

招待論文 Inkjet 4D Print: インクジェットUVプリントによる折紙テセレーションの自己折り

鳴海 紘也^{*†} 小山 和紀^{*†} 須藤 海^{†‡} 野間 裕太[†] 佐藤 宏樹[§]
 館 知宏[†] 杉本 雅明[¶] 五十嵐 健夫[†] 川原 圭博[†]

概要. 本発表では Inkjet 4D Print について紹介する. Inkjet 4D Print とは, 熱収縮するシートの表裏にインクジェット方式の UV プリンタで 2 次元パターンを印刷し, その後シート全体を加熱することによって, 3 次元の折紙テセレーション (折紙による敷き詰め構造) を得る自己折りの技術である. 折紙を自動で折る研究はこれまでに多数報告されているが, 本技術は FDM 方式の 3D プリンタなどを用いた従来手法に比べて (1)1200 倍以上である 8 万個以上の面を自動で折ることができ, (2)2.8 倍高速に造形でき, (3) 必要に応じてフルカラーの装飾を付与できる. また, 与えられた任意の 3D モデルを折るための印刷パターンを自動設計するツールも開発した. これにより, 様々な 3 次元形状を 2 次元的に製造できることを示した.

1 はじめに

折紙パターンの繰り返し構造である折紙テセレーションは, 宇宙機の太陽光パネル [6]・飲料缶 [12]・動的な建築のファサード [2]・衣服 [11] などに活用されている. また, 2017 年には, 任意の多面体が折紙テセレーションによって 1 枚の紙から折れることが数学的に証明された [3]. このため, 我々の身の回りに存在する多くの「かたち」を折紙テセレーションによって設計・拡張していける可能性がある.

しかし, 折紙テセレーションを個人または産業で活用していく上での最大のボトルネックは製造である. 例えば, 表面が 374 個のポリゴンで覆われたスタンフォードバニー ([9] の図 23) を手作業で折るのには 10 時間が必要である. これまでに折紙を自動で折る「自己折り」の研究はなされてきたものの, 折紙テセレーションを折れるほど精度が高く手間の少ない手法は存在しない. 例えば FDM 方式の 3D プリンタで出力した熱可塑性樹脂を再加熱することで意図的に歪ませる手法 [1] が提案されたが, 論文で示されたバニーのポリゴンは 26 個であり, 自己折りできた最大の面の数は 69 である. 手作業で伸縮性の素材に板を貼り付ける手法 [10] もあるが, 精度・手間の観点で不十分である. 一方本研究では最大 80,008 個 (先行研究の 1200 倍以上) の面の自己折りおよび, 635 個のポリゴンと 4299 個の面で構成されたバニーの自己折りに成功した.

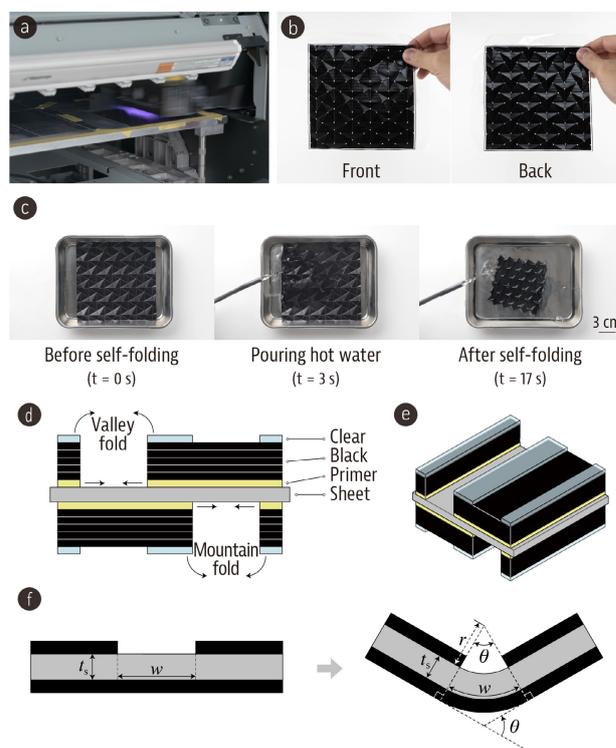


図 1. Inkjet 4D Print の概要. (a, b) UV プリンタで熱収縮シートの表裏に印刷を施す. (c) お湯などで加熱すると数秒で変形する. (d, e) インクの層構造. (f) 変形を円弧で近似した変形モデル.

