

ラミネートフィルムを用いた曲面テキスタイルの設計と製造

Design and Fabrication of Curved Textiles Using Laminate Film

上條 陽斗¹, 木村 正子^{1,2}, 木島 凧沙¹, 仙福孝太郎³, 館 知宏¹

Haruto KAMIJO¹, Shoko KIMURA², Nagisa KIJIMA¹, Kotaro SEMPUKU³, Tomohiro TACHI¹

¹ 東京大学, ² 名古屋工業大学, ³ 株式会社日建設計

¹The University of Tokyo, ²Nagoya Institute of Technology, ³NIKKEN SEKKEI LTD

【要約】

製造後の形状変化を利用する 4D ファブリケーションの多くは積層造形を用いて実装されてきた。しかし、積層造形にはサイズの制約や製造に長い時間がかかるという課題がある。本研究では平面上で圧縮材とプレテンションをかけた布を複合することで、座屈を引き起こし立体的な曲面テキスタイルを生み出す手法をラミネートフィルムとパワーネットチュールを用いて実装した Active Textile を提案する。積層造形によるサイズ制限を取り除くことで 1.8 m 四方に及ぶテキスタイルの製造を実現した。また、周期的パターン製造と分析を行い、シミュレーションを介した設計手法を提案する。提案手法を用いて実施したワークショップや服飾デザインの応用例も紹介する。

キーワード: 4D ファブリケーション, テキスタイル, 平面充填, シミュレーション

【Abstract】

Many 4D fabrications that utilize shape changes after manufacturing have been implemented using additive manufacturing. However, additive manufacturing has the challenges of size limitation and long manufacturing time. In this study, we propose Active Textile, which uses laminate film and power net tulle to create a three-dimensional curved textile by compositing a compression material and pre-tensioned fabric on a flat surface to induce buckling. By removing the size limitation due to the additive manufacturing, textiles as large as 1.8 m square can be produced. In addition, we propose a simulation-based design method by producing and analyzing periodic patterns. Examples of workshops conducted using the proposed method and applications to garment design will also be presented.

Keywords: 4D Fabrication, Textile, Tessellation, Simulation

1. 序論

デジタルファブリケーションの発展は異なる物性を示す部分を組み合わせることで製造後に変形を生じる 4D ファブリケーションおよびその設計を可能にした。形状記憶複合材料を組み合わせた自己折り[1]や柔らかい部分を介したスナップスルー[2]を取り入れることで製造が容易な形状から事後的な変形により複雑な形状を得る手法が提案されている。

弾性変形するロッドと伸縮性の布を一体化させて曲面を成すテキスタイルを製造する手法が Guberan らの作品[3]によって提案された。この手法では一体化前に布に導入する張力によって一体化後に布が収縮し、ロッドに圧縮力が加わり、面外への座屈を生じることで全体が立体的な曲面形状を生み出す。Pérez ら[4]はこの手法を用いて複雑な形状を得るためのシミュレーションと最適化を組み合わせた設計手法を提案している。また、Jourdan ら [5]は星型のロッドを離散的に敷き詰めたパターンを用いて、その粗密や大小を操作することで複曲面を設計する手法を提案している。これらの手法はいずれも予め張力をかけた布に対して 3D プリンタによってロッドを造形する方法によって実装されている。3D プリンタを用いる方法は 3D プリンタのサイズによって作成できる大きさを制限される。

本研究ではロッドとしてラミネートフィルムを採用したファブリケーション手法 Active Textile を提案する。この手法では製造可能なサイズがメートルスケールまで拡大され、また、特殊な設備を用いずに容易に製造することができる。この手法を用いてロッドの周期的な敷き詰めパターンの変形について分析する。また、本ファブリケーション手法の応用として作成した服飾デザインや実施したワークショップについて紹介する。

2. ファブリケーション

2.1 Active Textile の概要

Active Textile は弾性変形するロッドとしてラミネートフィルムを、伸縮性の布としてパワーネットチュール（以下チュール）を用いて曲面を成すテキスタイルを製造する手法である。ラミネートフィルムはポリエステル製で 0.1 mm から 0.25 mm の厚みのものから選択して用い、チュールにはポリエステル 100% のものを用いる。

