

UV インクを印刷した熱収縮シート構造による Ron Resch パターンの自己折り手法

小山和紀^{†*} 鳴海紘也^{†*} 須藤海^{‡†} 佐藤宏樹[†] 野間裕太[†] 館知宏[†] 杉本雅明[¶] 川原圭博[†]

[†] 東京大学 [‡] Nature Architects 株式会社 [¶] エレファンテック株式会社

1 はじめに

自己折りは2次元のシート形状から自動的に3次元形状を作製する技術として近年さかんに研究されているが、従来の自己折りに関する研究は単純な折りしか実現できないもの [1] か、製造に特殊な装置や多大な手作業 [2] を要するものがほとんどである。

そこで我々は市販の UV プリンタに着目し、熱収縮シートに UV インクのマスクングを施すことで、利用しやすい装置で高精度かつ高速な自己折りを目指す。本稿ではまずその基礎調査として、有名な折り紙テセレーションである Ron Resch パターンを UV プリンタにより実現した。また、提案する自己折りの構造をモデル化することにより、ギャップ幅と折り角に見られる線形関係を実験で検証した。

2 UV インクによる自己折り

2.1 概要と原理

図 1 に本研究で提案する自己折りの概要を示す。加熱前、熱収縮シートの両面には UV プリンタにより折りパターンが印刷されている。その後、構造全体をお湯に浸すなどして 70 °C から 100 °C で加熱することにより、目標の 3 次元形状を得る。

また、図 2A に提案手法の構造を示す。基本的な原理は [1] などの既存手法と同様で、熱収縮シートの片側だけ収縮を阻害することである。本研究では、ヒンジ部の片面だけにインクを積層することでシートの収縮を妨げる。その結果、インクが乗っていない側だけが収縮し山谷の折りを実現する。

2.2 材料と方法

本実験には、Mimaki の UJF-6042MkII (プリンタ)・LUS-150 (黒)・PR-200 (プライマ)・LH-100 (クリア) を利用した。また、熱収縮シートには、ポリエチレンの布地であるバイリーンアイロン収縮シート 30 (厚みの実測値 $t_{cloth} \approx 85 \mu\text{m}$ 、収縮率 $\varepsilon_{cloth} = 30\%$) とポリオレフィンのシートである

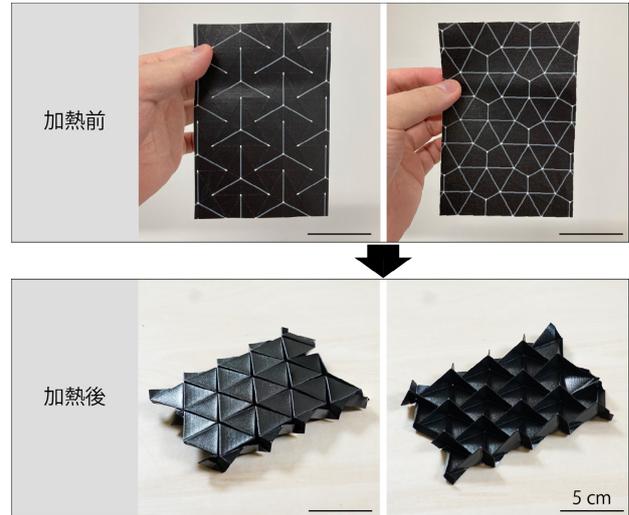


図 1 熱収縮シートの表裏 (図の左右) に UV インクを印刷した Ron Resch パターン。加熱により変形し立体形状をとる

ハッコーシュリンクフィルム (厚み $t_{film} = 15 \mu\text{m}$ 、収縮率の実測値 $\varepsilon_{film} \approx 5.9\%$) の 2 種類を用いた。

図 2A に示すとおり、本研究では自己折りの実現のために 3 種類のインクを使用した。まず、1 層目には熱収縮シートとインクの接着を助けるプライマを印刷する。次に、2 層目以降から熱収縮シートの収縮を妨げるために必要な層数のカラーインクを印刷する。予備実験により、我々のセットアップでは黒のインクが最も少ない層数でシャープに変形することが判明した。また、インクの層数に関しては、少なすぎると変形時に収縮を阻害できず、逆に多すぎると印刷時間が増える、精度が落ちる、変形の際に厚みが干渉し合うなどのトレードオフが見られた。そのため現状は、安定した変形を実現できるパラメータとして黒を 5 層印刷している。最後に、熱収縮シートとしてフィルムを用いる際には、面の剛性を上げるためにクリアを 1 層印刷した。クリアインクの副次的効果として、お湯などで長時間加熱した際にインクが軟化するのを防ぐことも分かった。

3 実験

図 1 に示した平面状の Ron Resch パターンのように、最終的に辺や頂点同士が衝突してそれ以上折れなくなるようなパターン (ロックする形状) では、折り角を制御せずにとりあえず一律に大きく変形さ

Self-folding Ron Resch patterns with heat-shrinkable sheets controlled by printed UV ink layers

Kazuki KOYAMA^{†*}, Koya NARUMI^{†*}, Kai SUTO^{‡†}, Hiroki SATO[†], Yuta NOMA[†], Tomohiro TACHI[†], Masaaki SUGIMOTO[¶] and Yoshihiro KAWAHARA[†]

[†]The University of Tokyo, [‡]Nature Architects Inc., [¶]Elephantech Inc.