2 Inkjet 4D Print

図 1 に Inkjet 4D Print の概要を示す. まず, 熱収縮シート (ここでは厚み 15 μm のポリオレフィン・ハッコーシュリンクフィルム 841-02) の両面に市販の UV プリンタ (MIMAKI UJF 6042-MkII) で印刷を施す (図 1a). 表裏には山折り・谷折りに

Copyright is held by the author(s). This paper is nonrefereed and non-archival.

* The first two authors contributed equally.

† 東京大学

‡ Nature Architects 株式会社

§ 宮城大学

¶ エレファンテック株式会社

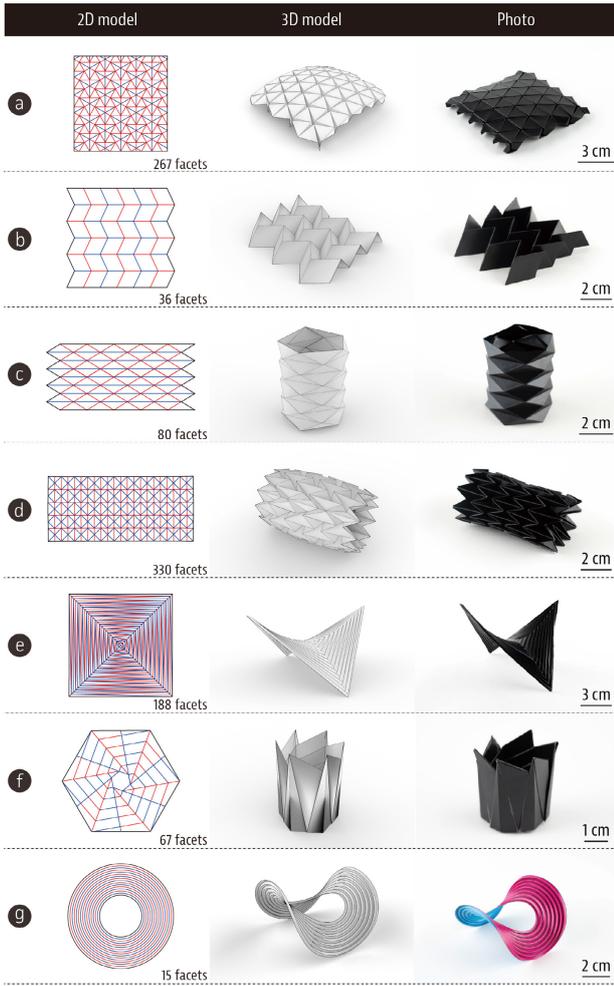


図 2. 有名な折紙テセレーション. (a-g) Ron Resch パターン [7]・ミウラ折り [6]・吉村パターン [12]・なまこ [4]・Hypar・フラッシュャー [5]・ディスク.

対応するパターンが乗っており (図 1b), 70 °C 以上で加熱することにより目標の立体形状を得る (図 1c). 図 1de に示すように, 山折りをした場合はヒンジの裏側を露出させ, 谷折りをした場合は表側を露出させる. これにより, 加熱時に露出部だけが収縮し, それ以外の部分はインクの硬さで収縮が阻害され変形が生じる. 印刷には約 150% の伸縮率を持つ黒 (LUS-150) を 5 層, 接着剤としてプライマ (PR-200) を 1 層, コーティングとしてクリア (LH-100) を 1 層利用している. インクの層数と伸縮率は重要であり, 硬すぎるインク層は変形時に割れてしまい, 柔らかすぎるインク層は全体の収縮に耐えられず変形しない. 図 1f には変形のモデルを示す. このとき, 角度 θ はインクのギャップ幅 w によって

$$\theta = \frac{\varepsilon}{t_s} w \quad (1)$$

と表され, 0° から約 180° まで線形に変化する. ただし ε はシートの収縮率, t_s はシートの厚みである.

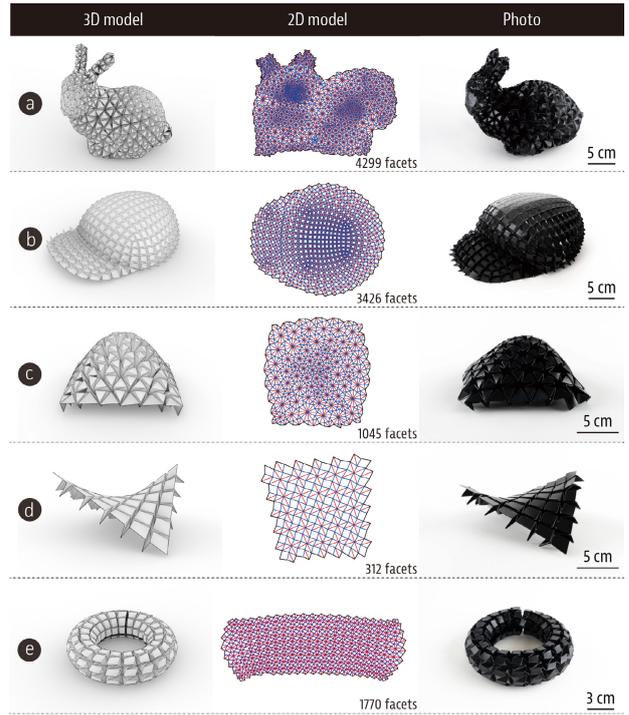


図 3. 自由形状. (a-e) バニー・帽子・山・鞍・トーラス.

