

# 先細り物体を折りたたみ3Dプリントするための インタラクティブな設計ツール

野間 裕太<sup>1,a)</sup> 鳴海 紘也<sup>1,b)</sup> 奥谷 文徳<sup>1,c)</sup> 川原 圭博<sup>1,d)</sup>

概要：積層型の3Dプリンタでは、その造形手法の特性により、あらかじめ高さ方向に「折りたたんだ」状態で3Dプリントし、造形後に展開することで造形時間及びサポート材消費を大幅に節約できる。しかし、意匠や使い勝手、強度の問題から、どの部分を折りたたんで印刷するかを自動決定することは極めて難しい。もし、STLファイルを入力すると折りたたみ可能な箇所を提示し、簡単な操作により折りたたんだ形状をインタラクティブに得られるインタフェースがあれば、折りたたみ操作を直感的かつ短時間で行うことができる。そこで本研究では、ユーザが厚み・段数を調節し物体を回転させながら、折りたたまれた形状や折りたたむ領域をリアルタイムに確認できるインタフェースを実装した。また折りたたまれた形状のSTLファイルを自動生成することで3Dプリントを即座に行える。本研究では、インタフェースを用いて得られた形状を印刷し、その物体の比較・評価も行った。

## 1. はじめに

3Dプリンタは高速なプロトタイプングを支援する強力なツールとして、ものづくりの様々な分野で用いられるようになった。しかし、3Dプリンタには大きく分けて3つの問題点がある。

1つ目の問題点は、長い造形時間である。3Dプリンタでの造形の多くは、数十分から数時間の造形時間を要する。特に、現在広く利用されている積層型の3Dプリンタの多くは、材料を一層ずつ堆積して造形を行うが、水平方向の造形に比べ高さ方向への積み上げにより長い時間を要するため、背の高い物体であるほど、造形時間は長くなる。

2つ目の問題点は、高価なサポート材の消費である。一部の3Dプリンタでは、上部の造形物を支えるため、除去が容易なサポート材も材料と同時にプリントしている。このサポート材は、造形後は基本的には除去され廃棄されるが、高精度で複数素材が印刷可能な高性能機種ではこのサポート材のコストも極めて高価である。したがってサポート材の消費量を削減できる3Dプリント手法を開発できれば、高価なサポート材にかかる費用を削減できる上、環境への影響の低減にも寄与する。

3つ目の問題点は、造形サイズの制限である。基本的に

3Dプリンタはトレイより大きな造形は不可能であり、極端に長い物体・大きな物体の造形は困難である。

そこで我々は以前、物体を折りたたんだ状態で3Dプリントし、それを造形後に力を加えて展開させることで、上記の問題を解決する手法を提案した [1]。このように、折りたたまれた状態で作った上で、膨らませて所望の形状を得る工夫は逆折り紙と呼ばれている [2]。この手法により、1つ目の問題点である造形時間は、造形時間が依存している物体の高さの削減により短くなった。2つ目の問題点であるサポート材消費に関しても、中空部分の体積の削減により削減できた。3つ目の問題点である造形サイズも、折りたたんだ状態で3Dプリントすることで縮小した。

しかし、印刷対象の3Dモデルを汎用3D CADを用いて折りたたまれた状態に変換するには、CADの操作に熟達している必要があるだけでなく、折りたたみが可能となる条件を満たすような先細り部を目視で判断したり、展開後も安定となる双安定性を持つよう折りたたみ形状を設計する必要がある。したがって、折りたたみの条件を満たす部分をソフトウェアが自動検出できることが望ましい。一方、折りたたみの操作を行うことで造形物の表面には折り線が入るほか、最終造形物の使われ方を意識すれば、折りたたみ処理を施すことが好ましくない箇所もあることから、すべてを自動的に処理するのではなく、造形物の用途や他の制約条件を考慮した折り線をインタラクティブにデザインできるツールが必要である。

