

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

山本匠^{1,a)} Jiaji Li² Akib Zaman² Noah Barnes³ 杉浦裕太¹ Stefanie Mueller² 鳴海紘也¹

概要: 本稿では、ジッパーの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。本稿では作製事例を複数示し、提案手法が印刷時間とサポート材消費を低減することを示した。また、本手法を用いることで、プリンタのサイズを超えた大型構造物の印刷や、モデルの部分的な改変が可能であることも示した。

1. はじめに

デスクトップ型の Fused Deposition Modeling (FDM) 3Dプリンタによって、個人で様々な立体構造を印刷できるようになってきたが、大きく複雑な構造を印刷する際には、依然として以下のような課題がある。

- **サポート材の消費:** 複雑な形状を印刷する際、3Dプリントは下から上に素材を積層して印刷するため、印刷中に構造物を支えるためのサポート材を印刷する必要が生じる。サポート材は印刷後には廃棄されるため、無駄な材料消費が生じる。
- **長い印刷時間:** 大型の造形物、特に高さのある造形物を印刷する際、印刷時間が長くなる。
- **サイズの制限:** プリンタの造形可能サイズを超えたオブジェクトは印刷できない。
- **部分的な改変には全体の再印刷が必要:** 印刷したオブジェクトの一部を後から修正したい場合、オブジェクト全体を再印刷する必要が生じる。

上記の問題を解決するために、平面状態で構造を印刷した後に立体状態に変形させる手法 [1], [2], [3] や、構造を複数のパーツに分割して個別に印刷する手法 [4], [5], [6], [7] が提案されている。平面状態で印刷する手法は、印刷時間やサポート材の消費を削減できる一方で、平面展開の結果構造物がプリンタの造形サイズを超えてしまうことがあ

る。一方、分割して印刷する手法は各パーツの体積を減らすことができるが、単純にオブジェクトを分割しても平らな形状にならないため、印刷時間や廃材を低減する効果は限定的である。また、分割したコンポーネントは接着剤やネジで接合されることが多く、繰り返しの組み立て・分解が手間になることも多い。

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、平坦な状態で印刷する計算製造パイプライン（図1）を提案する。提案手法は、自動的なパッチ分割とユーザのインタラクティブなパッチ分割の両方をサポートする。また、後述するボールジョイントで構成されたジッパー構造により、短時間かつ省サポート材での印刷と、容易な組み立てが可能となる。本研究の貢献を以下に示す。

- 短時間・省サポート材での印刷と、パッチ同士の角度に依存しない接続を可能にする、ボールジョイントを用いた3Dプリント可能なジッパー構造。
- 与えられた3Dモデルを可展面パッチへと分割するパイプライン。
- 本手法の有用性を示す作例・評価・応用例。

2. 関連研究

2.1 製造時間と材料消費を減らすファブリケーション手法

製造時間と材料消費を減らすため、これまで様々なファブリケーション手法が提案されてきた。例えば、レーザーカッターを用いた折紙 [8], [9], [10] や、ボクセル構造 [11], [12]・

¹ 慶應義塾大学

² MIT CSAIL

³ Boston University

a) imuka06x17@keio.jp

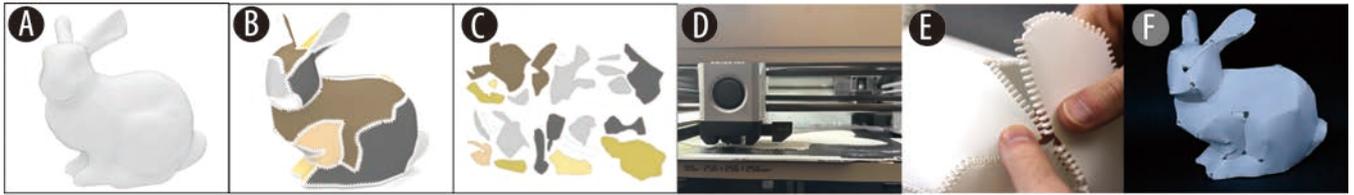


図 1 提案手法は、入力された 3D モデル (A) のエッジにジッパー状構造を付けた上で可展面パッチ (B) に変換する。その後、平面化されたパッチ (C) を 3D プリント (D) し、手作業で組み立てる (E) ことで、入力モデルを近似する 3D オブジェクト (F) を出力できる。

真空成形 [13]・ワイヤー構造 [14] などを用いた造形手法が提案されてきた。中でも、3D プリントの製造時間と材料消費を減らす研究はとりわけ注目を集めてきた。例えばサポート構造の最適化 [15], [16] や、多自由度の 3D プリンタを使う手法 [17], [18] は造形時間の短縮やサポート材消費の低減に有効である。しかし、サポート材の最適化は既にある程度成熟した分野であり、改善に限度がある。また、多自由度制御は市販の FDM 3D プリンタでは困難である。別の手法として、ワイヤーフレーム [19], [20] やボクセル [11], [12] により入力されたモデルを近似し、試作を行う手法がある。この手法では、造形物の形状再現性を犠牲にする代わりに造形時間を削減できる。以下、提案手法に特に関連する方法として、(i) 平面状態で印刷を行った後に立体状態に変形する手法と、(ii) オブジェクトを分割して別々に印刷する手法を紹介する。

平面状態で印刷した後に立体状態に変形させる手法。 オブジェクトを印刷した後に外部刺激 (熱など) によって形状を変化させる 4D プリントという手法が注目を集めている。特に、平面あるいはほぼ平面の状態でおブジェクトを作製し、後工程で所望の立体形状に変形させる手法が複数提案されている [1], [2], [3], [21], [22]。例えば、An らは薄い折紙シートを FDM 3D プリンタで印刷してから熱で意図的に立体形状へと変形させる手法を提案し、単純に 3D 形状を印刷する場合と比べて印刷時間が大幅に削減できることを示した [1]。これらの変形は多くの場合不可逆的であるが、何度も 2D/3D の状態を行ったり来たりできる可逆的なファブリケーション技術も提案されている [23]。

本研究では、ジッパー付きの複数のパッチを印刷し組み立てることで 3D 形状を製造する。様々な 4D プリント手法 [1], [2], [3], [21], [22] と同様に、本手法も平面形状で印刷したオブジェクトを印刷後に立体形状へと変形させるが、本手法は可逆的な組み立てと分解を可能にし、繰り返し再構成できる点が異なる。さらに [23] と比べて、本手法は 3D プリンタの造形可能サイズを超える構造物を作製できるという利点がある。

オブジェクトを分割して別々に印刷する手法。 オブジェクトを小さな部品に分割し、個別に印刷して後工程で組み立てる方法が提案されている [4], [6], [7], [24]。例えば、