2.2 Active Textile の製造手順

製造手順は図 1 に示すように、ラミネートフィルムの切り出し、チュールへの張力の導入、アイロンによるラミネートフィルムとチュールの一体化、チュールの切り出しによる張力の解放の 4 段階からな

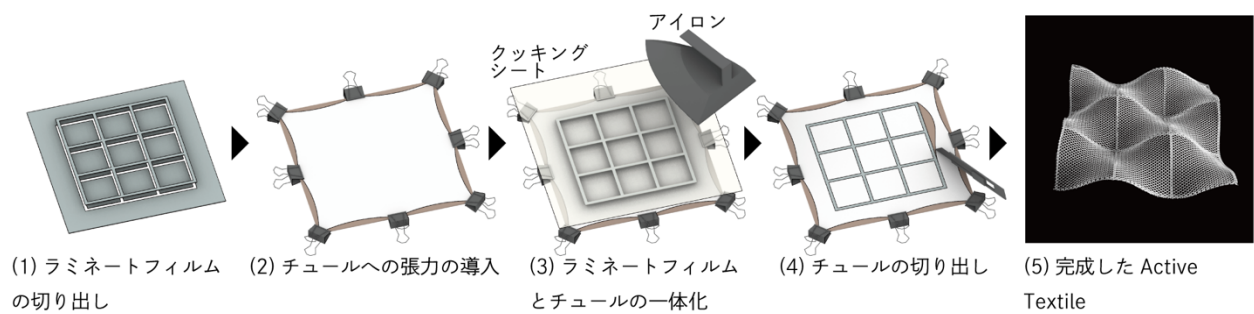


図 1. Active Textile の製造手順

る。以下に各段階を詳説する。

2.2.1 ラミネートフィルムの切り出し

ラミネートフィルムを設計したパターンに沿って切り出す。切り出しにはレーザーカッター、カッティングプロッターのいずれかを選択して用いる。また、カッターやハサミを用いて手作業で切り出すことも可能である。

2.2.2 チュールへの張力の導入

チュールを二方向に引っ張った状態で木製の板にクリップで固定しておく。チュールは二方向への伸縮が可能だが、伸縮率や剛性には異方性がある。製造結果が二方向に均等に収縮した形状となるように、伸縮性の低い巻き方向と伸縮性の高い幅方向の拡大率の比は 1:1.5 に設定する。拡大率の具体的な値は図 1 (5) の場合には巻き方向を 1.2 倍、幅方向を 1.8 倍として製造した。

2.2.3 ラミネートフィルムとチュールの一体化

切り出したラミネートフィルムを、張力をかけたチュールの上に、接着面が下になるように置いて熱したアイロンで圧力をかけることで接着する。アイロンの保護のためにラミネートフィルムとアイロンの間にクッキングシートを挟み、中温から高温を用いて接着する。

2.2.4 チュールの切り出し

製造物に当たる部分のチュールをカッターナイフで外周部から切り離すことで、引っ張っていた力が抜けてチュールが収縮し、曲面へと変形する。

2.3 製造サイズの制約

一体で製造できる Active Textile のサイズはチュール、ラミネートフィルムの大きさの双方から制限される。チュールは 1550 mm 幅のロールが一般に流通しており、これを構造用合板の下地に張ることで 1.8 m 四方にチュールを広げて張力を導入できる。ラミネートフィルムには 0.1 mm 厚では 1070 mm 幅のロールが、0.25 mm 厚では A3 サイズのシートが流通している。ラミネートフィルムの流通規格よりも大きな Active Textile を作る際にはラミネートフィルムを変形後の形状で伝達する曲げモーメントが小さくなる部分で突き合わせて継いだ。図 2 に、0.25 mm 厚のラミネートフィルムを用いて製造した 1.8 m 四方の Active Textile の事例を示した。

3. 周期パターンの設計と製造

Active Textile ではチュールに与える張力、ラミネートフィルムの厚み、ラミネートフィルムの切り出しパターンを変更することができる。本章ではラミネートフィルムの周期的な切り出しパターンと出来上がる曲面形状の対応を調べる。また、シミュレーションを用いたパターンの設計手法について提案する。

