

Pop-up Print: 双安定な折りたたみ 3D プリント

野間裕太* 鳴海紘也* 奥谷文徳* 川原圭博*

概要. 3D プリンタは長い造形時間と高価なサポート材消費を課題としている。本稿ではこれらの問題を解決するため、物体を折りたたんだ状態で 3D プリントした後に展開させる手法、Pop-up Print を提案する。この手法により、造形時間に影響する高さ、サポート材消費に影響する体積を減らすことができる。また、展開と折りたたみの動作を繰り返し行うことができ、物体の収納性や運搬性を高められる。本手法を実現するため、本稿ではまず基本的な形状を複数のパラメータを変化させて 3D プリントし、展開された状態での自立安定性への影響を測定した。この結果に基づき、双安定性や 3D 形状の折り線位置をインタラクティブに決定できる設計ツールを実装した。この設計ツールでは、折りたたみ可能な部分や展開時の自立安定性といった非直感的な条件を可視化することで、ユーザが物体の機能性やデザイン性を考慮して折り線位置を決定できるよう支援する。最後に、造形例を複数提示し、本手法の有効性を示した。

1 はじめに

3D プリンタは、高速なプロトタイピングを推進する強力なツールとして近年広く用いられるようになってきている一方で、依然として以下の 2 つの課題が残っている。

1. **長い造形時間.** 既存の 3D プリンタの多くは造形時間が長い。例えば図 1a 左に示す徳利は、3D プリンタ (Objet260 Connex3) を用いたところ造形に 10.5 時間を要した。多くの 3D プリンタは一層ずつ造形を行う付加造形方式を採用しており、高さのある物体の造形には特に長時間を要する。
2. **サポート材消費.** 3D モデルに張り出しや中空部分が存在する場合、多くの 3D プリンタはサポート材と呼ばれる素材を物体と同時に印刷する。しかし、サポート材は造形後に不要になる上に高価である。

これらの課題を解決するため、近年、4D プリン

トと呼ばれる手法が盛んに研究されている。4D プリントは、物体を最終形状よりもコンパクトな状態で造形して造形時間やサポート材消費を削減し、造形後に熱や湿度などの環境的な刺激を与えて最終形状に変化させる手法である [1]。しかし、これらの 4D プリント手法は造形時の形状から最終形状への変形が容易にできる一方で、最終形状から造形時のコンパクトな形状へ戻せない。もし最終形状から再度造形時のコンパクトな状態に戻せる手法があれば、造形時間やコストだけでなく、非使用時の収納性や運搬性を向上できる。

そこで我々は、昆虫の外部器官の作り方に着目した。カブトムシのツノは、蛹の状態では折りたたまれた状態で形作られ、体液を押し出すことによってツノの形になる [5]。これと同様に、もし折りたたまれたコンパクトな状態で 3D プリントし、造形後に展開させることができれば、3D プリント時の物体の高さや体積を削減でき、造形時間やサポート材消費を削減できる。さらに、折りたたまれた状態と展開された状態の間の遷移が簡単かつ可逆的にできれば、物体の非使用時の運搬性や収納性を向上できる。

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学

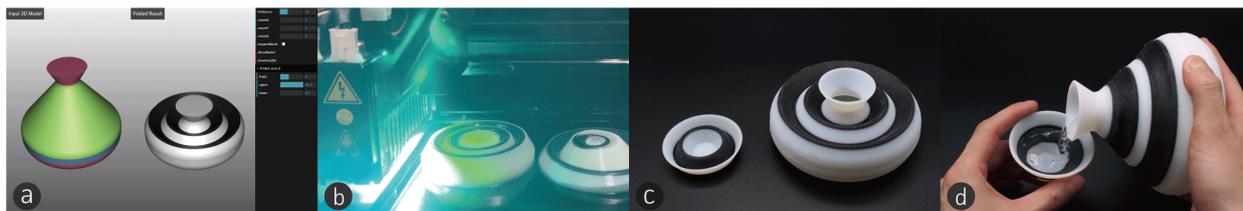


図 1. Pop-up Print の概略。(a) 折りたたまれた形状をインタラクティブに決定できる設計ツールの様子。(b) 折りたたまれた物体を造形する様子。(c) Pop-up Print により造形された徳利と猪口。(d) 造形された徳利から猪口に酒を注ぐ様子。