そこで、本稿では以下の機能を持つインタフェースを実

<sup>1</sup> 東京大学

a) noma@akg.t.u-tokyo.ac.jp

b) narumi@akg.t.u-tokyo.ac.jp

c) okuya23@akg.t.u-tokyo.ac.jp

d) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

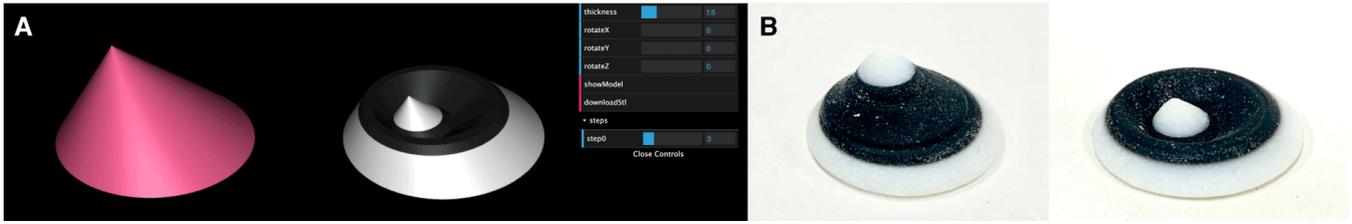


図 1 A: 印刷形状決定インタフェース上での形状の表示. B: 実際に Objet260 Connex 3 を用いてプリントしてできた物体. 左は造形後に展開させた時の形状, 右は造形時の形状.

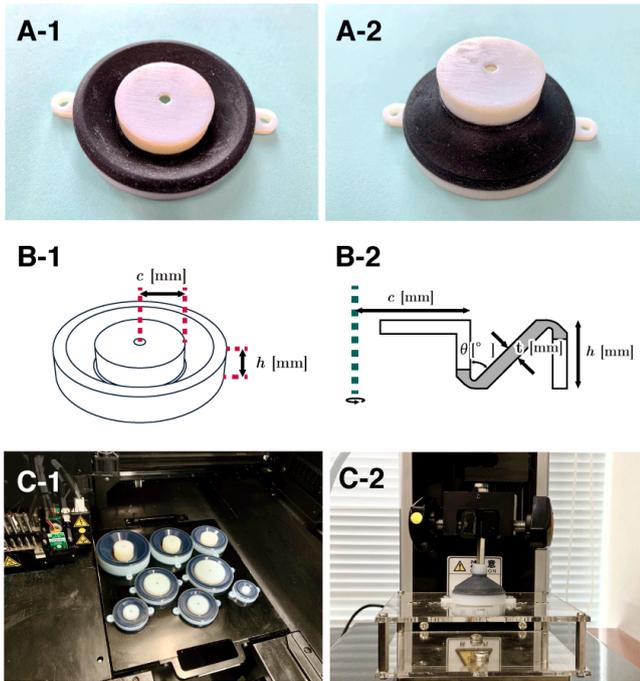


図 2 A: [1] で双安定性の測定に用いた物体. A-1: 造形時の形状, A-2: 展開時の形状. B-1:  $c, h$  の寸法, B-2:  $t, c, h, \theta$  の寸法を断面図に書き入れたもの. C-1: A に示した物体が 3D プリントで造形された直後の写真, C-2: 双安定性の測定の様子.

装した.

- 折りたたみ可能な領域を含む所望の形状を, 折りたたみ 3D プリント可能な形状に自動で変換する機能
- 先細り部分を自動かつリアルタイムに表示する機能
- 展開前後で構造が安定する双安定性の可視化機能

## 2. 関連研究

### 2.1 インタラクティブなインタフェース

3D 形状をユーザがインタラクティブに変換できるインタフェースは多く研究されている. 3D プリントの領域においては, 4DMesh [3], CurveUps [4], TherMorph [5], Ondulé [6] 等があり, これらは本稿のように 3D 形状を入力すると, それぞれの論文で有用とされる形状へと変形してくれるインタフェースである. 例えば, 4DMesh [3] では, 材料力学的な特性に関するパラメータをユーザが操作でき, 最終形状への変形を可視化できる. このように, ユーザが直感的には決定できないパラメータの変更による影響

