

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2021～2023

課題番号：19KK0375

研究課題名（和文）ジャミング転移現象とマイクロ液圧源を統合した多自由度ソフトアクチュエータ

研究課題名（英文）Multi-degree-of-freedom soft actuator integrating jamming transition phenomenon and microhydraulic pressure sources

研究代表者

金 俊完（KIM, Joon-wan）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：40401517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

渡航期間： 12ヶ月

研究成果の概要（和文）：生体を模するソフトロボットの可変剛性メカニズムとして、ジャミング転移現象と電界共役流体（ECF）ジェットの高圧を融合した新たな方法を提案、開発している。ECFマイクロポンプを、マルチモジュールによる局所的な可変剛性機能と能動的変形機能を組み合わせたソフトロボットへ応用し、この有効性を示している。まず、可変剛性機能と能動的変形機能を両立できる1自由度モジュールを実現し、この有効性を立証している。このモジュールを直列に連結させたアクチュエータでハードとソフトが共存する多様なソフトロボットを開発している。また、可変的な拘束要素としてジャミング転移を用いたソフトアクチュエータを提案・開発している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体システムが持つやわらかさをより適切に説明するために、ハードとソフトの可変性および制御可能性も導入した新たな学術分野である可変剛性ソフトロボット学を創成している。また、MEMS加工技術とECFジェットを融合したマイクロ液圧源をソフトロボットに内蔵し外部への配管を排除することで、より生体システムに近い新たなソフトロボットを実現できる。手術用マイクロマニピュレータへの応用はライフ・イノベーションにも寄与できる。本研究は、これまでにない基礎的研究であるとともに実用化に向けての大きな研究計画であり、その実現は生体システムを模倣する多様な分野でのブレークスルーが期待される。

研究成果の概要（英文）：We propose and develop a new method that integrates the jamming transition phenomenon and the negative pressure of electro-conjugate fluid (ECF) jets as a variable stiffness mechanism for biomimetic soft robots. The ECF micropump is applied to soft robots that combine local variable stiffness functions and active deformation capabilities through a multi-module design, demonstrating its effectiveness. Initially, we have realized a single-degree-of-freedom module that can achieve both variable stiffness and active deformation functions, proving its effectiveness. We have developed various soft robots that coexist both hard and soft characteristics, using actuators connected in series with this module. Additionally, we propose and develop soft actuators using jamming transition as a variable constraint element.

研究分野：マイクロファブリケーション

キーワード：MEMS Jamming ECF Micropump

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

堅いリンクと関節で作られている従来のハードロボットとは対照的に、コンプライアンスを有するソフトロボットは機械と人間とのギャップを安全に橋渡しできることから、生体を模倣したソフトロボットの研究が盛んに行われている。一般的なソフトロボットは高い変形性とコンプライアンスを持つことを目的としているが、実際のソフトロボット研究の中核的な課題はハードとソフトの可変性および制御可能性である。例えば、タコ、イカの触腕や象の鼻などは、柔らかいだけでなく、その一部を選択的に硬くすることで非常に大きい力を伝達することができる。また、ナマコは、体を柔らかくして岩の隙間にもぐりこみ、そこで体を硬くさせ天敵や波から身を守っている。このように力を伝達する、または、形状に適合・固定するために可変剛性機能が必須不可欠である。この可変剛性機能を人工的に実現する方法として、(1)磁性流体(MRF)や電気粘性流体(ERF)、(2)低融点材料、(3)ジャミング転移などがある。磁性流体や電気粘性流体は、応答性が速いものの強度および剛性が低い短所がある。ワックスやはんだのような低融点材料は、相転移に長い時間と大きなパワーが必要である。ジャミング転移は、粒子の密度が低い場合は流体的に、高い場合は固体的に振る舞う現象であり、弾性膜の中に微粒子を充填し、真空にすることで剛性が高まる現象である。ジャミング転移は比較的速い応答と優れた可変強度および剛性を有しているために、ソフトロボットの可変剛性のメカニズムとして適切である。ジャミング転移を用いた最も効果的な応用研究が、学習やフィードバックなしで未知の物体をピックアップするロボットのエンドエフェクタ(ユニバーサルグリッパ)である。また、人体への挿入時には柔らかく人体の形状に適合され、適切に配置されたときに内視鏡を支持するために硬くなる内視鏡シャフトガイドへもこの現象は応用されている。しかし、微粒子のジャミング転移には、外付けの大きな真空ポンプが必要であることから(a)システム全体が大きい、多数の配管やバルブが必要であることから(b)ソフトロボットの一部のみを選択的に制御できない限界がある。