そこで我々は、折りたたまれた状態で物体を造形し可逆的に展開できる手法である Pop-up Print を提案する。Pop-up Print の実現のため、本研究では以下の貢献を行った。

- 多様な 3D 形状を折りたたまれた状態に変換するためのアルゴリズムの構築
- 折りたたまれた物体の双安定性の定式化
- 折りたたまれた状態に変換できる設計ツールの実装
- Pop-up Print を用いて造形された物体の例示

なお、本研究の成果は [7] で詳説されており、こちらも参照されたい。

2 関連研究

2.1 造形時間とサポート材消費の削減

造形時間とサポート材消費を削減できるデジタルファブリケーション手法はこれまで盛んに研究されてきた。その方法の 1 つが、レーザカッタ [3] やブロックの積層 [9]、バキュームフォーミング [11] といった 3D プリント以外のファブリケーション手法を応用する方法である。これらの手法は 3D プリントと比べ高速かつ安価に実現できる一方で、その最終造形物の表面には凹凸や穴が存在し、滑らかで穴のない表面を実現できていない。

もう 1 つの方法は、物体をコンパクトな形状で 3D プリントし、造形後に変形させるものである。造形前に小さな塊に分解して造形後に人の手で組み立てる手法 [4] はその一例である。さらに、造形後の組み立てを簡略化するため、4D プリントの手法が多く研究者により研究されている。4D プリントに関する先行研究では、コンパクトなシートの状態で造形し、熱湯 [2] や熱 [1] といった外部の刺激によって最終形状を得ることができる。これらの手法では 3D プリントを用いるため、滑らかで精巧な表面を実現できる。

2.2 変形が可逆なデジタルファブリケーション手法

造形後の形状が 2 つの状態を持ち、片方の状態からもう片方の状態への遷移が可逆なデジタルファブリケーション手法は複数存在する [12][10]。これらの手法は収納性や運搬性の観点から有用である一方、いずれも (1) 滑らかで穴のない曲面を造形できない、(2) 展開された状態に外部からの支持が必要、(3) 折りたたまれた状態から展開された状態への遷移に手間がかかる、という 3 つの課題を抱えている。一方で、本研究は (1) 滑らかで穴のない表面を造形できる、(2) 双安定性により展開された状態で安定するため外部からの支持が不要、(3) 展開する動作が数秒で完結する、という 3 点で優れている。

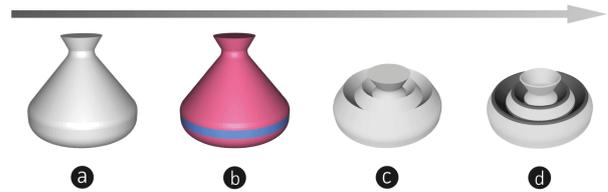


図 2. 折りたたみ処理の流れ.

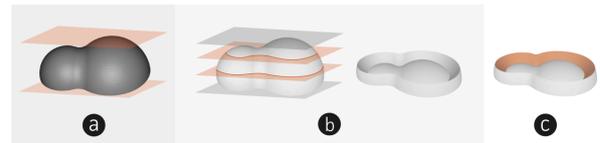


図 3. 鏡映変換の手順.

