

Zip-up Print: ジッパーを用いた高速かつ省サポート材の 3D プリント手法

山本 匠^{*} Jiaji Li[†] Akib Zaman[‡] Noah Barnes[‡] 杉浦 裕太^{*} Stefanie Mueller[†] 鳴海 紘也^{*}

概要. 本研究では、ジッパーが付いた構造物を平面状態で 3D プリントし、それを印刷後に組み立てることによって 3 次元形状を作製する計算製造パイプラインを提案する。構造物を平面に展開してから印刷することにより、単純に立体形状を 3D プリントするよりも高速かつ省サポートな造形が可能となる。我々の実装したシステムは、3D モデルを入力すると、そのモデルを平面に展開可能な「可展面」という構造に近似し、構造の境界部分にジッパーを生成する。ユーザは出力されたジッパー付きの構造を平面上に敷き詰めて 3D プリントする。本稿では、ジッパー構造とパイプラインの概要、作製した構造物と応用例を示す。

1 はじめに

Fused Deposition Modeling (FDM) 3D プリントによって、個人で様々な立体構造を印刷できるようになってきた。しかし、大きく複雑な構造を印刷する際、(i) 印刷後に廃棄されるサポート材を消費する、(ii) 大型造形物、特に高さのある造形物には印刷時間がかかる、(iii) プリントの造形サイズを超えた大きさの造形物は印刷できない、(iv) 印刷した構造物を部分的に修正したい場合、構造物全体を再印刷する必要が生じる、という課題がある。

これらを解決するために、平面状態で構造物を印刷した後に立体に変形させる手法 [1, 3] や、複数のパーツに分割して印刷し、組み立てる手法 [2] が提案されている。しかし、前者は印刷時間やサポート材を削減できる一方で、プリントの造形サイズを超えた構造物を印刷できない。後者は、プリントの造形サイズを超えた構造物を印刷できるが、単純に構造物を分割しても平らな形状にならないため、印刷時間やサポート材の削減は限定的である。また、分割したパーツは多くの場合接着剤・ネジで接合され、繰り返しの組み立て・分解が困難である。

本研究では、入力した 3D モデルを可展面（伸縮することなく平面に展開できる面）のパッチに分割した後で、パッチの境界部分にジッパー構造を生成し、平面状態で 3D プリントする計算製造パイプライン (図 1) を提案する。提案手法を用いることで、自動的なパッチ分割とユーザの対話的なパッチ分割の両方が可能になる。加えてボール・ソケット構造を用いたジッパーにより、短時間かつ省サポート材での印刷と、繰り返しの組み立てが可能となる。

2 ジッパー構造

市販で販売されているジッパー構造は、接続する 2 面の歯が平行になっている。しかし、角度の異なる面同士を接続する際に、ジッパーの歯同士を平行にしつつ面と接続しようとする、面と歯の角度が異なる。そのため、プリントする際にサポート材が必要となる可能性がある。ジッパーの歯と面構造を平行の状態に接続させようとする、3D プリントする際にはサポート材が少なく済むが、接続する 2 面の歯は平行にならないため、歯同士の角度が異なる場合でもジッパーを接続させる必要がある。

本研究では、ボール・ソケット構造を有するジッパーを提案する。図 2 に示すように、各ジッパーはボールとソケットから構成され、一方の歯のボールが他方の歯のソケットにはまることで結合する。この構造はボールジョイントのように機能し、パッチ間の角度に依存しない接続を可能にするため、異なる角度を持つパッチ同士を接続できる。この構造により、ジッパーと面構造が平行な状態でパッチを印刷しつつ、これにより、印刷時間とサポート材の両方を低減できる。

3 計算製造パイプライン

図 1A-E に本研究で提案するパイプラインを示す。入力された 3D モデル (図 1A) を可展面のパッチに変換する (図 1B)。この変換には Zhao らが提案した手法 [4] を用いた。ユーザは場合に応じて対話的に分割線を入力し、さらにパッチを分割することができる (図 1C)。その後、パッチの境界部分にジッパーを生成する (図 1D)。最後に、パーツを平面状態にし、3D プリント可能な状態にする (図 1E)。