3.1 正多角形パターンの Active Textile

正多角形による平面充填は正三角形、正四角形、正六角形の 3 種類で可能である。正多角形のタイリングに沿ってラミネートフィルムを配置した Active Textile の変形する形状を調べる。正三角形と正四角形は一辺 30 mm、正六角形は一辺 20 mm としたパターンを用いて、0.25 mm 厚のラミネートフィルムを幅 1 mm に切り出して作成した Active Textile を図 3 (a)-(c) に示す。

Active Textile の曲面はラミネートフィルムが座屈することで生み出される。一般の柱の場合、座屈の形状は両端の支持条件によって異なる。周期的なパターンに現れた座屈モードを図 4 に示す。

図 3 (a) に示した正三角形のパターンでは中央の正三角形で頂点が上に、辺の midpoint が下に移動した変形パターンを生じる。中央の三角形に関する 3 辺では図 4 (a) に示した座屈モードに変形する。

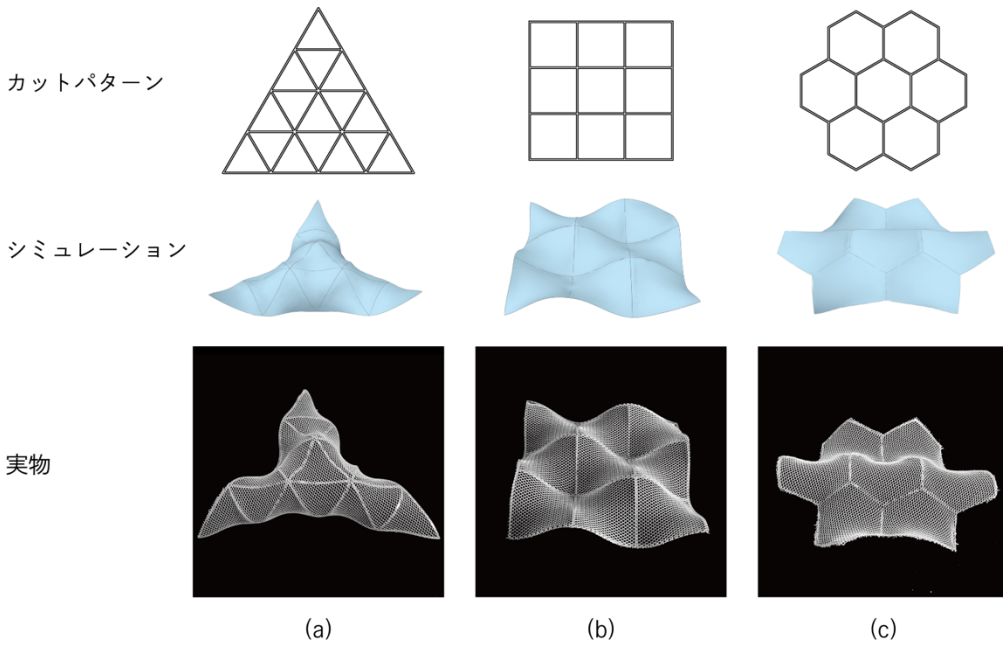
図 3 (b) に示した正四角形のパターンでは市松模様状に頂点が交互に上下に移動した変形を生じる。全ての辺は図 4 (b) に示した座屈モードに変形する。

図 3 (c) に示した正六角形のパターンでは 6 本の辺のうち向かい合う 2 本が図 4 (c) に示した座屈モードに変形し、その他の 4 辺は大きな変形を生じない。