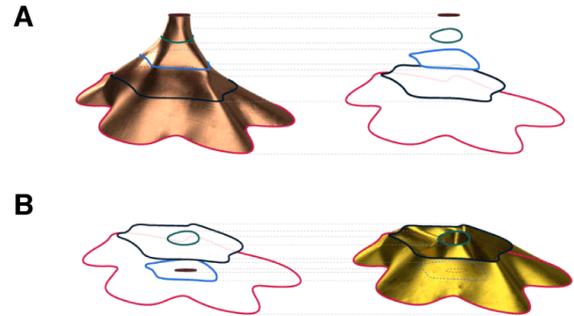


図 3 A: 山のような形状, B: A の形状を各等高平面で折りたたんだ形状. このように, 先細り形状は等高平面で折り返す操作が可能である.

をコンピュータに計算・表示させ, その表示に応じてユーザが再度パラメータを設定するインタフェースは, ユーザが試行錯誤しやすくなり, 非直感的な設計を可能とする.

また, 計算折り紙の領域においても入出力を可能とするインタフェースが複数提案されている. 例えば, Origamizer [7] は 3D 形状を入力とし, その 3D 形状を折ることのできる 2D の折り線パターンを出力する. 剛体折りのシミュレーションを行う Rigid Origami Simulator [8] は, 剛体折り紙の 2D 形状から 3D 形状への遷移をインタラクティブに表示できる. 近年提案された Freeform Origami [9] は折り紙の 2D パターンと 3D パターンを同時に表示し, 片方を編集するともう片方の変化をリアルタイムで可視化してくれる. 折り紙は, 展開図の情報から最終的な立体形状を想像するのが困難であり, それゆえ上記の研究は変形後の立体形状を 3D モデルとして表示している. 本稿の内容でも, 折りたたみ後の形状もインタフェース上で表示することで, ユーザの試行錯誤を容易にしている.

上記のインタフェースでは, いずれもユーザが形状パラメータを簡単かつインタラクティブに変更でき, また変更後の形状をリアルタイムで可視化することで, ユーザは目標の形状が得られるまで繰り返し試行錯誤を行うことができる.

### 2.2 先細り形状の検出

本稿では, 折りたたむ領域として「先細り形状」に着目した. 先細り形状とは, 高さ方向のベクトルに垂直な等高

平面で切った時の断面積が、高さに対して単調増加または単調減少となっている形状である。筆者の先行研究 [1] では、図 3 のように、形状の全部または一部に先細り形状が含まれる場合に折りたたみが可能である性質を示した。しかし先細りである部分を目視で確認することは難しい場合もあり、インタフェースには入力された形状の先細り部分を可視化する機能が必要である。

Packable Springs [10] では、3D モデル上の各メッシュを、それらが持つ法線ベクトルの高さ方向成分の正負で分類することにより先細り形状の検出を行っている。

しかし Packable Springs では、どの方向を高さ方向とするかをインタフェースが自動的に算出しており、ユーザがインタラクティブに変更できない。また、軸は一方向きしか選択できず、二股に分かれている形状の折りたたみには対応していない。

二股に分かれている形状の折りたたみに対応するためには、Yan らにより提案された、3D 形状で Medial Axis を計算する手法 [11] を用いて形状の軸を決定する実装も考えられる。この手法を用いれば複数の軸を検出でき、二股に分かれている形状を折りたたむことができる。しかし、Medial Axis の計算には数秒から数分かかることが報告されており、「インタラクティブな」インタフェースには向かない。

以上により、本稿ではユーザがインタラクティブに軸の方向を決定できる機能が必要だと考え実装した。このインタラクティブなインタフェースにより、ユーザはデザイン性や機能性を考慮しつつ、短時間で折りたたむ部分を決定できる。

### 3. 折りたたみインタフェース

#### 3.1 設計目標

先行研究を踏まえ、本研究ではユーザが折りたたみ形状に関するパラメータ（折りたたむ段数・物体の厚み・印刷の向き）をインタラクティブに決定できるようにする。

これらの3つのパラメータはそれぞれ相互にそして複雑に絡み合うために、パラメータの模索は自明ではなく、人とコンピュータが協力して行う必要がある。人間が得意な立体形状の把握及び最終的に必要な形状のイメージと、計算機が得意な折りたたみ前後の状態の描画及び双安定性の計算の協調を実現するため、本稿では以下を設計目標とした。