3 折りたたみのアルゴリズム

3.1 概略

本研究では、所望の 3D 形状を事前に折りたたまれた状態に変換する処理を行う。まず、入力された 3D 形状の表面を抽出する (図 2a)。次に、表面の内折りたたみ可能な先細り形状領域 (3.2 で詳説) を検出する (図 2b の赤で示した部分)。次に、折りたたみ可能な領域に対して鏡映変換 (3.2 で詳説) を施す (図 2c)。最後に、表面の厚み付けや素材の分割、ヒンジ作成を行い、折りたたまれた状態に変換する (図 2d)。

3.2 鏡映変換による折りたたみ

本研究では、3D 形状の表面の折りたたみに平面での折り返しを用いた。平面での折り返しは、特に折る曲面が可展面 (後述) の場合には、3D 形状を折り目の乗っている平面で鏡映変換した結果と同じになる [6]。本研究では、計算や設計の簡単さから、平面による鏡映変換を折り方法として採用した。

図 3 に、3D 形状の表面に平面での折り返しを行う様子を示す。まず、2 平面間にある表面が全て先細り領域 (後述) となる平行な 2 平面を選択する (図 3a)。次に、選択した 2 平面間に、平行かつ等間隔な平面を偶数個配置し、それらの平面で鏡映変換を施す (図 3b)。最後に、鏡映変換が平面での折り返しと等価になるよう、折りで裏返った部分を可展面に変換する (図 3c)。

この鏡映変換は、理論的には任意の 3D 形状に対して施すことができる。しかし、折りたたまれた状態で造形した物体は造形後に展開できる必要があることから、折りたたみによって自己交差が発生しないことが必要である。この自己交差を防ぐため、本研究では折りたたみ可能な領域を「先細り形状」に限定した。先細り形状とは、 $z_1 < z_2$ なる z_1, z_2 において、 $z = z_1$ と $z = z_2$ による 3D 形状の切断面

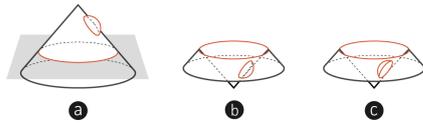


図 4. 非可展面 (a) に鏡映変換を施した結果 (b) と平面で折り返した結果 (c) .

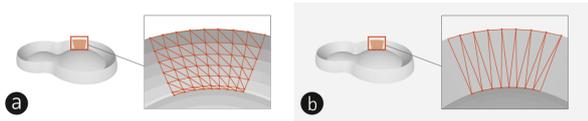


図 5. (a) 非可展面のメッシュ. (b) (a) を可展面に変換した結果.

$\Omega(z_1)$ と $\Omega(z_2)$ が、どのように z_1, z_2 を選んでも、常に $\Omega(z_1) \subset \Omega(z_2)$ (または常に $\Omega(z_1) \supset \Omega(z_2)$) となるような形状である. 本研究では, [10] の先細り形状検出法を援用し, ある 2 平面間にあるメッシュの法線ベクトルが全て正 (または全て負) であれば, その 2 平面間の領域は先細り形状であると判定している.

一方で, 先細り形状は一般的な 3D 形状には必ずしも含まれない. そこで本研究では, 本研究の手法をより多様な 3D 形状に適用するため, 形状の一部を先細り形状に変換するアルゴリズムを提案している. 詳細は [7] で説明されており, こちらも参照されたい.

また, 平面での折り返しと鏡映変換が等価なのは, 表面が可展面の場合に限られる [6]. 可展面とは, 伸縮したり切り開いたりすることなしに一枚の平面上に展開できるような曲面である. 例えば, 図 4a に示す非可展面を平面で折り返す場合, 鏡映変換を施した結果 (図 4b) と実際に平面で折り返した結果 (図 4c) は異なる形状になってしまう. もし可展面であればこのようなミスマッチは発生しないため, 本研究では平面での折り返しを施す対象を可展面に限定した.

そこで本研究では, 折りたたみによって裏返った部分 (図 3c の橙色部分) を, 可展面に変換する処理を行う. 図 5 にメッシュを可展面に変換する処理の様子を示す. [8] に代表される可展面変換手法では, 図 5a のように内部点を持つ非可展面を, 図 5b のように境界にある点のみで構成されるようリメッシュして可展面に変換している. 本研究でも同じ方法により可展面への変換を行っている.

