

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13601  
研究種目：若手研究  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20K19890  
研究課題名（和文）機能性流体を用いることで無脊椎軟体生物を模倣したロボットの設計手法に関する研究  
  
研究課題名（英文）A study on the design of bio-inspired invertebrate robot based on functional fluids  
  
研究代表者  
柯 強 (OR, Keung)  
  
信州大学・先鋭領域融合研究群社会基盤研究所・特任講師  
  
研究者番号：70821122  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：生物は進化の過程を通じて、優れた機能や能力を獲得してきた。このような生体システムに内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、再現する設計手法はバイオインスパイアードと呼ばれ、近年注目されている。既存の生物規範ロボットは、人工筋肉やワイヤなどの駆動方法を利用して脊椎動物を模倣するケースが多いがミミズなどの無脊椎動物を模倣する事例は少ない。本研究では背骨を持たない無脊椎動物の柔らかい身体に着目し、ソフトロボティクスを生かしてミミズを模倣した小型のロボットを開発した。作製したロボットは土中で蠕動運動を行い掘り進むことを可能にした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

生物は進化の過程を通じて、優れた機能や能力を獲得してきた。その優れた機能や能力をロボットの設計に生かすことで、ロボットの性能向上に貢献できる。特に無脊椎動物のような着目されていない生物システムの能力をロボットで実現することは、無脊椎動物のしなやかさを生み出す原理の解明など学術的な意義だけでなく、狭いところの探索など様々な場面で活用できる。さらに、協調ロボットなど人間と一緒に働く場面では、柔らかい構造が求められている。そのため、ソフトロボティクスの要素技術として、柔らかさを求める場面での活用に期待できる。

研究成果の概要（英文）：Throughout evolution, organisms have developed remarkable functions and abilities. The design approach that actively incorporates and transfers these functions, abilities, and structures found in biological systems into robotic design is known as bio-inspired design, and it has received significant attention in recent years. Researchers in the field of bio-inspired robotics often focus on vertebrates, using actuation methods such as artificial muscles or wires. However, only a few researchers have paid attention to invertebrates, such as earthworms. In this study, we focused on the soft bodies of invertebrates that neither develop nor retain a vertebral column, and developed a compact robot that mimics an earthworm using soft robotics techniques. The fabricated robot is capable of performing peristaltic movements in the soil, enabling it to burrow and advance.

研究分野：ソフトロボット

キーワード：ソフトロボティクス バイオインスパイアード

1. 研究開始当初の背景

生物は進化の過程を通じて、優れた機能や能力を獲得してきた。例えば、ノミはジャンプする時に蓄えたエネルギーを瞬間的に解放することで、自身の体の約 10 倍の高さまでジャンプできると報告されている。その能力は筋肉の働きだけでなく、足の付け根にあるレジリンというゴム状のタンパク質によるものである[1]。このような生体システムに内在する優れた機能や能力、構造をロボットの設計過程に積極的に取り入れ、再現する設計手法はバイオインスパイアードと呼ばれ、近年注目されている。

既存の生物規範ロボットは、人工筋肉やワイヤなど駆動方法を利用して脊椎動物を模倣する場合が多い。しかし、カタツムリやミミズなどの無脊椎生物には、筋肉構造や運動機能について未解明のものが多く、脊椎動物ロボットと同様の手法や構造で設計することは困難である。そのため、背骨を持たない無脊椎生物の優れた機能や能力をロボットの設計に取り入れ、ロボットの性能を向上させることが研究課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は生体システムが持つ「やわらかさ」に着目し、しなやかな身体を持つソフトロボットを開発することで、背骨を持たない無脊椎生物のしなやかさを生み出す原理の解明と新たなロボット設計論の開拓を目的とする。

3. 研究の方法

無脊椎生物の一例としてミミズの体節構造を考察し、ミミズの液体包骨格構造を模倣したアクチュエータの開発を行う。ここで、無脊椎生物の柔らかさを重視するため、なるべく硬い要素を利用しないことを目指す。複数のアクチュエータモジュールを組み合わせることでミミズロボットを開発し、ミミズのような動きを実現できるかを検証し、設計手法を検討する。

4. 研究成果

研究の進行に伴い、計画を立てる段階から手法や目標は調整され、具体的には下記のような変更がある：

- ・無脊椎軟体生物から無脊椎生物に変更した
- ・ミミズロボットの実装において、機能性流体の利用から液体包骨格に変更した

軟体動物は無脊椎生物の一部であり、その特徴は主に柔らかい身体を持つことだ。本研究における着目点は骨などの硬い要素が少ない柔軟な身体を持つロボットの開発のため、研究の目的は大きく変更されていない。