2. 研究の目的

このような限界を克服する一つの候補として、電界共役流体(Electro-Conjugate Fluid: ECF)に着目している。ECFとは、その中に挿入された電極対に直流電圧を印加することで電極間に活発なジェット流を発生させる機能性流体である。このECFジェットは、微細な電極対と液体(ECF)のみで発生可能であり、機械的な摺動部・可動部がないため、今まで難しかった圧力源のマイクロ化が実現できる。応募者は、MEMS加工技術を用いて三角柱・スリット形電極対(TPSE)を提案し、このTPSEを集積化したECFマイクロポンプを実現することで、 $10 \times 10 \times 1.5 \text{ mm}^3$ のサイズで400 kPaの吐出圧力を得ている。また、さらなる出力パワー密度の向上を目指し、ナノ加工技術を用いて高出力ECFマイクロ圧力源を開発している。

本研究では、このECFマイクロ圧力源を搭載したマルチモジュールによる局所的な可変剛性機能と能動的変形機能を組み合わせた多自由度ソフトロボットを実現し、この有効性を示すことを研究目的とする。可変剛性機能と能動的変形機能を両立できる1自由度のモジュールを実現し、この有効性を確認する。このモジュールを直列に連結させたアクチュエータでハードとソフトが共存する多様なソフトロボットを開発する。また、体を硬くする機構はないものの可変的な変位拘束要素としてジャミング転移を用いる3自由度のモジュールを提案・開発する。最後に、局所的な可変剛性機能と能動的変形機能を組み合わせた多自由度ソフトロボットを実現する。

3. 研究の方法

局所的な可変剛性機能と能動的変形機能を組み合わせたソフトロボットを実現するために、ガラス基板(厚さ: 0.5 mm)の代わりにポリイミドフィルム(厚さ: 0.1 mm)上に集積化したTPSEフィルムと柔軟なシリコンゴム(PDMS)の流路を組み合わせたフレキシブルECFマイクロポンプとそのMEMSプロセスを新たに提案、開発する。ポリイミドがPDMSに比べて相対的に硬いため、1自由度のモジュールでは変位拘束要素としても機能する。

本研究のコンセプトである、ECFジェットの陰圧を用いたジャミング転移現象による剛性変化と、陽圧によるアクチュエータの駆動が両立可能であることを証明するために、1自由度のECFジャミングモジュールを提案する。この構造は片側のみベローズ形状をもつソフトアクチュエータでチャンバ内部にはジャミング転移現象を引き起こすための粉体と作動流体であるECFが封入されている。加圧および減圧を行う圧力源であるフレキシブルECFマイクロポンプはベローズ部分と反対側の変位拘束部分に配置される。内部媒体が外圧の状態ではアクチュエータの形状は外力によって柔軟に変形することができる。ECFマイクロポンプで加圧するとベローズ部分が膨張し、アクチュエータは1自由度で湾曲する。反対に減圧を行うとチャンバ体積が減少し、封入された粉体によりジャミング転移現象が発生し剛性が増加する。剛性はチャンバ内部の圧力を小さくするほど増大し、圧力を制御することによって剛性を連続的に変化させることができる。この形状は加圧によるアクチュエータの駆動と減圧による剛性変化を1つのポンプで

行うため、それぞれを同時に動作させることはできないものの、ソフトとハードが共存する指の軌道マッチングや柔軟な生体システムの湾曲を再現できる。

本研究の第二段階として、変拘束要素にジャミング転移現象を利用する。加圧により伸長する太いチューブを中心に配置し、その周囲に3本の細いチューブを120°間隔で接着する。細いチューブ内には粉体を封入し、減圧によってジャミング転移現象が発生し剛性が変化するようにする。3本のジャミングチューブと中心の駆動チューブはそれぞれ別のマイクロポンプで駆動する。ジャミングチューブは無減圧時には中心の駆動チューブとともに伸長しアクチュエータは湾曲しない。3本の内1本のジャミングチューブを減圧すると剛性が増大し、そのジャミングチューブは変位拘束要素へと切り替わる。この状態で駆動チューブへ加圧を行うと変位拘束要素である減圧したジャミングチューブが内側となるように全体が湾曲する。3本のジャミングチューブの剛性を変化させることで自由な湾曲が達成される。

