

曲面の4Dプリントに向けたドットパターンの収縮率の調査

藤野 皓* 鳴海 紘也*

概要. 本研究では、インクジェット印刷を施した熱収縮フィルムを加熱することにより、曲面の自動変形を行う。先行研究である Inkjet 4D Print [2] では、熱収縮フィルムの両面に折紙のパターンを印刷することで、フィルムが折れる（収縮率最大）か折れない（収縮率ゼロ）かの2状態を制御していた。しかし、この手法で実現できる形状は離散的な折紙に限られ、連続的な曲面を実現することはできなかった。本研究では、フィルムの両面にドットパターンを印刷し、パターンの密度によって局所的な収縮率を制御することで曲面を実現することを目指す。その予備検討として、ドットパターンの密度に対する収縮率を調査し、ドットパターンの組み合わせによって得られた曲面の事例を示す。

1 はじめに

平面から立体に自動変形する構造は、Deployable Structure の一種としてCG・建築・ファブリケーションの分野でさかんに研究されており、インフレーター [3]・4D プリント [1]・折紙 [2] などを利用して、これまでに様々な手法が提案されている。しかし、それらの手法にはチューブ状の凹凸が発生したり、平面の集合で曲面を近似したことにより角ばった形状になったりする欠点があるため、なめらかな曲面を直接再現することは困難であった。

本研究では、先行研究である Inkjet 4D Print [2] を拡張し、ドットパターンの印刷された平面上のフィルムを加熱することによりなめらかな曲面を得る手法を提案する（図1）。この手法では、UV プリンタを用いて熱収縮フィルムの両面に硬さのあるドットパターンを印刷することでフィルムが収縮しない領域を作成し、パターンの密度を変化させることで局所的な収縮率を制御する。これにより、将来的にはユーザの入力した曲面をなめらかな曲面のまま再現できるような自動変形が可能になると考えられる。本稿ではその準備段階として、ドットパターンの密度による収縮率の変化を調査し、パターンを変化させることにより得られた曲面の事例を示す。

2 提案手法

2.1 素材と設備

本研究では、熱収縮フィルムとしてサンプラスチック株式会社のPVC（75℃で縦横に40%収縮）を用いた。印刷にはUVプリンタUJF-6042 MkII（ミマキエンジニアリング）を使用し、ドットパターンはプライマ1層、黒3層、クリア1層の計5層印刷

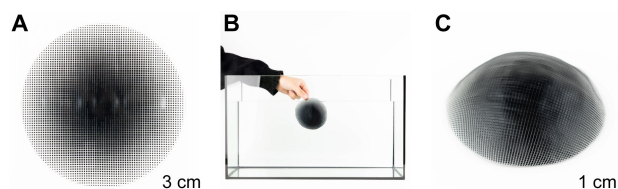


図1. 変形の過程. A: 変形前のシートの写真. B: お湯による変形の様子. C: 変形後のシートの写真.

した。また、パターン印刷を熱収縮フィルムの両面に施すことにより、フィルムが収縮する部分と阻害される部分がそれぞれ確実に機能するようにした。

2.2 ドットパターンと収縮率

まず、ドットパターンの密度に対するフィルムの収縮率を調査するために、ドットの印刷されていない長さの割合を透明比率 $r = \beta / (\alpha + \beta)$ と定義した（図2A）。次に r を0から1まで0.1刻みで変化させ、フィルムの収縮率を計測した。異なる r についてそれぞれ $n = 6$ のサンプルを計測し、平均値を求めた。計測結果を図2に示す。 $r < 0.6$ の領域では収縮率は r に対しておおむね線形に増加する一方で、 $r > 0.6$ の領域では収縮率がほぼ横ばい（フィルムそのものの収縮率の値）になることがわかる。

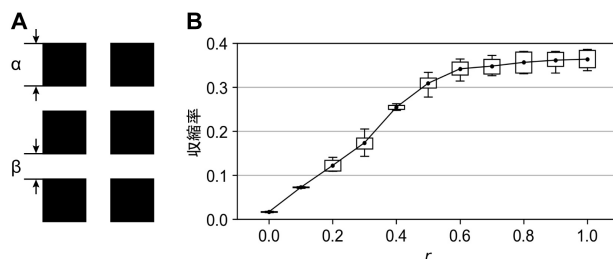


図2. A: ドットパターンの模式図. B: 透明率 r と収縮率の関係（箱上下端は標準偏差, 点は平均）.

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

そこで、次に実験と同様の状況をシミュレーションにより検証した。シミュレーションには Rhino8 / Grasshopper のビルトインコンポーネントである Kangaroo2 を用い、インクの乗った部分を剛体、インクの乗っていない部分をフィルムの収縮率 (40%) で収縮する素材として設定した。 $r = 0.5$ のときのシミュレーションの様子を図 3 に示す。また、 r に対する収縮率の実測値と計算値を図 4 に示す。