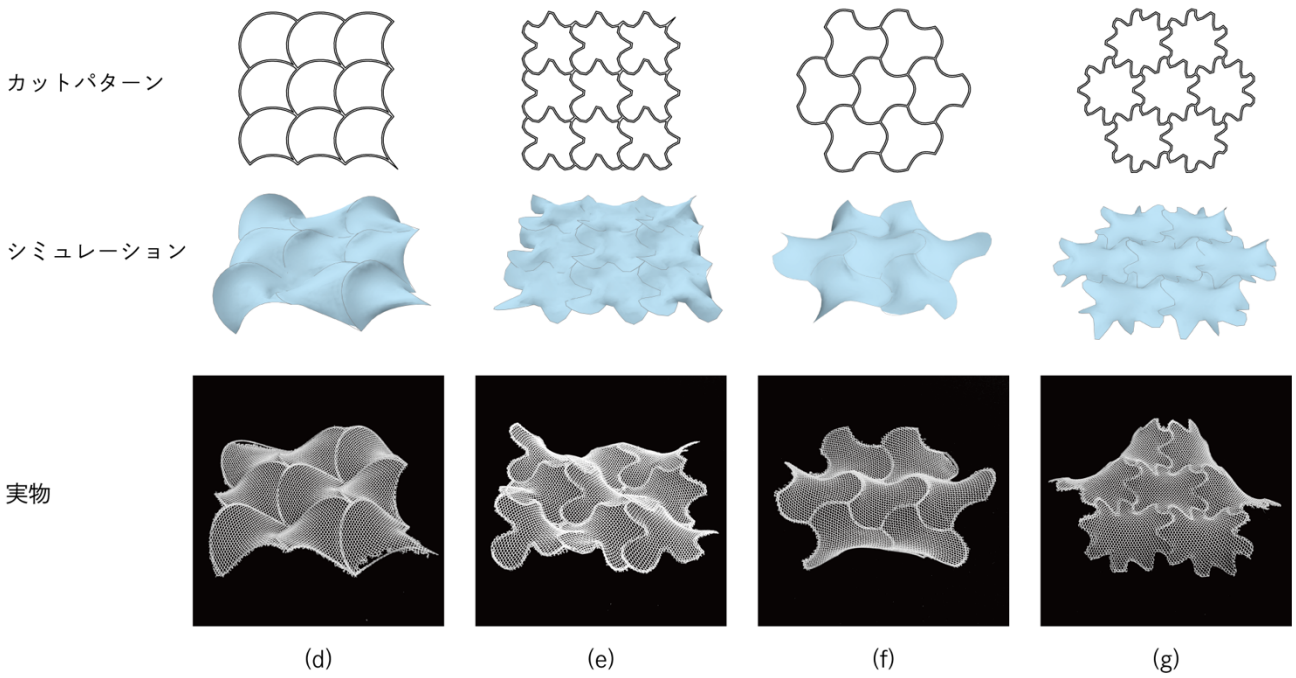
正多角形パターンの Active Textile が図 3 に示した変形モード以外の変形を生じる可能性もあるが、今回作成したサンプルでは多くの変形モードが、不安定か、軽い衝撃で図 3 に示したモードへ遷移する。面を折り曲げるような形状をとるモードには強く安定するものもあった。その例を図 5 に示す。



図 2. 1.8 m 四方の Active Textile



(a) (b) (c)



(d) (e) (f) (g)

図 3. 各種パターンのカットパターン, シミュレーション, 実物の比較

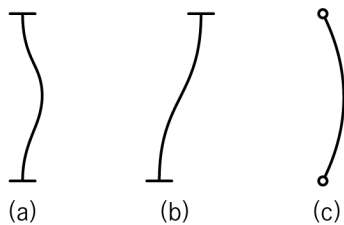


図 4. 柱の座屈モード

3.2 Active Textile のシミュレーション

不整形な Active Textile を設計する目的で, 平面パターンから曲面への変形シミュレーションを Rhinoceros + Grasshopper で実装した. シミュレーションには動的緩和法を実装した Grasshopper のプラグインの kangaroo2 [6]を用いた. Rhinoceros 上の NURBS 曲線の制御点を編集し, Grasshopper からシミュレーションを実行するシ

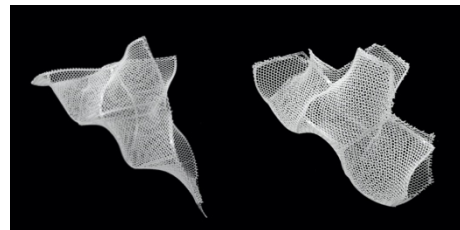


図 5. 折れるような変形モード

ステムで, 敷き詰めパターンに対して対称性のある初期変位を与えて変形する曲面の形状を予測する.