4. 研究成果

(1) ECF マイクロポンプに適している粒子に関する研究

異なるサイズの粒子をテストすることで、ジャミング効果が発生した際に、より小さな粒子が高いグリップング力を実現できることを実験的に明確にしている。最も高いグリップング力は、直径0.5 mmの粒子を用いた際であり、このグリップング力は16 Nであった。粒子が小さいほど、真空条件下で粒子間の摩擦が増加し、その結果グリップング力が向上すると推測している。ガラス粒子を用いたシリコンオイル下でのジャミング効果は、同一の粒子が空気真空中で動作した場合と比較すると、グリップング力が著しく低下することが観察されている。この低下の理由は、ガラス粒子の丸みにより、粒子がオイルに浸された際の摩擦が減少するためであると判断している。オイルが潤滑剤として機能するため減少する摩擦の問題を克服するために、不均一なサイズと表面形状を持つアルミナ粒子を用いることを提案している。アルミナ粒子のグリップング力はガラス粒子のそれを上回り、電界共役流体（ECF）を作動流体として使用した場合の性能の低下はないことを明らかにしている。ECF マイクロポンプを搭載したジャミンググリッパは2.75 kVの電圧をECF マイクロポンプに印加することで32 mgの質量を操作できることを実験的に立証している。この結果から、アルミナ粒子がECF マイクロポンプを用いたジャミング転移現象に効果的であることを明確にしている。

(2) 可変剛性機能と能動的変形機能を両立できる1自由度のモジュール

このモジュールの能動的変位機能をテストするために、エアコンプレッサとECF マイクロポンプを用いて実験を行った結果、ECF マイクロポンプから10 kPaを生成するためにはECF マイクロポンプに2 kVの電圧を印加する必要があることが明らかになっている。同様に、ECF マイクロポンプに2.5 kVの電圧を印加すると、約15 kPaの出力圧力が得られることを実験的に立証している。したがって、ECF マイクロポンプによるアクチュエータの動作実験では、印加電圧を0 kV、2.0 kV、2.5 kVと定めている。ECF マイクロポンプを用いた本モジュールの最大曲げ角は2.5 kVで15度である。アルミナ粒子がソフトアクチュエータのチャンバ内に充填されているにもかかわらず、本モジュールは曲げ動作を実行することができ、変位機構の動作を立証している。

可変剛性機能を実験的に立証している。ECF マイクロポンプによりソフトアクチュエータに負圧を与えた際に、ジャミング転移現象による剛性の変化を明らかにしている。初期状態の0 kPa印加時のソフトアクチュエータの3 mmでの曲げ力は0.134 Nで、-50 kPaをソフトアクチュエータに印加したとき、3 mmでの曲げ力は0.743 Nであった。初期状態に比べて5.5倍の増加を示している。この結果から、ECF マイクロポンプの負圧によるジャミング効果がソフトアクチュエータの剛性を切り替えることができることを証明している。また、本ソフトアクチュエータはその重量の5.2倍以上の負荷に耐えることができることを立証している。ECF マイクロポンプに2.5 kVを印加し、25 gの重さのソフトアクチュエータの先端に130 gの重りを置いたところ、印加電圧が維持されている間、本ソフトアクチュエータは重りを支えることができている。印加電圧をオフにしたとき、この重りはソフトアクチュエータの先端から落ちていることから、可変剛性機能を実験的に証明している。

