

模様の回転と帯の長さに基づく花紋スマッキングの動的可視化

吉田哲也¹⁾ (正会員) 中西彩子¹⁾ (非会員)

1) 奈良女子大学

Dynamic Visualization of Petaloid Smocking based on Rotation of Shapes and Pleat Length

Tetsuya Yoshida¹⁾ Ayako Nakanishi¹⁾

1) Nara Women's University

概要

布のねじり折りと縫い留めで被服の装飾となる模様を造形する花紋スマッキングに対し、折りの程度に応じて模様と帯が変化することで折り途中の様子が可視化されるように、本稿では模様の回転と帯の長さに基づいて花紋スマッキングを作図するアプローチを提案する。折りの様子を可視化することにより、時間をかけて作図したにも関わらず模様が重なってしまい装飾として制作できないことを避けたり、折り途中の様子を確認することで柔らかな布の折りたたみでの造形がしやすくなると期待される。提案法では帯をねじるように折る代わりに模様を一斉に回転させるとともに、折り途中の様子を表す帯が回転に応じて定まるように作図する。提案法による作図の幾何的な性質を示すとともに、この性質に基づいて作図するプロセスや作図例を報告する。提案法を GeoGebra を用いて実装し、花紋スマッキングを施した服飾雑貨の例としてバッグを制作して検証した。布の折りたたみで容量を変変にできるようにマジックテープを用いて制作したバッグは折り後の形状を維持しやすくなるとともに、折り途中の様子を確認することで容量の変更をしやすくなった。

Abstract

Petaloid smocking is made of cloth by sewing and flattening pleats to create shapes over the surface. For dynamically visualizing the folding of pleats, this paper proposes an approach for creating crease patterns based on the rotation of shapes and pleat length. Dynamic visualization of petaloid smocking will contribute to avoiding the situation where the designed petaloid smocking cannot be actually produced due to the overlap of designed patterns, and to facilitating the shaping of flexible cloth. We show geometric characteristics of the crease patterns based on the proposed approach, and suggest a design framework with several examples of crease pattern. By designing a crease pattern with GeoGebra, the proposed approach is validated through the application to fashion goods. The shape of the produced bag can be transformed through folding, and fastened with magic tapes to enable variable size.

1 はじめに

裁断した布を針と糸で縫いとめる服飾では、布の表面に模様を造形するスモッキングという技法がある [1]. 図 1 にスモッキングの例を示す. 著者らは紙を素材とする折り紙における花紋折りに着目し、布の表面に造形する花卉のような形状をした模様と造形操作を花紋スモッキングと呼び、図 2 左に示すような折り紙の展開図に基づいてパターンを生成する手法と、図 2 左の中央の多角形から伸びる帯の共有を通じた組合せのデザインを提案した [2]. 花紋スモッキングでは図 2 左の中央の多角形が図 2 右のような模様となるように造形するが、それぞれの模様を布の表面の装飾として造形するために、著者らの手法では展開図の折り線への山谷の割り当てを保存しながら花紋スモッキングを組み合わせる [2]. また、造形できる模様の形状の拡張 [3] や、合同変換によるタイリング [4, 5] を活用して無限に広がる花紋スモッキングをデザインする枠組みを提案した [6].

紙や布の折りたたみで造形する場合、折られた面の順序関係 (面の重なり順と呼ばれる) を考慮しなければ、折り前の表現である展開図から折り後の形状を求めることは鏡映変換に基づく折り紙写像として定式化できる [7]. このため、折り後の形状を展開図から描画するソフトウェアもある [8]. しかし、同じ展開図でも重なり順によっては面が自己交差してしまい実際には制作できない場合がある. 平坦に折ることが可能な折り紙 (平坦折り紙と呼ばれる) に対する局所的な必要条件はいくつか知られているものの [7], 展開図の大局的な平坦折り可能性の判定は NP 完全で困難な問題である [9].

布のねじり折りと縫い留めで被服の装飾となる模様を造形する花紋スモッキングは平坦折り紙とみなすことができるため、模様が重なることなく造形できるかを展開図から判断することは難しいと考えられる. しかし、折りの様子を可視化できれば、時間をかけて作図したにも関わらず模様が重なってしまい装飾として造形できないことを避けたり、折り途中の様子を確認することで柔らかな布の折りたたみでの造形がしやすくなると期待される. 本稿では、折りたたみの程度に応じて模様と帯が変化して折り途中の様子が可視化されるように、模様の回転と帯の長さに基づいて花紋スモッキングを作図するア



(a) ベーシック (b) イタリアン (c) ラティス

図 1 スモッキングの例

プローチを提案する. 提案法による作図の幾何的な性質を示すとともに、この性質に基づいて作図するプロセスや作図例を示す.