(1) 液体包骨格で構成されたミミズを模倣したロボットの開発

(a) 液体包骨格アクチュエータの開発

ミミズは液体包骨格を持ち、軸方向に変化する筋肉「Longitudinal Muscle」と径方向に変化する筋肉「Circular Muscle」を備えている。この2種類の筋肉を用いて体節を軸方向に伸ばしたり、径方向に膨張させたりすることで蠕動運動を実現している。そこで本研究は水、形状記憶合金(SMA)およびゴムライク樹脂を用いてミミズの液体包骨格と筋肉の機能を模倣したアクチュエータを製作した。開発したアクチュエータとミミズの液体包骨格イメージの比較は図 1a に示す。

駆動原理として、ゴムライク樹脂が水を包み、SMA が径方向に収縮することで樹脂と水に圧力をかける。水の圧縮量が低いため、樹脂は変形して軸方向に伸ばす。SMA の電源が切れると元の状態に戻る。作製したアクチュエータの動作は図 1b に示す。この構造のメリットとして、アクチュエータの動作は SMA だけで実現でき、小型化が容易である。また、硬

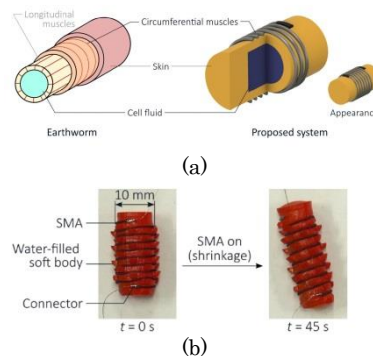


図 1

い材料の SMA は細く、水とゴムライク樹脂は「柔軟」であるため、アクチュエータがやわらかい。

(b) 液体包骨格アクチュエータのシミュレーション

設計パラメータがアクチュエータの伸縮性に与える影響を考察するため、有限要素解析ソフト Abaqus を用いてシミュレーションを行った。解析の結果、壁厚は薄い方が良いことが明らかになったが、実際の 3D プリンターの精度よりも小さい値であったことから、壁厚は 3D プリンターで作製可能な値に設定した。また、中空の構造よりもゴムライク樹脂内部の充填物の必要性もシミュレーションで検証できた。図 2 はシミュレーション中のモデルを示す。

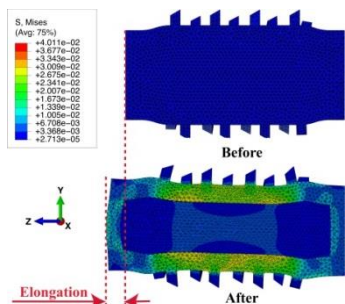


図 2

(c) ミミズを模倣したロボット

複数の液体包骨格アクチュエータモジュールを用いてミミズを模倣したロボットを開発した。作製したロボットは図 3 に示す。ロボットは無脊椎動物であるミミズと同様に体全体が柔らかく、身長は 132mm の小型サイズである。ミミズは土で掘り進むため、ロボットの頭部のみを硬い素材で作製した。加えて、土中に蠕動運動により前進するため、ミミズのような剛毛を用意し、土中でアンカーとして機能するよう設計した。

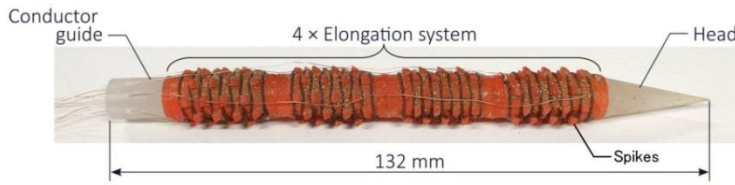


図 3

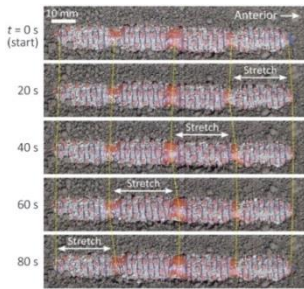


図 4

(d) 評価実験

土中移動の能力：

ロボットを土深さ 5mm のところに埋めた状態で移動実験を行った。土中に埋まった状態は測定が困難であるため、ロボットの移動距離は実験前後の隠れていない 2 枚の写真を比較することで測定を行った。結果は図 4 に示す。蠕動パターンは波長 4 節のパターン(図 5)で実験を行った。SMA の過収縮によるゴムライク樹脂の破壊を防ぐため、ロボットの蠕動サイクルは 120s で、その中で SMA の駆動時間は 20s、非駆動時間は 100s と設定した。

その結果、ロボットの移動距離は 6 サイクルで  $2.7 \pm 0.6\text{mm}$ 、12 サイクルで  $3.4 \pm 1.2\text{mm}$  という結果を得た。実験結果により、ロボットの前進能力は確認された。

制御問題の考察：

SMA の過熱や過収縮問題を考慮し、文献[2]の蠕動パターンの分析を参考にして、各節のアクチュエータの制御パターンを用意し、ロボットの移動量への影響を考察した。具体的な移動パターンは図 5 に示す。駆動される状態のアクチュエータはハイライトで強調する。図 5 に示すように、複数のアクチュエータは同時に駆動する場合もある。実験結果は図 6 に示す。すべての 4 つの移動パターンは前進することができ、波長 3 と波長 4 のパターンが 1、2 より移動性能が優れることが明らかになった。