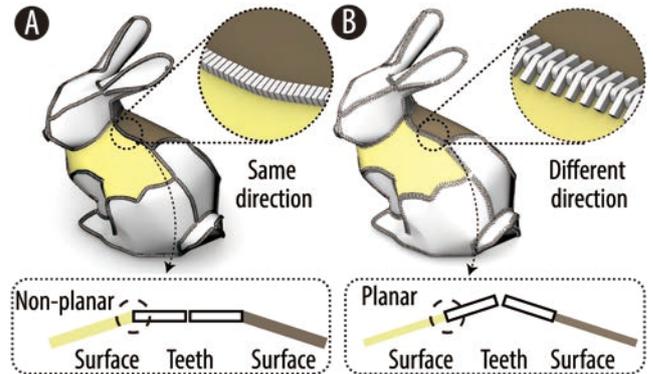


図 2 (A) 左右のジッパー構造を互いに平行に配置する手法。(B) ジッパー構造を面構造に平行に整列させる手法

Dapper [7] はオブジェクトを分割し、ビルドボリューム内に収まるようにパッキングを最適化することで、印刷時間と材料消費を削減した。Karasik ら [24] は、サポート材を必要としない 3D プリントを実現するための分割手法を提案した。このようなアプローチを用いると、プリンタのサイズを超える大きさのオブジェクトを印刷できる。

本研究もこれらの研究と同様にオブジェクトを分割して別々に印刷する。一方本研究では、(i) 各部品を小さな非平面の部品ではなく 2D 状態で印刷するため、印刷時間と材料消費をより大きく削減できる。また、(ii) ジッパーの利用により容易な分解と再組み立てが可能になる。

2.2 3D プリント可能なジッパー構造

3D プリント可能なジッパー構造は多くのデザイナーや研究者によって探究されてきた。zippppper プロジェクトでは三又や曲線などの新しいジッパー構造が提案されている [25]。また RichRach では曲線ジッパー構造のパラメトリックデザイン手法が提案されている [26]。Pan らは曲線上に接続可能なジッパーを用いてスケルトン構造上の 3D オブジェクトを作製する手法を提案した [27]。しかし、これらは主に直線や曲線形状を対象としており、三次元的に曲がった面を含む構造を対象としていない。

別の例として、布とジッパーを用いて 3 次元形状を構築する手法がある。Schüller らは 3D モデルを可展面ストリップに分解し、レーザーカットした布に市販のジッパーを縫製・接着して再構成する手法を提案した [28]。しかし、

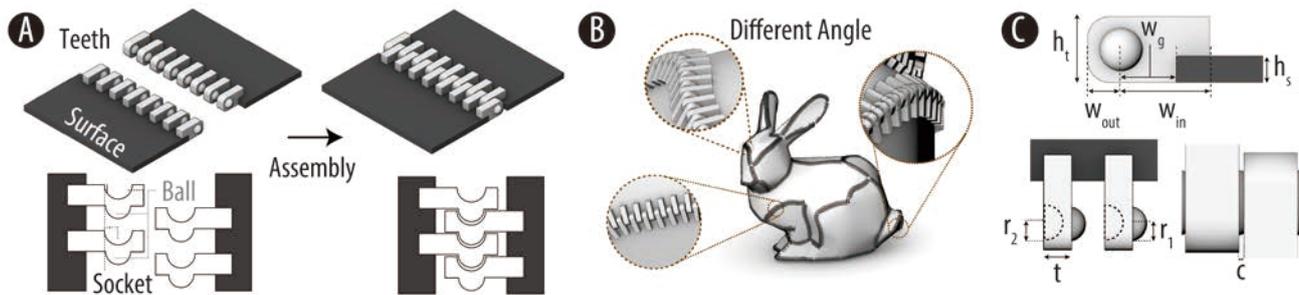


図 3 (A) 提案するジッパー構造. (B) 異なる角度でパッチを接続する例. (C) 各種パラメータ.

この手法で用いるジッパーは平面的な既製品に制約されるため、縫製や接着などの手作業でジッパーと構造物を取り付ける必要がある。また、市販のジッパーは立体構造を保持する目的で作られていないため構造的な安定性を確保しにくい。そこで Masuda らは、3D プリントされたジッパーを布に熱圧着する手法を提案した [29]。しかし、この手法は任意の 3D モデルを入力として扱うことはできず、入力を手動で可展面にする必要がある。また、構造物の印刷後布とジッパーを熱圧着する後処理は依然として残る。

[27] はスケルトン構造の造形に主眼を置いているのに対し、本手法では閉じた曲面を含む構造物の生成について焦点を当てている点異なる。また [28] や Masuda ら [29] と比べて、任意の 3D モデルを入力でき、かつ構造物とジッパーの両方を一度に 3D プリント可能であるという点で異なる。

2.3 可展面近似

可展面 (developable surface) とは、伸縮を伴わずに平面へ展開できる曲面である。ウェアラブルデバイス [30] や建築デザイン [31] に見られる非可展形状は、美的であり人体への適合性も高いが、伸縮性のある材料か立体的な造形を要求するため、しばしば作製が困難である [32]。この課題に対処するため、研究者たちは非可展形状を可展面パッチで近似するアルゴリズムを探究してきた。これにより、木材など伸縮性のない材料をレーザーカットなどの平面的な造形手法で加工するだけで目標形状が実現できるようになり、作製コストを削減できる。例えば Mitani と Suzuki は、曲面を三角形ストリップで近似し、ペーパークラフトの展開パターンを生成する手法を提案した [33]。Stein らは、三角形メッシュの展開可能性に関する厳密な定義に基づく最適化手法を提案し、ファブリケーションへの応用を議論した [34]。Zhao らは、エッジベースの展開可能性エネルギーを用いて入力曲面を展開可能メッシュに変形する手法を導入した [35]。

本研究では、Zhao らの手法 [35] を用いて入力曲面を可展面に近似する。

3. ジッパー構造

ジッパーが付いた 3D オブジェクトを構築する上で、主に 2 つの課題がある。

- (i) ジッパー構造と面構造の接合
 - (ii) 面構造の柔軟性とジッパー構造の剛性の両立
- 以下、この 2 点を説明する。

3.1 ジッパー構造と面構造の接合

与えられた 3D モデルを複数のパッチに分割し、市販のジッパーや過去の研究で提案されたジッパー [29] で接続したとしても、多くの場合分割された構造を平面に展開することはできない。これは、市販のジッパー構造や [29] が、ジッパーの歯が互いに平行であることを前提としている (図 2 (A)) からである。平行でない 2 つの可展面パッチ同士を接続する場合、歯を互いに平行に保とうとすると、ジッパー構造と面構造の間に角度差が生じ、結果として 3D プリント時にはパッチは平面にならない。これによってオーバーハングが発生し、印刷時間の増加やサポート材の消費につながる。この問題に対処するためには、ジッパーの歯と面構造と同じ方向に揃えることが望ましい。これによりパッチは平面となり、図 2 (B) に示すようにサポート材不要でプリントが可能になる。ただし、図 2 (B) のような構造を実現するためには、接合部が平行でなくても接続できるジッパーを実現する必要がある。