- (1) ユーザが段数・厚み等のパラメータを入力可能
- (2) 折りたたみ前後の状態を確認可能
- (3) 折りたたみ可能な領域がリアルタイムに描画可能
- (4) 双安定性が確認可能

#### 3.2 インタフェースの概略

図 4 に提案するインタフェースを示す。このインタフェー

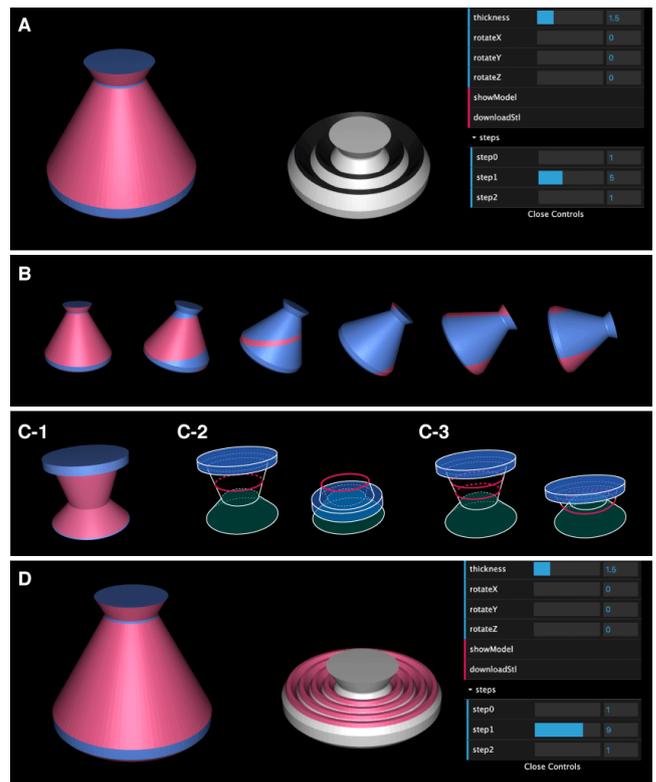


図 4 A: インタフェースの描画例。赤で示した部分が先細り形状であり、ユーザは全体の厚み、 $x, y, z$  軸での回転角、各部分の折りたたみ段数を操作できる。 B: 物体を回転させた時の様子。 C: 偶数段で折り返した結果、自己交差が起ってしまう形状の例。 C-2 の赤線で示された平面で折り返した場合、上部の青色部分と下部の緑色部分が干渉してしまう。 C-3 のように奇数段数で折り返せば、青色部分と緑色部分の上下関係は保たれ、互いに干渉しない。 D: 柔軟素材部分が双安定にならない場合は、右側の図のように、折りたたまれた形状の柔軟素材部分が赤く表示される。

スは、3D 形状 (STL ファイル) を入力とし、その形状のある軸に対して垂直な面で折りたたむ。ユーザは 3D 形状を回転させることで、所望の軸を中心にした折りたたみを行う。また、折りたたみの段数や出力形状の厚みなどのパラメータは、インタフェース右上にあるスライダによって変更できる。

ユーザは、以下の手順により折りたたまれた形状を得ることができる。

- (1) STL ファイルを入力
- (2) 形状を回転させる操作により、折りたたみ可能領域を探索
- (3) 段数や厚みを調整
- (4) (2) と (3) を、出力形状のシミュレーション結果を見ながら繰り返す
- (5) 厚みをつけた最終的な形状を確認
- (6) STL ファイルを出力

