JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	折り紙構造による形状変化インタフェースの提案と試作
Author(s)	楠木, 幹也; NGUYEN, Linh Viet; Tsai, Hsin-Ruey; HO, Anh-Van; 謝, 浩然
Citation	研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）, 2023-HCI-204(6): 1-8
Issue Date	2023-08-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/18794
Rights	社団法人情報処理学会, 楠木幹也, NGUYEN Linh Viet, Hsin-Ruey Tsai, HO Anh-Van, 謝浩然, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション, 2023-HCI-204 (6), 2023, pp.1-6. ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Vol.2023-HCI-204 No.6
2023/8/8

折り紙構造による形状変化インタフェースの提案と試作

楠木 幹也[1,a)]　NGUYEN Linh Viet[1]　Hsin-Ruey Tsai[2]　HO Anh-Van[1]　謝 浩然[1]

概要：近年折り紙構造を用いた研究が盛んであり，様々な分野で活用されている．その中でも円筒折り紙構造は，ロボットアームや移動ロボットとして利用されている．しかしながら，折り紙構造を手折りする場合，複雑な製造プロセスのためユーザの製作負荷が高い．本研究は特に Twisted Tower という円筒折り紙構造に着目し，構造解析を行った．それを基に設計支援インタフェースを開発し，レーザーカッターを用いて簡易に製作できる技術を提案した．結果として，ユーザは異なるサイズや層の Twisted Tower 構造を容易に製作することが可能になった．またモータとマイコン等を搭載したモジュールを作成することで，形状変化インタフェースとして，様々なインタラクションに応用することができる．さらに，柔らかい素材でできているため人間との安全なインタラクションに貢献することができ，安価に製作できるため誰でも利用することができる．

Shape-Changing Interface with Origami-Inspired Robotic Structures

1. はじめに

ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) は，人間とコンピュータの間の相互作用に焦点を当てた研究分野であり，1960 年代にグラフィカルユーザインタフェース (GUI) と呼ばれるインタフェースが誕生して以降，視覚のみならずユーザとコンピュータの間でより実体的なインタラクションのため，物理的な物体を操作したり触れたりすることでユーザとコンピュータがインタラクションを行うタンジブルユーザインタフェース (TUI)[1] や，物理的な形状が変化することで情報を伝える形状変化ユーザインタフェース (SUI)[2] といったインタフェース形態が提案された．これらは視覚的な情報だけでなく触覚的なフィードバックや情報を提供することで，ユーザとのより直観的なインタラクションを可能にしている．人間とコンピュータの間の効果的なインタラクションは，ユーザエクスペリエンスを向上させる．そして多種多様なロボットやコンピュータ機械が研究開発されてきた現在，人間とコンピュータのインタラクションがますます重要視されているのが現状である．

[1] 北陸先端科学技術大学院大学
Nomi, Ishikawa 923–1211, Japan
[2] National Chengchi University
Taipei, Taiwan
[a)] s2210058@jaist.ac.jp

折り紙構造の持つ幾何学的な特性や柔軟性を問題解決の手法として活用する研究は盛んに行われており，ロボット工学や医療といった分野で広く応用されている．通常ロボットアームは硬くて重いといったイメージがあるが，近年では柔らかい素材を用いた軽量なソフトロボットに関する研究が行われている [3]．柔らかい素材を用いることで人間との安全なインタラクションを構築できる [4]．そしてソフトロボティクスに関する研究の中には，折り紙構造に着目した研究テーマがよく行われている [5]．折り紙構造を用いることで，ロボットアームは軽量かつ柔軟でありながら安定性を高めることができる．また，折り畳むことによってロボットアームの容積を削減することもできる．このような利点から，折り紙構造を用いたソフトロボットアームは，形状変化インタフェースとして非常に適しているといえる (図 1)．

本研究では，形状変化インタフェースとして折り紙構造を用いたソフトロボットアームを利用するために，Twisted Tower と呼ばれる円筒折り紙構造に焦点を当て，その構造解析を行った．また，この解析結果を基に設計支援インタフェースを開発し，レーザーカッターを用いて簡易に製作できるデジタルファブリケーション技術を提案した．結果として，ユーザの設計意図に沿ったサイズや層の Twisted Tower 構造を容易に製作することが可能となった．そして製作された Twisted Tower 構造は，形状変化インタフェー

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

スとしてウェアラブルロボットアームといったインタラクションに応用することができる．また安価に製作でき，作業における疲労も低下したことで，多くの人が利用することを期待できる．