上記を考慮して、本研究ではボール・ソケット構造に基づくジッパーを採用した。図 3 (A) 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。その結果、ジッパー構造と面構造が平行な状態でパッチを印刷しつつ、異なる角度を持つパッチ同士を接続できる (図 3 (B))。これにより、印刷時間とサポート材の両方を低減できる。

3.2 面構造の柔軟性とジッパー構造の剛性の両立

平面状で印刷したパッチを組み立てる過程では、パッチ

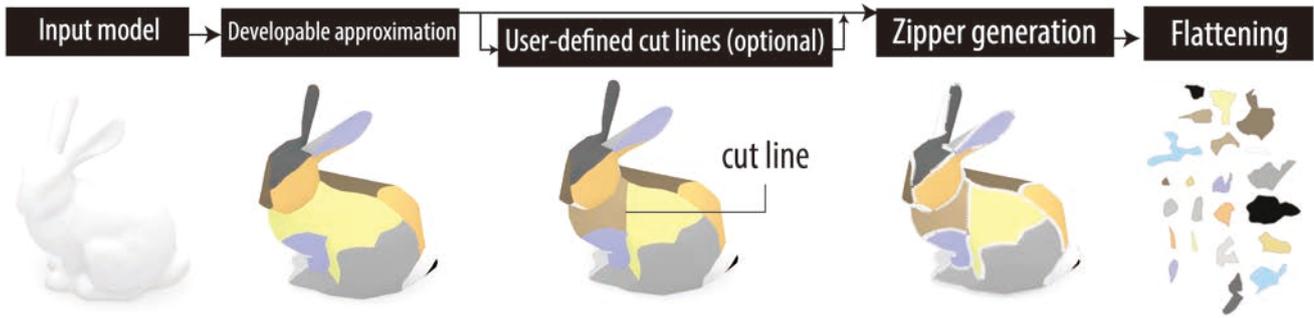


図 4 本研究の計算製造パイプライン.

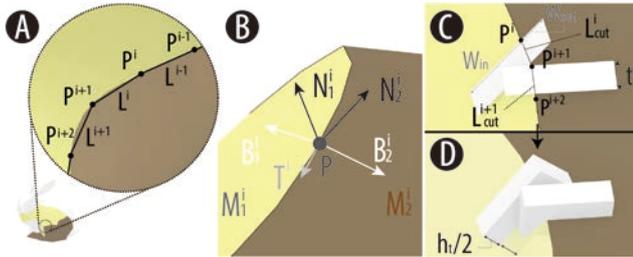


図 5 ジッパー生成プロセス.

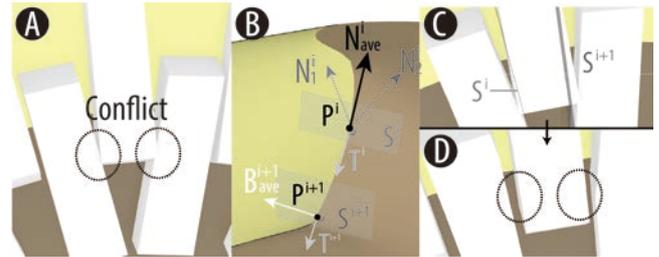


図 6 衝突回避のプロセス.

を面外方向に曲げつつ、ジッパー構造によって確実に接合する必要がある。このため、パッチの面部分には柔軟性が求められる一方でジッパー部分には十分な剛性が必要となる。最も単純な解決策は、面構造とジッパー構造に異なる材料を用いることであるが、ここでは材料切り替えによる印刷時間や廃材の増加を防ぐため、単一の素材を想定し、部分ごとに厚みを変えて対応した。プリント材料には Bambu Lab TPU for AMS (ショア硬度 68D) を使用し、レイヤー高さは 0.2mm とした。具体的な印刷パラメータを以下に示す。

面構造に関連するパラメータ: 面構造の厚み (図 3 における h_s) は 0.6mm に設定した。0.2mm や 0.4mm は薄すぎて印刷の欠陥や裂けが生じる場合がある一方で、0.6mm は十分な厚みと柔軟性を両立できる。

ジッパー構造に関連するパラメータ: 歯の厚さ (t) は実験的に 1.7mm とした。この厚みがあれば、歯が変形せずによく噛み合う。ボール半径 (r_1) は 1.0mm とし、十分な印刷品質を維持できる下限値とした。ソケット半径 (r_2) はボールよりやや大きく設定することでボール構造を入れやすくなるため、1.1mm とした。さらに、高さ (h_t) は 4.0mm、外側の幅 (W_{out}) は 4.0mm、内側の幅 (W_{in}) は 1.5mm、ボールと表面の間隙 (W_g) は 2.0mm とした。ジッパー構造の歯同士の間隔 (c) が大きすぎるとジッパーが外れやすくなり、小さすぎると噛み合わせが困難になるため、実験的に 0.1mm とした。

4. コンピュータショナルパイプライン

図 4 に示すように、本稿で提案するパイプラインは入力

した 3D モデルを自動的に可展面パッチに変換する。その後、ユーザはインタラクティブに分割線を追加し、パッチをさらに分割できる。次に、可展面パッチ間の境界に沿ってジッパーが自動的に生成される。最後に、ジッパーの付いたパッチを平面に展開し、3D プリント可能な状態にする。システムは Grasshopper で実装された。

4.1 可展面近似と分割線の追加

平面から 3D 形状を組み立てるためには、入力された 3D モデルを可展面に変換する必要がある。CG 分野では多くの手法が提案されてきたが、本研究のパイプラインでは Zhao らの手法 [35] を採用した。この手法では、入力された三角形メッシュの頂点を最適化し、それを展開可能な複数枚のパッチに分割する。

可展面近似には、Zhao らが公開しているコードを利用した。このコードは各パッチの OBJ ファイルと、各三角ポリゴンがどのパッチに属しているかを示すインデックスが入力されたテキストファイルを出力する。パッチが自動生成された後、ユーザは GUI を通じて、所望の位置にシーム (パッチの交線に沿った分割線) を手動で挿入できる (5 章参照)。