まず、最終的に必要となる形状の STL ファイルを用意し、インタフェースに入力する。その後インタフェースの

スライダを用いてその形状を回転させ、所望の場所が折りたたまれるように折りたたみ方向を探索する(図4-B)。折りたたみ方向をユーザが決定したら、折りたたみの段数・物体の厚みをユーザが入力する。ここで、図4-Cのような自己交差を防ぐため、段数は奇数に限定している。最後にインタフェースは、双安定性が確保できれば柔軟素材部分を黒色に、確保できなければ赤色に描画する(図4-D)。ユーザはその形状・折りたたみに納得すれば1クリックで折りたたまれた状態(=印刷のためのSTLファイル)を得られ、即座に折りたたみ3D印刷が可能となる。

### 3.3 折りたたみ可能な領域の探索

ユーザは、図4-A及び4-Bに示すように、物体の $x, y, z$ 軸方向の回転をスライダにより操作すると、物体のジオメトリに各軸についての回転行列を乗ずることで、物体が回転する。

回転させた物体の折りたたみ可能な領域の検出法を説明する。まず、Packable Springs[10]の先細り領域の検出法と同様、3Dモデルの各メッシュの $z$ 成分の正負で各メッシュを分類する。ここで、 $z$ 軸に垂直な2平面に挟まれた領域にあるメッシュの法線ベクトルの $z$ 成分が、全て正であれば $z$ 軸の正方向に対して、全て負であれば $z$ 軸の負方向に対して折りたたみ可能である。

本稿のインタフェースでは、ユーザが回転操作を行った際、リアルタイムに折りたたみ可能な領域を計算し画面上に赤色で表示する。計算速度は、メッシュ数が500程度の3Dモデルであれば、筆者のPC(MacBook Pro(13-inch, 2018, Four Thunderbolt 3 Ports), プロセッサ:2.3 Intel Core i5, メモリ:16)及びブラウザ(Google Chrome 79.0)を用いて、5 fps程度のフレームレートで描画されることが確認できた。この機能により、ユーザはリアルタイムに折りたたみ可能な領域を把握できる。

### 3.4 各パラメータの調整

インタフェースでは、図4-Aに示すように、ユーザは各先細り部分を何段で折りたたむか、及び厚みを何mmにするかを決定できる。この結果は、折りたたみ形状の3Dモデルとして図4-Aのようにリアルタイムで表示される。これにより、ユーザは段数を変化させた時の折りたたまれた形状の変化を目視で確認できる。ここまでの機能により、形状の折りたたみ方を直感的に確認できる。しかし折りたたみ3D印刷に必要な「変形前後に安定する」性質は人間が目視では判断できないため、変形前後に安定する性質、つまり双安定性もインタフェース上で確認できる必要がある。

## 3.5 双安定性について

### 3.5.1 双安定である必要性

提案手法の折りたたみ3D印刷を実現するためには、双安定性の確保が重要である。物体が双安定であるとは、物体が2つの状態を持ち、ある状態から別の状態に移るためには外から仕事を加える必要がある状態を指す。

折りたたみ3D印刷された物体は、プリント直後の平坦な状態では安定である。一方で、展開された状態で安定となるかは保証されない。双安定性は折りたたみ面の形状や折りたたみ時の一段あたりの高さ、物体の厚さ、上の段の重さ等、様々なパラメータによって変化する。つまり、形状によっては、物体が双安定とならない場合も存在する。

双安定とならない場合に展開させた状態で安定させるには、支えを入れる方法や、水圧や気圧で膨らませる方法がある。しかし前者は支えとなる物体を別途作成・挿入する必要があり、後者は物体全体に圧力がかかり、物体のある部分に力が集中して壊れるなどの欠点を有する。折りたたみ3D印刷された物体を上記の方法による支持なしに使用できるようにするためには、展開させた状態でも安定する構造であることが必要である。このため、折りたたみインタフェースの実装にあたり、出力形状が双安定かどうかを判定する機能が必要である。

### 3.5.2 双安定性の関数

全ての形状の双安定性を事前に計算しておくことは現実的ではない。そこで、本稿では形状をある程度モデル化し、代表的なパラメータのみの関数として表すことで、任意の形状に対して双安定性を計算する近似的な手法を用いた。