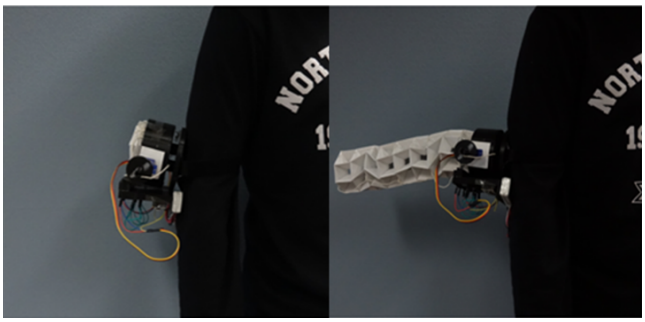


図 1: 折り紙構造を用いた形状変化インタフェースの一例

2. 関連研究

2.1 形状変化インタフェース

HCI 分野では，物理形状の変化によって情報を伝達する形状変化インタフェースが広く提案されている．Bendi は，ジョイスティックを入力として形状変化をリアルタイムで電話相手に反映させるデバイスである [6]．MorpheesPlug は，形状変化インタフェースの作成に使用するツールキットである [7]．ユーザは 3D プリンタで作成可能な空気圧で駆動するデバイスを製作することができる．KnobSlider は，物理的なインタフェースのスペース削減のため，スライダーとつまみの両方の機能を兼ね備えたことで，インタフェースの柔軟性を向上させた [8]．

形状変化インタフェースには，折り紙の変形を利用したデバイスがいくつか存在する．ExpanDial は，折り紙の変形に着想を得た円周と高さを可変できるダイアルである [9]．FoldWatch は，折り紙を利用した軽量かつ折り畳み機能を持つスマートウォッチの新しいデザイン空間を探求した [10]．PneUI は，柔軟な材料を用いた気動式のインタフェースであり，形状変化はあらかじめ定義された構造により制御可能である [11]．この一部として折り紙構造が用いられており，空気により形状変化する．本研究も折り紙の変形を利用した形状変化インタフェースである．

形状変化インタフェースには，モジュール型のものがいくつか存在する．Cubimorph は，任意の形状に変化することで様々な機能を持つモジュール型のインタラクティブデバイスである [12]．ShapeClip は，ポータブルかつ拡張可能な形状変化ディスプレイであり，ユーザは電子工学といった専門知識を必要とせずデザインすることが可能である [13]．本研究もモジュール型の形状変化インタフェースである．

2.2 折り紙型ロボットアーム

折り紙構造を用いたロボットアームを紹介する．折り紙構造を用いたロボットアームでは主に，Twisted Tower 構造，吉村パターン，Kresling パターンといった折り紙構造が用いられている．Twisted Tower 構造を利用したソフトなロボットアームの研究のなかには 3D プリンターを利用した製作手法の提案 [14] や剛体部品のみで製作されたもの [15] が存在する．また，Twisted Tower 構造ではケーブル駆動により動作するロボットアームがある [16]．Twisted Tower 構造はロボットアームとしての用途だけでなく，移動ロボットとしての用途も存在する [17]．吉村パターンを利用したロボットアームの研究では，モジュール式のロボットアームを提案したことで柔軟なマニピュレータを開発した [18], [19]．他には，吉村パターンによる移動可能なロボットの開発といった研究もなされており [20]，ぜん動運動が可能なロボットも開発されている [21]．Kresling パターンを利用したロボットアームの研究では，磁気制御によるロボットアームが存在する [22]．他にも，Kresling パターンには双安定性といった特徴を持っており，その特徴を活用した再構成が可能なロボットアームを構築した [23]．リンクとジョイントを選ぶことでロボットアームの自由度を変えることが可能となっている．

また Twisted Tower，吉村パターン，Kresling パターンの 3 種類の折り紙構造について，既存研究は条件を揃えて手折りで製作し，性能比較 [24] とそれらの製作コストを調査した [25][26]．結果として，Twisted Tower 構造が優れた伸縮，曲げ，ねじりといった性質を持つものの．最も製作負荷が高いことが分かった．

3. 折り紙構造

3.1 折り紙構造の選定

形状変化インタフェースとして折り紙構造を用いたロボットアームを使用する．理由として，柔軟性があるため，人間との安全なインタラクションをもたらすことや，不使用時には折り畳むことで物理的なスペースを削減することが挙げられる．使用する折り紙構造について，代表的な円筒形の折り紙構造である，吉村パターン，Kresling パターン，Twisted Tower の 3 つの中から検討する．各折り紙構造の特徴を表 1 に示す [24]．これらの折り紙構造は関連研究を基に製作した (図 2:Twisted Tower[16]，吉村パターン [18]，Kresling パターン [23])．伸縮性能については 3 つの円筒折り紙構造はどれも高い．曲げ性能については吉村パターンと Twisted Tower が高く，Kresling パターンは低い．ねじり性能について，吉村パターンはねじり機構を持っていない．Kresling パターンはひとつの方向にのみ回転が可能であり，Twisted Tower は逆方向にも回転が可能である．以上より伸縮，曲げ，ねじりといった多様な性質を持つ Twisted Tower 構造を選択した．

