

風船 3D プリンタの実現に向けたパウチの熱融着パターンと変形角度の調査

石黒 凜* 鳴海 紘也*

概要. インフレーター構造は、キャラクターバルーンなどの軽量・大型形状を実現する上で有用である。しかし、複雑な形状のバルーンを作製するためには、一般に複数の平面パターンを接着して曲面を実現する必要があり、設計・製造コストが高い。本研究では、インフレーター構造により軽量かつ大型の形状を試作する別のアプローチとして、風船 3D プリンタを提案する。風船 3D プリンタとは、2 層のプラスチックフィルムを Roll-to-roll で断続的に熱融着することで、実質無限長かつチューブ状のパウチモータを作製し、Fused Deposition Modeling (FDM) 方式の 3D プリンタの要領で積層することで目標の立体形状を実現する造形方式である。チューブは一定間隔ごとにあらかじめ計算した方向へ曲がっており、全体として目標の形状を取る。本稿では予備調査として、先行研究を参考にした熱融着パターンと変形角度の調査及びシミュレーションを行った。

1 はじめに

インフレーター構造は軽量かつ大型の構造を作るのに適しているため、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 [4] などに用いられる。しかし、複雑な形状のインフレーター構造を実現しようとする、複数枚の平面パターンを接着する必要があり、設計・製造コストが高くなる。一方、ロボティクスや HCI の分野では、2 枚のシートを様々な 2 次元形状で熱融着し、ソフトアクチュエータ [2] や可動構造 [3] として用いるパウチモータ [1] が注目を集めている。パウチモータは熱融着のパターンによって様々な形状に変形する上、2 次元の製造プロセスであるため大規模化が容易であるという利点がある。

そこで本研究では、パウチモータを応用して「風船 3D プリンタ」の実現を目指す。風船 3D プリンタとは、チューブ状のインフレーター構造を Fused Deposition Modeling (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方法である。チューブには一定間隔ごとにパウチモータの熱融着パターンが施され、それぞれが特定の角度で曲がることにより全体形状が決まる。このプリンタの実現には、図 1 の梱包材作成マシンから着想を得ている。本稿では、このチューブの屈曲を考える上で必要となる、熱融着パターンと変形角度の調査およびシミュレーションを行った。

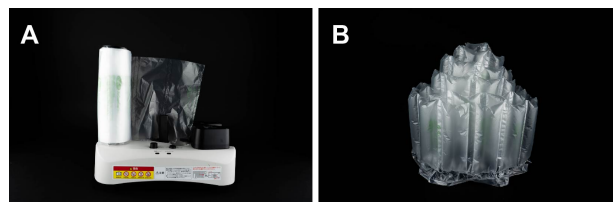


図 1. 風船 3D プリンタの想定。A: 梱包材マシン。B: 梱包材を積層した様子。

2 熱融着パターンと変形角度の調査

先行研究 [2, 3] によると、長方形パターンの中心をひし形に熱融着することで、パウチに空気を入れた際にチューブが曲がり安定した形状を取る。このひし形の高さや幅を変動させ、折れ曲がりの角度を測定した。測定には横幅 195 mm、縦幅 70 mm のナイロン製パウチを使用し、空気圧は 100 kPa とした。

まず、図 1 のように横幅 d を変化させながらひし形を熱融着し、空気を注入した際の折れ曲がりの角度 θ を測定した。縦幅は 40 mm で固定し、10 mm から 85 mm まで、5 mm 刻みで測定した。その結果、屈曲の角度は 84° から 130° まで制御でき、 $d = 0.87\theta + 65.40$ に線形近似できた。

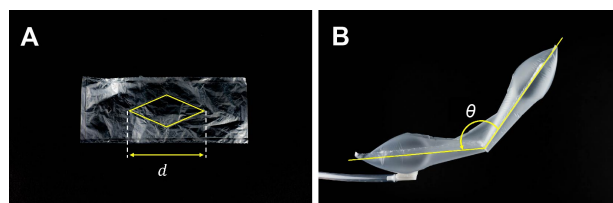


図 2. 熱融着とパウチの折れ曲がりの様子。A: 空気を入れる前の様子。B: パウチを側面から見た際の空気を入れた後の様子。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 慶應義塾大学

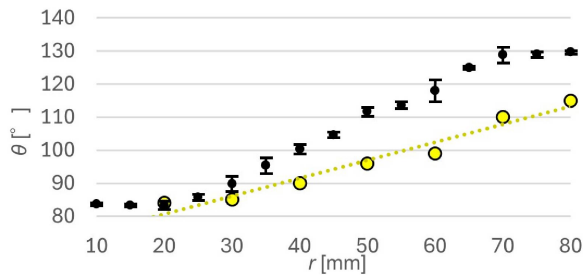


図 3. ひし形の横幅と折れ曲がりの角度の関係。エラーバーは標準偏差，黄色のデータはシミュレーションの値を示す。

次に，図4のようにひし形を ϕ 回転させ，パウチのねじれを測定した。このとき，縦幅が40 mm・横幅が60 mmのひし形を 5° から 35° まで 5° 刻みで回転させた。その結果，ひし形の回転 ϕ とねじれの角度 ψ には比例関係が読み取ることができ， $\psi = 2.08\phi - 1.50$ の線形に近似できた。