4 結果・応用例

計算製造パイプラインを用いてスタンフォードバニーを 3D プリントし (図 1F)、組み立てた (図 1G) 結果が図 1H である。印刷時には、スライサー

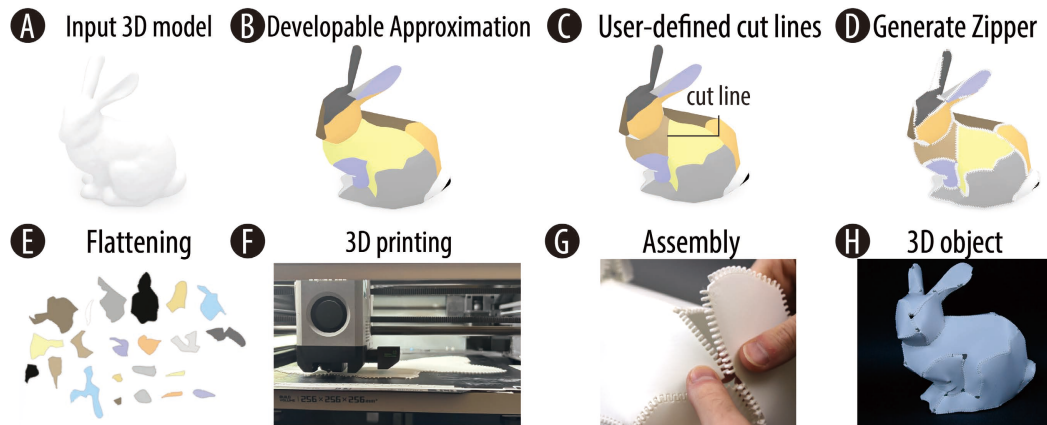


図 1. 提案手法は、入力された 3D モデル (A) のエッジにジッパー状構造を付けた上で可展面パッチ (B) に変換する．その後、ユーザはインタラクティブに分割線を入力し、さらにパッチを分割することができる (C)．次にパッチの境界部分にジッパーを生成する (D)．最後に、平面化されたパッチ (E) を 3D プリント (F) し、手作業で組み立てる (G) ことで、入力モデルを近似する 3D オブジェクト (H) を出力できる．

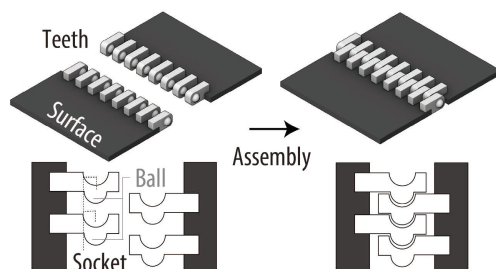


図 2. ボール・ソケット構造を有するジッパー．

は Bambu Studio, プリンタは Bambu X1 Carbon (造形サイズ: $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$, 0.4 mm ノズル), フィラメントは TPU for AMS を使用した. 印刷した構造物の大きさは $276 \times 197 \times 280 \text{ mm}^3$ であり, プリンタのサイズを超えた大型構造物の印刷を実現した.

作製したスタンフォードバニーに関して, 提案手法と従来の 3D プリント (ベースライン手法) における印刷時間およびサポート材消費量を比較した. 印刷時間およびサポート材の値はスライサ (Bambu Lab Studio) 内で取得した. 提案手法では, Bambu Lab X1 Carbon の使用を想定し, 各パーツが $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$ のビルドボリューム内に収まるように配置し, 全パーツが作製完了するまで印刷を繰り返した. 一方, ベースライン手法の条件では, 入力オブジェクトをそのままスライスした. ベースライン手法では, Bambu Lab X1 Carbon に収まらなかったため, より大きな Bambu Lab H2S を想定してスライスした. いずれの条件においても, 壁厚は 0.2 mm に設定した.

結果的に, 提案手法とベースライン手法を比較して, 印刷時間は 22 時間 35 分と 12 時間 19 分 (45.46%

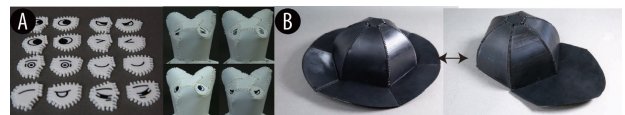


図 3. 応用例

削減), サポート材消費量は 48.96 g と 6.98 g (85.74% 削減) となり, 本研究の有効性が確認された.

本研究の応用例を図 3 に示す. 図 3 (A) は, クマのモデルの目の部分のメッシュを分割しておき, 表情を変化させられるようにした例である. 加えて, ジッパーを用いることで, オブジェクトの模様やテクスチャだけでなく形状そのものを変化させることも可能である. 図 3 (B) では 2 種類の帽子形状を切り替えている. 本手法を用いることで, ユーザは必要な材料を抑えながら, 多様なデザインの帽子を楽しむことができる.

5 結論

本稿では, ジッパー付きの構造物を平面状態で 3D プリントし, 印刷後に組み立てることによって 3 次元形状を作製する計算製造パイプラインを提案した. ボール・ソケット構造を用いたジッパー構造を用いることで, 印刷時間とサポート材を極力減らした状態で, ジッパー付きのパッチを印刷することができる. 加えて, 提案手法が印刷時間とサポート材消費量を削減させること, プリンタの造形可能サイズを超えた大型構造物の印刷が可能であることを示し, 繰り返しの組み立てと分解が可能であるというジッパーの特性を活かした応用例を示した. 今後はより高速な組み立てを可能にする手法として, スライダーも作製することを目指す.

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24KJ1957 および JST ASPIRE (JPMJAP2401) の助成を受けたものである。

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] L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, and W. Matusik. Chopper: partitioning models into 3D-printable parts. *ACM Trans. Graph.*, 31(6), Nov. 2012.
- [3] 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, p. 58–70, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [4] Z.-Y. Zhao, Q. Fang, W. Ouyang, Z. Zhang, L. Liu, and X.-M. Fu. Developability-driven piecewise approximations for triangular meshes. *ACM Trans. Graph.*, 41(4), July 2022.