

再構成可能な腱駆動モジュラーソフトロボット

大橋 直和^{1,a)} 岩本 憲泰^{1,b)} 梅舘 拓也^{1,c)}

概要：モジュラーロボットは、容易に再構成できるという点で優れている。モジュラーロボットを従来の硬い材料だけではなく柔らかい材料と組み合わせて作ることで、しなやかな動きが出来るようになり、人と同じ空間で使用することも可能になる。そこで本研究では腱駆動アクチュエータを用いて再構成可能なモジュラーソフトロボットを作製した。モジュールはゴムライク樹脂を用いて「曲げ」「圧縮」「ひねり」のいずれかの変形が起きやすいように作製した。さらに用いるモジュールの個数及び組み合わせを変えることで一方向に曲がるモジュラーソフトロボットや螺旋状に曲がるモジュラーソフトロボットなどが作製可能であることが分かった。

1. はじめに

モジュラーロボットは他のロボットと異なり、容易に再構成できるという点で優れている。さらにモジュラーロボットのモジュールは再利用が可能であり、環境や用途に合わせて形状や動きを変えることが出来る。すでに再構成可能なモジュラーロボットの研究 [1], [2], [3], [4], [5], [6] が行われており、代表的なものに M-TRAN[7] や ATRON[8], SMORES[9] などがある。また、レゴのブロックのようにモジュラーロボットのモジュールを簡単に再構成出来るようにしたロボット [10], [11] も研究・開発がされている。

モジュラーロボットを従来の硬い材料だけではなく柔らかい材料と組み合わせて作ることで、人と同じ空間で使用でき、しなやかな動きをさせることができる [12], [13]。柔らかい材料を用いて作られたモジュラーソフトロボットは空気圧アクチュエータで動いているものが多い [14], [15], [16], [17], [18]。モジュラーソフトロボットに空気圧アクチュエータを用いる場合、空気圧の制御は容易である一方で、コンプレッサーなどの装置の小型化が難しく、さらに空気の漏れによるトラブルが発生しやすい。

そこで本研究では腱駆動アクチュエータを用いて再構成可能なモジュラーソフトロボットを作製する。腱駆動アクチュエータは駆動発生機構部をコンパクトに作製でき、モジュールへのアクチュエータの取り付けが容易で、糸を通す順番を変えるだけで同じモジュールの組み合わせでも異

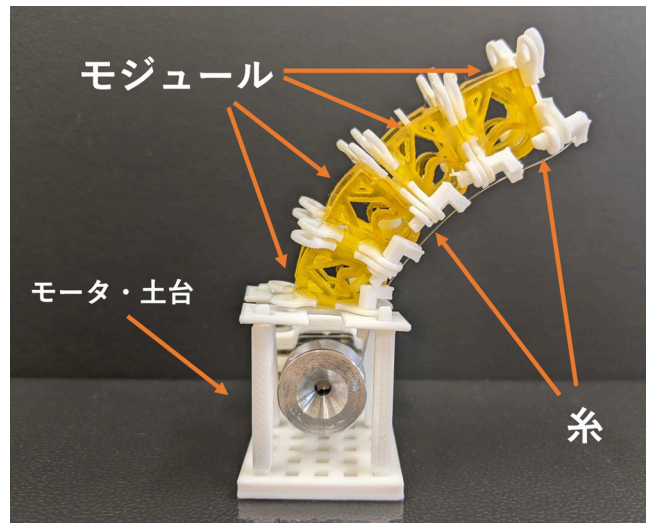


図 1 ロボットの全体像

なった振る舞いをさせることが出来る。いろいろな形状の腱駆動ロボットの研究・開発が行われているが [19], [20], 再構成可能なモジュラーソフトロボットはまだない。本研究ではモジュールはゴムライク樹脂を用いて「曲げ」「圧縮」「ひねり」のいずれかの変形が起きやすいように作製した。さらに用いるモジュールの個数及び組み合わせを変えることでどんな変形が出来るか検証した。一方向に曲がるモジュラーソフトロボットや螺旋状に曲がるモジュラーソフトロボットなどが作製可能であることが分かった。

