

# 円筒折り紙構造を用いた軽量型ロボットアームの制作評価実験

楠木幹也<sup>†1</sup> 謝浩然<sup>†1</sup>

**概要**：近年、折り紙構造を用いた柔らかいロボットアームの研究が盛んに行われている。本研究では、代表的な円筒折り紙構造による軽量型ロボットアームの制作に着目し、実際の制作コストや体験の評価実験を行う。具体的には、Twisted Tower, 吉村パターン, Kresling パターンの3つの円筒型折り紙構造を手折りしてもらい制作評価実験を実施した。制作評価実験では、それぞれの折り紙構造について、規定時間にわたる制作作業を行ってもらった後、NASA-TLX 法を用いたアンケート評価を実施した。実験結果として、Twisted Tower, 吉村パターン, Kresling パターンの順に制作負荷が高いことが明らかになった。

## 1. はじめに

現在、多くのロボットやコンピュータ機械が我々の周りに存在しており、人間とロボットのインタラクションが重要視されているのが現状である。ウェアラブルデバイスとして、ロボットアームを人間の体に取り付けて扱う場合は、より密接なインタラクションが求められる。ウェアラブルロボットアームの一つとして、余剰肢ロボットと呼ばれるものがある。これはロボットアームを人間の体に取り付けることで、人間の身体能力を拡張することができる。

一般的には、ロボットアームは硬くて重いイメージがあるが、近年では柔らかい素材を用いた軽量のソフトロボットアームに関する研究も盛んに行われている[1]。ソフトロボットアームは制御の精度が悪いといった課題が存在するものの、ソフトロボットアームの長所である柔軟性は、人体との安全なインタラクションをもたらす可能性がある[2]。ソフトロボットアームに関する研究の中には折り紙構造を用いた研究も存在する[3]。折り紙は安価な素材かつ入手も容易であるため、その手軽さから多くの人に親しまれている。折り紙を用いたソフトロボットアームは、安全、安価、手軽である点から個人でのものづくりに適した要素を持っていると考えられる。

本研究では、3つの円筒折り紙構造によるロボットアームの制作コストの比較を行うため、10人の被験者を募り、15分間にわたって3種類のロボットアームを制作する実験を実施した後、NASA-TLXを用いたアンケートに回答してもらった。そのアンケート結果から、Twisted Towerが3つの中で最も制作負荷が高い折り紙構造であることが明らかになった。今後の課題として、より制作負荷の低い折り紙構造や折り方を模索していく必要がある。また、人間身体能力を拡張する折り紙構造を用いた余剰肢ロボットの研究開発も視野に入れている(図1)。

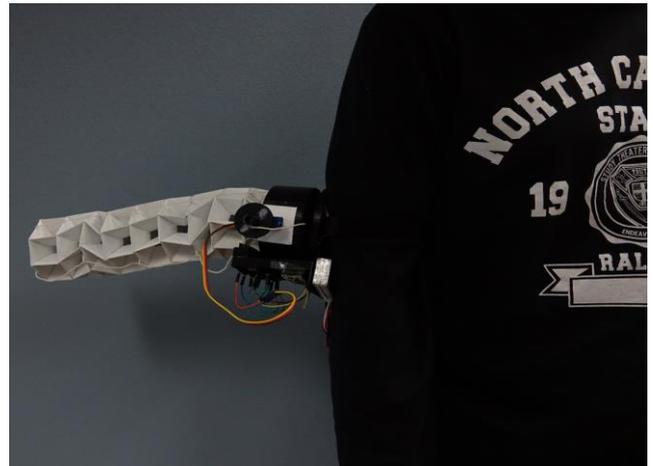


図1 折り紙型ロボットアームの装着イメージ図

## 2. 関連研究

### 2.1 軽量型ロボットアーム

ロボットアームの軽量化を目的とした研究を紹介する。Hagenahらは、最新の素材を用いることで、軽量のロボットアームの構築方法を紹介した[4]。Lensらは、腱駆動と腱の弾性を組み合わせることで、ロボットアームの重量の大幅な削減を実現した[5]。Xieらは、伸縮機構を用いたコンパクトで軽量のロボットアームを開発し、余剰肢ロボットとして活用している[6][7]。その他にも、軽量のロボットアームを尻尾デバイスとしても活用している[8]。本研究は、折り紙構造を用いた軽量型ロボットアームの比較を目的としている。