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

表 1: 折り紙構造の比較

折り紙構造	伸縮性能	曲げ性能	ねじり性能
吉村パターン	○	○	×
Kresling パターン	○	×	△
Twisted Tower	○	○	○

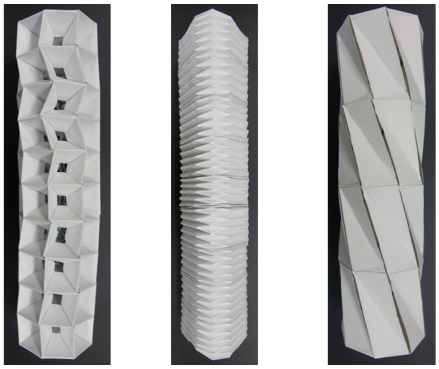
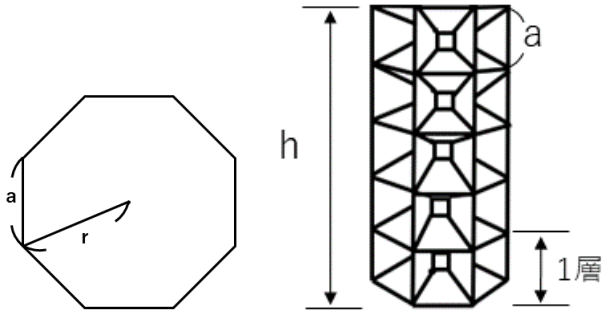


図 2: 3 種類の折り紙構造 (左:Twisted Tower, 中央: 吉村パターン，右:Kresling パターン)

3.2 Twisted Tower 構造の解析

User Interface 設計におけるパラメータ調整のため，Twisted Tower 構造の解析を行う．Twisted Tower 構造に剛体としての運動学を適用している．Twisted Tower 構造の上面と底面は正八角形である．正八角形における 1 辺の長さを a，正八角形の外接円の半径を r，層の数を n，高さを h とすると，Twisted Tower 構造における関係式は次式で表される (図 3).



(a) 上面図　(b) 側面図

図 3: Twisted Tower 構造

$$r = \frac{a}{2\sin(\frac{\pi}{8})} \tag{1}$$

$$h = an \tag{2}$$

また正八角形の面の数は n+1 で表され，隣接する面のねじり角度を θ とすると，ねじり範囲は

$$\frac{-4}{\pi} < \theta < \frac{4}{\pi} \tag{3}$$

と表される．隣接する面に純粋なねじり運動が生成された場合，面は平行を保ったまま，次式のような面の距離における直線的な変位 x が生じる．

$$x = -\frac{4h}{\pi}|\theta| + h \tag{4}$$

ねじりが生じていない場合 (θ=0)，軸方向における変位も生じないため距離は h となる．ねじりが最大に近づく場合 (θ= -π/4,π/4)，距離は小さくなる．

3.3 User Interface 設計

Twisted Tower は，手折りするには負荷が高いというデメリットが存在する．よって Twisted Tower の展開図を基にレーザーカッターを用いた製作手法を提案する [27]．システムは Grasshopper によって実装された．実装した展開図を図 4 に示す．実装した展開図では，固定にテープを使わないようにトリックを用いた (図 5)．これによりユーザの負荷を更に下げた．また，パラメータとして 1 辺の長さと層の数を導入することで，ユーザの設計意図に沿って Twisted Tower の大きさと高さを調整することができる (図 6).

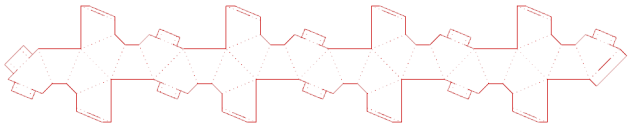


図 4: Twisted Tower 構造の展開図

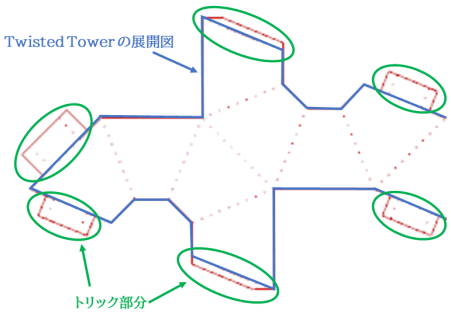
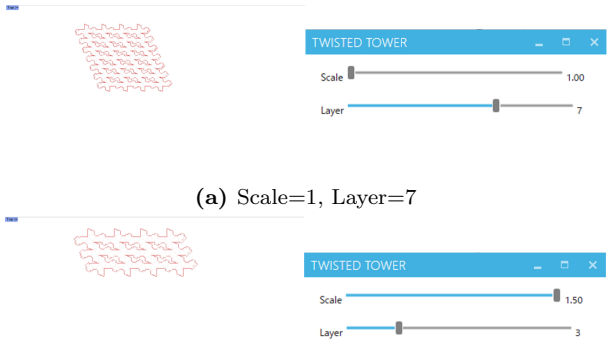