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応力を $b$ とする。 $b$ は形状・折りたたみ方によって変化する。つまり一段あたりの高さや厚さ等の、形状を決定するパラメータ $t_1, t_2, t_3, \dots$ が与えられた時、応力 $b$ は式1のような $t_1, t_2, t_3, \dots$ についての関数で表される。

$$b = f(t_1, t_2, t_3, \dots) \quad (1)$$

この関数 $f$ を知ることができれば、展開後の物体が双安定となるかどうかを判定でき、必要な双安定性を持つように各パラメータを操作するアルゴリズムの実装も可能となる。

先行研究[1]では、この関数 $f$ が、 $t_1, t_2, t_3, \dots$ それぞれについての関数の積の形でできると仮定した。すなわち、 $b$ の式が定数 $K$ を用いて式2の形になっていると仮定した。

$$b = f(t_1, t_2, t_3, \dots) = K \cdot f_1(t_1) \cdot f_2(t_2) \cdot f_3(t_3) \dots \quad (2)$$

そして一段あたりの高さ $h$  [mm]、物体の厚さ $t$  [mm]、断面の曲率半径 $c$  [mm]に対して以下のように定式化がなされている。

$$f_1(t) = \min\{0.35t^2 + 0.020t, -0.16t + 1.4\}$$

$$f_2(c) = 0.0074c + 0.68$$

$$f_3(h) = \min\{-0.0066h + 1.2, 0.0081h^2 + 0.028h - 0.34\}$$

### 3.5.3 双安定性の表示

ユーザが段数と厚みを決定し、その結果双安定性が閾値よりも小さくなったら、図 4-C に示すように双安定とならない柔軟素材部分が赤く表示され、ユーザはこの折りたたみ方だと双安定にならないことを知ることができる。この機能を用いることで、できるだけ高さを抑えて印刷したい場合に、段数を赤く表示されない範囲で増やせば良く、簡単に双安定かつ高さを抑えた形状を得られる。

## 4. 折りたたみ 3D プリントした物体の比較

実際に、マルチマテリアル 3D プリンタである Objet260 Connex 3 を用いて、図 5 に示す 3 物体をプリントした。どの物体も折りたたみ形状はインタフェースから自動で生成されたものであり、3 段の折りたたみによって自立する性質もシミュレーションと一致した。また、展開前の形状は設計した状態とほぼ同じ形状であった。

### 4.1 所望の形状と一致した物体

図 5-A 及び図 5-B に示した物体は、所望の形状と印刷後の物体を展開させた形状が概ね一致した。これらの物体は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っており、インタフェースでのシミュレーション結果と一致した。

### 4.2 所望の形状とは一致しなかった物体

図 5-C では、インタフェースに半球を入力し、3 段で折りたたんだ物体を出力した。この物体は、折りたたまれた状態から展開された状態への遷移が可能で、実際に双安定になったが、中央の硬質素材部分の高さが低くなり、元の半球の形状とはかけ離れてしまった。

この理由として、ヒンジの形状が挙げられる。半球を 3 段で折りたたんだ際の下側のヒンジは、ヒンジの角度が鋭く、展開させた時にヒンジが伸びた。このため、柔軟素材部分の幅が大きくなり、高さが低くなったと考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、ユーザが所望の形状を入力すると、折りたたみ可能な箇所や双安定性を可視化しつつ、直感的な操作により折りたたみ 3D プリント可能な形状が出力されるインタフェースを実装できた。

今後は以下の研究課題にも取り組む予定である。

### 5.1 インタフェース上での入力 3D 形状の簡単な編集

現在、本稿で提案したインタフェースでは、ユーザは与えられた形状を自由に編集できず、入力した形状をそのま

ま用いなければならない。また、全ての形状に先細り形状が含まれるわけではなく、仮に先細り形状が含まれていたとしても高さが低すぎて折りたたみ不可能な場合が多い。

ここで、ユーザが造形精度を妥協した上で形状に変化を加え、インタラクティブに先細り領域を広げることができれば、本稿のインタフェースの可用性は大きく広がると考える。このためには、ユーザがどの領域のメッシュの形状に変化を加えるのかを指定できる必要がある。