### 2.2 折り紙型ロボットアーム

近年、折り紙構造を用いたロボットアームが提案されている。Twisted Tower 構造を利用したロボットアームは数多くの研究がなされている。Wangらは、3Dプリンターを用いた Twisted Tower の製作手法を提案した[9]。VanderHoffらは、糸で作動する Twisted Tower 構造のロボットアームを開発した[10]。Wuらは、剛体部品のみで構成された Twisted Tower 機構を開発した[11]。Twisted Tower 構造はロボット

<sup>†1</sup> 北陸先端科学技術大学院大学

アームの他にも Crawling Robot としての用途も存在する [12]. 吉村パターンに関するロボットアームの研究は数多く研究されている. Santoso らは, 吉村パターンを用いたモジュール式の連続体マニピュレータを開発した [13][14]. Banerjee らは, 吉村パターンを用いて, ぜん動運動可能なロボットを実現した [15]. Onal らは, 吉村パターンを用いたも虫ロボットを開発した [16]. Kresling パターンに関するロボットアームの研究を紹介する. Kaufmann らは, Kresling パターンの双安定性という特徴を生かし, 再構成可能な関節運動を実現した [17]. Wu らは, Kresling パターンに基づいた磁気制御のロボットアームを開発した [18]. Matsuo らは, Kresling パターンを用いて, 運動構造のみによって高い伸展比と変形性を併せ持つ, 多自由度の剛体伸縮機構を実現した [19]. 本研究では, 余剰肢ロボットの軽量化を図り, 上述した折り紙構造を用いたロボットアームの制作評価実験を行った.

### 3. 折り紙構造

本研究の目的は, 円筒型折り紙構造を用いたソフトロボットアーム制作してもらうことで, 制作負荷の比較評価を行うことである. 比較対象は, Twisted Tower, 吉村パターン, Kresling パターンの3つの折り紙構造である.

#### 3.1 Twisted Tower

Twisted Tower 構造とは, 複数の層が積み重なることによって形成されるモジュール式の折り紙構造である. 最初の八角形状の層を1段作るためには, 縦横比が1:2となるように設定された長方形の折り紙を24枚用意し, 特定の順序に沿って折り曲げ, それらを組み立てる必要がある. 以降の層は16枚の長方形の折り紙を用意する必要がある. 層の直径と高さは, 長方形の大きさによって決定される. この構造は直線的な伸縮や曲げを生み出すことが可能である (図2).

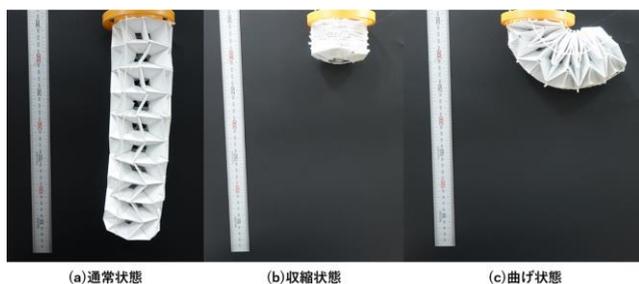


図2 Twisted Tower 構造

#### 3.2 吉村パターン

折り紙構造における吉村パターンは, 薄い円筒を軸方向に力を加えた際に現れる構造であり, 比較的知られている円筒折り紙パターンの一つである. 吉村パターンは, ダイヤモンドパターンが連続した構造を持っている. 吉村パタ

ーンの構造的特徴として, 高いねじり剛性が挙げられる (図3).