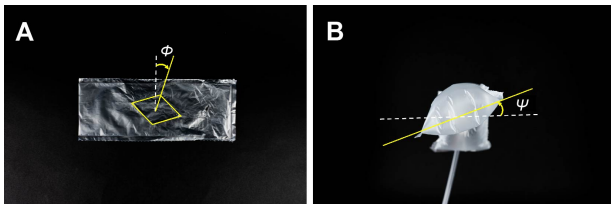


図 4. 熱融着とパウチのねじれの様子。A: 空気を入れる前の様子。B: パウチを正面から見た際の空気を入れた後の様子。

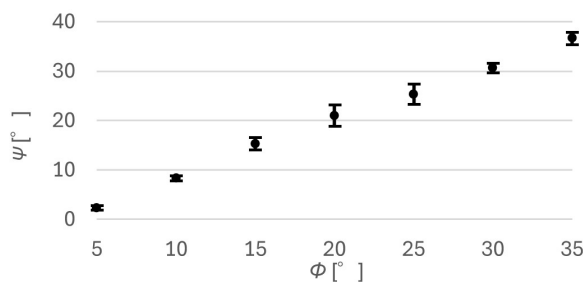


図 5. ひし形の回転とねじれの角度の関係。エラーバーは標準偏差を示す。

3 変形シミュレーション

先行論文 [2] を参考に，3D CAD の Rhino 8 を使用し，パウチにひし形に熱融着した際の変形シミュレーションを行った。図2の折れ曲がりをシミュレーションした結果を図3の黄線に示す。実測値とシミュレーション値にはズレが見られるが，傾向は一致していた。値のズレはフィルムの厚みや伸縮率，空気

圧の違いによるものと考えられる。なお，パウチのねじれに関するシミュレーションは本稿では行えなかったため，今後の課題とする。

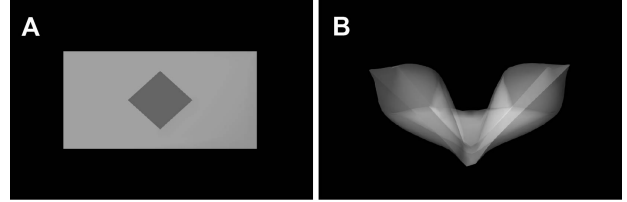


図 6. パウチの変形シミュレーション。A: 入力メッシュ。B: 出力メッシュ。

4 曲面に関するチューブのシミュレーション

最後に，Rhino 8 を使用し，チューブをらせん状に巻くことで入力された曲面を表現するスライサを試作した。ガウス曲率正の凸面が複数存在する複雑な曲面の場合は，モデルの中心座標に近い凸面をチューブで表現した後，チューブを曲面の内側に通して次の凸面に移るアルゴリズムを実施した。さらに，図3の結果からわかるように，ひし形の熱融着では 84° から 130° までの折れ曲がりしか表現できない。そのため，チューブの螺旋を表現する際，曲線上に細かく点を取り，その中から折れ曲がりの角度が 84° から 130° までの範囲内に収まる組み合わせになるよう点を選ぶ実装を行った。最後に，図3の線形近似を基に，スライスされた曲線状の3点を結ぶ角度から，熱融着するひし形の縦幅とひし形同士の距離を計算した。

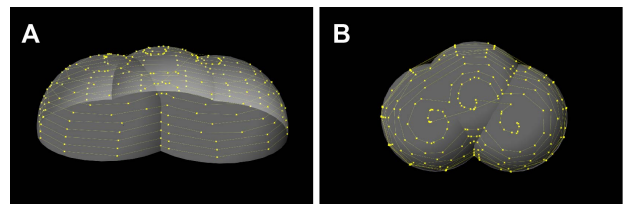


図 7. 曲面にチューブをまくシミュレーション。

5 まとめと今後の展望

本稿では，連続した空気チューブにより曲面を近似する風船 3D プリンタを目標として，パウチにひし形を熱融着した場合の折れ曲がりとねじれの角度を検証した。今後は，パウチを連続的に出力できる装置を作り，実際の曲面を作る。また，シミュレーションと実際の造形精度を比較し，シミュレーションのパラメータを調整する。その他，シミュレータを用いて造形可能な形状の検証も行う。

6 謝辞

本研究はJSPS 学術変革領域研究(B) (JP24H00825) および JST AdCORP (JPMJKB2302) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] R. Niiyama, D. Rus, and S. Kim. Pouch Motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6332–6337, 2014.
- [2] J. Ou, M. Skouras, N. Vlavianos, F. Heibeck, C.-Y. Cheng, J. Peters, and H. Ishii. aeroMorph - Heat-sealing Inflatable Shape-change Materials for Interaction Design. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 121–132, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [3] Y. Yang, L. Ren, C. Chen, B. Hu, Z. Zhang, X. Li, Y. Shen, K. Zhu, J. Ji, Y. Zhang, Y. Ni, J. Wu, Q. Wang, J. Wu, L. Sun, Y. Tao, and G. Wang. SnapInflatables: Designing Inflatables with Snap-through Instability for Responsive Interaction. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [4] 鈴木康広. 空気の人. <https://www.mabataki.com/works/aerial-being/>, 2007.