安定する曲面形状では平面状態からの頂点の移動が対称性の高いものになるという観察から, 対称性を持つように選択した複数点に対して面外方向に小さい力を加えることで初期不整として座屈を引き起こしている. 図 3 に示した実物の曲面形状に対応する初期不整のほ

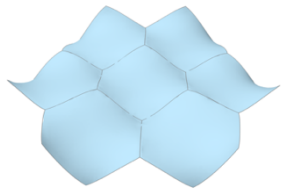


図 6. 正六角形パターンの実物と異なる変形モード

か、いくつかの対称性のある不整を与えてシミュレーションを行ったところ、今回用いたパラメーターでは正三角形と正四角形では図 3 に示した変形モードへと移行したが、正六角形では図 6 に示すような変形モードでも安定した。

3.3 曲線パターンの Active Textile の設計と製造

周期的な曲面構造がよく観察できる正四角形と正六角形のタイリングを用いて、各辺を曲線に置き換えたパターンによる Active Textile を設計し、実際に製造した。

3.2 で実装したシミュレーションを用い、作図した曲線形状に対してシミュレーションを行うことを繰り返して Active Textile を設計した。設計したパターンとシミュレーション結果、実際の製造物の比較を図 3 (d)-(g)に示す。(d)や(f)のような単調なパターンでは正多角形パターンでの変形から座屈モードの変化は見られず、細かな曲面形状の違いを設計するに留まった一方で、(e)や(g)のように何度も折れ曲がるパターンでは、正多角形パターンよりも高次の座屈モードでも安定することができることがシミュレーションから予想されて、設計を行った。その結果、(e)では正四角形パターンと同様の変形モードをとったが、(g)ではシミュレーションに近い変形モードをとり、正六角形のパターンとの変形の違いが確認できた。

何度も折れ曲がったパターンでの変形モードの変化は辺全体の曲げ変形がねじり変形の合成で実現され、全体の剛性が低下するために、高次の座屈モードに入った際に、低次のモードに遷移するのに必要なだけの圧縮力がラミネートフィルムにかからないからだと考えられる。

3.4 Active Textile の応用

提案した Active Textile のファブリケーション手法を用いた服飾デザインへの応用事例を図 7 に示す。大型のテキスタイルを一度に製造できる利点を活用している。また、ファブリケーション手法および設計手法を用いて実施したワークショップの事例を図 8 に示す。本事例ではインタラクティブな設計手法や、素早く簡便なファブリケーション手法の利点を活用している。

4. 結論

本研究では弾性変形するラミネートフィルムと張力を導入したチュールを複合する 4D ファブリケーション手法の Active Textile を提案し、正多角形の平面充填パターンの変形の製造を通じた分析を踏まえてシミュレーションを実装し、シミュレーションを利用したインタラクティブな設計手法を提案した。また、Active Textile を応用する実践を通して本手法の有用性を模索した。

製造とシミュレーションの分析から、同じトポロジーを持つロッドのパターンに対して、曲線形状の変化が変形モードの変化をもたらす得ることが示唆



図 7. 服飾デザインの事例



図 8. ワークショップの実施例

されたが、変形モードが変化する条件については明らかにすることができていない。また、本研究での分析は単一の正多角形の平面充填を下にしたパターンに限定され、それ以外の周期パターンや非周期パターンについては分析できていない。特に非均一なパターンの設計は Jourdan ら[5]が示したような曲率分布を伴う形状の設計可能性が期待でき、今後の研究の課題である。

謝辞

本研究に際して東京大学 T-BOX にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1. Tolley, Michael T., et al. "Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating." *Smart Materials and Structures* 23.9 (2014): 094006.
2. Noma, Yuta, et al. "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*. 2020.
3. Guberan, Christophe, et al. "Active Shoes." <https://selfassemblylab.mit.edu/active-shoes>. MIT Self Assembly Lab. (最終閲覧日 2022. 09. 18)
4. Pérez, Jesús, Miguel A. Otaduy, and Bernhard Thomaszewski. "Computational design and automated fabrication of kirchhoff-plateau surfaces." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 36.4 (2017): 1-12.
5. Jourdan, David, et al. "Printing-on-fabric meta-material for self-shaping architectural models." *Advances in Architectural Geometry 2020* (2020).
6. Piker, D. "kangaroo2. 0." (2017).