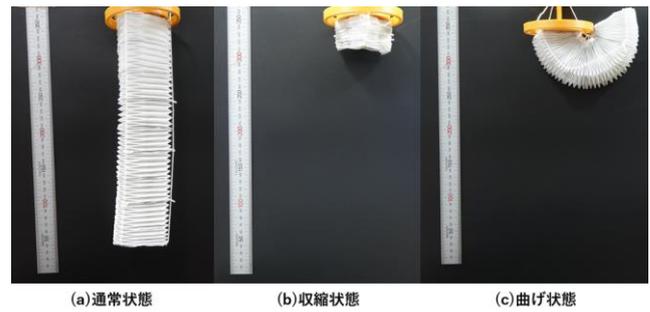


図3 吉村パターン

#### 3.3 Kresling パターン

Kresling パターンは, 双安定性という特徴をもつ折り紙構造の一つで, 円柱の上面と底面をねじることで, 軸方向に伸縮を発生させることができる (図4).

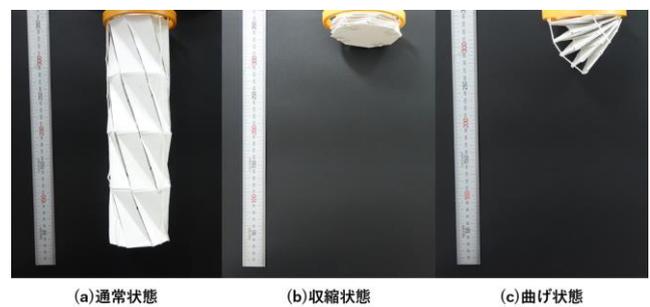


図4 Kresling パターン

### 4. ロボットアームの制作実験

本研究では Twisted Tower, 吉村パターン, Kresling パターンの3つの円筒折り紙構造を用いたソフトロボットアームの制作実験を行った. 3つの折り紙構造を図5に示す. それぞれの構造について, 左の図から, 適切に折り曲げ組み合わせることで, 右の図のような円筒折り紙構造が作られる.

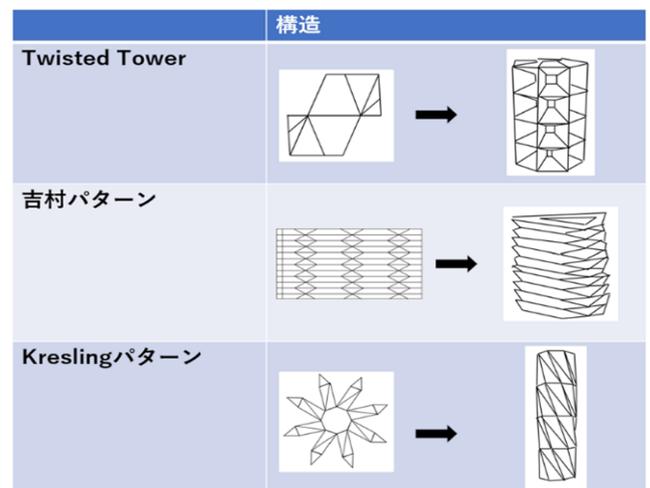


図5 実験に用いた折り紙の構造

#### 4.1 実験内容

3種類の折り紙構造の制作コスト及びメンタルワークロードを比較調査するために、評価実験を実施した。実験に参加したのは所属大学の学生の10名(20代,男性9名,女性1名)である。アンケート評価では,主観的なメンタルワークロード評価手法であるNASA-TLX法を使用する。最初に,被験者にそれぞれの折り紙構造について,およそ2分程度で折り方の説明を行った後,15分間それぞれの折り紙構造について折ってもらう。被験者が用いる材料は厚さ0.09mmのコピー用紙(プラス株式会社,品番CR-220)で統一した。なお,吉村パターンとKreslingパターンは折り目線がついている紙を用いており, Twisted Towerについては折り方が複雑であるため,最初の説明に加えて,実験の最中でも,折り方の順序を説明している動画を見るのが可能である。3種類全ての制作実験を終えた後に,アンケートに回答してもらった。アンケート評価では,7段階のリッカート尺度(1:全くそう思わない⇔7:とてもそう思う)を使用する。制作実験中の様子を図6に示し,実際の制作物を図7に示す。