3.3 素材とヒンジ

本研究で用いた平面での折り返しでは, 折りの過程で面にたわみが発生する [6] ため, 折りにより裏返る部分は伸び縮みする柔軟素材で造形しなければならない. 一方で, 折りにより裏返らない部分は,

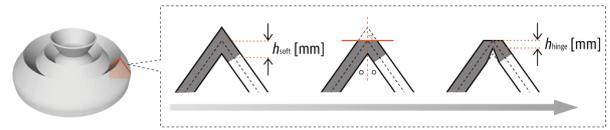


図 6. 素材の境界部分とヒンジの作成手順.

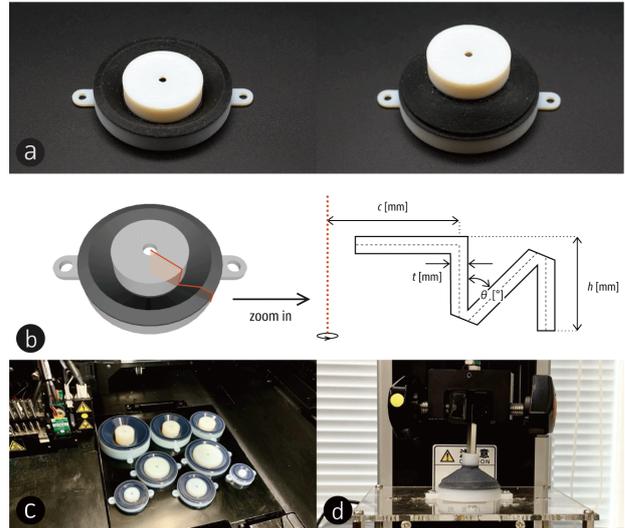


図 7. 双安定性の測定実験の様子. (a) 実験に用いてコップ様の形状. (b) コップ様の形状の形状パラメータ. (c) パラメータを変えて 3D プリントしたコップ様の形状. (d) 測定実験の様子.

耐久性や 4 章で後述する双安定性のためには, 硬質素材で造形されることが望ましい. そこで, 物体の一部のみを柔軟素材で造形するため, 本研究では複数素材を同時に 3D プリント可能なマルチマテリアル 3D プリンタの Objet260 Connex3 を用いた.

図 6 に, 厚み付けと素材の分割, ヒンジ作成のパイプラインを示す. まず, 鏡映変換を施された表面に対して厚み付けを行う. この時, 平面での折り返しの折り目の中心から定数 h_{soft} [mm] だけ離れた箇所に柔軟素材と硬質素材の境界を設けて分割する. 次に, ヒンジの頂点の厚みを, ヒンジ部の厚みが半分となるように山側を削り取る. 最後に, ヒンジの厚みが定数 h_{hinge} [mm] になるように調整する. このようにヒンジの厚みを薄くすることにより, 展開状態と折りたたみ状態の両状態での折り角を実現できる柔軟性と, 展開と折りたたみの操作を繰り返せる耐久性を持たせることができた.

4 双安定性の評価

4.1 双安定性

本研究では, 折りたたまれた物体は人の手で「押し出す」ことによって展開できる. 本研究の手法で

3D プリントされた物体は展開された状態での使用が想定されるため、外部から力を加えずとも自立安定することが望ましい。考えられる方法の1つに、物体の内部に支えとなる柱を設置する方法がある [10]。しかし、[10]の柱は設置に膨大な手数を必要とする上、内部に柱が存在するために容器などの用途で使用するには不便である。

そこで本研究では、支えとなる構造がなくとも、展開された状態と折りたたまれた状態の両方で自立安定となる双安定性を持つよう、最終形状を設計することを目指す。物体が双安定性を持っていれば、折りたたまれた状態から展開された状態に遷移させる操作が、人間が指で押し出すだけで数秒で完結する。

本研究では準備実験として、図 7a に示す物体を 3D プリントし、折りたたまれた状態と展開された状態の両方で安定となることを確認した。そこで、この双安定となる条件を他の多様な形状でも一般化するため、双安定性に与える各形状パラメータの変化の影響を実験により解析した。