4.2 ジッパー構造の生成

ジッパー構造を可展面パッチの境界に取り付けるため、まず異なるパッチ間で共有される境界を検出し、それらをポリライン曲線として抽出する。そのポリラインに沿って 2 つのパッチ間で交互にジッパー構造を生成する。

得られたポリライン曲線を N 個の直線セグメント

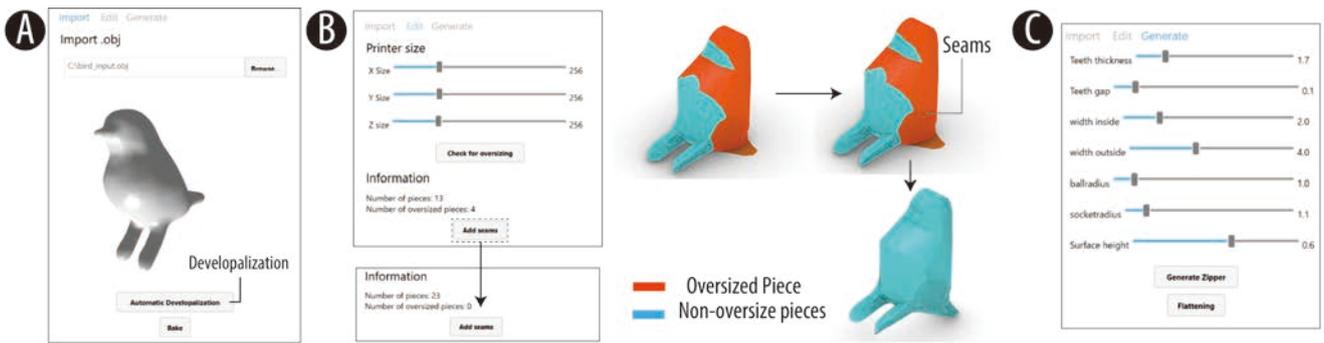


図 7 ユーザインタフェース.

(L^1, L^2, \dots, L^N) に分割し, それらを結ぶ $N + 1$ 個の点 $(P^1, P^2, \dots, P^{N+1})$ を曲線上に生成する (図 5 (A)). 各セグメント L^i について, このセグメントを共有する 2 つのメッシュ面をそれぞれ M_1^i および M_2^i とし, 点 P^i におけるポリラインの単位接ベクトルを T^i とする. また, M_1^i および M_2^i の単位法線ベクトルをそれぞれ N_1^i および N_2^i とする. 次に, T^i と対応する法線ベクトル N_1^i および N_2^i との外積を計算し, 従法線ベクトル B_1^i および B_2^i を求める (図 5 (B)). 従法線ベクトルは, それぞれのメッシュの内側方向を向くものとする.

各セグメント L^i に対して, 終点 P^{i+1} から長さ c を切り詰めることで短縮セグメント L_{cut}^i を定義する. ジッパーを生成するために, i が奇数の場合, L_{cut}^i 上に新たな直線を作成し, B_1^i 方向に w_1 だけオフセットする. 一方, i が偶数の場合は, 同じ量だけ B_2^i 方向にオフセットする. 同時に, もう 1 本の直線を作成し, 逆方向にオフセットする. この直線を, i が奇数の場合は $-B_1^i$ 方向に w_2 だけ, 偶数の場合は $-B_2^i$ 方向にオフセットする. これらの線を結ぶことで, ジッパー構造を構築するための平面が形成される (図 5 (C)). 最後に, この平面を押し出してジッパー構造を形成する. 押し出しは, i が奇数の場合に N_1^i および $-N_1^i$ 方向に, i が偶数の場合に N_2^i および $-N_2^i$ 方向に, それぞれ $h_t/2$ の距離で行う (図 5 (D)).

上記の手順は, 直線上に沿ったジッパー構造の生成では常に問題なく動作するが, 曲線上に沿ったジッパーに適用した場合, 隣接するジッパー構造の接線方向が変化するため, ジッパーの歯の自己交差が発生することがある (図 6 (A)). この問題に対処するために, 各ジッパー構造に対して 3 次元空間内の存在可能領域を定義し, この領域外に出た構造部分を除去することで干渉を回避する.

平均法線ベクトル N_{ave}^i は, N_1^i と N_2^i を加算して正規化することで求める. 次に, 従法線方向 B_{ave}^i を, N_{ave}^i と接ベクトル T^i の外積として計算する. 点 P^i を 2 つ複製し, それぞれを N_{ave}^i 方向および $-N_{\text{ave}}^i$ 方向に $h_c/2$ だけ平行移動させる. さらに, これらの各点についてもう一度 2 つずつ複製し, それぞれを B_{ave}^i 方向および $-B_{\text{ave}}^i$ 方向に $w_c/2$ だけ平行移動させる. この手順により 4 つの頂点が生成さ

れ, それらを結ぶことで平面 S^i が形成される (図 6 (B)). したがって, セグメント L^i 上に生成されるジッパー構造の存在可能領域は, S^i と S^{i+1} で囲まれる空間として定義される. ジッパー構造のうちこの領域以外の部分を除去することで, 隣接するジッパー構造同士の干渉を効果的に回避できる (図 6 (C)).

最後に, 各ジッパーの歯の前面と背面にそれぞれボールとソケットを生成する. なお, 3 つ以上のパッチが 1 つの頂点を共有する場合, ジッパーの歯同士が衝突し得るため, 頂点周辺で自己交差するジッパーを検出・除去した.

4.3 平面展開

この時点で, 入力された 3D モデルは必要に応じて複数のパッチに分割され平面展開できるように近似されているが, まだ実際に平面展開されている訳ではない. そこで, Boundary First Flattening [36] を用いてパッチを平面に展開した. このとき, 立体形状で噛み合っている 2 つのパッチは, 平面展開すると自己交差する可能性がある. そのため, 平面展開されたパッチを内側に 2mm オフセットし, 複数のパッチ同士が交差しない間隔を確保した. 最後に, 展開メッシュの境界に沿ってジッパーの歯を再配置することで, 印刷可能な平面状のパッチ構造を得る.

5. ユーザインタフェース

ユーザインタフェースを Grasshopper の Human UI プラグインにより実装した. 機能は主に 3D モデルの入力 (図 7 (A)), ユーザによる分割線の追加 (図 7 (B)), ジッパーのデザインと生成・平面展開 (図 7 (C)) に分かれている.