* Joint first authors

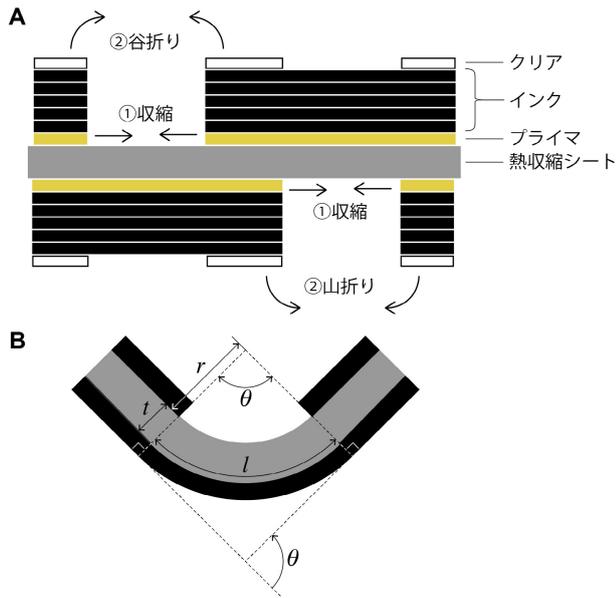


図2 A: 印刷層と変形原理。B: モデルとパラメータ

せておけば、ある程度予想通りの形状になる。しかし、より高精度な変形を目指す場合や、曲面に拡張した一般化 Ron Resch パターン（面と面の間に隙間が生じる場合が多い）やその他多くの折りパターンを自己折りしたい場合には、ロックに頼った変形はできなくなる。そこで本章では、自己折りの際に目標とする折り角を実現するために、印刷のギャップ幅と折り角の関係性を明らかにする。

3.1 モデル化

我々は図 2B に示すようなモデルを仮定し、ギャップ幅 l と折り角 θ の関係を定式化した。

$$\begin{cases} r \times \theta [\text{rad}] = (1 - \varepsilon)l \\ (r + t) \times \theta [\text{rad}] = l \end{cases} \\ \therefore \theta [^\circ] = \frac{180\varepsilon}{\pi t}l. \quad (1)$$

この時、折り目幅と折り角の間には比例関係があると考えられる。なお、 t および ε は、それぞれ熱収縮シートの厚みと収縮率である。

3.2 方法・結果・考察

上述のモデルを実験により検証した。まず、A5 (210 mm × 148 mm) のシート上に、短辺の長さの折り線を複数用意し、そのギャップ幅 l を変化させた。それぞれの l について、8 個のサンプルを用意し、加熱後の折り角 θ を計測した。

その結果、図 3 のプロットに示すように、布とフィルムの両方で l と θ の強い線形性 ($R^2 > 0.98$) が確認された。また、標準偏差はどの折り目幅に対しても布: 6°/mm、フィルム: 9°/mm で抑えられ、高精度で折り角を制御できていることが分かった。

なお、布とフィルムのフィッティングの傾きは

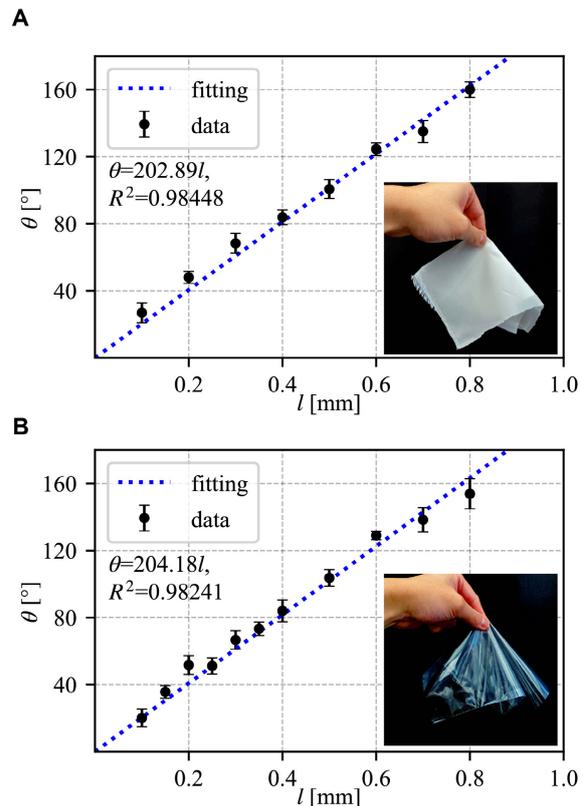


図3 ギャップ幅 l と折り角 θ の関係。A: 布、B: フィルム。写真はそれぞれ印刷前の布とフィルム。エラーバーは標準偏差 ($n = 8$)

203 と 204 であったが、式 (1) に布のパラメータ ($t_{\text{cloth}}, \varepsilon_{\text{cloth}}$) とフィルムのパラメータ ($t_{\text{film}}, \varepsilon_{\text{film}}$) を代入するとそれぞれ $\theta/l \approx 202$ と $\theta/l \approx 225$ となる。これらの数値を比較すると、前述のモデルが適当であると結論づけられる。

4 折紙テセレーションへの適用

本稿では、UV インクと熱収縮性シートを用いた自己折り手法を提案し、Ron Resch パターンの自己折りを示した。また、自己折り構造のモデル化およびその検証を行った。今後はギャップ幅によって折り角を制御できるという本稿の結果を利用し、一般化した Ron Rech パターンの自己折りを目指す。

謝辞 本研究は JST ACT-I (グラント番号: JPMJPR18UN) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] An et al., An End-to-End Approach to Making Self-Folded 3D Surface Shapes by Uniform Heating, *IEEE ICRA*, 2018.
- [2] Guseinov et al., CurveUps: Shaping objects from flat plates with tension-actuated curvature, *ACM ToG*, 2017.