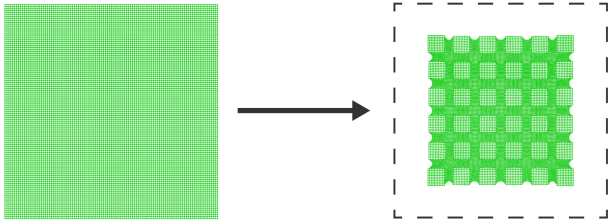


図 3. Grasshopper 上でのシミュレーション

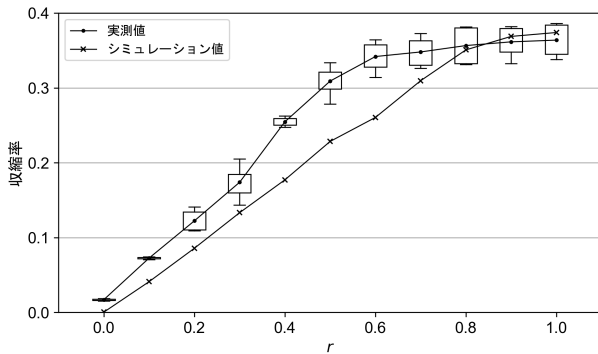


図 4. 収縮シミュレーションの結果

フィルム全体での収縮率は実験から得た値を使用したが、図 4 を見るとその増加は $r = 1$ の時を最大とする直線とはならず、 $r = 0.8$ の付近に変曲点が発生した。加えて、Grasshopper を用いたシミュレーションではインクが付いた部分を剛体、それ以外の辺が縮むものとして計算したため、歪みは実際のフィルムに印刷した場合よりも小さくなる。そのため、図 4 の 2 つのプロットは程度は異なるが同じ傾向にあると言え、この変曲点については印刷部分の周囲のフィルムが歪むことにより収縮が大きくなったもので、必ず発生するものと言える。この傾向から、実際のパターン印刷に使用するための近似式はシミュレーションに基づくものでなく、実際にフィルムで計測した値から算出することとした。そこで、 $0 \leq r \leq 0.573$ と $0.573 \leq r \leq 1$ の 2 つの値域に分けて最小二乗法を適用し、収縮率を s として以下の式 1 のように変曲点を含む形で算出した。

$$s = \begin{cases} 0.567r + 0.0165 & (0 \leq r < 0.573) \\ 0.0574r + 0.292 & (0.573 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 パターンと得られた曲面

ここまでの実験とシミュレーションより、式 1 を用いて必要なドットの比率を計算し曲面を作成するためのグラデーション画像を作成した。このとき、作成した画像・変換したパターンを印刷した物・熱を加えた後の結果を図 5 に示す。

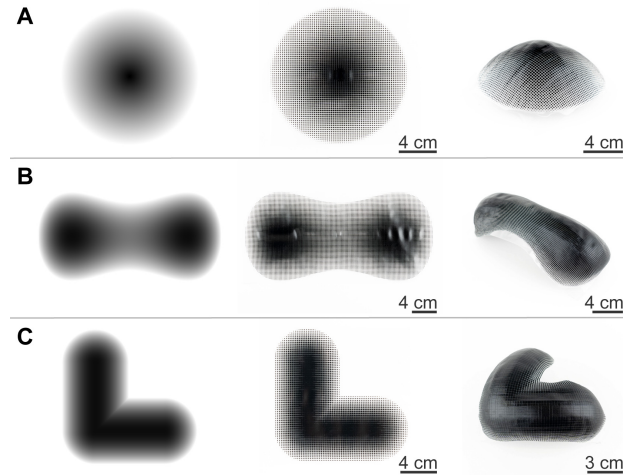


図 5. グラデーションとドットパターン及び曲面

本稿では、図 5 左端のようなグレースケールの画像を入力とし、それを実際に出力する大きさに合わせ小領域に分割、その小領域において収縮率に合わせて透明比率を制御する、という方式でパターンを作成した。このとき、元となるグレースケール画像は Python を用いて作成し、画素値が 0 に近ければ近いほど出力されるパターンの透明比率も小さくなるように変換を行った。また、パターン作成時の小領域の大きさは 2 mm 四方とし、その中でさらに縦横 100 段階に印刷領域の大きさを変化させた。

この方式ではグラデーションパターンから直接完成形を確認することができず、またフィルムの曲がる方向も制御できていないが、図 1 や図 5A のように単純な円形のグラデーションから作られる形状だけでなく、グラデーションの方向を変化させて曲率が滑らかに変化していくような曲面 (図 5B) を作る事ができた。また、図 5C のように、グラデーションを組み合わせることにより、負の曲率と正の曲率の両方を呈する曲面を製造することも可能である。

3 おわりに

本稿では、インクジェット印刷により平面から曲面を製造する手法の前提として、ドットパターン印刷によるフィルムの収縮率の変化と、実際にフィルムにパターンを印刷して得られた曲面形状を示した。今後は曲面形状を入力とし、平面に展張したものの収縮率から印刷可能なドットパターンを自動で出力するシステムの開発を目指す。

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。

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] K. Narumi, K. Koyama, K. Suto, Y. Noma, H. Sato, T. Tachi, M. Sugimoto, T. Igarashi, and Y. Kawahara. Inkjet 4D Print: Self-folding Tessellated Origami Objects by Inkjet UV Printing. *ACM Trans. Graph.*, 42(4), July 2023.
- [3] J. Panetta, F. Isvoranu, T. Chen, E. Siéfert, B. Roman, and M. Pauly. Computational inverse design of surface-based inflatables. *ACM Trans. Graph.*, 40(4), July 2021.