

Title	円筒折り紙構造を用いた軽量型ロボットアームの試作と比較検討
Author(s)	楠木, 幹也; 謝, 浩然
Citation	HCGシンポジウム2022: HCG2022 1-3-3
Issue Date	2022-12
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/18203
Rights	Copyright (C)2022 IEICE. 楠木 幹也, 謝 浩然, HCGシンポジウム2022, 2022, HCG2022-1-3-3.
Description	HCGシンポジウム2022, Human Communication Group Symposium 2022, 高松, 2022年12月14日-2022年12月16日

円筒折り紙構造を用いた軽量型ロボットアームの試作と比較検討

楠木 幹也[†] 謝 浩然[†]

[†] 北陸先端科学技術大学院大学 〒923-1211 石川県能美市旭台 1-1

E-mail: [†] {s2210058,xie}@jaist.ac.jp

あらまし 近年、折り紙構造を用いた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、代表的な折り紙構造の制作や性能等の特性を調査するために、Twisted Tower、吉村パターン、Kresling パターンの3つの円筒折り紙構造の試作と比較研究を行った。結果として使いやすさ、作製時間、軽量性等において、それぞれの構造にトレードオフの関係があることが明らかになった。本研究成果は、人間拡張のため、余剰肢ロボットの軽量化への応用を期待できる。

キーワード 軽量型ロボットアーム、折り紙構造、Twisted Tower、吉村パターン、Kresling パターン

Comparative Study of Lightweight Robot Arm Using Cylindrical Origami Structures

Mikiya KUSUNOKI[†] Haoran XIE[†]

[†] Japan Advanced Institute of Science and Technology 1-1 Asahidai, Nomi-shi, Ishikawa, 923-1211 Japan

E-mail: [†] {s2210058,xie}@jaist.ac.jp

Abstract In recent years, there has been a lot of research on robot arms using origami structures. In this study, three cylindrical origami structures (Twisted Tower, Yoshimura Pattern, and Kresling Pattern) were fabricated and compared in order to investigate the characteristics of each origami structure. The results show that there is a trade-off between each structure in terms of ease of use, fabrication time, and light weight. The results of this research are expected to be applied to supernumerary robotic limbs for human augmentation.

Keyword Lightweight Robot Arm, Origami Structure, Twisted Tower, Yoshimura Pattern, Kresling Pattern

1. はじめに

現在、3Dプリンター等が普及した事で、一般の人でも個人でもものづくりが可能な時代となっている。FabLabとは、個人が3Dプリンターやレーザ加工機などの機械を用いたものづくりの環境を実現する場所であり、日本では2011年に初めて鎌倉市にFabLabが設立された。以降 FabLab の数は増加しており、この動きは日本のみならず、世界中に広がっている。

近年では、人間拡張といった人間の能力や感覚を拡張する研究が広く行われている。人間拡張研究のひとつに余剰肢ロボットという研究分野がある。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能力を拡張している。しかしながら、従来の余剰肢ロボットは硬くウェアラブルデバイスとしては危険である。一般的に、ロボットアームは硬くて危険なイメージがあるが、最近では柔らかい素材を用いたソフトロボットアームに関する研究も存在する[1]。ソフトロボットアームは制御に課題があるものの、ソフトロボッ



(a)Twisted Tower (b)吉村パターン (c)Kreslingパターン

図1 本研究に利用された円筒折り紙構造
トアームのもつ柔軟性は、人間とのインタラクションを考慮した際に比較的安全である[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が存在する[3]。折り紙は素材が安く、入手も簡単であるため多くの人に親しまれている。余剰肢ロボットとして、折り紙構造を用いたソフトロボットアームを活用できれば、安全、安価かつ個人で製作できる可能

性を秘めている。

本研究は、折り紙構造を用いた3種類のロボットアームを試作し、比較実験を行った。結果として、使いやすさや制作容易度、軽量性等においてそれぞれの構造にトレードオフの関係があることが明らかになった。今後の期待として、今回試作した円筒折り紙は余剰肢ロボットに活用することが考えられる。

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たことで、ロボットアームの重量の大幅な削減を実現した[5]。本研究も、折り紙構造を用いることで軽量型ロボットアームを目指している。

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[6]。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[7]。Wuらは、剛体部品のみで構成されたTwisted Tower機構を開発した[8]。Twisted Tower構造はロボットアームの他にもCrawling Robotとしての用途も存在する[9]。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[10][11]。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[12]。Onalらは、吉村パターンを用いた虫ロボットを開発した[13]。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[14]。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[15]。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[16]。本研究では、上述した折り紙構造を用いたロボットアームの試作と比較実験を行った。