図6 制作実験の様子

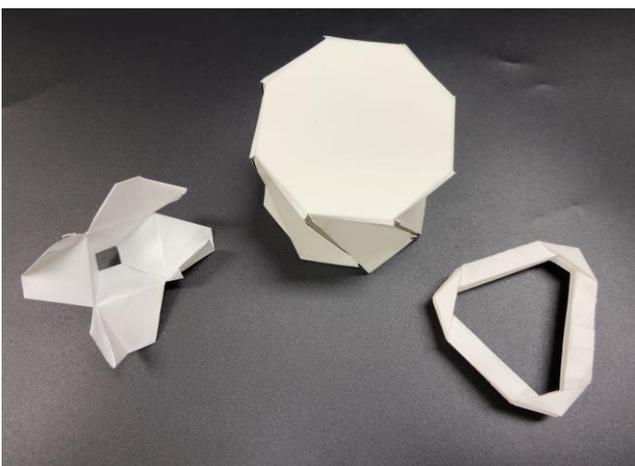


図7 制作実験における制作物

##### 4.1.1 Twisted Tower 構造ロボットアームの制作

本研究では, Twisted Tower 構造は, VanderHoff らの論文[10]の作成方法を参考に設計した。外接円の直径がおよそ

80mm となるように, 元となる縦横比 1:2 の長方形の紙を 50mm×100mm とした。1層あたりの高さは通常 30mm 程度である。

##### 4.1.2 吉村パターン構造ロボットアームの制作

吉村パターンに関しては, 本研究は吉村パターンを応用した Santoso らの論文[13]を参考に設計した。また, 軸方向に伸びている折り目線の交点を頂点とし, それらを結んでできた三角形の外接円をとっている。参考にした論文では, モジュール構造として, 一つのモジュールにモータや基板等が搭載されているが, 試作した円筒折り紙では, 折り紙構造のみを参考に設計している。

##### 4.1.3 Kresling パターン構造ロボットアームの制作

Kresling パターンに関しては, 本研究は Kaufmann らの論文[17]を参考に設計した。1層あたりの高さは, およそ 71mm である。Kaufmann らの論文を参考に, 折り目以外は厚紙を張り付けることで構造的な強化を行っている。

#### 4.2 実験結果

3種類のそれぞれの折り紙構造についてのアンケート結果を図8~10に示す。

実験の結果としては, Twisted Tower 構造が最も制作負荷の高い折り方であることが明らかになった。Twisted Tower 構造は, NASA-TLX の全ての項目で高いという結果がでており, 特に「知的要求」と「努力」が他と比べて高いことから, 制作に苦労したことが容易に想像できる。Twisted Tower 構造について被験者は, 「折り曲げる工程が多く, 折り方が難しかったため大変だった。」「初見で折り方を理解するのが難しかった。」「折る工程を記憶するのが難しかったが, 覚えた後はスムーズにできた。」「ロボットアームにするのに折るべき折り紙の数が多すぎるため大変だと感じた。」「動画を見ながらの作業は少し大変だった。」「一番作るのが面倒だった。ロボットアームとしての汎用性は最も高そうだが, 作るのが最も難しい。」等の感想があった。実際に, 被験者は最初の一つの部分を折るのに多くの時間を要していた。しかしながら, 回数を重ねるにつれ, 被験者は折る工程を暗記していくため, 要する時間はどんどん短くなっていった。このことから, 時間が経過するほど制作負荷は減っていくと考えられる。吉村パターンについて被験者は, 「山折りと谷折りが組み合わせられていることにより折りづらかった。」「折るのが難しかった。」「手先の細かい作業が要求されるのでストレスを感じた。」「一つ目が折れたら, 二つ目は簡単に折れた。」「完成品の強度が低かったので, ロボットアームとしての実用性は低く感じた。」等の感想があった。今回参考にした吉村パターンに関しては, 折る工程を暗記する必要がない分, Twisted Tower より制作負荷が低かったと考えられる。Kresling パターンについて被験者は, 「3つの中で最も作りやすかった。」「曲げにくいので, ロボットアームとしての応用範囲は狭そう。」等の感想があった。Kresling パターンは, 折る工程を暗記する必