今後は、Freeform User Interface[12]などを参考にして、GUIからの簡単な入力により 3D 形状をある程度編集できる機能を実装する予定である。

### 5.2 より良いヒンジ形状の検討

本稿のインタフェースにより出力された物体を 3D プリントしてできた物体は、ヒンジの角度が鈍い物体は展開された状態の形状が元の形状と概ね一致したものの、ヒンジの角度が鋭い物体ではヒンジ部分の影響で中央の硬質素材部分の高さが下がり、元の形状とはかけ離れてしまう。

これを解決するため、今後はより良いヒンジ形状を検討する。折り紙工学の分野では厚みのある物体を折りたたむ方法に関する研究 [13] が存在するため、これを参考にヒンジの設計を行う。

## 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (JP17J09630, JP19J14472) 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] 野間裕太, 鳴海紘也, 奥谷文徳, 川原圭博: 折りたたみ 3D 印刷の提案と形状に対する双安定性の評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 (2019).
- [2] Matsuda, K., Gotoh, H., Tajika, Y., Sushida, T., Aonuma, H., Niimi, T., Akiyama, M., Inoue, Y. and Kondo, S.: Complex furrows in a 2D epithelial sheet code the 3D structure of a beetle horn, *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 13939 (online), DOI: 10.1038/s41598-017-14170-w (2017).
- [3] Wang, G., Yang, H., Yan, Z., Gecer Ulu, N., Tao, Y., Gu, J., Kara, L. B. and Yao, L.: 4DMesh: 4D Printing Morphing Non-Developable Mesh Surfaces, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 623-635 (online), DOI: 10.1145/3242587.3242625 (2018).
- [4] Guseinov, R., Miguel, E. and Bickel, B.: CurveUps: Shaping Objects from Flat Plates with Tension-actuated Curvature, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 4, pp. 64:1-64:12 (online), DOI: 10.1145/3072959.3073709 (2017).
- [5] An, B., Tao, Y., Gu, J., Cheng, T., Chen, X. A., Zhang, X., Zhao, W., Do, Y., Takahashi, S., Wu, H.-Y., Zhang, T. and Yao, L.: Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Hu-*



図 5 インタフェース上での表示と実際に印刷した物体の比較. A: 斜円錐. B: 円錐台. C: 半球. 全て先細り形状であり, 本提案によって高さ方向に折りたたみ 3D プリントを実現した.

*man Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 260:1–260:12 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173834 (2018).

- [6] He, L., Peng, H., Lin, M., Konjeti, R., Guimbretière, F. and Froehlich, J. E.: Ondulé: Designing and Controlling 3D Printable Springs, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 739–750 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347951 (2019).
- [7] Tachi, T.: Origamizing Polyhedral Surfaces, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 2, pp. 298–311 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2009.67 (2010).
- [8] Tachi, T.: Simulation of Rigid Origami, *Origami 4: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*, Vol. 4 (online), DOI: 10.1201/b10653-20 (2009).
- [9] Tachi, T.: Generalization of rigid foldable quadrilateral mesh origami, *Journal Of The International Association For Shell And Spatial Structures*, Vol. 50 (2009).
- [10] Wolff, K., Poranne, R., Glauser, O. and Sorkine-Hornung, O.: Packable Springs, *Computer Graphics Forum*, Vol. 37, No. 2, pp. 251–262 (online), DOI: 10.1111/cgf.13358 (2018).
- [11] Yan, Y., Sykes, K., Chambers, E., Letscher, D. and Ju, T.: Erosion Thickness on Medial Axes of 3D Shapes, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 38:1–38:12 (online), DOI: 10.1145/2897824.2925938 (2016).
- [12] Igarashi, T.: Freeform User Interfaces for Graphical Computing, *Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Graphics*, SG'03, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 39–48 (online), available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1757492.1757497> (2003).
- [13] Ku, J. S. and Demaine, E. D.: Folding Flat Crease Patterns With Thick Materials, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 8, No. 3 (online), DOI: 10.1115/1.4031954 (2016). 031003.