4.2 定式化

本手法で造形された物体の双安定性を議論するため、本研究では展開された状態から折りたたまれた状態に戻すために必要な外力を考えた。もしこの外力が十分に大きければ物体は双安定であり、逆に 0 もしくは負の値であれば双安定ではないと判定できる。この外力を形状パラメータを用いて定式化できれば、本手法で造形された物体が双安定かどうかを判定できる。

図 7 に、双安定性に影響を与える形状パラメータを示す。本研究では物体の厚み t [mm]、曲率半径 c [mm]、折りたたまれた部分の高さ h [mm]、折りたたまれた部分の角度 θ [°] の 4 つのパラメータを考慮した。展開された状態から折りたたまれた状態に遷移させるのに必要な外力 F [N] は、これらのパラメータについて 1 次または 2 次であると推測できる ([7] の図 10) ため、 t, c, h, θ についての関数 $f_t(t), f_c(c), f_h(h), f_\theta(\theta)$ 、および定数 K を用いて以下のように表されると仮定した。

$$F = f(t, c, h, \theta) = K \cdot f_t(t) \cdot f_c(c) \cdot f_h(h) \cdot f_\theta(\theta) \quad (1)$$

本研究では、 $f_t(t), f_c(c), f_h(h), f_\theta(\theta)$ を定式化することを目的として、以下の実験を行った。まず、特定の形状について 1 種類の形状パラメータのみを変え 3 種類の形状パラメータを固定したものを 3D プリントした。次に、展開された状態から折りたたまれた状態に遷移させるための外力を引張圧縮試験機 (MCT-2150) を用いて測定した。最後に、得られた結果に対してカーブフィッティングを施し、 $f_t(t), f_c(c), f_h(h), f_\theta(\theta)$ を得た。

表 1. 実験に用いたパラメータの一覧。

t	1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3
c	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25
h	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22
θ	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65

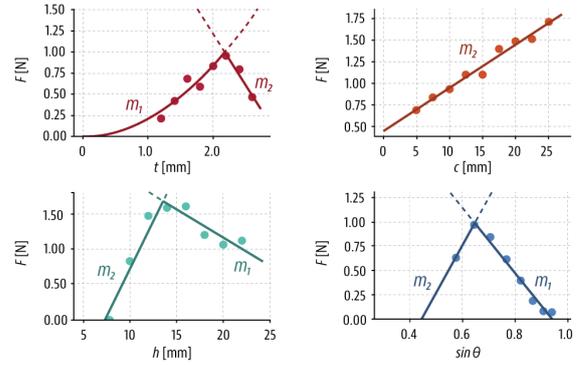


図 8. 測定結果。

4.3 実験

実験ではまず、コップ様の形状の 4 つの形状パラメータの内 1 つのパラメータのみを変えて 3D プリントした (図 7c)。この実験では $t = 2$ mm, $c = 15$ mm, $h = 10$ mm, $\theta = 45^\circ$ を基本形状とし、測定のためその内 1 つの変数のみを表 1 に示す値に変えて計 37 個の物体を 3D プリントした。

次に、展開された状態から折りたたまれた状態への遷移に必要な最大の外力を測定した (図 7d)。この実験では 15 回遷移を測定し、その平均値を採用した。

図 8 に結果を示す。[7] に詳説した関数によりフィッティングした結果は以下ようになった。

$$\begin{aligned} f_t(t) &= \min\{0.22t^2 - 0.020t, -0.63t + 2.2\} \\ f_c(c) &= 0.0050c + 0.45 \\ f_h(h) &= \min\{-0.080h + 2.8, 0.27h - 2.0\} \\ f_\theta(\theta) &= \min\{-3.4 \times \sin \theta + 3.2, 4.9 \times \sin \theta - 2.2\} \\ K &= 2.6 \\ F &= f(t, c, h, \theta) \\ &= K \cdot f_t(t) \cdot f_c(c) \cdot f_h(h) \cdot f_\theta(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