2.3. 余剰肢ロボット

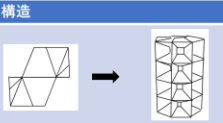
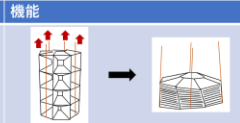
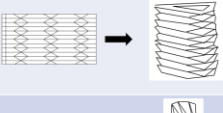
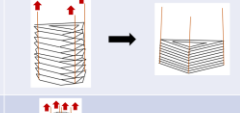


人間拡張分野における余剰肢ロボットを紹介する。Xieらは、伸縮機構を用いたことでコンパクトな余剰肢ロボットを開発した[17,18]。Manisekaranらは、災害時に作業負担を軽減するための半自律型の余剰肢ロボットの設計と実装を行った[19]。これらは、硬い素材

を用いており、本研究では柔らかい紙を用いたロボットアームを用いている。

3. 折り紙構造

本研究の目的は、3つの折り紙構造の制作を利用し、試作した3つの円筒型折り紙構造に対し、比較実験を行うことである。比較対象は、代表的な円筒形の折り紙構造である、Twisted Tower、吉村パターン、Kreslingパターンの3つとした。それぞれの構造と機能を表1に示す。

表1 円筒折り紙の構造と機能

	構造	機能
Twisted Tower		
吉村パターン		
Kreslingパターン		

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。

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。

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。

4. ロボットアーム試作・検証

本研究は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軽量型ロボットアームを試作した。それぞれの折り紙構造を比較するために、材料は厚さ0.09mmの紙で統一し、高さ

290mm, 外接円の直径 80mm を目標に作成した, 試作は筆頭著者が行っており, 作り始めてから作り終わるまでの時間を計測し, それぞれの折り紙構造の作製時間を測定した. その他に, 作製した折り紙構造について, 重量, 最大収縮長, 最大曲げ角度を測定した. 最大収縮長については, 作製した円筒折り紙構造の軸方向に向かって円筒の外側に糸を通す. Twisted Tower と Kresling パターンは, 4 本の糸を通し, 吉村パターンは 3 本の糸を通して(表 1). 糸は底面にのみ固定されており, 上面には固定されていない. 3D プリンターを用いて作成した台と上面を固定し, 全ての糸を手動で上向きに引っ張ることで, 円筒折り紙を収縮させている. 糸を引く力は統一しておらず, 手動でこれ以上収縮しないことを目安に最大収縮長を測定した. 最大曲げ角度も同様に糸を通し, 台と固定させる. こちらは糸を 1 本のみ上向きに引き, 円筒折り紙を曲げている. こちらも糸を引く力は統一しておらず, 手動でこれ以上曲がらないことを目安に, 上面と底面が交差する角度を最大曲げ角度として測定した.

4.1 Twisted Tower 構造ロボットアーム

本研究では, Twisted Tower 構造は, VanderHoff らの論文[5]の作成方法を参考に作製した. 外接円の直径がおおよそ 80mm となるように, 元となる縦横比 1:2 の長方形を 50mm×100mm とした. 1 層あたりの高さは通常 30mm 程度であるが, 折り紙の疲労により 1 層あたりの高さはそれぞれ異なっている. 本研究は 10 層の Twisted Tower を作製し, その高さは 290mm となった. 実際に試作してみて, 折り曲げるだけでなく, それらを組み立てることも困難に感じた. 試作した Twisted Tower 構造の円筒折り紙によるロボットアームを図 2 に示す.

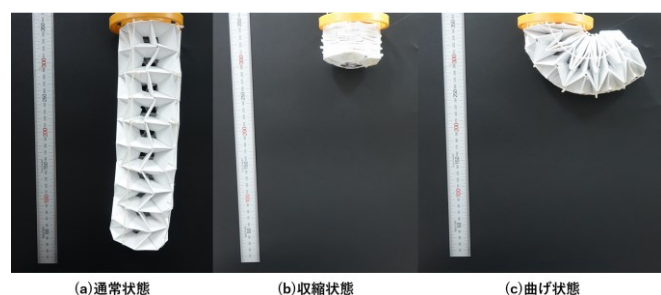


図 2 Twisted Tower 構造折り紙によるロボットアーム

4.2 吉村パターン構造ロボットアーム

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[8]を参考に作製した. 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している.

実際に試作してみて, 厚さ 0.09mm の紙で作製した吉村パターンの円筒折り紙はバランスをとるのが難しく, 自立させることが困難であった. 折り曲げることも困難に感じたが, Twisted Tower 構造よりは容易に感じた. 試作した吉村パターンの円筒折り紙によるロボットアームを図 3 に示す.