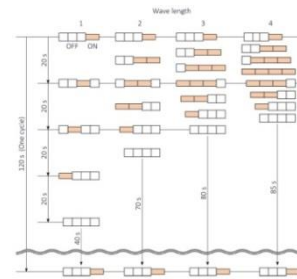


図 5

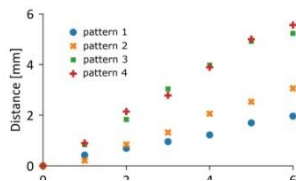


図 6

(2) 機能性流体を利用して柔らかい身体の作製

液体包骨格のほかに、機能性流体である磁気粘性流体(MR 流体)とシリコンゴムを用いて柔らかい身体の作製も行った。

従来の市販 MR 流体の媒体は鉱物油で構成されるものが多い。その鉱物油はシリコンゴムに侵入し、膨張させる問題点がある。本研究では臭化カリウム(KBr)、臭化ヘキサデシルトリメチルアンモニウム(CTAB)、及びカルボニル鉄粉を用いて水性 MR 流体を作製した。

評価実験により、PDMS などシリコンゴムに対する侵入量が少ないことを確認した。作製した水性 MR 流体を使用して、液圧ソフト指を開発した。作製したソフト指は全体的に柔らかく、外部の磁場で屈曲特性を調整できることを確認した。結果は図 7 に示す。図 7a は実験時の指の外観を示し、図 7b は磁場をかけない状態で駆動する指の軌道を示す。図 7c は液圧通路に磁場をかけて駆動する指の軌道を示す。この結果により、無脊椎生物ロボットの設計に応用することが期待できる。



(a)

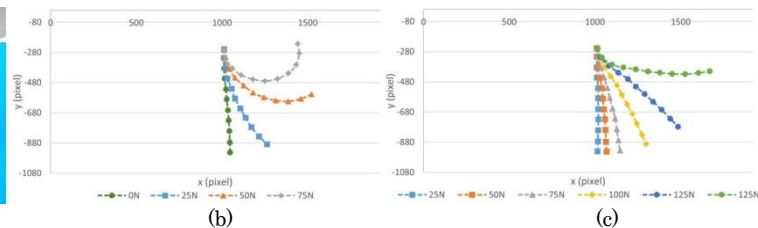


図 7

[1] 東昭, 生物の動きの事典, 株式会社朝倉書店, 1997

[2] A. Kandhari, Y. Wang, H. J. Chiel, R. D. Quinn, and K. A. Daltorio, "An analysis of peristaltic locomotion for maximizing velocity or minimizing cost of transport of earthworm-like robots," Soft robotics, vol. 8, no. 4, pp. 485-505, 2021

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Or Keung, Wu Kehua, Nakano Kazashi, Ikeda Masahiro, Ando Mitsuhiro, Kuniyoshi Yasuo, Niiyama Ryuma	4. 巻 10
2. 論文標題 Curriculum-reinforcement learning on simulation platform of tendon-driven high-degree of freedom underactuated manipulator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frobot.2023.1066518	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Niiyama Ryuma, Matsushita Kazuma, Ikeda Masahiro, Or Keung, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 18
2. 論文標題 A 3D printed hydrostatic skeleton for an earthworm-inspired soft burrowing robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 7990~7997
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D2SM00882C	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nakano Kazashi, Gunji Megu, Ikeda Masahiro, Or Keung, Ando Mitsuhiro, Inoue Katsuma, Mochiyama Hiromi, Nakajima Kohei, Niiyama Ryuma, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 8
2. 論文標題 "RobOstrich" Manipulator: A Novel Mechanical Design and Control Based on the Anatomy and Behavior of an Ostrich Neck	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3062~3069
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2023.3265301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Chen Lai, Sasatani Takuya, Or Keung, Nishikawa Satoshi, Kawahara Yoshihiro, Niiyama Ryuma, Kuniyoshi Yasuo	4. 巻 6
2. 論文標題 Wireless Powered Dielectric Elastomer Actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 7278~7284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2021.3097271	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 Misu Kenji, Ikeda Masahiro, Or Keung, Ando Mitsuhito, Gunji Megu, Mochiyama Hiromi, Niiyama Ryuma	4. 巻 34
2. 論文標題 Robostrich Arm: Wire-Driven High-DOF Underactuated Manipulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 328 ~ 338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kazuma Matsushita, Masahiro Ikeda, Or Keung, Niiyama Ryuma, Kuniyoshi Yasuo
2. 発表標題 An Actuation System using a Hydrostatic Skeleton and a Shape Memory Alloy for Earthworm-like Soft Robots
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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