロボティクスを融合させた“スナップモータ”によるアクチュエータ基盤技術の確立を目指す。スナップモータは、撃力によりフィジカル空間に働きかけるアクチュエーション技術である。具体的には、弾性ロッド、電磁モータ、フレームの3つの構成要素のシンプルなループ構造であり、弾性ロッドに飛び移り座屈を生じさせることで俊敏動作を得て、撃力を生む。

3. 研究の方法

本研究では、基礎から応用に亘る、下記4つの課題(1)~(4)に取り組んだ。スナップモータの設計論確立・人体への影響調査と同時並行的に、2つの応用可能性について検討する。

(1) スナップモータの設計論の構築

フィジカル空間で様々な力学的作業を実現するためのアクチュエーション技術として、スナップモータの有効性を明らかにした上で、その設計論を確立する。まず、スナップモータに投入する入力エネルギーに対して、出力される力学的エネルギーを計測し、摩擦下でのエネルギー効率を従来型のアクチュエータと比較することにより、その基本的な有効性を検証する。弾性ロッド、ラジコンサーボモータ、フレームからなるスナップモータに対して、ラジコンサーボモータに流れる電流をリアルタイムで計測し、スナップモータに投入するエネルギーを算出する実験系を構築する。同時に、弾性ロッドの飛び移り座屈によって得られる最終的な仕事量を計測する。例えば、弾性ロッドに紐を介して力センサを取り付け、力積から総仕事量を推定する。また並行して、弾性ロッドの飛び移り座屈時の形状遷移シミュレーションを行い、一時的に弾性体に蓄えられるエネルギーを算出する。これらの諸量を把握し、スナップモータのパワーフロー調整能力とエネルギー効率を定量的に明らかにする。最終的には、スナップモータの性能限界を明らかにした上で、弾性ロッドの飛び移り座屈時の形状遷移シミュレータを利用しつつ、要求された仕様を満たすスナップモータを作るための設計論を確立する。

(2) スナップモータによる撃力が生体組織内部に与える影響の調査

フィジカル空間の代表はヒトであり、ヒトがスナップモータを装着した際、その撃力がヒトに

与える影響を把握することは重要である。特に、ヒトの内部にどのような影響を及ぼし得るかについて、検討が必要である。そこで、生きていない状態の動物の身体を用いて、スナップモータの撃力が生体組織内部にどのような力学的な作用をもたらすかを計測する。

(3) スナップモータの流体を搬送するパルスポンプへの応用可能性の検討

スナップモータを用いて、流体の被覆を大变形させ、内部の流体を効率よく輸送できるかを検討する。従来のポンプと効率を比較する。ポンプの流入口と流出口に取り付けた流量計と、ポンプに取り付けた圧力計により、ポンプのパワーをリアルタイム計測し、デバイスに投入する電流から算出した投入エネルギーとの比較により、ポンプの効率を定量的に把握する。

(4) 打音検査用アクチュエータとしての応用可能性

スナップモータが、小型ロボットにも搭載可能な、コンパクトな打音検査用アクチュエータとして応用可能か否かを検討する。近年ドローンによる橋梁などの打音検査の検討が行われているが、ドローンに搭載するハンマーが大型である、ドローンの動きに制約が生ずる等、改善の余地があった。スナップモータを実際にドローンに搭載して、打音検査が行えるかどうかの検証を行う。コンクリート内の不良の検出率や、走査速度等で、スナップモータによる打音検査の有効性を定量的に評価する。

4. 研究成果

課題(1) スナップモータの設計論の構築においては、設計論のベースとなるロッド理論に基づくシミュレーション技術を発展させ、アーチ形の高出力スナップモータの大変形シミュレータを実現し、その設計に関する知見を得た。また、撃力性能に関する最も重要な物理量である力積の計測技術の知見を得た。前者については、その研究成果の一部を、ソフトロボティクスの世界初標準テキスト「ソフトロボット学入門」で公表した。また、アーチ形スナップモータに関する研究成果は、伝統あるロボティクスの国際誌である *Advanced Robotics* に採択され、公表されている。

課題(2) スナップモータによる撃力が生体組織内部に与える影響の調査については、スナップモータを活用した、人関節の遠隔リハビリテーション診断の研究へと方向を変えて、その応用展開の可能性を示した。この研究成果も、*Advanced Robotics* に採択され、公表されている。