図 5: トリック構造の詳細

3.4 プロトタイプ製作

3.3 で述べた User Interface を用いて実際にプロトタイプを製作した．使用したレーザーカッターは，トロテックレーザージャパン株式会社の SP500 である．素材は厚さ 0.25mm の紙を用いている．プロトタイプでは 5 層の Twisted Tower を製作した．UI で製作した展開図 (図 7)，レーザーカッターを用いた展開図 (図 8)，実際に組み立てたもの (図 9) を示す．

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan



(a) Scale=1, Layer=7

(b) Scale=1.5, Layer=3

図 6: パラメータ調整の設計支援インタフェース

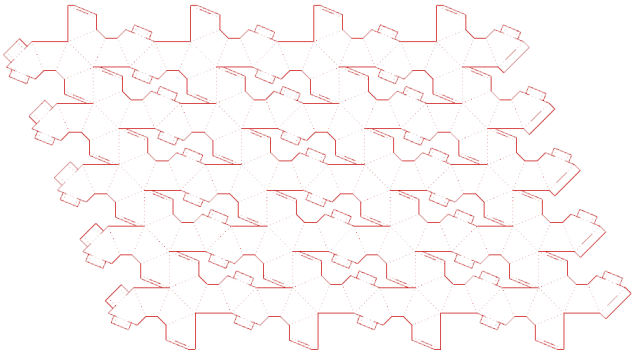


図 7: プロトタイプのための展開図

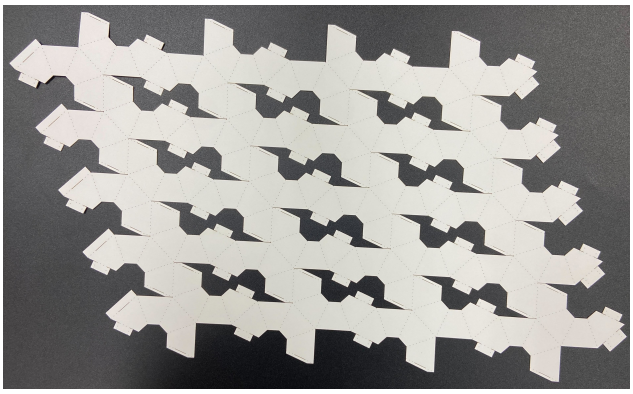


図 8: レーザーカッター使用後の展開図

4. 性能評価

Twisted Tower と呼ばれる折り紙構造を形状変化インタフェースとして用いる場合，Twisted Tower が持つバネのような性質は非常に重要である．それと同時に折り紙には疲労が伴うため，頻繁に使用すると元の形状に戻らなくなるというデメリットが存在する [25][26]．そこで Twisted Tower 構造の素材と層の数を変えて性能評価を行った．具体的には折り紙構造を軸方向に圧縮させて元に戻すという動作を 1000 回実施した．これにより，伸縮動作における剛性と折り紙の疲労を測定することができる．実験において素材の厚さは 0.25mm に統一し，折り目部分である点線の

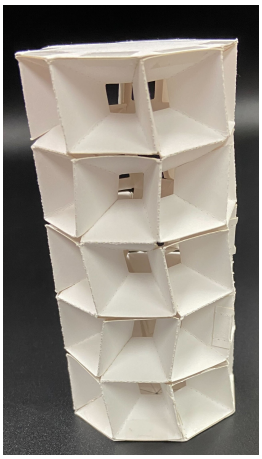


図 9: 展開図から組み立てたプロトタイプ (太さ:94.8mm 高さ:122.5mm)

間隔といったパラメータも統一されてある．展開図より，1 層あたりの高さはおよそ 24.5[mm] で変位の大きさは 1 層あたり 20[mm] とした．実験機器は，荷重測定器である株式会社イマダの ZTA-50N を使用した．実験手順 (1)〜(6) を以下に示す (図 10)．

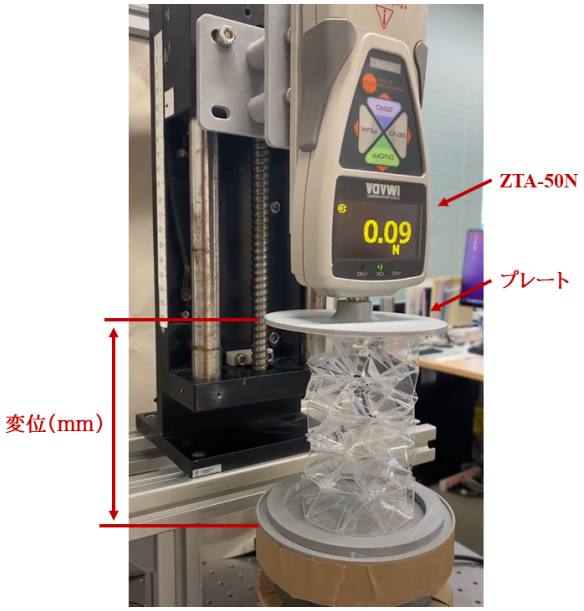


図 10: 性能評価実験のセットアップ

(1) プレートをサンプルの上面に触れるように移動させる．
(2) 表面に触れた状態でプレートをさらに移動させ，フォースゲージには負の力の値 (約-1N から-2N) が表示されるようにする．
(3) その後，力の値を 0N に設定する．力の値は，各テストサンプルの初回サイクルの開始点で必ず 0N に設定する．
(4) 最大変位 (mm) を決定する．
(5) 力の値が 0N になる出発点に戻る．
(6) テストサイクルを開始する．