3D モデルの入力と可展面近似: 図 7 (A) に 3D モデルの入力と可展面近似のための画面を示す. ユーザはまず, UI から 3D モデルを入力する (図 7 (A)). 入力後, UI 上でプレビューが表示される. その後「Automatic Developalization」ボタンを押すことで, Zhao らの手法 [35] を用いて可展面近似を行う. 次に, Bake ボタンを押すことで, Rhino 上に可展面近似を行った後のオブジェクトを出力できる.

ユーザによる分割線の追加: 分割されたパッチは, ユーザが持つ 3D プリンタのベッドサイズより大きい可能性が

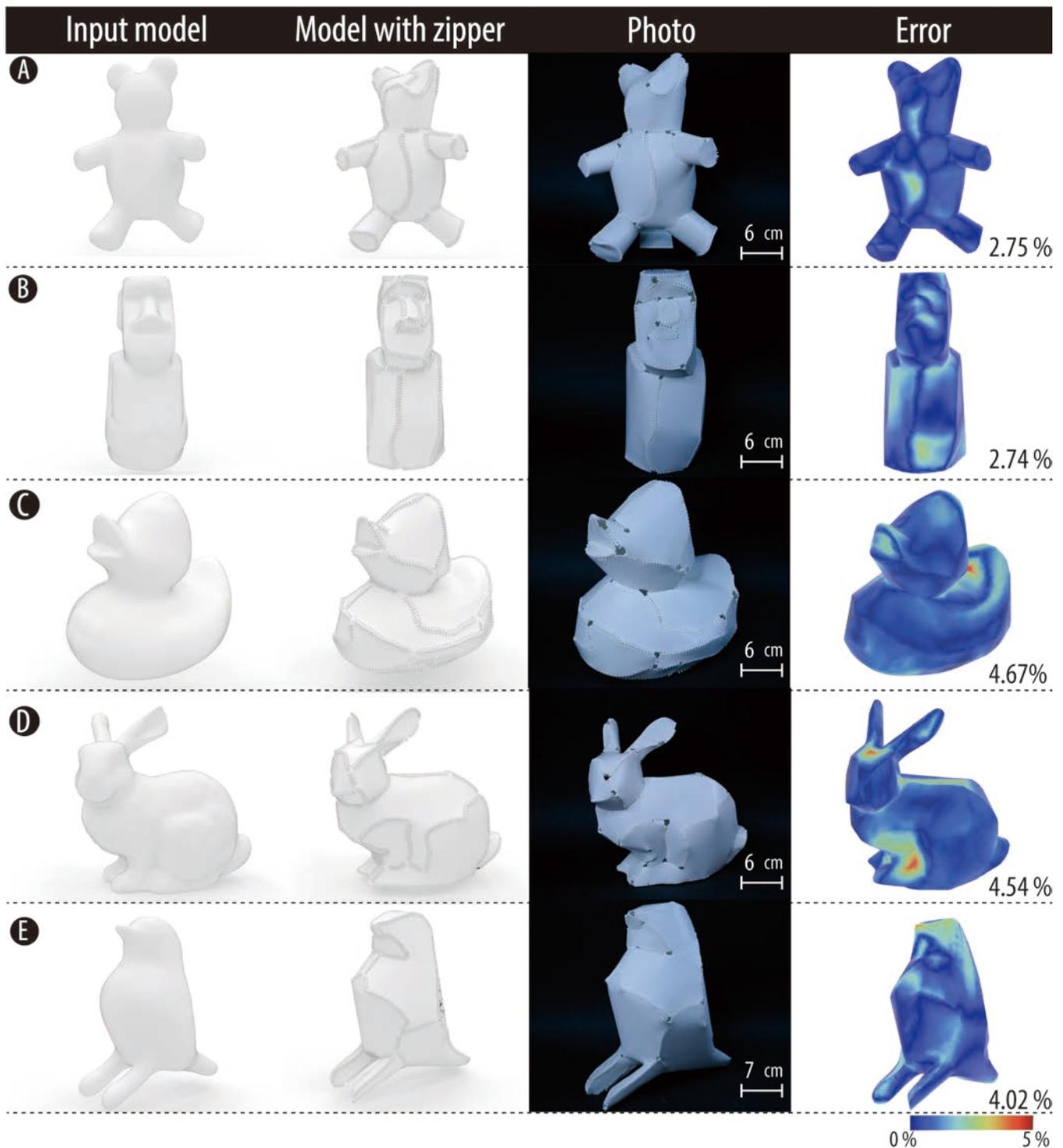


図 8 作製結果とスキャンした 3 次元データの誤差。

ある。このような場合、ユーザは分割線を追加してパッチをさらに分割することでベッドサイズの中に収める必要がある。そこでユーザがベッドサイズを入力すると、そのサイズを超えたオブジェクトを Rhino 上で可視化する (図 7 (B)) 機能を実装した。「Check for oversizing」ボタンを押すことで、平面展開をした際にプリンタのベッドサイズを超えたパッチが赤く表示され、ベッドサイズ内に納まったパッチは青色に表示される。大きすぎるパッチがある場合、

ユーザはパッチ上の辺を複数選択して一筆書きのポリラインを作り、Rhino の DupEdge コマンドと Join コマンドで 1 つのポリラインに統合してシームを準備する。このシームを選択した状態で「Add seams」ボタンを押すと、パッチが分割される。ベッドサイズを超えるパッチがなくなるまでシームを追加することで、目標形状を自分の環境のプリンタで印刷できることが保証される。

ジッパーのパラメトリックデザイン、生成、平面展開:

上記のプロセスで分割線を定義した後、ジッパーをメッシュ同士の境界線上に沿って生成する。この際、ユーザはジッパーのパラメータ（歯形状の厚み t 、間隔 c 、内側の幅 W_{in} 、外側の幅 W_{out} 、ボール構造の半径 r_1 、ソケット構造の半径 r_2 、面構造の厚み W_s を制御できる）を調整できる（図 7 (C)）。最後に、「Generate Zipper」ボタンを押すことで 3D 形状上でのジッパーが生成され、「2D Flattening」ボタンを押すことで 2D のジッパーつきのパッチを出力できる。この出力ファイルを 3D プリンタのスライサーに入力することで平面展開された状態の構造物を印刷できる。

6. 結果と評価

スライサーには Bambu Studio、プリンタは Bambu X1 Carbon（造形サイズ：256 × 256 × 256 mm³、0.4 mm ノズル）、フィラメントは TPU for AMS を使用した。

6.1 結果

印刷と組み立てをした結果を図 8 に示す。今回は入力モデルとして、Zhao らの手法 [35] の補足資料にあるサンプルファイルを用いた。

図 8 (A) から (E) はそれぞれクマ（197 × 137 × 282 mm³、全パーツ数 $N = 19$ ）・モアイ像（116 × 121 × 254 mm³、 $N = 13$ ）・アヒル（193 × 234 × 205 mm³、 $N = 19$ 、元は 12）・スタンフォードバンニー（276 × 197 × 280 mm³、 $N = 23$ 、元は 20）・鳥（178 × 296 × 334 mm³、 $N = 16$ 、元は 13）のモデルである。特に、図 8 (D) および (E) の例は、使用したプリンタの造形範囲を超えていたが、モデルを複数のパーツに分割しジッパーで接続することで、ビルドサイズを超えるオブジェクトを印刷できた。

6.2 形状誤差

印刷した構造物とそれに対応する可展面近似したモデルを比較することで、形状誤差を算出した。iPhone 15 上の Qclone iOS アプリを用いて印刷した構造物をスキャンした。次に、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを用いて可展面に近似したモデルのメッシュデータとスキャンデータの位置合わせを行い、有向 Hausdorff 距離を計算した。[37]、[38] に従い、Hausdorff 距離を可展面モデルのバウンディングボックスの対角線で正規化することで誤差率を算出し、これらを 0-5% のカラーマップで可視化した。

結果を図 8 に示す。5 つのオブジェクトにおける誤差率はそれぞれ 2.75%、2.74%、4.67%、4.54%、および 4.02% であり、平均は 3.74% であった。検証に用いた形状の全てに誤差が 5% 未満であり、提案手法の高い形状再現性が確認できた。

6.3 印刷時間とサポート材消費量

本手法（「With Pipeline」条件）と従来の 3D プリント

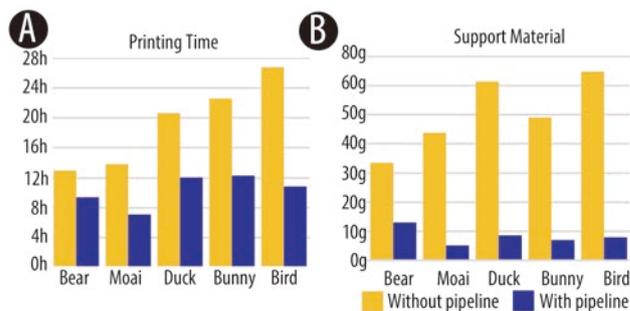


図 9 提案手法と従来手法の印刷時間・サポート材消費量の比較。

（「Without Pipeline」条件）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ー（Bambu Lab Studio）内で取得した。「With Pipeline」条件では、Bambu Lab X1 Carbon の使用を想定し、各パーツが 256 × 256 × 256 mm³ 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、「Without Pipeline」条件では、入力オブジェクトをそのままスライスした。いずれの条件においても、壁厚は 0.2 mm に設定した。なお、「Without Pipeline」条件の一部の大型オブジェクトは 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。

「Without Pipeline」条件と「With Pipeline」条件の比較結果を図 9 に示す。印刷時間について（図 9 (A)）、クマでは「Without Pipeline」条件で 13 時間 0 分、「With Pipeline」条件で 9 時間 25 分（27.56%削減）、モアイでは 13 時間 46 分と 7 時間 6 分（43.76%削減）、アヒルでは 20 時間 37 分と 12 時間 3 分（41.55%削減）、バンニーでは 22 時間 35 分と 12 時間 19 分（45.46%削減）、鳥では 26 時間 46 分と 10 時間 52 分（59.40%削減）となり、平均で印刷時間は 44.48% 減少した。

サポート材消費量について（図 9 (B)）、クマでは 33.38 g と 5.13 g（84.42%削減）、モアイでは 43.74 g と 5.13 g（88.27%削減）、アヒルでは 61.38 g と 8.57 g（86.03%削減）、バンニーでは 48.96 g と 6.98 g（85.74%削減）、鳥では 64.83 g と 7.92 g（87.78%削減）であり、平均で 81.77%減少した。

7. アプリケーション

最後に、入力されたモデルを複数のパッチに分割することを積極的に利用したアプリケーション事例を紹介する。

モデルの表情を変更: 図 10 (A) は、クマのモデルの目の部分のメッシュをわざと分割しておき、表情を変化させられるようにした例である。黒と白の TPU フィラメントを用いてパーツをプリントすることで、様々な目の形状を実現し、ジッパーを取り外し、新たな目に取り替えることで印刷後の造形物を修正している。

つばを変更可能な帽子: 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

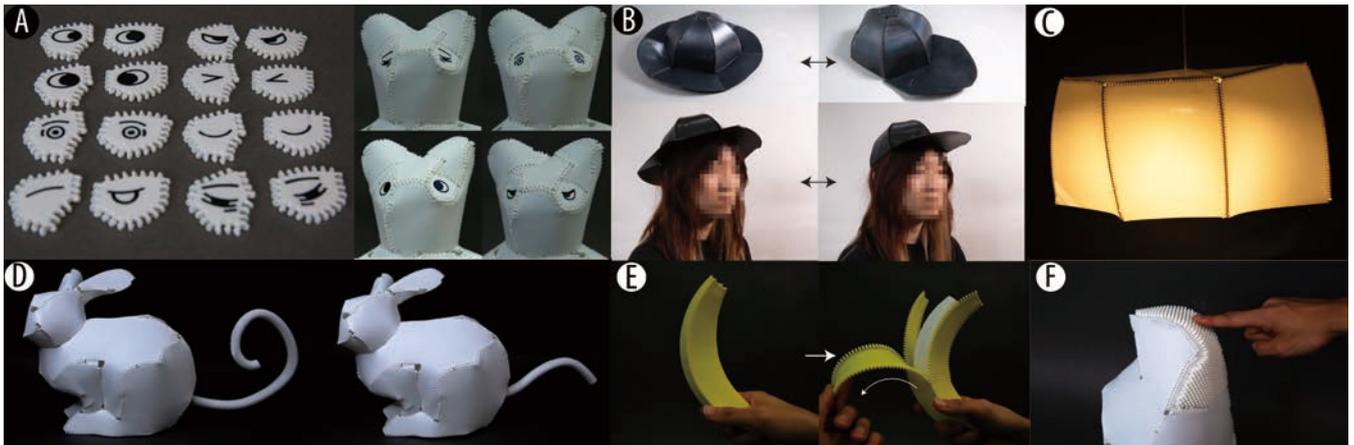


図 10 アプリケーション例.

化させることも可能である。図 10 (B) では 2 種類の帽子形状を切り替えている。帽子のようなファッションアイテムは、一般的にその日の服装に合わせて選ばれるため、複数の帽子を所有する必要がある。しかし、本手法を用いることで、ユーザはオブジェクト作製に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。

大型ランプシェード: 図 10 (C) は、本手法を用いて作製した大型のランプシェード ($372 \times 372 \times 175 \text{ mm}^3$) である。ジッパーを用いることで、本研究で使用した Bambu Lab X1 Carbon のビルドボリュームを超えるオブジェクトを作製できる。

しっぽが変更可能なバニー: 提案手法は、通常の 3D プリントで出力されたオブジェクトと組み合わせることも可能である。図 10 (D) は、ウサギのしっぽを付け替えて形を変更した例である。しっぽの部分は従来の 3D プリントで出力されており、可展面パッチとつなげることで組み立てることができる。

バナナの模型: 図 10 (E) はバナナの模型である。バナナの皮に当たる部分にジッパーがついており、バナナの皮を剥くと内側から果肉が現れる。提案手法を用いることによって、果物や昆虫の脱皮のように表面を剥き、オブジェクトを変化させるようなインタラクションが可能となる。

テクスチャの改変: 図 10 (F) は、鳥のモデルにおいてパッチの一部に小さな棘のようなテクスチャを追加した例である。必要に応じて異なる触覚を実現できるため、触り心地の異なる物体のプロトタイピングなどに活用できる。

8. 考察・制約・今後の課題

8.1 モデルの審美性・強度

現状の実装では、複数のシームが交わる分岐点において衝突するジッパーの歯を除外している。この処理により衝突は防止できるが、分岐点周辺に小さな穴や未接続領域が生じるという問題が残る。

また、本研究で出力可能なモデルの物理的な強度につい

ても課題が残る。パーツ間をジッパー構造の噛み合わせのみで結合しているため、一体造形されたモデルや接着剤を用いた接合と比較して、その結合強度は劣る。従って現状では、プロトタイピングや観賞用のオブジェクト用途に適している一方で、強い外力がかかる用途や高い耐久性が求められる用途には適さない。

8.2 可展面近似

可展面近似のプロセスには、Zhao らの手法 [35] を採用した。しかし、場合によっては可展面パッチが過剰に細分化され、多数の小さなパッチが生成されることがある。パッチ数が多いと、組み立ての複雑さと作業負荷が増大する。さらに、本手法ではジッパーの 3D モデルをパッチを構成する面の 3D モデルとマージする際に、どうしても面のモデルの一部が重なって消失する。そのため、パッチが小さすぎる場合、マージの際に面がジッパーと完全に重なって消失する可能性がある。これらの課題に対処するため、自己交差を回避しつつ、より少数で大きな可展面パッチへと分割可能な手法 [39] の実装を検討している。

また、現状の手法ではユーザが手動で分割線を加えるのは、可展面パッチへの分割後である。しかし本来はユーザが分割線を入力した後可展面近似を行うのが理想である。今後は、ユーザが初期段階で分割線を定義し、定義した分割線を維持しつつも可展面パッチを自動生成できる手法を開発する。

8.3 組み立ての体験・スライダーおよびインタラクションの探究

現状の制約として、ジッパーの組み立ては、手動で行う必要がある。そのため、オブジェクト作製には、実際の印刷時間に加え、組み立て作業の時間も要する。今後はユーザ実験を実施し、具体的な組み立ての時間の計測や、組み立てにおける作業負荷やユーザ体験についても調査する。

市販のジッパーは、スライダーを用いることで素早く開

閉できる。本研究の手法にもスライダを用いることができれば、より高速な組み立てが可能になる。一方で、本研究のジッパーは、各歯が面構造に対して平行に配置されているため、2つのパッチ間の歯の角度は、パッチ間の角に応じて変化する。そのため、分岐角が一定のY字型構造を有している従来のスライダを用いることが困難である。今後は局所的な形状に応じて分岐角を調整できるスライダを設計することを目指す。

また、スライダがあれば、それ自体を用いたインタラクションを活用できる可能性もある。例えばKuらはタッチセンシングの機能を備えた（通常の平面的な）スライダを実装し、スライダの動作に基づくインタラクションを示した [40]。同様に、本研究のジッパーにスライダを追加し、導電性フィラメントを用いることで、物体に新たなインタラクションの機能を追加できる可能性がある。

9. 結論

本論文では、ジッパー構造を用いた高速かつ省サポート材で印刷できる3Dプリント手法を提案した。提案したパイプラインでは、入力された3Dモデルを可展面パッチに分割し、パッチの境界部分にジッパー構造を生成した。また、複数の作例を提示し、ジッパーの採用により印刷時間とサポート材消費を低減できることを示した。加えて、本手法を用いることでプリンタのサイズを超えた大型構造物を印刷したり、モデルを部分的に変更したりできることを示した。本研究が3Dプリントによる造形にさらなる自由度をもたらすことを願う。

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。また、原稿の校正を手伝っていただいた藤野皓氏に感謝する。

参考文献

- [1] 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 Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173834 (2018).
- [2] 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, Association for Computing Machinery, p. 623–635 (online), DOI: 10.1145/3242587.3242625 (2018).
- [3] Wang, G., Tao, Y., Capunaman, O. B., Yang, H. and Yao, L.: A-line: 4D Printing Morphing Linear Composite Structures, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300656 (2019).
- [4] Luo, L., Baran, I., Rusinkiewicz, S. and Matusik, W.: Chopper: partitioning models into 3D-printable parts, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6 (online), DOI: 10.1145/2366145.2366148 (2012).
- [5] Vanek, J., Galicia, J. G., Benes, B., Měch, R., Carr, N., Stava, O. and Miller, G.: Packmerger: A 3d print volume optimizer, *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 6, Wiley Online Library, pp. 322–332 (2014).
- [6] Jadoon, A. K., Wu, C., Liu, Y.-J., He, Y. and Wang, C. C.: Interactive Partitioning of 3D Models into Printable Parts, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 38, No. 4, pp. 38–53 (online), DOI: 10.1109/MCG.2018.042731658 (2018).
- [7] Chen, X., Zhang, H., Lin, J., Hu, R., Lu, L., Huang, Q., Benes, B., Cohen-Or, D. and Chen, B.: Dapper: decompose-and-pack for 3D printing, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 6 (online), DOI: 10.1145/2816795.2818087 (2015).
- [8] Abdullah, M., Sommerfeld, R., Sievers, B., Geier, L., Noack, J., Ding, M., Thieme, C., Seidel, L., Fritzsche, L., Langenhan, E., Adameck, O., Dzingel, M., Kern, T., Taraz, M., Lempert, C., Katakura, S., Elhassany, H. M., Roumen, T. and Baudisch, P.: HingeCore: Laser-Cut Foamcore for Fast Assembly, *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3526113.3545618 (2022).
- [9] Nisser, M., Liao, C. C., Chai, Y., Adhikari, A., Hodges, S. and Mueller, S.: LaserFactory: A Laser Cutter-based Electromechanical Assembly and Fabrication Platform to Make Functional Devices & Robots, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445692 (2021).
- [10] Mueller, S., Kruck, B. and Baudisch, P.: LaserOrigami: laser-cutting 3D objects, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2585–2592 (online), DOI: 10.1145/2470654.2481358 (2013).
- [11] Mueller, S., Mohr, T., Guenther, K., Frohnhofen, J. and Baudisch, P.: faBrickation: fast 3D printing of functional objects by integrating construction kit building blocks, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 3827–3834 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557005 (2014).
- [12] Suzuki, R., Yamaoka, J., Leithinger, D., Yeh, T., Gross, M. D., Kawahara, Y. and Kakehi, Y.: Dynablock: Dynamic 3D Printing for Instant and Reconstructable Shape Formation, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 99–111 (online), DOI: 10.1145/3242587.3242659 (2018).
- [13] Yamaoka, J. and Kakehi, Y.: ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2106–2115 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025498 (2017).