2. ロボットの概要

2.1 全体像

ロボットの全体像を図 1 に示す。ロボットは大きく分けてモジュールを繋げた部分と土台で構成されている。土台に

¹ 信州大学
Shinshu University

a) 21fs306g@shinshu-u.ac.jp

b) iwamoto@shinshu-u.ac.jp

c) umedachi@shinshu-u.ac.jp

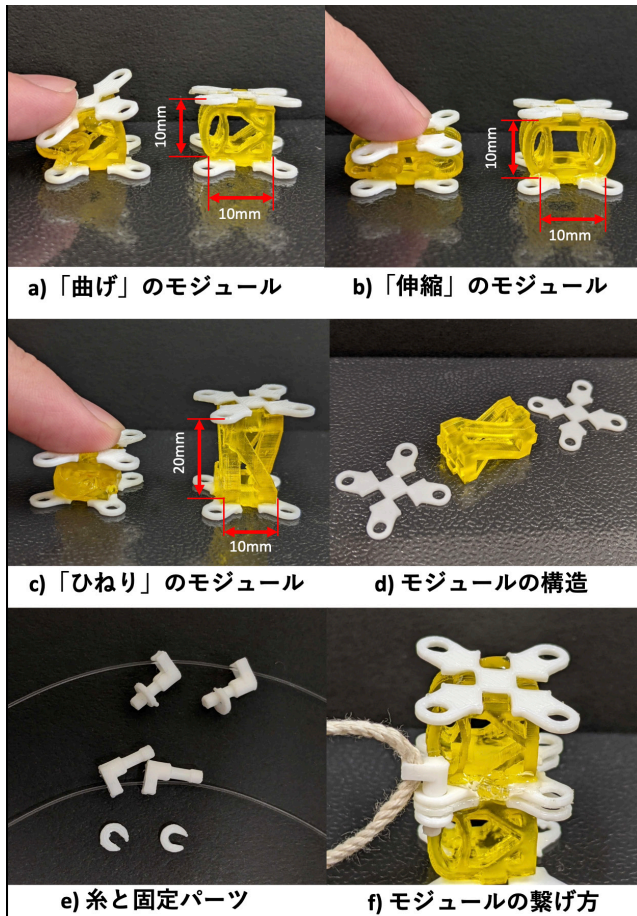


図 2 開発したモジュール

はプリー付きのモータが取り付けられている。モジュールの上下の硬い部分の穴に糸を通しておく。ロボットはモータを用いてモジュールに通した糸を引くことにより形を変えることができる。モジュール部分は、「曲げ」「圧縮」「ひねり」のいずれかの特徴を持ったモジュールをいくつもつなげることによって構成されている。本研究は腱に釣り糸を用いたが見やすさを重視するために、一部の図では太めのタコ糸を用いた。

2.2 モジュール

次に「曲げ」「圧縮」「ひねり」それぞれのモジュール及び各パーツについて図 2 に示す。それぞれのモジュールの大きさは縦が約 10mm、横が約 10mm、高さが「曲げ」「圧縮」のモジュールは約 10mm 「ひねり」のモジュールは約 20mm である。

2.2.1 「曲げ」のモジュール

「曲げ」のモジュールを図 2a) に示す。図 2a) 中のモジュールの左側を楕円、右側を支柱にすることにより、上部に荷重を加えた際に「曲げ」の変形が発生しやすくなる。

2.2.2 「圧縮」のモジュール

「圧縮」のモジュールを図 2b) に示す。4 辺の柱を楕円にすることにより、上部に荷重を加えた際に「圧縮」の変形

が発生しやすくなる。

2.2.3 「ひねり」のモジュール

時計回りの「ひねり」のモジュールを図 2c) に示す。斜め柱だけを使ってモジュールを作製することにより、上部に荷重を加えた際に「ひねり」の変形が発生しやすくなる。斜め柱の方向を変えた反時計回りの「ひねり」のモジュールも作製した。

2.2.4 モジュールの作製方法

接着剤で接着する前のモジュールを図 2d) に示す。柔らかい部分の上側と下側に板状の硬い部分を接着剤を用いてサンドイッチ構造にすることによりモジュールを作製した。柔らかい部分はミツ社の M3DS-SA5 を用いてゴムライク樹脂（ショア A 5 ゴムライク樹脂）で造形した。硬い部分は Raise 3D 社の Raise3D E2 を用いて PLA 樹脂（Raise3D 純正プレミアム PLA フィラメント）で造形した。接着剤はセメダイン社のスーパー XG 速乾クリアを用いた。

2.2.5 糸の取り付け方法

図 2e) のようにモジュールを取り付けるためのパーツをあらかじめ糸に通しておいた。図 2f) のようにモジュールの硬い部分の四方に開けた穴のいずれかに固定用のパーツを取り付けることにより、モジュール同士の固定とモジュールに糸を通す作業を同時に行えるようにした。この作業を繰り返すことにより、モジュールをつなげることと任意の穴に任意の順番で糸を取り付けることができる。