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

4.1 素材

最も適した素材を適用するため，素材を変えて実験を行った．これは，折り紙構造を軸方向に圧縮させて元の戻すという動作を 3 つの素材について行うことで，素材の違いによる性能の違いを明らかにする実験である．実験では全ての素材について 5 層に統一した．展開図から求められる理論的な高さは 122.5[mm] であるが，実際には素材によって誤差が生じている．使用した素材は，安価で容易に入手可能なポリプロピレン (株式会社ジョーホク pp シート 0.25mm)，ユポ (ペーパーエントランス ユポ FGS 0.25mm)，紙 (株式会社ふじさん企画 上質紙 0.25mm) の 3 つである．結果を図 11, 12, 13 に示す．縦軸が荷重 [N] で横軸が歪み [%] である．実験後のそれぞれのサンプルを図 14 に示す．3 つのサンプルに共通して，回数を重ねるごとに疲労が見られた．また，3 つのサンプルとも似たような曲線が得られた．図 7 にある実験後のサンプルでは紙が最も疲労しており，次にユポが疲労していた．ポリプロピレンは伸縮を 1000 サイクル行っても影響がほとんどないことが明らかになった．またそれぞれの素材について，最大変位における荷重に大きな差が生じているが，これは折り紙の手折りによる誤差であると考えれられる．特に最大変位の部分では荷重の変化が急激であるため，数 mm の誤差が荷重に大きな影響を与えると考えられる．