要がなく、折る工程も困難でないため、最も制作負荷が低かったと考えられる。

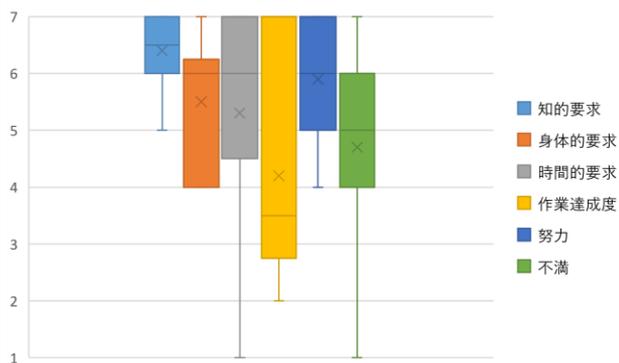


図 8 Twisted Tower 構造のアンケート結果

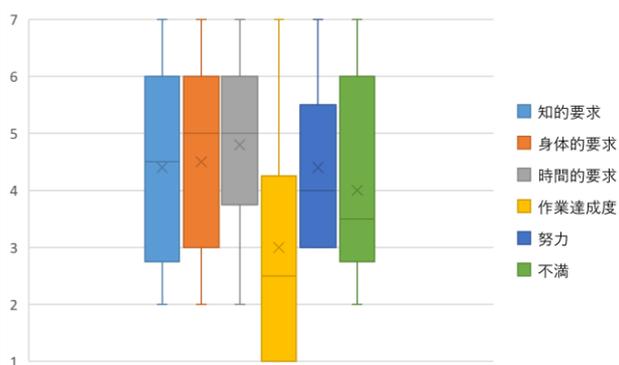


図 9 吉村パターンのアンケート結果

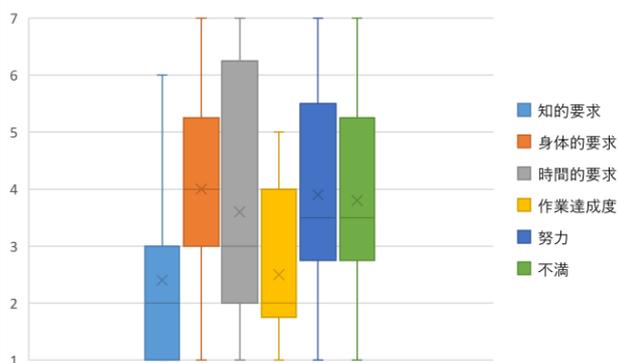


図 10 Kresling パターンのアンケート結果

## 5. まとめ

本研究では、Twisted Tower、吉村パターン、Kresling パターンの3つの円筒折り紙構造を用いたソフトロボットアームについての制作評価実験を行った。結果として、Twisted Tower 構造はメンタルワークロードの全ての項目で高い数値がでており、最も制作負荷が高いことが明らかになった。

今後の課題として、より制作負荷の低い折り紙構造や折り方を模索することが挙げられる。吉村パターンは横に傾

けた時自重に耐えられずに垂れてしまい、Kresling パターンは極端に曲げ性能が低い、といった課題がある。その一方で、ロボットアームとしての Twisted Tower 構造は、吉村パターンと異なり自重に耐えることができ、Kresling パターンよりも高い曲げ性能を持っている。しかしながら、吉村パターン、Kresling パターンと比較して、Twisted Tower 構造は制作コストが高いという欠点があると分かった。そこで、制作コストを下げる手法を考案する必要がある。

折り紙構造を用いたロボットアームは、従来のロボットアームと比較して自作しやすいことは明らかである。これらの制作コストをさらに下げることで、誰もがものづくりの一環として興味を持つ可能性がある。また、折り紙構造を用いたロボットアームを余剰肢ロボットへ適用することができれば、安価で安全に人間の能力を拡張することができる。