次に, ユーザが設計した折紙のパターンを印刷パターンに自動変換するソフトウェアを開発した. 我々が過去に発表した折紙設計ソフトウェア Crane [8] をベースに, 式 1 より折紙の立体形状に割り当てられた変形角度 θ を実現するギャップ幅 w を計算し, 複数のインク層に対応した印刷パターンを出力した. 図 2 および図 3 にはそれぞれ, 有名な折紙テセレーションの 2D モデルをユーザ自身が設計した場合 (= 順問題) と, 3D メッシュを入力した際に自動で 2D モデルを計算した場合 (= 逆問題) の作例を示す.

詳細は発表で述べるが, 本技術は既存研究 [1] の 1200 倍以上である 80,008 個の面を自己折りできる. また, FDM 3D プリンタを利用する自己折り手法 [1] と比べた場合, 約 15 cm 四方のシート構造を約 2.8 倍高速な 26 分で印刷できる. これは, FDM 3D プリンタで目標の立体物を普通に印刷した場合 (8 時間 47 分) に比べて約 20 倍高速である. さらに, 装置がカラー印刷機であることを利用し, 図 2g のようなフルカラーの折紙も実現できる.

3 結論

本稿では, 折紙を 2 次元形状で印刷し, 加熱することで 3 次元形状を得る Injet 4D Print を紹介した. 一度平面を介して立体を作ると, 造形時間の短縮・サポート材の不使用・運搬/保管の効率化など, 様々な利点が見込める. 今後, 導電性インクなどを組み合わせ, さらに機能的な立体構造を検討する.

謝辞

本研究の一部は JST ACT-I (JPMJPR18UN), 株式会社メルカリ R4D と RIISE との共同研究である価値交換工学, JST AdCORP (JPMJKB2302) によって実施された。最後に, 先行研究である Thermorph [1] のデータを提供して下さった CMU の Jianzhe Gu および Lining Yao, インクとフィルムの粘弾性試験を実施して下さった神奈川県立産業技術総合研究所の武田理香氏, アプリケーションとしてノースリーブジャケットのデザインと製造を実施して下さった東京藝術大学の齋藤晃祥氏, 撮影に協力して下さった MIT CSAIL の Yunyi Zhu に感謝します。

参考文献

- [1] 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, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [2] ARUP, Al Bahr Towers, <https://www.arup.com/projects/al-bahr-towers>.
- [3] E. D. Demaine and T. Tachi. Origamizer: A Practical Algorithm for Folding Any Polyhedron. In B. Aronov and M. J. Katz eds., *33rd International Symposium on Computational Geometry (SoCG 2017)*, Vol. 77 of *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, pp. 34:1–34:16, Dagstuhl, Germany, 2017. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [4] S. Fujimoto. *Souzousei wo kaihatsu suru rittai origami*. Hyogo-ken Gakkou Kouseikai Tamba Shibu, 1976. (Written in Japanese).
- [5] R. J. Lang. *Origami in Action*. St. Martin 's Griffin, New York, 1997.
- [6] K. MIURA. Proposition of Pseudo-Cylindrical Concave Polyhedral Shells. *ISAS report/Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo*, 34(9):141–163, 11 1969.
- [7] R. Resch. The design and analysis of kinematic folded plate systems. In *Proceedings of IASS Symposium on Folded Plates and Prismatic Structures, 1970*, 1970.
- [8] K. Suto, Y. Noma, K. Tanimichi, K. Narumi, and T. Tachi. Crane: An Integrated Computational Design Platform for Functional, Foldable, and Fabricable Origami Products. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, dec 2022.
- [9] T. Tachi. Origamizing Polyhedral Surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(2):298–311, 2010.
- [10] M. T. Tolley, S. M. Felton, S. Miyashita, D. Aukes, D. Rus, and R. J. Wood. Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating. *Smart Materials and Structures*, 23(9):094006, 2014.
- [11] WOW Inc., ISSEY MIYAKE “Steam Stretch” Concept Movie, <https://vimeo.com/108092253>.
- [12] Y. Yoshimura. On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under axial compression. 1955.