課題(3) スナップモータの流体を搬送するパルスポンプへの応用可能性の検討においては、スナップポンプと名付けたプロトタイプを開発し、そのパワーフローの解析を行うとともに、スナップモータの平行機構で実現される面状の変形により効率よく流体を搬送する新たな拍動ポンプ、スナップシェルの開発に成功した。スナップポンプに関する研究成果は、ロボティクス分野におけるトップレベルのレター誌である *IEEE Robotics and Automation Letters* に採択され、公表されている。

課題(4) 打音検査用アクチュエータとしての応用可能性において、スナップモータを利用した小型・軽量の打音装置のプロトタイプを開発し、さらに、スナップモータを搭載した打音検査ドローンを構築した上で、コンクリート不良を調べる実験を現場で行い、その有効性を検証した。打音検査用ドローンに関する研究成果も、*IEEE Robotics and Automation Letters* に採択され、公表されている。

< 引用文献 >

[1] 科学技術基本計画(H28.1.22 閣議決定)。

<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>

[2] 広瀬茂男: 若手研究者へのメッセージ, 日本ロボット学会誌, 29-6, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Misu Kenji, Mochiyama Hiromi	4. 巻 35
2. 論文標題 Arched snap motor: power flow analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1107 ~ 1115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1964377	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 Arakawa Kazuki, Giorgio-Serchi Francesco, Mochiyama Hiromi	4. 巻 6
2. 論文標題 Snap Pump: A Snap-Through Mechanism for a Pulsatile Pump	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 803 ~ 810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3052416	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 該当する
1. 著者名 Nishimura Yuki, Takahashi Shuki, Mochiyama Hiromi, Yamaguchi Tomoyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Automated Hammering Inspection System With Multi-Copter Type Mobile Robot for Concrete Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 9993 ~ 10000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3191246	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 Endo Yuki, Yagi Keisuke, Mori Yoshikazu, Takei Toshinobu, Mochiyama Hiromi	4. 巻 37
2. 論文標題 Tele-Snap: a joint impedance estimation system using snap motor and openPose for remote rehabilitation diagnosis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 528 ~ 539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2197968	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8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 高橋 脩己, 西村 勇輝, 山口 友之, 望山 洋
2. 発表標題 Aerial Snap: スナップモータを用いたドローンに搭載可能な小型軽量打音機構
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(ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 勇輝, 高橋 脩己, 望山 洋, 山口 友之
2. 発表標題 スナップモータによる小型軽量打撃機構を搭載した打音検査ロボットの開発
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(ROBOMECH2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森優也, 望山洋
2. 発表標題 スナップシェル: パラレル機構による面状スナップモータ
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama (with Francesco Giorgio-Serchi)
2. 発表標題 A pulsed pump by snap-through actuation
3. 学会等名 Interdisciplinary Collaborative Talks: ICRA2020 Workshop “Beyond Soft Robotics” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 翠健仁
2. 発表標題 アーチ型スナップモータのエネルギー計測
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nishimura Yuki, Takahashi Shuki, Mochiyama Hiromi, Yamaguchi Tomoyuki
2. 発表標題 Automated Hammering Inspection System With Multi-Copter Type Mobile Robot for Concrete Structures
3. 学会等名 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 Trans-shape Design of Soft Robots
3. 学会等名 Workshop on Energy-based approach to analyze and develop soft robotic systems, 2022 IEEE International Conference on Soft Robotics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 Harmonic Fusion of Mechanism and Control in Soft Robots
3. 学会等名 2022 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鈴森康一, 中嶋浩平, 新山龍馬, 舛屋賢, 平井慎一, 望山洋, 岩本憲泰 他13名	4. 発行年 2023年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 15
3. 書名 ソフトロボット学入門 (第1部 柔軟物体の数理と情報処理 第1章 柔軟モデリング 1.2節弾性ロッド)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

スナップモータ, 筑波大学柔軟ロボット学研究室 https://www.frlab.iit.tsukuba.ac.jp/research/702
--

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	山口 友之 (Yamaguchi Tomoyuki) (50424825)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	
研究分担者	矢木 啓介 (Yagi Keisuke) (90802710)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・助教 (12101)	

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