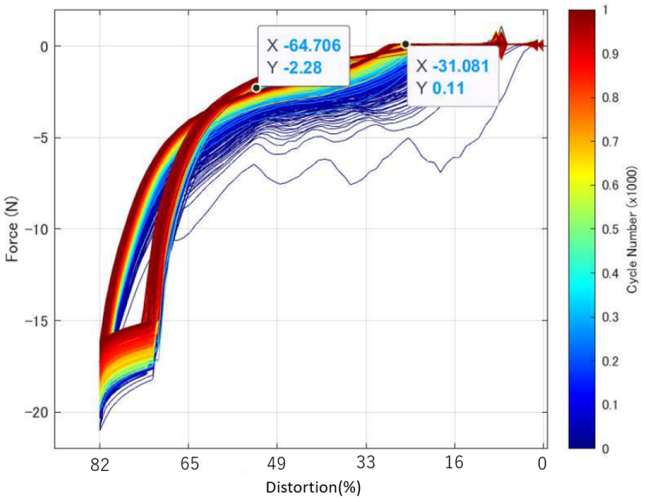


図 11: ポリプロピレンの荷重と歪みの実験結果

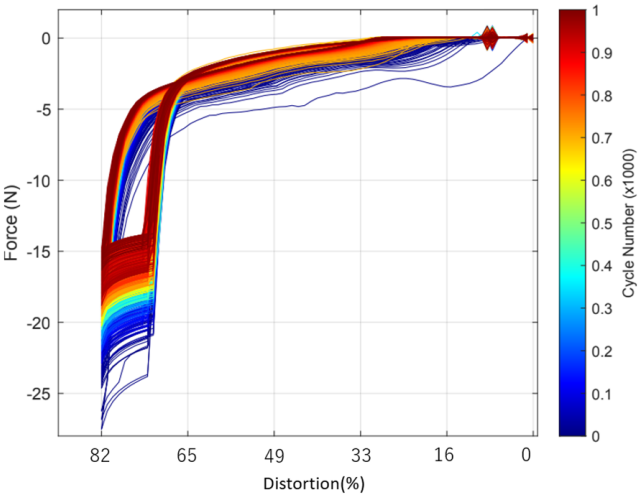


図 12: ユポの荷重と歪みの実験結果

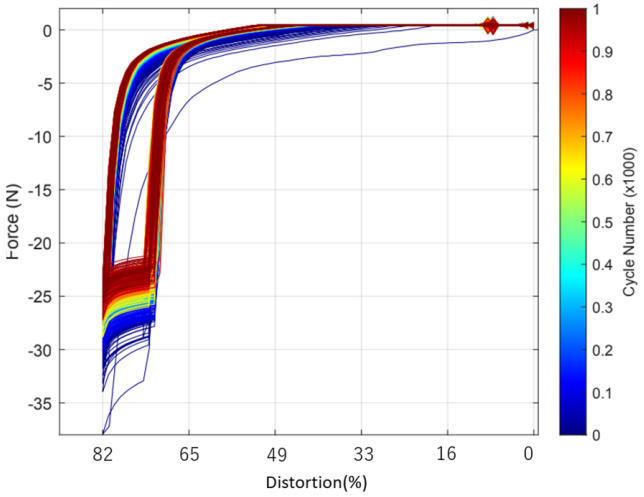


図 13: 紙の荷重と歪みの実験結果

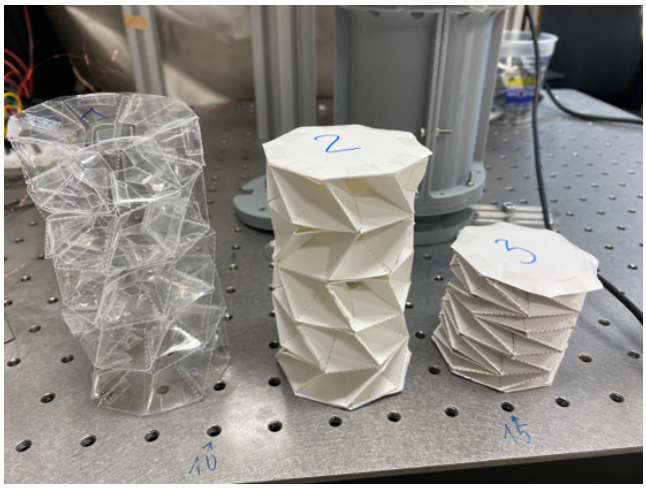


図 14: 実験後のサンプル

4.2 層数

次に層数を変えて実験を行った．これは，折り紙構造を軸方向に圧縮させて元の戻すという動作を異なる層について行うことで，層数の違いによる性能の違いを明らかにする実験である．3,7 層の 2 種類である．結果を図 15, 16 に示す．3,7 層の理論的な高さは，73.5[mm] と 171.5[mm] である．図 4,8,9 においても似たような曲線が得られた．図から 800〜1000 サイクルにおける線形領域から任意の 2 点を選択し，剛性を求めた．結果を図 10 に示す．この結果から，層が増えるにつれ剛性は小さくなるということが明らかになった．この実験においても最大変位時の荷重に大

きな差が生じているが，手折りによる誤差であると考えられる．

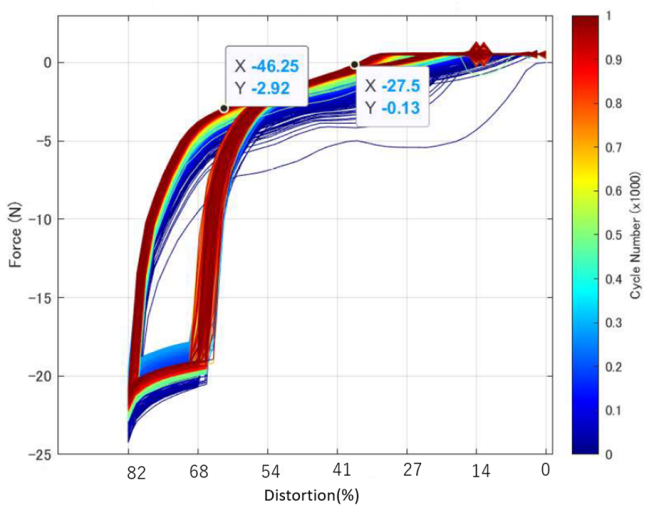


図 15: 3 層における荷重と歪みの実験結果

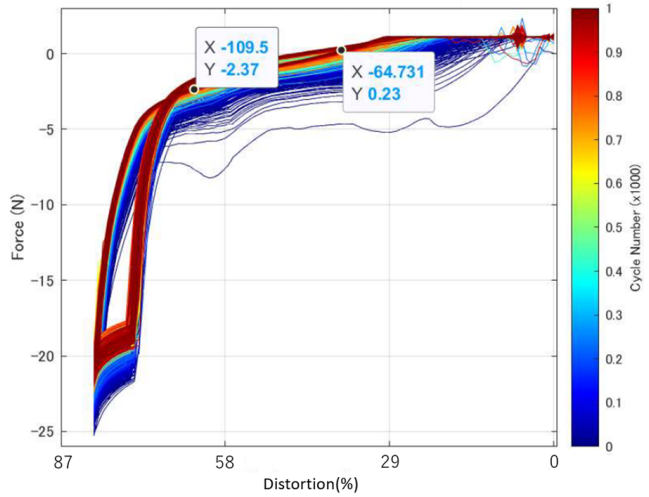


図 16: 7 層における荷重と歪みの実験結果

表 2: 層数における剛性の変化

層数	3	5	7
2 点間の剛性 (N/mm)	0.148	0.071	0.048

5. 形状変化インタフェースとしての Twisted Tower

3.3 で紹介した設計支援インタフェースを用いて製作した Twisted Tower を図 17 に示す．上面と下面の正八角形の部分は設計支援インタフェースとは別に製作されている．製作した Twisted Tower に対して軸方向に沿って外側に紐を通し，それらを引っ張ることで収縮状態と曲げ状態を実現できる (図 18)．これらは柔らかい素材で製作されているため人間の身の回りにあっても安全であり，製作に必要なコストも大きくないためユーザは容易に利用することが可能である．また大きさや長さが調整可能なため，用途に合わせて製作することができる．形状変化インタフェースとして期待される応用例として，ウェアラブルロボットアームの他に，様々なオブジェクトに提案インタフェースを取り付けることで，オブジェクトの物理的な機能を強化するといったものが考えられる．