3. モジュール部分の変形の様子

「曲げ」「圧縮」「ひねり」のモジュールの個数及び組み合わせを変えることでどんな変形が出来るか検証した。検証した変形の様子をいくつか紹介する。

3.1 変形の例 a)











曲げのモジュールのみで、同じ向きに曲がるようにロボットを構成した。このロボットのモジュール部分が、一方向に曲がる様子を図 3a) に示す。

3.2 変形の例 b)

曲げのモジュールのみで上 2 つと下 2 つのモジュールが異なる向きに曲がるようにロボットを構成した。このロボットのモジュール部分が、S 字に曲がる様子を図 3b) に示す。

3.3 変形の例 c)

時計回りと反時計回りのひねりのモジュールのみでロボットを構成した。このロボットのモジュール部分が圧縮する様子を図 3c) に示す。時計回りと反時計回りの「ひねり」のモジュールを用いることで上下の硬い部分は回らないが、真ん中の硬い部分だけ回る変形をすることが出来る。

モジュールの名前	曲げ 右	曲げ 左	圧縮	ひねり 時計回り	ひねり 半時計 回り
実物					
簡略図					

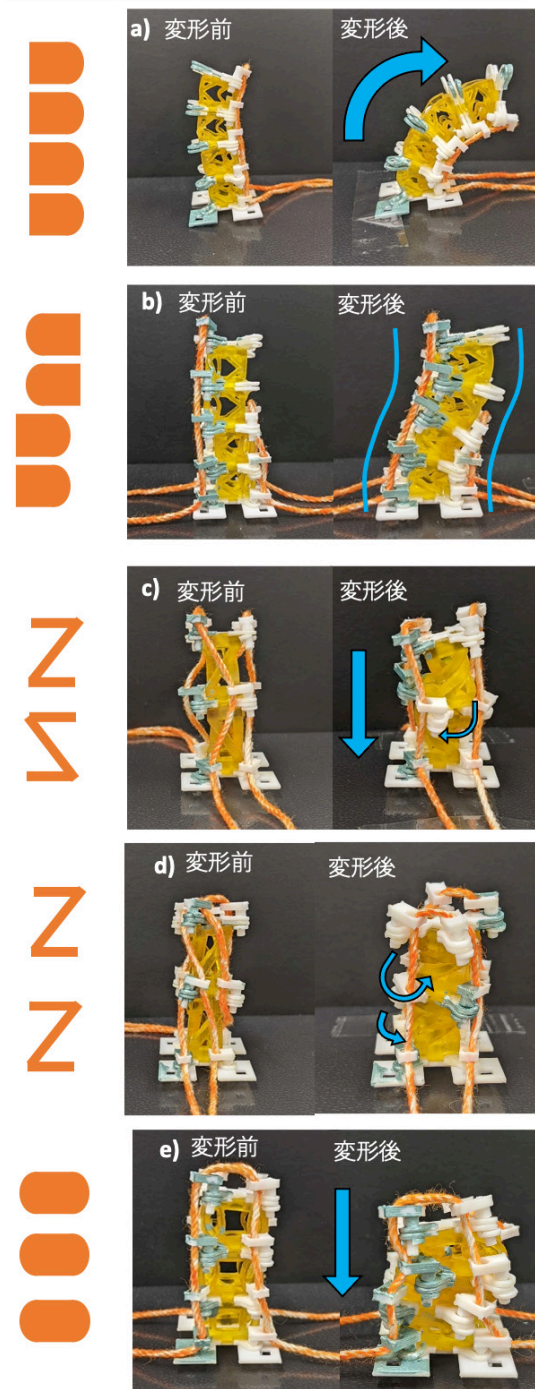


図 3 さまざまな変形の様子. a) モジュール部分が一方に曲がる様子, b) モジュール部分が S 字に曲がる様子, c) 「ひねり」のモジュールのみを用いて, モジュール部分が圧縮する様子, d) モジュール部分が螺旋状に曲がる様子, e) 「圧縮」のモジュールのみを用いて, モジュール部分が圧縮する様子

3.4 変形の例 d)

反時計回りのひねりのモジュールのみでロボットを構成した. このロボットのモジュール部分が螺旋状に曲がる様子を図 3d) に示す.

3.5 変形の例 e)

圧縮のモジュールのみでロボットを構成した. このロボットのモジュール部分が圧縮する様子を図 3e) に示す.

4. 終わりに

腱駆動アクチュエータを用いて再構成可能なモジュラーソフトロボットを作製した. そしてモジュールの個数及び組み合わせを変えることでどんな変形が出来るか検証した. 一方向に曲がるモジュラーソフトロボットや螺旋状に曲がるモジュラーソフトロボットなどが作製可能であることが分かった.