(3) ジャミング転移の可変的な変位拘束要素への応用

本研究で提案しているECF ジャミング効果による変位拘束機構は、下部のECF マイクロポンプがある部屋と、上部の粒子が入っている2つの部屋に分かれており、その間に設置されたフィルタが粒子移動を遮断している。下部のECF マイクロポンプで負圧を発生させることで、上部の圧力を下げ、上部のチューブがジャミング転移現象を起こす。これにより、上部のチューブはソフトとハードな状態を切り替えることが可能である。動作実験により、ジャミング転移現象が生じている粒子のみが、伸びにくくジャミング転移現象の変位拘束機構としての有用性を確認している。粒子の量の変化による伸縮性の変化を調べた実験結果では、粒子が増えれば増えるほど伸びにくいことが明らかになっている。しかし粒子100%の実験ではチューブが破裂することがあることから、80%が最適と考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe Maho, Yoshida Kazuhiro, Kim Joon-wan, Eom Sang In, Yokota Shinichi	4. 巻 33
2. 論文標題 Three-dimensional AC electroosmotic micropump with high power density	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 105008 ~ 105008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/acef31	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 矢野 智昭、坂間 清子、金 俊完、松本 洋一、尾形 秀樹	4. 巻 126
2. 論文標題 第8回 機素潤滑設計(技術ロードマップから見る2030年の社会)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Mechanical Engineers	6. 最初と最後の頁 36 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemag.126.1257_36	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 Otomo Taiki, Matsubara Tatsuya, Yoshida Kazuhiro, Kim Deok-Ho, Ikeuchi Masashi, Kim Joon-wan	4. 巻 356
2. 論文標題 A microfluidic device integrated with a stretchable microporous membrane controlled by electro-conjugate fluid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114332 ~ 114332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2023.114332	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 Huyhn Huy Hoang, Han Dong, Yoshida Kazuhiro, De Volder Michael, Kim Joon-wan	4. 巻 338
2. 論文標題 Soft actuator with switchable stiffness using a micropump-activated jamming system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113449 ~ 113449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2022.113449	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

[学会発表] 計15件(うち招待講演 4件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Joon-wan KIM
2. 発表標題 Microfabricated syringe pump on a chip actuated by ECF (ElectroConjugate Fluid) flow
3. 学会等名 The 26th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taiki Otomo, Joon-wan Kim, Akihiro Yasuda, Siqi Peng, Kazuhiro Yoshida
2. 発表標題 Study on Oil-in-oil Droplet Generation based on Flow-focusing Geometry Using Ehd Micropumps
3. 学会等名 International Conference on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Joon-wan Kim, Yuya Kondo, Taiki Otomo, Akihiro Yasuda, Tatsuya Matsubara, Kazuhiro Yoshida
2. 発表標題 Study on Droplet Trapping Using an EHD Micropump
3. 学会等名 International Conference on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taiki Otomo, Tatsuya Matsubara, Deok-Ho Kim, Masashi Ikeuchi, Kazuhiro Yoshida, Joon-wan KIM
2. 発表標題 Proposal of a porous PDMS membrane using MEMS-fabricated nickel micropillars as a mold
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Biomedical Engineering International Workshop on Nanodevice Technologies 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Joon-wan Kim
2. 発表標題 ECF(electro-conjugate fluid)-driven microsyringe pump for lab-on-a-chip devices
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Biomedical Engineering International Workshop on Nanodevice Technologies 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本健二, 松原 竜也, 吉田 和弘, 金 俊完
2. 発表標題 電界共役流体 (ECF) 駆動形蠕動マイクロポンプの提案
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片岡遼, 吉田和弘, 金俊完
2. 発表標題 MR環境下で使用できるECFアクチュエータに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Joon-wan KIM
2. 発表標題 A micropump using MEMS technology and its applications to soft robots
3. 学会等名 The 24th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ZHU Yichuan, 吉田 和弘, 金 俊完.
2. 発表標題 カーボンナノチューブ技術を用いたECF マイクロポンプ用の針状電極作製に関する研究
3. 学会等名 2022年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢島 洋平, 吉田 和弘, 金 俊完.
2. 発表標題 ECFマイクロレートジャイロの高性能化に向けた基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片岡 遼, 吉田 和弘, 金 俊完.
2. 発表標題 ECFジェット効果を用いたMR環境下で使用できるアクチュエータに関する基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤優也, 松原竜也, 吉田和弘, 金俊完.
2. 発表標題 EHDマイクロポンプの発生圧力を用いた液滴トラップデバイスの提案
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhu Yichuan, 吉田和弘, 金俊完
2. 発表標題 ECFマイクロポンプにおけるリング形電極の新たな製作方法に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大友 泰輝, 吉田 和弘, 金 俊完
2. 発表標題 ECFマイクロポンプ駆動により肺胞の動的環境を再現するマイクロデバイスの提案
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金俊完
2. 発表標題 MEMS技術によるマイクロ液圧源の高パワー密度化とその応用
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会（招待講演）
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
	デ・ヴォルダー マイケル (De Volder Michael)	ケンブリッジ大学・Institute for Manufacturing・ Professor	

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			
英国	University of Cambridge			