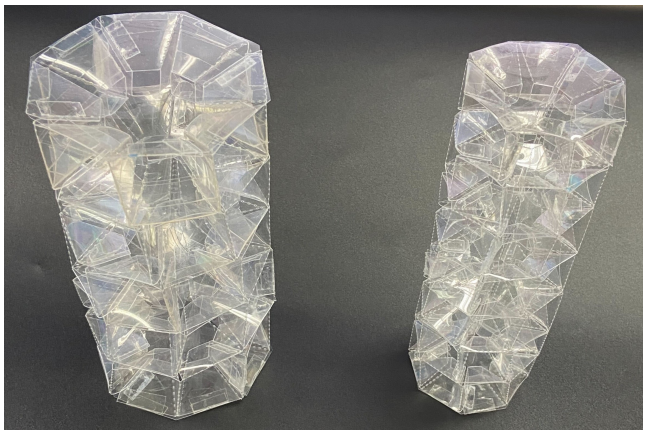


図 17: 異なる高さと太さの Twisted Tower(左: 太さ 90mm 高さ 170mm (5 層)，右: 太さ 64mm 高さ 168mm (7 層))

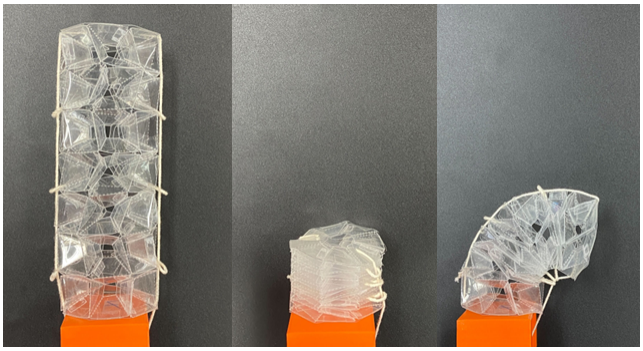


図 18: Twisted Tower の駆動 (左: 通常状態，中央: 収縮状態，右: 曲げ状態)

6. まとめ

本研究では，Twisted Tower と呼ばれる円筒折り紙構造の構造解析結果を基に設計支援インタフェースを開発したことで，レーザーカッターを用いて簡易に製作できる技術を提案した．これによりユーザは異なるサイズや層の Twisted Tower 構造を容易に製作することが可能となった．ユーザは状況に沿った高さや大きさを持つ形状変化インタフェースを製作できるため，多様なアプリケーションの提案が可能である．

従来のロボットアームは複雑な機械部品を必要とすることが多く，設計や製作には時間とコストを要した．それに

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

対し折り紙構造は薄い素材を折り畳んで作られるため，材料や製造工程のコストが低く抑えられる．さらに折り紙構造を用いたソフトロボットアームは安全性の面でも優れている．従来のロボットアームと比較して，予期していない力と衝突した場合にも変形することで衝撃を緩和することができる．これにより事故の危険性を減らすことができる．従って、人間と頻繁に接触する形状変化インタフェースとして，折り紙構造を用いた柔らかいロボットアームを利用することには大きな恩恵がある．

制限として，依然折り紙の疲労が存在することが挙げられる．実験を通してポリプロピレンを適用することで折り紙の疲労を抑えられることが明らかになったが，長期間にわたって使用するといつかは疲労してしまう．しかしながら製作コストが安いため，再度製作することでこの問題を解決することが可能である．他にもロボットアームの用途における持ち上げられる重量が低いことが挙げられる．これに関してはロボットアームとしての用途を限定する必要がある．またソフトロボットアームは非線形な変形をすることがあり，制御の予測が困難であるという制限も存在している．従って，正確な制御を必要とするインタフェースには用いることができないという大きなデメリットが存在する．

今後の課題として，ユーザ評価実験が挙げられる．今回提案した設計支援インタフェースを用いてユーザの製作負荷を詳しく調査する必要がある．従来の手折りと比較して製作負荷は軽減されているが，今後さらにユーザの製作負荷を軽減するインタフェースの開発を目指している．

折り紙構造を用いた形状変化インタフェースは人間と機械のインタフェースとして新たな可能性を提示する．再構成可能であり，折り畳みによる省スペースや安全性といった要因により，優れたインタフェースになる可能性を秘めている．

参考文献

[1] Brygg Ullmer and Hiroshi Ishii. The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology. Association for Computing Machinery, 1997, p223–232