この式を用いて、所望の形状の形状パラメータを代入して計算した値がもし正であれば双安定、負であれば双安定でないとして判定した。

5 設計ツール

本手法を用いて所望の形状を折りたたまれた形状に変換する際には、折りたたみ可能な先細り領域や

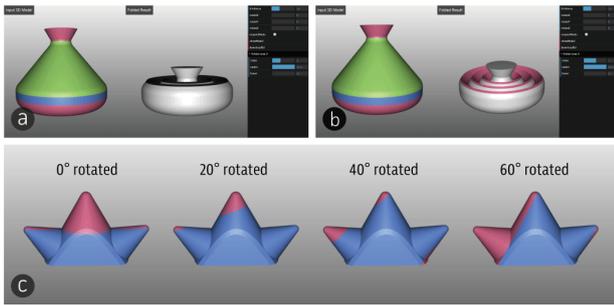


図 9. 折りたたみ形状を決定するための設計ツールの様子。

双安定性の有無といった、人間にとって非直感的な事項を把握する必要がある。一方で折り目の位置の決定には、その物体の使われ方やデザイン性も考慮する必要がある、それらは人間の得意とするところである。そこで、人間とコンピュータが協調して折りたたみ形状を決定できるようにするため、本研究では以下の2要件を実現するインタラクティブな設計ツールを実装した。

1. 折り目の数、厚み、折り平面の向きといったパラメータを探索しながら決定できる
2. 折りたたみ可能な部分や双安定性をリアルタイムで表示できる

図 9 に、実装した設計ツールの動作する様子を示す。この設計ツールは STL ファイルを入力すると、画面左側に入力形状、画面右側に折りたたみのシミュレーション結果が表示される (図 9ab)。左側に表示されている 3D 形状の表面の内、赤色部分は 3.2 で説明した先細り形状部分、青色部分は先細り形状でない部分、緑色部分はすでに折りたたみ済みの領域である。もしユーザが赤色部分をクリックすると、平行で等間隔に配置された平面によりその部分を鏡映変換した結果が画面右側に表示される。画面右端には (1) 物体の厚み、(2) 3D 形状の XYZ 回転、(3) 折りたたむ領域の位置、(4) 鏡映変換を行う平面の数、の 4 つを操作できるメニュー部分がある。ユーザがこれら进行操作すると、3D 形状の表示がリアルタイムに反映される。これにより、ユーザは折りたたみ形状を試行錯誤しながら決定できる。

この設計ツールでは、ユーザが 3D 形状を回転させると先細り形状部分がリアルタイムに変化する (図 9c) ため、ユーザは折りたたみ可能な領域を視認しながら適切な折りたたみの方向の探索できる。また、設計ツールは折りたたみ形状のシミュレーション結果を更新するたびに、式 2 により双安定性を再計算する。そこでもし柔軟素材部分が双安定でない判定された場合、図 9b の柔軟素材部分が赤色で表示される。これにより、折りたたまれた物体が双安定となる条件を視認しながら、パラメータを操作



図 10. Pop-up Print の造形結果例。

して折り線の位置を調整できる。

最後に、ユーザは `downloadStl` ボタンを押すことで、折りたたまれた形状の STL ファイルを保存できる。

6 3D プリント結果の例と議論

図 10 に、本手法を用いた実際の造形結果の例を示す。本研究では、3D プリントで德利と猪口を模した水密な容器を優れた収納性を有する双安定構造で実現できた。また、Huffman's Cone をはじめ、滑らかで穴のない表面を持ち、かつ美的にも優れた物体を 3D プリントすることもできた。

本研究の主眼である造形時間とサポート材消費は、Objet260 Connex3 を用いた場合、いずれの物体でも削減できた。造形時間は平均で 39%、サポート材消費は平均で 26%削減できた。

一方で、3D プリントされた物体には以下の 2 課題が残った。

6.1 元の形状とのずれ

図 10c のヒトデの腕のように、展開された形状に若干のたわみが発生し、入力形状とのずれが発生した。これは、ヒンジが折りたたまれた状態で 3D プリントされるため、展開時に元に戻ろうとする外力が働くためである。この課題を解決するためには、ヒンジ構造を改良する必要がある。