5. 今後の展望

今後, 再構成可能な腱駆動モジュラーソフトロボットを用いてどんなアプリケーションを作ることが出来るか検討していく. また, 「曲げ」「圧縮」「ひねり」以外の変形しやすいモジュールを作製していく. 将来的に再構成可能な腱駆動モジュラーソフトロボットを教育の分野に応用出来ないか考えていく.

謝辞 本研究は JSPS 科研費, 新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05467 の助成, 及び JSPS 科研費基盤研究 (B)21H01289 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] Chennareddy, S., Agrawal, A. and Karupppiah, A.: *Modular self-reconfigurable robotic systems: a survey on hardware architectures*, Journal of Robotics, Vol. 2017 (2017).
- [2] Moubarak, P. and Ben-Tzvi, P.: *Modular and reconfigurable mobile robotics*, Robotics and autonomous systems, Vol. 60, No. 12, pp. 1648–1663 (2012).
- [3] Yim, M., Shen, W.-M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E. and Chirikjian, G. S.: *Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 43–52 (2007).
- [4] Alattas, R. J., Patel, S. and Sobh, T. M.: *Evolutionary modular robotics: Survey and analysis*, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 95, No. 3, pp. 815–828 (2019).
- [5] Chen, I.-M. and Yim, M.: *Modular robots*, Springer Handbook of Robotics, Springer, pp. 531–542 (2016).
- [6] Seo, J., Paik, J. and Yim, M.: *Modular reconfigurable robotics*, Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, Vol. 2, pp. 63–88 (2019).
- [7] Murata, S., Yoshida, E., Kamimura, A., Kurokawa, H., Tomita, K. and Kokaji, S.: *M-TRAN: Self-reconfigurable modular robotic system*, IEEE/ASME transactions on mechatronics, Vol. 7, No. 4, pp. 431–441

- (2002).
- [8] Jorgensen, M. W., Ostergaard, E. H. and Lund, H. H.: *Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot*, 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566), Vol. 2, Ieee, pp. 2068–2073 (2004).
 - [9] Liu, C., Whitzer, M. and Yim, M.: *A distributed reconfiguration planning algorithm for modular robots*, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 4, No. 4, pp. 4231–4238 (2019).
 - [10] LEGO: Robots For Kids — Categories — レゴ® ショップ公式オンラインストア JP, <https://www.lego.com/ja-jp/categories/robots-for-kids>. (Accessed on 12/13/2021).
 - [11] Corporation, X.: Xiaomi Mall - Xiaomi Corporation, <https://www.mi.com/toyblock>. (Accessed on 12/13/2021).
 - [12] Laschi, C., Mazzolai, B. and Cianchetti, M.: *Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities*, Science robotics, Vol. 1, No. 1, p. eaah3690 (2016).
 - [13] Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J. and Kim, S.: *Soft robot review*, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 3–15 (2017).
 - [14] Morin, S. A., Shevchenko, Y., Lessing, J., Kwok, S. W., Shepherd, R. F., Stokes, A. A. and Whitesides, G. M.: *Using “Click-e-Bricks” to Make 3D Elastomeric Structures*, Advanced Materials, Vol. 26, No. 34, pp. 5991–5999 (2014).
 - [15] Robertson, M. A. and Paik, J.: *New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse capabilities*, Science Robotics, Vol. 2, No. 9 (2017).
 - [16] Brunete, A., Ranganath, A., Segovia, S., d Frutos, J. P., Hernando, M. and Gambao, E.: *Current trends in reconfigurable modular robots design*, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 14, No. 3, p. 1729881417710457 (2017).
 - [17] Sui, X., Cai, H., Bie, D., Zhang, Y., Zhao, J. and Zhu, Y.: *Automatic generation of locomotion patterns for soft modular reconfigurable robots*, Applied Sciences, Vol. 10, No. 1, p. 294 (2020).
 - [18] : *Soft Robotics for Kids with LEGO Mindstorms — Soft Robotics Toolkit*, <https://softroboticstoolkit.com/soft-robotics-kids>. (Accessed on 12/13/2021).
 - [19] Maghooa, F., Stilli, A., Noh, Y., Althoefer, K. and Wurdemann, H. A.: *Tendon and pressure actuation for a bio-inspired manipulator based on an antagonistic principle*, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, pp. 2556–2561 (2015).
 - [20] Clark, A. B., Mathivannan, V. and Rojas, N.: *A Continuum Manipulator for Open-Source Surgical Robotics Research and Shared Development*, IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, Vol. 3, No. 1, pp. 277–280 (2020).