## 参考文献

- [1] Z. AL-Rabia, M. Al-Ibadi and A. Al-Ibadi : "Design and Implementation of a Multiple DoF Soft Robot Arm Using Exestensor Muscles" 2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, pp. 170-174(2022).
- [2] S. Sanan, M. H. Ornstein and C. G. Atkeson : "Physical human interaction for an inflatable manipulator" 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 7401-7404(2011).
- [3] Zhang, K., Qiu, C., and Dai, J. S. : "An Extensible Continuum Robot With Integrated Origami Parallel Modules." ASME. Journal of Mechanisms and Robotics, Vol.8, No.3(2016).
- [4] H. Hagenah, W. Böhm, T. Breitsprecher, M. Merklein, S. Wartzack : "Modelling, Construction and Manufacture of a Lightweight Robot Arm" Procedia CIRP, Vol.12, pp. 211-216(2013).
- [5] T. Lens and O. von Stryk : "Design and dynamics model of a lightweight series elastic tendon-driven robot arm" 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4512-4518(2013).
- [6] Z. Ding, S. Yoshida, T. Torii, and H. Xie : "XLimb: Wearable Robot Arm with Storable and Extendable Mechanisms" In 12th Augmented Human International Conference, No.8, pp.1-4(2021).
- [7] H. Xie, Z. Ding, S. Yoshida, T. Chong, T. Torii, and T. Fukusato : "Augmenting Human with Compact Supernumerary Robotic Limbs" In 13th Augmented Human International Conference, No.8, pp.1-4(2022).
- [8] H. Xie, K. Mitsuhashi, and T. Torii : "Augmenting Human With a Tail" In Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference, No.35, pp.1-7(2019).
- [9] Y. Wang and K. Lee : "3D-printed semi-soft mechanisms inspired by origami twisted tower" 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), pp. 161-166(2017).
- [10] E. Vander Hoff, Donghwa Jeong and Kiju Lee : "OrigamiBot-I: A thread-actuated origami robot for manipulation and locomotion" 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1421-1426(2014).
- [11] Wu, X., Yang, C., Li, J., Zhao, Q., Wu, W., Zhu, Y., and Zhang, F : "Rigid-Foldable Mechanism Inspired by Origami Twisted Tower." ASME. Journal of Mechanisms and Robotics, Vol.14, No.5(2022).
- [12] Fei, F., Leng, Y., Xian, S., Dong, W., Yin, K. and Zhang, G : "Design of an Origami Crawling Robot with Reconfigurable Sliding Feet" Applied Sciences, Vol.12, No.5, pp.2520(2022).
- [13] J. Santoso, E. H. Skorina, M. Luo, R. Yan and C. D. Onal : "Design and analysis of an origami continuum manipulation module with torsional strength" 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2098-2104(2017).
- [14] Santoso J, Onal CD : "An Origami Continuum Robot Capable of Precise Motion Through Torsionally Stiff Body and Smooth

- Inverse Kinematics" *Soft Robotics*, Vol.8, No.4, pp.371-386(2021).
- [15] Banerjee, H., Pusalkar, N., and Ren, H.:"Single-Motor Controlled Tendon-Driven Peristaltic Soft Origami Robot" *ASME. Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.10, No.6(2018).
- [16] C. D. Onal, R. J. Wood and D. Rus.:"An Origami-Inspired Approach to Worm Robots" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.18, No.2, pp. 430-438(2013).
- [17] Joshua Kaufmann, Priyanka Bhovad, and Suyi Li.:"Harnessing the Multistability of Kresling Origami for Reconfigurable Articulation in Soft Robotic Arms" *Soft Robotics*, Vol.9, No.2, pp.212-223(2022).
- [18] Shuai Wu, Qiji Ze, Jize Dai, Nupur Udipi, Glaucio H. Paulino and Ruike Zhao.:"Stretchable origami robotic arm with omnidirectional bending and twisting" *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.118, No.36, pp.e2110023118(2021).
- [19] H. Matsuo, H. H. Asada and Y. Takeda.:"Design of a Novel Multiple-DOF Extendable Arm With Rigid Components Inspired by a Deployable Origami Structure" *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.5, No.2, pp.2730-2737(2020).