6.2 耐久性

本手法で造形された物体の耐久性を確認するため、双安定性実験で用いた基本形状 ($t = 2 \text{ mm}$, $c = 15 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$, $\theta = 45^\circ$) について、展開と折りたたみを 100 往復繰り返す耐久試験を行い、展開された状態から折りたたまれた状態への遷移に必要な外力を測定した。その結果、最初の 5 回の外力の平均が 0.795 N だった一方、最後の 5 回の外力の平均は 0.752 N であり、5.5% の減少が見られた。このため、短期間で繰り返し展開と折りたたみを行う場合には、本手法は適さないことがわかった。

7 今後の課題と展望

本研究の折りたたみ法は先細り形状という限られた形状にしか適用できない。折りたたみ可能な形状の幅を広げるためには、3D プリントで実現可能な別の折りたたみ法を模索する必要がある。

また、本研究は 3D プリントの時間と素材の削減が目的だったが、本手法で造形できる双安定性な構造は 3D プリント可能なロボットや触覚インタフェースなど、他用途への応用も期待できる。

8 結論

本研究では、物体を折りたたまれた状態で造形し、造形後に展開させる手法である Pop-up Print を提案し、その折りたたみのアルゴリズムを論じた。また、物体が双安定となる条件を定式化した。また、ユーザがインタラクティブに折り線位置を決定できる設計ツールを実装した。さらに、本研究の手法で実際に物体を造形し、造形時間やサポート材消費が削減できることを確認した。

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (JP17J09630, JP19J14472), JST ACT-I (JPMJPR18UN), および JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

参考文献

[1] B. An, S. Miyashita, A. Ong, D. Aukes, M. Tolley, E. Demaine, M. Demaine, R. Wood, and

- D. Rus. An End-to-End Approach to Self-Folding Origami Structures by Uniform Heat. *IEEE Transactions on Robotics*, 34, 11 2017.
- [2] B. An, Y. Tao, J. Gu, T. Cheng, X. A. Chen, X. Zhang, W. Zhao, Y. Do, S. Takahashi, H.-Y. Wu, T. Zhang, and L. Yao. Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 260:1–260:12, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [3] D. Beyer, S. Gurevich, S. Mueller, H.-T. Chen, and P. Baudisch. Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, p. 17991806, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, and W. Matusik. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable Parts. *ACM Trans. Graph.*, 31(6), Nov. 2012.
- [5] K. Matsuda, H. Gotoh, Y. Tajika, T. Sushida, H. Aonuma, T. Niimi, M. Akiyama, Y. Inoue, and S. Kondo. Complex furrows in a 2D epithelial sheet code the 3D structure of a beetle horn. *Scientific Reports*, 7(1):13939, 2017.
- [6] J. Mitani and T. Igarashi. Interactive Design of Planar Curved Folding by Reflection. In B.-Y. Chen, J. Kautz, T.-Y. Lee, and M. C. Lin eds., *Pacific Graphics Short Papers*. The Eurographics Association, 2011.
- [7] Y. Noma, K. Narumi, F. Okuya, and Y. Kawahara. Pop-up Print: Rapidly 3D Printing Mechanically Reversible Objects in the Folded State. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [8] C. Schüller, R. Poranne, and O. Sorkine-Hornung. Shape Representation by Zippables. *ACM Trans. Graph.*, 37(4), July 2018.
- [9] R. Suzuki, J. Yamaoka, D. Leithinger, T. Yeh, M. D. Gross, Y. Kawahara, and Y. Kakehi. Dynablock: Dynamic 3D Printing for Instant and Reconstructable Shape Formation. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 99–111, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [10] K. Wolff, R. Poranne, O. Glauser, and O. Sorkine-Hornung. Packable Springs. *Computer Graphics Forum*, 37(2):251–262, 2018.
- [11] J. Yamaoka and Y. Kakehi. ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2106–2115, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [12] C. Yu, K. Crane, and S. Coros. Computational Design of Telescoping Structures. *ACM Trans. Graph.*, 36(4):83:1–83:9, July 2017.