[2] Ken Nakagaki, Sean Follmer and Hiroshi Ishii. LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ’15). Association for Computing Machinery, 2015, p333–339

[3] Z. AL Rabia, M. Al Ibadi and A. Al Ibadi. Design and Implementation of a Multiple DoF Soft Robot Arm Using Exestensor Muscles. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2022, p170-174

[4] S. Sanan. M, H. Ornstein and C. G. Atkeson. Physical human interaction for an inflatable manipulator. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011, p7401-7404

[5] Zhang, K., Qiu, C. and Dai, J. S. An Extensible Continuum Robot With Integrated Origami Parallel Modules. ASME. J. Mechanisms Robotics. 2016

[6] Young-Woo Park, Joohee Park and Tek-Jin Nam. The Trial of Bendi in a Coffeehouse: Use of a Shape-Changing Device for a Tactile-Visual Phone Conversation. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’15). Association for Computing Machinery, 2015, p2181–2190.

[7] Hyunyoung Kim, Aluna Everitt, Carlos Tejada, Mengyu Zhong and Daniel Ashbrook. MorpheesPlug: A Toolkit for Prototyping Shape-Changing Interfaces. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’21). Association for Computing Machinery, 2021, Article 101, p1–13

[8] Hyunyoung Kim, Céline Coutrix and Anne Roudaut. KnobSlider: Design of a Shape-Changing UI for Parameter Control. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’18). Association for Computing Machinery, 2018, Paper 339, p1–13

[9] Hyunyoung Kim, Patrícia Deud Guimarães, Céline Coutrix and Anne Roudaut. ExpanDial: Designing a Shape-Changing Dial. In Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference (DIS ’19). Association for Computing Machinery, 2019, p949–961

[10] Alexandra Fuchs, Miriam Sturdee and Johannes Schöning. Foldwatch: using origami-inspired paper prototypes to explore the extension of output space in smartwatches. In Proceedings of the 10th Nordic Conference on Human-Computer Interaction (NordiCHI ’18). Association for Computing Machinery, 2018, p47–59

[11] Lining Yao, Ryuma Niiyama, Jifei Ou, Sean Follmer, Clark Della Silva and Hiroshi Ishii. PneUI: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST ’13). Association for Computing Machinery, 2013, p13–22

[12] A. Roudaut, D. Krusteva, M. McCoy, A. Karnik, K. Ramani and S. Subramanian, Cubimorph: Designing modular interactive devices. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, p3339-3345

[13] John Hardy, Christian Weichel, Faisal Taher, John Vidler and Jason Alexander. ShapeClip: Towards Rapid Prototyping with Shape-Changing Displays for Designers. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’15). Association for Computing Machinery, 2015, p19–28

[14] Y. Wang, and K. Lee. 3D printed semi soft mechanisms inspired by origami twisted tower. NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), 2017, p161-166

[15] Wu, X., Yang, C., Li, J., Zhao, Q., Wu, W., Zhu, Y. and Zhang, F. Rigid Foldable Mechanism Inspired by Origami Twisted Tower. ASME. J. Mechanisms Robotics. 2022

[16] 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, p1421-1426

[17] Fei, F.; Len g, Y.; Xian, S.; Dong, W.; Yin, K.; Zhang, G. Design o f an Origami Crawling Robot with Reconfigurable Sliding Feet. Appl, Sci, 2022

[18] J. Santoso, E. H. Skorina, M. Luo, R. Yan and C. D. Onal. Design and analysis of an origami continuum manip-

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

ulation module with torsional strength. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017, p2098-2104
[19] Santoso J and Onal CD. An Origami Continuum Robot Capable of Precise Motion Through Torsionally Stiff Body and Smooth Inverse Kinematics. Soft Robot, 2021, p371-386.
[20] C. D. Onal, R. J. Wood and D. Rus. An Origami-Inspired Approach to Worm Robots. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, p430-438
[21] Banerjee, H., Pusalkar, N., and Ren, H. Single Motor Controlled Tendon-Driven Peristaltic Soft Origami Robot. ASME. J. Mechanisms Robotics, 2018
[22] huai Wu and Qiji Ze and Jiz e 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, 2021, vol 118, no. 36
[23] Joshua Kaufmann, Priyanka Bhovad, and Suyi Li. Harnessing the Multistability of Kresling Origami for Reconfigurable Articulation in Soft Robotic Arms. Soft Robotics, 2022, p212-223.
[24] 楠木幹也，謝浩然．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．電子情報通信学会，HCG シンポジウム 2022，I-3-3
[25] 楠木幹也，謝浩然．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．情報処理学会インタラクション，2023, 1B45
[26] Mikiya Kusunoki, Haoran Xie. UX Study for Origami-Inspired Foldable Robotic Mechanisms. 7th Asian CHI Symposium 2023
[27] Sung, C., and Rus, D. Foldable Joints for Foldable Robots. ASME. J. Mechanisms Robotics. 2015

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan