

# 一筆書きのパウチモータによる展開可能な3次元形状の実現

石黒 凜<sup>1</sup> 斎藤 淳平<sup>2</sup> 山本 匠<sup>1</sup> 桑名 真結香<sup>1</sup> 鳴海 紘也<sup>3</sup>

**概要：**本研究では、平面型の空気圧アクチュエータであるパウチモータを一筆書きで連続的に造形することで、空気を入れた際に目標の3次元形状に変形する展開構造を実現する。インフレータブル構造は、軽量かつ大型の形状を実現できる手段として、キャラクターを模したアドバルーンやインスタレーションに用いられている。しかし、複雑な形状の風船を実現するためには多数のシートを貼り合わせる必要があり、大きな作業時間と手間が必要であった。そこで我々は、Fused Deposition Modeling (FDM) 方式の3Dプリンタのような一筆書きの立体造形に着目した。まず、ロール状の細長いチューブ構造に対して事前に計算したパターンを熱融着する。次に、そのチューブ構造に空気を入れると、融着パターンが計算された角度に折れ曲がることでチューブが螺旋状に積層し、目的の3次元形状を得る。本研究では、融着パターンと折れ角の関係を実験的に求め、その結果に基づき入力形状からチューブ経路・融着位置・融着パターンを自動算出するスライサを実装した。

## 1. はじめに

インフレータブル構造は、軽量かつ大型の形状を実現する方法として有用であり、キャラクターバルーン、空気膜構造物などの建築構造物や芸術的な造形物を構築する手法として長く利用されてきた[5], [6]。しかし、インフレータブル構造を作製する際には通常2枚以上のシートを立体的に接着する必要があり、設計・製造コストが高くなる。一方、HCIの分野では、2枚のフィルムを様々な2次元形状で熱融着し、内部に空気や液体を注入することでソフトアクチュエータ[11]や可動構造[17]として用いるパウチモータ[9]が注目を集めている。パウチモータは融着パターンによって曲げや収縮などの変形を実現できる上、製造が2次元プロセスで完結する利点を持つ。

本研究では、複数の融着パターンを持つ長いチューブ状のインフレータブル構造をFused Deposition Modeling (FDM) 方式の3Dプリンタのように積層することで、目標とする3次元形状を製造する設計手法を提案する。このチューブには一定間隔ごとにパウチモータの融着パターンがついており、このパターンがそれぞれ特定の角度で曲がることによりチューブが積層していき、全体形状が決まる。この手法を実現するために、我々はまず、融着パターンに対するパウチの変形角度を定式化した。また、入力された形状を実現できるチューブの経路を計算するスライサを実

装し、その経路から必要な融着パターンを求めた。さらに、このパターンをroll-to-rollで融着可能な装置を開発し、実際の作例として円柱形状の造形物を示した。

## 2. 関連研究

### 2.1 インフレータブル構造と逆問題

インフレータブル構造は、軽量性・可搬性・展開性の高さを活かして、乗り物[10]、大規模ディスプレイ[14]、センサデバイス[15]など、目的に応じた形状作製の手段として広く用いられてきた[1], [2], [4], [16]。

インフレータブル構造を利用して作る別の構造ではなく、インフレータブル構造そのものを対象とする研究も存在する。Ouら[11]は、シート上にひし形の融着パターンを配置することで、空気を注入した際に生じる形状変化を調査した。この手法では折り曲げたい箇所にひし形の融着を施すことでヒンジを作製しているが、入力された形状を再現するための逆問題は扱われていない。また、我々の研究に最も関連するreflatables[8]では、1本のチューブを折り曲げて面ファスナーで固定することにより、空気を注入した際に目標の形状を実現している。しかし、この研究では与えられた立体形状をバラバラの層に分解して再現するため、層間の経路を考慮できておらず、例えば二股に分かれる形状などは実現できない。

より厳密な逆問題を扱う手法も提案されている。Air-Tied[12]は、1本のチューブを束ねてトラス構造を形成することで、高強度かつ大規模な構造物を作製する研究である。しかしこの手法はトラス構造の実現に特化しており、

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科

<sup>2</sup> 慶應義塾大学環境情報学部

<sup>3</sup> 慶應義塾大学理工学部

面のある形状の再現には適さない。また、Surface-based Inflatables [13] は任意の入力メッシュを入力として 2 枚の平面シートの融着パターンを計算し、空気を注入することで立体形状を実現する。しかし、巨大な形状を実現する場合、巨大なシートや広大な作業空間、大型加工設備が必要となり、実運用上の制約が大きい。また、単一のシート全体の変形挙動を一度に計算するため、局所的な変更が全体に影響し、逆問題の計算コストが高くなるという問題も残る。

本研究は、チューブ状のインフレータブル構造を FDM 方式の 3D プリンタのように積層して目標とする立体形状を実現する。Surface-based Inflatables [13] に比べると、本手法では roll-to-roll での融着が可能な自作の装置を用いるため、限られた作業空間でも理論上無限大の構造物を作製できるという利点がある。また、入力モデルをスライスして一筆書きの立体造形を行いうため、形状全体の最適化をせずに逆問題を解くことができ、計算コストを抑えられる。また、reflatables [8] に比べると、スライスした層間の移動経路を考慮できているため、より複雑な形状を表現できる。

## 2.2 パウチモータ

パウチモータ [9] とは、流体を密封した袋（パウチ）を利用して折れ曲がりや回転運動を実現する。パウチモータの主な利点として、シートを平面上で熱融着して製造できる点、すなわち 2 次元の製造プロセスで完結する点が挙げられる。さらに、空気とシートで構成されているため非常に軽量であり、空気を抜いた状態では運搬が容易であることや、空気圧を利用して一定の強度を発揮できる。これらの特性により、様々なサイズや用途のアクチュエータに応用されている [7], [15], [17]。

本研究もこれらの研究と同様に、パウチモータを用いて効率的に三次元形状を作成することを目指す。

## 2.3 FDM 方式

FDM 方式とは、3D プリンタに使用される造形方式の 1 種で、熱で樹脂を溶かしながら積層させて立体を造形する手法である。この方式では、スライサと呼ばれるソフトウェアを使用して、入力された 3D 形状を層状に分解（スライス）し、そのスライスを 1 層ずつ、溶かした樹脂で再現して立体を構築する。造形する際、樹脂を押し出すノズルが造形すべき部分以外を移動する場合には、樹脂の押し出しを適切に制御する必要がある。しかし、一般的な 3D プリンタでは、溶けた樹脂の押し出しを完全に停止させることが難しく、造形する必要がない部分にも樹脂が付着する問題が発生する。

そこで、造形対象以外の移動距離を最小限に抑えるスライサである、TRAvel Slicer [3] が考案された。このスライ

サでは、スライス後の層内部での移動と層間での移動をそれぞれ最適化している。層内部では、平面領域に対して空間を平面領域をフェルマー螺旋で埋めて移動距離を最小化する。一方、層間の移動では、各層の情報をグラフとして整理し、深さ優先探索（DFS）を用いて移動を最小限に抑える手法が採用されている。

本研究では、1 本のチューブを用いて FDM 方式と同様に積層して立体を実現する。造形に用いる素材が 1 本の連續したチューブであるため、TRAvel Slicer と同様に、造形対象以外での移動距離を最小限に抑える経路設計が不可欠である。

## 3. 融着パターンの設計

### 3.1 融着パターンの設計

チューブの変形を制御するため、融着パターンおよびパウチサイズに応じた変形特性の調査を行った。先行研究 [11], [17] では、空気注入時に広い折れ曲がり角度の範囲を実現できることから、図 1A に示すひし形の融着パターンが主に用いられている。しかし、このひし形パターンは空気注入後に 2 つの安定状態をもち、折れ曲がり方向を一意に制御できない。そこで、図 1B に示す長方形の融着パターンを新たに提案する。このパターンでは、折れ曲がり方向が明確に一方向に規定されるため、折れ方向および形状変化の制御が可能となり、高い精度で形状を制御できる。本研究では、これら 2 種類の融着パターンを対象に、空気注入時の変形特性を比較した。実験では、150 mm の幅の 70D Nylon TPU シートを 2 枚重ねて熱融着して作製したチューブを使用した。

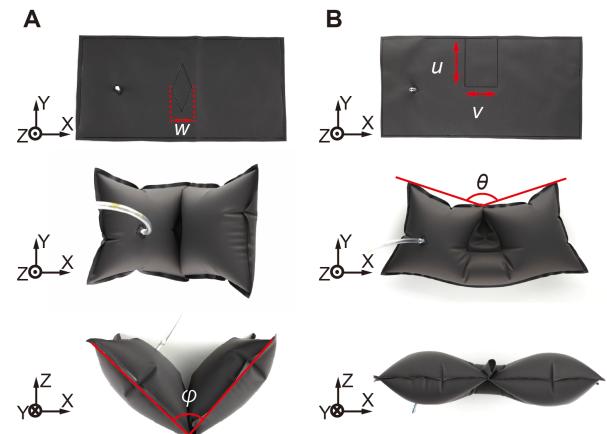


図 1 ひし形と長方形の融着パターンと形状変化。

### 3.2 ひし形の融着パターン

150 mm 幅のチューブに対し、図 1A に示すひし形の横幅  $w$  を変化させたひし形を融着し、空気を注入した際の折れ曲がりの角度  $\phi$  を測定した。縦幅は 100 mm で固定し、

横幅  $w$  は 10 mm から 100 mm まで、10 mm 刻みで 3 サンプルずつ測定し、結果を図 2 に示す。 $R^2 > 0.98$  で  $w$  と  $\phi$  を線形近似できることが確認できた。 $w$  と  $\phi$  には、 $\phi = 0.4767w + 68.476$  という関係性が成り立ち、 $w$  を変化させることで、折れ曲がりの角度  $\phi$  は  $72^\circ$  から  $180^\circ$  の範囲で表現できることが確認された。

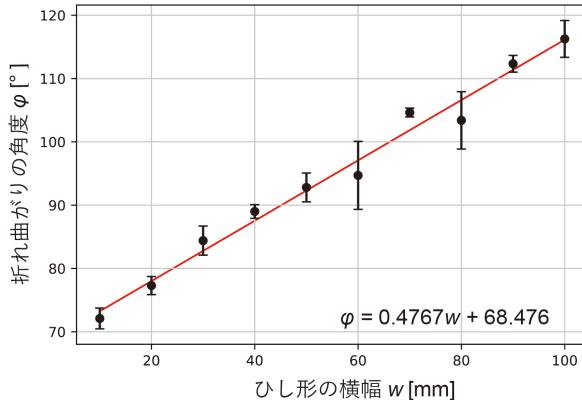


図 2 折れ曲がりの角度  $\phi$  とひし形の横幅  $w$  の関係。エラーバーは標準偏差。

### 3.3 長方形の融着パターン

150 mm 幅のチュープに対し、図 1B に示す長方形の縦幅  $u$  を変化させた長方形を熱融着し、空気を注入した際の折れ曲がりの角度  $\theta$  を測定した。横幅  $v$  は 75 mm で固定し、縦幅  $u$  は 10 mm から 100 mm まで、10 mm 刻みで 3 サンプルずつ測定した。結果は図 3 のようになり、 $R^2 > 0.95$  で  $u$  と  $\theta$  を線形近似できることが確認できた。 $u$  と  $\theta$  には、 $\theta = -0.45094u + 176.75$  という関係性が成り立ち、 $u$  を変化させることで、折れ曲がりの角度  $\theta$  は  $140^\circ$  から  $180^\circ$  の範囲で表現できることが分かった。

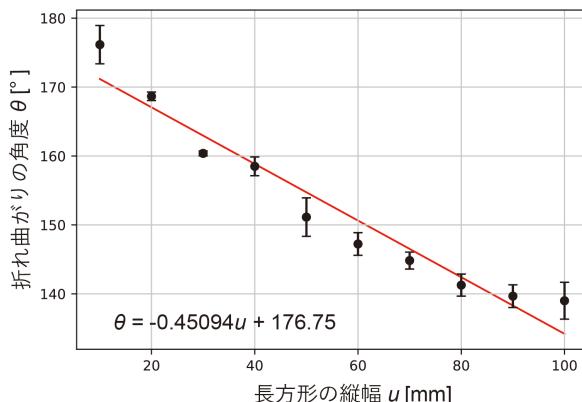


図 3 折れ曲がりの角度  $\theta$  と長方形の縦幅  $u$  の関係。エラーバーは標準偏差。

同様に、長方形の横幅  $v$  を変化させた長方形を熱融着し、空気を注入した際の折れ曲がりの角度  $\theta$  を測定した。

長方形の縦幅  $u$  を 75 mm で固定し、横幅  $v$  を 10 mm から 100 mm の範囲で 10 mm 刻みで 3 サンプルずつ測定した。結果は図 4 のようになり、 $v$  と  $\theta$  に線形的な相関は見られなかった。折れ曲がりの角度  $\theta$  は、 $v$  を変化させると  $139^\circ$  から  $155^\circ$  の範囲で変化した。

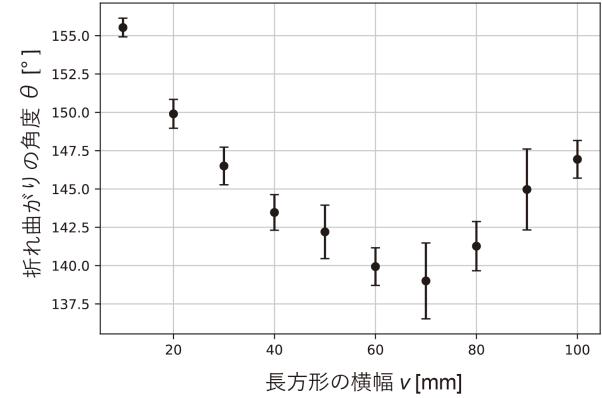


図 4 折れ曲がりの角度  $\theta$  と長方形の横幅  $v$  の関係。エラーバーは標準偏差。

### 3.4 使用する融着パターン

長方形パターンとひし形パターンの融着特性を比較した。この 2 つのパターンは、折れ曲がり方向の制御可否、折れ曲がりの軸、そして得られる折れ角度の範囲において異なる。多くの融着パターンを用いて形状を実現する本研究では、折れ曲がり方向を一意に制御できる点を重視し、長方形パターンを主要な融着形状として採用する。特に、縦幅  $u$  を変化させることで折れ角度が制御可能かつ、表現可能な折れ曲がりの角度  $\theta$  の範囲が広いことから、長方形パターンの縦幅  $u$  を設計パラメータとして折れ曲がり角度を制御する。また、融着パターンによって折れ曲がりの方向は異なる。図 1 に示すように、ひし形パターンでは ZX 平面での折れ曲がりが生じるのに対し、長方形パターンでは XY 平面での折れ曲がりが生じる。そのため、長方形パターンのみでは再現が困難な形状を扱う場合には、ひし形パターンを併用する。

## 4. 設計手法

はじめに、作製する形状のメッシュを入力する。次に、この入力されたメッシュに対しスライサがチュープの経路を計算する。この経路を基に、チュープの折れ曲がりの位置や角度、融着パターンを求め、マシンを制御するコードを生成する。このコードを基に、マシンが自動で熱融着を行う。本研究では、Rhino 8 とそのプログラミング環境である Grasshopper を使用し、スライサを作成した。

### 4.1 チュープ経路の決定と融着パターンの導出

スライサでは、図 5 に示す手順で入力のメッシュ形状

(図 5A) を近似するチューブの経路を導出する。

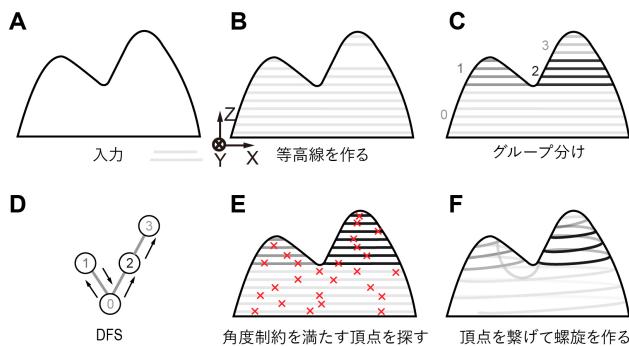


図 5 チューブの経路の導出手順。

まず、入力されたメッシュ（図 5A）をチューブの厚さごとにスライスし、等高線を求める。このスライスでは、メッシュの Z 座標の最小値から最大値に向かって XY 平面に平行な断面を順に作成して等高線を求める（図 5B）。これにより得られた等高線をグループ分けし、それぞれリストに格納する（図 5C）。グループ分けは、各 Z 座標における等高線の個数を基準として行う。ある Z 座標で求めた等高線の個数が直前の Z 座標での個数と同じ場合（図 6A）、それぞれの等高線の中心座標を比較して、既に存在するどのグループに属するかを判定する（図 6B）。一方、等高線の個数が異なる場合、新たなグループを作成する（図 6C）。この際、新たなグループに属する等高線と直前の Z 座標における等高線を XY 平面に投影し、重なる部分が存在する場合には、それらの閉曲線の属すグループが接続しているとみなす（図 6D）。

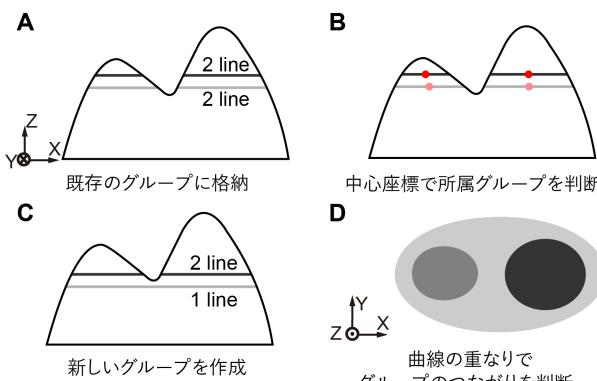


図 6 グループ分けの仕方。

次に、メッシュ表面におけるグループ同士の接続関係を格納したグラフを基に、チューブで表現するグループの順番を深さ優先探索によって求める（図 5D）。ここで得られたグループの順序に従って等高線を 1 本ずつ辿り、チューブの折れ角制約を考慮しながら、各等高線に対応するチューブ経路および折れ曲がり点を導出する（図 5E）。

具体的には、図 7 に示すようにチューブ経路を決定する。まず、パウチにパターンを熱融着することでチューブを折り曲げ、チューブ経路を表現する。このとき、3 章で導出したように、表現可能な折れ曲がり角度には制約範囲が存在する。さらに、融着点同士の間隔が過度に近い場合、折れ曲がり角度が実験で得られた値と異なることが確認されたため、融着点同士は一定の距離を保つ必要がある。そこで、既定の長さをもつ辺を角度制約を満たすように逐次延長することで、等高線に対応したチューブ経路を求める。

まず、開始点および直前のチューブの方向ベクトルを与える（図 7A）。この開始点から既定の長さの辺を伸ばし、直前のチューブ辺となす角度が角度制約  $140^\circ \sim 180^\circ$  を満たすように辺を回転させることで、弧状の候補点集合を生成する。これらの候補点のうち、等高線上に存在する点がある場合には、その点を折れ曲がり点として採用する（図 7B）。一方、等高線上に存在する点がない場合には、等高線に最も近い位置にある候補点を折れ曲がり点とする（図 7C）。選択された折れ曲がり点を新たな開始点とし、直前の点からその点へ向かうベクトルを次の方向ベクトルとして更新する。この処理を繰り返すことで、等高線に沿って連続的なチューブ経路を計算する。

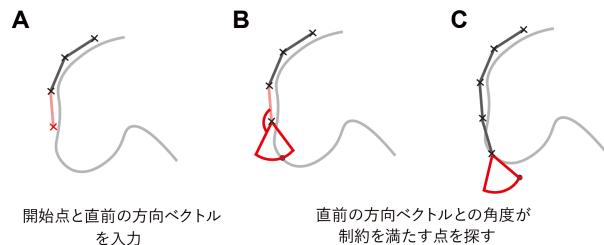


図 7 折れ曲がり点の導出方法。

最後に、各等高線に対して得られた経路を順に接続し、全体のチューブ経路を構築する（図 5F）。得られた螺旋経路から融着点および融着角度を抽出し、これらの値を基に、3 章で導出した関係式  $\theta = -0.45094u + 176.75$  を用いて長方形の融着パターンを算出した。

#### 4.2 磁石の位置の決定

チューブの経路を計算し実際に造形を行ったところ、得られた形状は目標形状から大きく乖離した。主に、パウチの太さが均一ではないため積層された層が自重によって崩落するためである。そこで本研究では、積層されたパウチ同士を確実に固定するため、各層に磁石を取り付ける手法を導入する。

図 8 に示す手順に基づいて磁石を配置する位置を決定する。まず、積層される順序に従って、4.1 で導出した等高線に対応する 2 本のチューブ経路を抽出する。ここでは、後に描画される経路を経路 1、先に描画される経路を経路

2と定義する(図8A). 次に、経路2を構成する各辺について中点を求め、連続する複数の辺ごとに、経路1に最も近い中点を選択する(図8B). さらに、その中点との距離が最小となる点を経路1上から探索し、両者の点の組を磁石配置の候補点とする(図8C).

磁石を置く位置をヒューリスティックに決定する. 連続する2つの等高線間の距離がパウチの太さの1/2以下であることを距離条件とする. 距離条件を満たす場合、磁石を設置するための十分なスペースが確保されると仮説する. 図8C)の段階で得られる候補点の組は、いずれも等高線上に存在するため、これらの距離がパウチの太さの1/2以下であれば、経路を変更することなく、経路2の中間点に対応する位置へ磁石を配置できると考える.

一方、候補点同士の距離がパウチの太さの1/2を超える場合には、磁石の設置ができないとする. そこで、経路1において候補点周辺の4辺を抽出し、角度制約および距離制約を満たす範囲で経路を更新する. それでも距離条件を満たさない場合には、更新対象とする辺の範囲を段階的に拡張し、磁石配置が可能となる位置を探索する(図5E). このようにして磁石の位置を決定した.

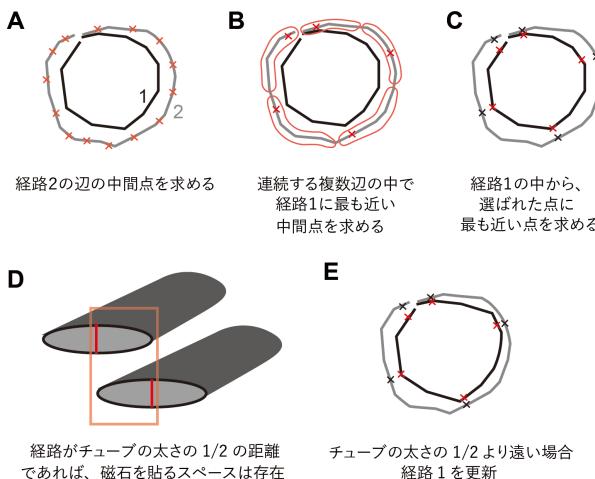


図8 磁石の設置点の決定方法.

#### 4.3 マシンの設計

独自仕様の言語入力を基に熱融着を行う、図9に作製した熱融着マシンを示す. 本装置は、はんだごてを搭載したCNCマシンに、上下にローラーを配置することでRoll-to-Roll方式でシートを搬送できる. 次に、スライサーで生成された融着パターン・間隔を基に、はんだごての移動経路やローラーの送り量がコードとして機械へ送信される. そして、熱融着が行われ、融着が完了すると前後のローラーが回転してシートを送り出し、続けて次の位置で熱融着処理が実行される. シート送り部には2つのローラーを、巻き取り部には高さの異なる3つのローラーを配

置し、熱融着時にシートが適切に張力を保った状態になるようしている.

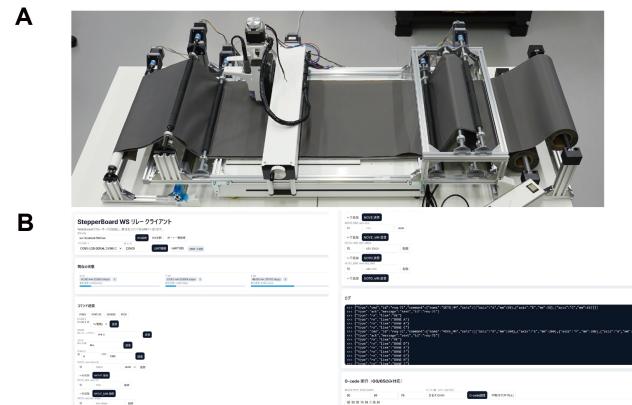


図9 熱融着マシン. A: 実際に作製した熱融着マシン. B: マシンの操作画面.

## 5. 結果

導出したチューブの経路と、実際に作った結果を図10に示す. シートは70D Nylon TPUシートを使用して、150 mmの太さのチューブを用意し、層の固定の磁石は直径15 mmのネオジム磁石を使用した.

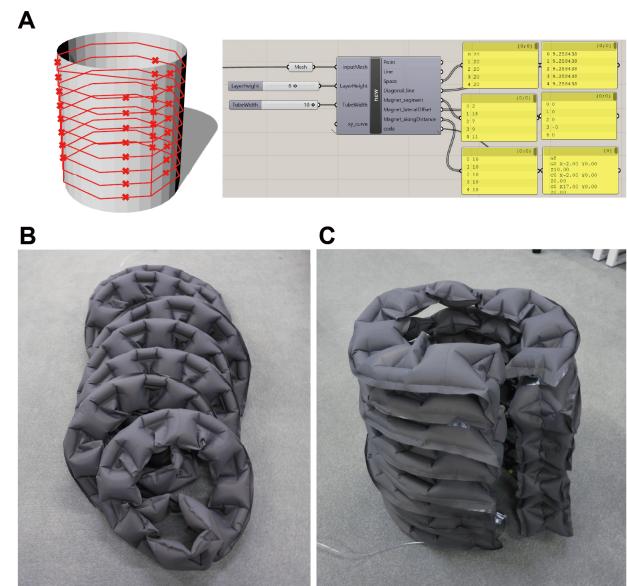


図10 Grasshopperでの出力結果とパウチの作製結果.

本手法を用いて円柱を作製した. 直径500 mm、高さ600 mmの円柱を入力形状とし、9層からなる経路および各層に4箇所の磁石設置位置を算出した. さらに、融着位置および融着パターンに基づいてG-codeを出力した(図10A). このG-codeにより装置を駆動し、計算された融着パターンが施されたパウチを作製した. 作製したパウチに空気を注入し、(図10B)算出された位置に磁石を貼付し

た結果、全体として入力した円柱形状に近い形状が得られた（図 10C）。

## 6. 議論・今後の課題

### 6.1 形状誤差とその要因

入力形状は、直径 500 mm、高さ 600 mm の円柱である。それに対し、完成した造形物は直径 610 mm、高さ 720 mm であった。XY 方向の誤差、Z 方向の誤差がそれぞれ生じる要因としては以下の可能性がある。

- XY 方向：本稿では、チューブの太さを経路生成の過程で考慮していない。チューブの太さを考慮せずにらせんに沿ってチューブを配置した結果、外径が設計値よりも大きくなつたと考えられる。加えて、本稿で提案したスライサは、指定された長さの辺を等高線に沿ってらせん状に伸ばす方法であるが、長方形パターンで表現可能な角度に制限があるため、形状誤差が生じる可能性がある。
- Z 方向：パウチに空気を入れた際、熱融着した箇所の周辺はしていない箇所に比べ、へこみやすい。これにより、チューブの厚みが一様ではなく、各層において正確なスライス厚を維持できなかつた可能性がある可能性がある。

今後は、これらの問題を考慮したスライス方法を検討する。

### 6.2 構造の安定性

積層した際に、磁石を配置してもパウチ同士が固定されず、自重によってチューブが崩落する場合があった。本稿では距離条件をもとに磁石を均等に配置しているが、この問題を解決するためにはパウチにかかる重力を考慮する必要がある。今後は距離条件と重力の両方を計算して、磁石を配置するアルゴリズムを検討する。

### 6.3 パウチ内の圧力

一部の形状を作製する際、パウチが破裂することがあった。これは、複雑な形状であるほど経路が長くなり、チューブ内で圧力差が生まれ、融着した部分が破壊されるためである。圧力差が生じた原因として、一部の箇所で融着が機能せず空気漏れが生じたと考えられる。今後は、ロバストに融着ができるか融着プロセスを改善する。また、圧力差が生じても破裂しないような素材を探査する。

## 7. 結論

本研究では、平面型の空気圧アクチュエータであるパウチモータを一筆書きで連続的に造形することで、空気注入時に目標とする 3 次元形状へと変形する展開構造の実現を目指した。そのために、融着パターンの調査を行うとともに、経路を算出するスライサおよび造形装置を作製した。いくつかの単純な形状を対象としてスライサにより経路計

算を行い、そのうちの 1 つである円柱形状については実物の造形を行つた。その結果、算出された位置に磁石を配置することで、空気注入後に全体として入力形状に近い円柱形状を形成できることを確認した。

### 謝辞

本研究は JSPS 学術変革領域研究 (B) (JP24H00825) 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いた藤野皓氏、小林直生氏に感謝する。

### 参考文献

- [1] Biswas, B., Powell, E., Nixdorf, R., Sewell, R. and Roudaut, A.: Encounter with the Giants: Understanding Interaction with Large-scale Inflatable Soft Robots, *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3706598.3713673 (2025).
- [2] Gomi, R., Suzuki, R., Takashima, K., Fujita, K. and Kitamura, Y.: InflatableBots: Inflatable Shape-Changing Mobile Robots for Large-Scale Encountered-Type Haptics in VR, *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3613904.3642069 (2024).
- [3] Gould, J., Friedman-Gerlicz, C. and Buechley, L.: TRAvel Slicer: Continuous Extrusion Toolpaths for 3D Printing, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3654777.3676349 (2024).
- [4] Goveia da Rocha, B. and Tomico, O.: Flow: Towards Communicating Directional Cues through Inflatables, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–6 (online), DOI: 10.1145/3290607.3312828 (2019).
- [5] Hasegawa, T. and Kakehi, Y.: Single-Stroke Structures, xlab (online), available from <<https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/single-stroke-structures/>>
- [6] Hiroaki, S.: Kukinohito, <https://www.mabataki.com/works/aerial-being/> (2007). 2025-05-26.
- [7] Kokubu, S., Tortós Vinocour, P. E. and Yu, W.: Bidirectional Support for Individual Finger Joints in Soft Rehabilitation Gloves: Integration of Foldable Pouch Actuators With Modular Elastomeric Actuators, *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 65672–65684 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3395468 (2024).
- [8] Murayama, T., Yamaoka, J. and Kakehi, Y.: Reflatables: A Tube-based Reconfigurable Fabrication of Inflatable 3D Objects, *CHI EA '20*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–8 (online), DOI: 10.1145/334480.3382904 (2020).
- [9] Narumi, K., Sato, H., Nakahara, K., Seong, Y. a., Morinaga, K., Kakehi, Y., Niijyama, R. and Kawahara, Y.: Liquid Pouch Motors: Printable Planar Actuators Driven by Liquid-to-Gas Phase Change for Shape-Changing Interfaces, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 3915–3922 (online), DOI: 10.1109/LRA.2020.2983681 (2020).
- [10] Niijyama, R., Sato, H., Tsujimura, K., Narumi, K.,

- Seong, Y. a., Yamamura, R., Kakehi, Y. and Kawahara, Y.: poimo: Portable and Inflatable Mobility Devices Customizable for Personal Physical Characteristics, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 912–923 (online), DOI: 10.1145/3379337.3415894 (2020).
- [11] Ou, J., Skouras, M., Vlavianos, N., Heibeck, F., Cheng, C.-Y., Peters, J. and Ishii, H.: aeroMorph - Heat-sealing Inflatable Shape-change Materials for Interaction Design, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 121–132 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984520 (2016).
- [12] Rambold, L., Kovacs, R., Lempert, C., Abdullah, M., Lendowski, H., Fritzsche, L., Taraz, M. and Baudisch, P.: AirTied: Automatic Personal Fabrication of Truss Structures, *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3586183.3606820 (2023).
- [13] Ren, Y., Panetta, J., Suzuki, S., Kusupati, U., Isvoranu, F. and Pauly, M.: Computational Homogenization for Inverse Design of Surface-based Inflatables, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 43, No. 4 (online), DOI: 10.1145/3658125 (2024).
- [14] Suzuki, R., Nakayama, R., Liu, D., Kakehi, Y., Gross, M. D. and Leithinger, D.: LiftTiles: Constructive Building Blocks for Prototyping Room-scale Shape-changing Interfaces, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 143–151 (online), DOI: 10.1145/3374920.3374941 (2020).
- [15] Waldschütz, H., Van Koningsbruggen, R. and Hornecker, E.: pneuCNTRL: a Pneumatic Control System for User Studies on Dynamic, Haptic Inflatables, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3623509.3635263 (2024).
- [16] Webb, P., Sumini, V., Golan, A. and Ishii, H.: Auto-Inflatables: Chemical Inflation for Pop-Up Fabrication, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–6 (online), DOI: 10.1145/3290607.3312860 (2019).
- [17] Yang, Y., Ren, L., Chen, C., Hu, B., Zhang, Z., Li, X., Shen, Y., Zhu, K., Ji, J., Zhang, Y., Ni, Y., Wu, J., Wang, Q., Wu, J., Sun, L., Tao, Y. and Wang, G.: SnapInflatables: Designing Inflatables with Snap-through Instability for Responsive Interaction, *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3613904.3642933 (2024).