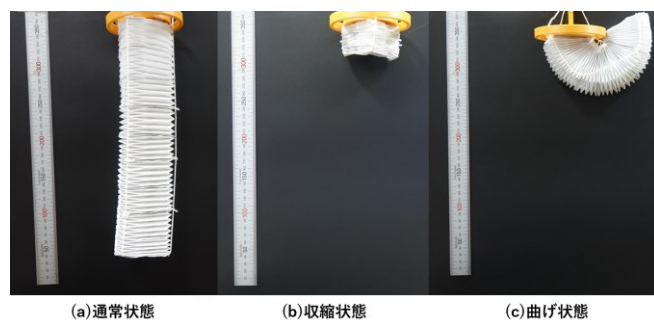


図 3 吉村パターンの折り紙によるロボットアーム

4.3 Kresling パターン構造ロボットアーム

Kresling パターンに関して, 本研究は Kaufmann らの論文[12]を参考に作製した. 1 層あたりの高さは, おおよそ 71mm である. 試作した円筒折り紙では 4 つの層を積み重ねており, 高さは 285mm である. 基準とした高さ 290mm とは 5mm の差が生じている. 実際に試作してみて, Twisted Tower や吉村パターンと比較して, 作製するのが容易に感じた. 試作した Kresling パターンの円筒折り紙によるロボットアームを図 4 に示す.

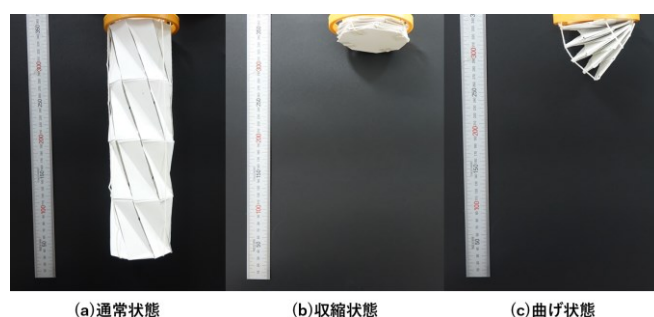


図 4 Kresling パターン折り紙によるロボットアーム

5. 結果

それぞれの円筒折り紙によるロボットアームの結果を表 2 に示す.

表 2 3 種類の円筒折り紙によるロボットアームの比較結果

	Twisted Tower構造	吉村パターン	Kreslingパターン
高さ(mm)	290	290	285
外接円の直径(mm)	78	81	79
重さ(g)	58	16	25
作製時間(h)	12	4.5	2.5
最大収縮長(mm)	43	30	19
最大曲げ角度(°)	130	205	53

試作した円筒折り紙によるロボットアームは,

Twisted Tower 構造, Kresling パターン, 吉村パターンの順番で重量が大きいという結果となった。特に, Twisted Tower 構造は, Kresling パターンの 2 倍以上, 吉村パターンの 3 倍以上重いという結果となった。作製時間においても, Twisted Tower が最も多くの時間を要した。最初は特定の順序に沿って折り曲げるのに 5 分程度の時間がかかったが, 何回か繰り返すと折り方を記憶することが可能となり, より短時間で折り曲げられるようになった。最終的には 2 分程度で完成させることが可能になった。最大収縮長は, Kresling パターン, 吉村パターン, Twisted Tower の順番で短くなった。ロボットアームの曲げ角度に関しては, 吉村パターン, Twisted Tower 構造, Kresling パターンの順番で大きいという結果になった。次に主観評価について表 3 に示す。主観評価では, 5 段階評価をした。5 を最も良いとし, 1 を最も悪いとした。

表 3 円筒折り紙の主観評価

	使いやすさ	制作容易度	軽量性	伸縮性能	曲げ性能
Twisted Tower	5	1	3	3	4
吉村パターン	3	3	5	4	5
Kreslingパターン	3	4	4	5	2

使いやすさでは, Twisted Tower 構造が最も良いと感じた。吉村パターンは安定性がなく, 自立させることが困難であった。Kresling パターンは双安定性という特徴を持つことから, 伸長にも収縮にも機構が必要となるため, 使いづらいと感じた。制作容易度では, Twisted Tower が最も悪い結果となった。Twisted Tower は折り曲げるだけでなく, 組み立てる過程も困難であると感じた。