- [14] Liu, M., Zhang, Y., Bai, J., Cao, Y., Alperovich, J. M. and Ramani, K.: WireFab: Mix-Dimensional Modeling and Fabrication for 3D Mesh Models, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 965–976 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025619 (2017).
- [15] Schmidt, R. and Umetani, N.: Branching support structures for 3D printing, *ACM siggraph 2014 studio*, pp. 1–1 (2014).
- [16] Vanek, J., Galicia, J. A. G. and Benes, B.: Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication, *Computer graphics forum*, Vol. 33, No. 5, Wiley Online Library, pp. 117–125 (2014).
- [17] Keating, S. and Oxman, N.: Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 6, pp. 439–448 (2013).
- [18] Dai, C., Wang, C. C. L., Wu, C., Lefebvre, S., Fang, G. and Liu, Y.-J.: Support-free volume printing by multi-axis motion, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3197517.3201342 (2018).
- [19] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F. and Baudisch, P.: WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 273–280 (online), DOI: 10.1145/2642918.2647359 (2014).
- [20] Peng, H., Wu, R., Marschner, S. and Guimbretière, F.: On-The-Fly Print: Incremental Printing While Modelling, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 887–896 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858106 (2016).
- [21] Sun, L., Li, J., Chen, Y., Yang, Y., Tao, Y., Wang, G. and Yao, L.: 4DTexture: A Shape-Changing Fabrication Method for 3D Surfaces with Texture, *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–7 (online), DOI: 10.1145/3334480.3383053 (2020).
- [22] Ding, Z., Weeger, O., Qi, H. J. and Dunn, M. L.: 4D rods: 3D structures via programmable 1D composite rods, *Materials & Design*, Vol. 137, pp. 256–265 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.004> (2018).
- [23] Noma, Y., Narumi, K., Okuya, F. and Kawahara, Y.: Pop-up Print: Rapidly 3D Printing Mechanically Reversible Objects in the Folded State, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 58–70 (online), DOI: 10.1145/3379337.3415853 (2020).
- [24] Karasik, E., Fattal, R. and Werman, M.: Object partitioning for support-free 3d-printing, *Computer Graphics Forum*, Vol. 38, No. 2, Wiley Online Library, pp. 305–316 (2019).
- [25] Nendo: Zipppppper Project, Design project page on Nendo website.
- [26] Kaplan, D.: RichRach – Reinventing Zippers, Online project page (2025).
- [27] Pan, D., Zhou, F., Fan, Y., Dong, T., Qi, F., Ni, Y., Tao, Y., Sun, L. and Wang, G.: Touch-n-Curl: Designing and Constructing Skeletal Form through 3D Printing Flattened Zipper Assembly, *Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '25, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3746059.3747620 (2025).
- [28] Schüller, C., Poranne, R. and Sorkine-Hornung, O.: Shape representation by zippables, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3197517.3201347 (2018).
- [29] Masuda, R., Noma, Y. and Narumi, K.: Computational Design and Fabrication of 3D Printed Zippers Connecting 3D Textile Structures, *Adjunct Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST Adjunct '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3672539.3686743 (2024).
- [30] Markvicka, E., Wang, G., Lee, Y.-C., Laput, G., Majidi, C. and Yao, L.: ElectroDermis: Fully Untethered, Stretchable, and Highly-Customizable Electronic Bandages, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–10 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300862 (2019).
- [31] Fornes, M.: The art of the prototypical, *Architectural Design*, Vol. 86, No. 2, pp. 60–67 (2016).
- [32] Yuan, C., Cao, N. and Shi, Y.: Complex Surface Fabrication via Developable Surface Approximation: A Survey, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2025).
- [33] Mitani, J. and Suzuki, H.: Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 3, p. 259–263 (online), DOI: 10.1145/1015706.1015711 (2004).
- [34] Stein, O., Grinspun, E. and Crane, K.: Developability of triangle meshes, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3197517.3201303 (2018).
- [35] Zhao, Z.-Y., Fang, Q., Ouyang, W., Zhang, Z., Liu, L. and Fu, X.-M.: Developability-driven piecewise approximations for triangular meshes, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 41, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3528223.3530117 (2022).
- [36] Sawhney, R. and Crane, K.: Boundary First Flattening, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 1 (online), DOI: 10.1145/3132705 (2017).
- [37] Narumi, K., Koyama, K., Suto, K., Noma, Y., Sato, H., Tachi, T., Sugimoto, M., Igarashi, T. and Kawahara, Y.: Inkjet 4D Print: Self-folding Tessellated Origami Objects by Inkjet UV Printing, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 42, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3592409 (2023).
- [38] Panetta, J., Isvoranu, F., Chen, T., Siéfert, E., Roman, B. and Pauly, M.: Computational inverse design of surface-based inflatables, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 40, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3450626.3459789 (2021).
- [39] Baharami, H., Piovarczy, M., Tarimi, M., Bickel, B. and Pietroni, N.: Fabricable Discretized Ruled Surfaces, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 44, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3734519 (2025).
- [40] Ku, P.-S., Gong, J., Wu, T.-Y., Wei, Y., Tang, Y., Ens, B. and Yang, X.-D.: Zippro: The Design and Implementation of An Interactive Zipper, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376756 (2020).