6. まとめ

本研究では, 3 種類の円筒折り紙によるロボットアームを試作し, それらの比較実験を行った結果, それぞれの折り紙構造の長所と短所を確かめる事ができた。試作においては, Kresling パターンは容易に作製する事が出来たが, 吉村パターンと Twisted Tower 構造は, Kresling パターンと比較すると, 作製する事が困難であると感じた。しかしながら, どちらも折る作業をこなす内に慣れてくると, 段々と容易に感じられるようになった。また, Twisted Tower 構造に関しては, 折り曲げる作業だけでなく, それらを組み合わせる作業も困難であると感じた。Twisted Tower 構造の特性を維持しながらも, より容易に, 時間をかけずに作製する方法を考える必要がある。比較実験においては, それぞれの構造の特徴が明らかになった。

今後の課題として, ユーザ実験が挙げられる。被験者を募り, 本研究の円筒折り紙ロボットアームを作製してもらい, それらの試作時間を測定し, さらに制作体験等についてアンケート調査を行う予定である。

今後の応用例として, 余剰肢ロボットへの活用が考えられる。従来の余剰肢ロボットは, 硬い, 重い, かさばるといった短所が存在する。それに対して, 本研究で作製した円筒折り紙構造を用いることで, 柔らかい, 軽量, 折り畳み可能な余剰肢ロボットアームの作製が可能になる。

文 献

- [1] Z. AL-Rabia, M. Al-Ibadi and A. Al-Ibadi, "Design and Implementation of a Multiple DoF Soft Robot Arm Using Exosensor Muscles," 2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2022, pp. 170-174.
- [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, 2011, pp. 7401-7404.
- [3] Zhang, K., Qiu, C., and Dai, J. S. (March 7, 2016). "An Extensible Continuum Robot With Integrated Origami Parallel Modules." ASME. J. Mechanisms Robotics. June 2016; 8(3): 031010.
- [4] H. Hagenah, W. Böhm, T. Breitsprecher, M. Merklein, S. Wartack, "Modelling, Construction and Manufacture of a Lightweight Robot Arm," Procedia CIRP, Volume 12, 2013, pp 211-216.
- [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, 2013, pp. 4512-4518.
- [6] 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), 2017, pp. 161-166.
- [7] 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, 2014, pp. 1421-1426.
- [8] Wu, X., Yang, C., Li, J., Zhao, Q., Wu, W., Zhu, Y., and Zhang, F. (February 21, 2022). "Rigid-Foldable Mechanism Inspired by Origami Twisted Tower." ASME. J. Mechanisms Robotics. October 2022; 14(5): 054503.
- [9] Fei, F.; Leng, Y.; Xian, S.; Dong, W.; Yin, K.; Zhang, G. Design of an Origami Crawling Robot with Reconfigurable Sliding Feet. Appl. Sci. 2022, 12, 2520.
- [10] 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), 2017, pp. 2098-2104.
- [11] Santoso J, Onal CD. An Origami Continuum Robot Capable of Precise Motion Through Torsionally Stiff Body and Smooth Inverse Kinematics. Soft Robot. 2021 Aug;8(4):371-386.
- [12] Banerjee, H., Pusalkar, N., and Ren, H. (September 7, 2018). "Single-Motor Controlled Tendon-Driven Peristaltic Soft Origami Robot." ASME. J. Mechanisms Robotics. December 2018; 10(6):

064501.

- [13] C. D. Onal, R. J. Wood and D. Rus, "An Origami-Inspired Approach to Worm Robots," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 2, pp. 430-438, April 2013.
- [14] Joshua Kaufmann, Priyanka Bhovad, and Suyi Li. Harnessing the Multistability of Kresling Origami for Reconfigurable Articulation in Soft Robotic Arms. *Soft Robotics*. Apr 2022.212-223.
- [15] huai Wu and Qiji Ze and Jize Dai and Nupur Udipi and 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.
- [16] H. Matsuo, H. H. Asada and Y. Takeda, "Design of a Novel Mutliple-DOF Extendable Arm With Rigid Components Inspired by a Deployable Origami Structure," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2730-2737, April 2020.
- [17] Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Takuma Torii, and Haoran Xie. 2021. XLimb: Wearable Robot Arm with Storable and Extendable Mechanisms. In *12th Augmented Human International Conference (AH2021)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 8, 1-4.
- [18] Haoran Xie, Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Toby Chong, Takuma Torii, and Tsukasa Fukusato. 2022. Augmenting Human with Compact Supernumerary Robotic Limbs. In *13th Augmented Human International Conference (AH2022)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 8, 1-4.
- [19] Parthan Manisekaran, Shreyanka S G, Sujeet, Shikha Tripathi, and Sudarshan T S B. 2022. ARMER: Modular and Semi-Autonomous Supernumerary Robotic Limbs for Disaster Relief. In *Advances in Robotics - 5th International Conference of The Robotics Society (AIR2021)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 47, 1-8.