本稿のアプローチを GeoGebra[10] を用いて実装し、花紋スモッキングを施した服飾雑貨を制作して検証した. 制作したバッグではマジックテープで折り後の帯を固定するため、布の折りたたみを通じてバッグの容量を変えることができる. また、布は柔らかいため布の折りたたみを維持しながら造形するには慣れが必要であるが、動的可視化を通じて折り途中の様子を確認することで容量の変更がしやすくなった.

2 章で布の表面に模様を造形する花紋スモッキングを説明し、3 章で折りの様子を動的に可視化する作図のアプローチを提案する. 4 章で実制作を通じた検証を述べ、5 章でまとめと今後の展望を述べる.

2 花紋スモッキング

スモッキングとは、布を寄せ集めたひだであるギャザーを糸で巻き込むような縫い方である「かがり縫い」をしたり、布のひだや折り目であるプリーツを浮彫り風にする手芸の技法である [1]. 図 1 にスモッキングの例を示す. たとえば図 1(a) や図 1(b) では布を寄せ集めたひだであるギャザーをかがり縫いすることで布の装飾を造形した例である. スモッキングには様々な種類があるが、本稿では図 1(c) のように布の表面に平坦な模様を造形するものを扱う [2, 3].

2.1 折り紙に基づく花紋スモッキングの表現

折り紙は折り線とその交点が指定された平坦な紙を折り線で折ることで造形するものである. 折り線を辺、交点を頂点と考えることで、折り紙は平面グラフとみなせる [11]. 折り方には山折りと谷折りの 2 種類があり、折り紙の平面グラフは展開図と呼ばれる [7]. 本稿では、山

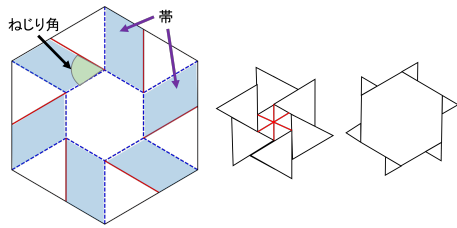


図2 花紋折りの例 (左:展開図, 中央:折り後の形状, 右:裏から見た模様)

折り線を赤の実線, 谷折り線を青の破線で表す.

折り紙の展開図の例を図2の左に, 展開図を折り線の山折り, 谷折りに従って折った形状を図2中央に示す. 折り後の中央の正多角形の模様は花卉のように見えるため, この種類の折り紙は「花紋折り」と呼ばれる. スモッキングでは図2右の裏から見た模様を装飾として造形するが, 本稿では, 花紋折りのような模様を布の表面にスモッキングで造形するものを花紋スモッキングと呼ぶ [2, 3].

花紋スモッキングは平坦折り紙とみなすことができるため, 本稿では平坦折り可能な展開図を扱う. 展開図の山折りと谷折りは対称なため, 以下では展開図で中央の多角形(本稿では模様と呼ぶ)の折り線はすべて谷折りとする(図2). また, 模様の頂点の次数はすべて4とする. このとき, 前川定理や川崎定理など [7] から, 花紋折りの展開図で模様の各辺から伸びる一対の山折り線と谷折り線(帯と呼ばれる [12])は平行になる. また, 模様と帯の山折り線との角はねじり角 [13] と呼ばれる.

2.2 花紋スモッキングの組合せ

折り紙の数理では任意の正多角形に対して花紋折りを造形できることが知られている [13]. 昔から親しまれてきた花紋折りでは折り後に全ての帯が1点で交わるが, そうでないものは擬花紋折りと呼ばれる [2]. どちらも帯をねじるように折って造形するため, 両者はねじり折りとも呼ばれる [13].

ねじり折りの展開図を連結する問題は折り紙の数理で研究されてきたが [8, 13], 著者らは折り線への山谷割当てが指定されたねじり折りの展開図を山谷割当てを保存しながら互いの帯を共有するように配置する問題として花紋スモッキングの組合せを捉える枠組みを提案した [2]. また, 帯の交差が平坦な模様の造形を妨げることに着目して造形できる模様の形状を拡張するとともに, 帯

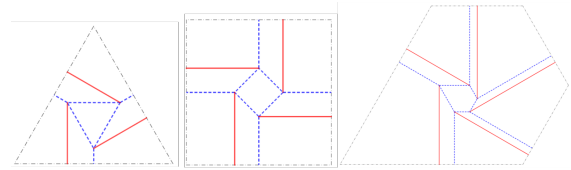


図3 ねじり折りに対するモジュールの例

が交差する箇所へのねじり折りの挿入を繰り返して展開図を作成するアプローチを提案した [3].

2.3 ねじり折りに対するモジュール

逐次的にねじり折りを挿入するだけでは帯の交差による被服の表面のしわをなくすための試行錯誤が多くなり, 花紋スモッキングを装飾できる布の大きさが限られてしまうという課題に対し, 著者らは花紋スモッキングの展開図を作成する際の単位としての「ねじり折りに対するモジュール」を定義し, モジュールの結合を通じた展開図の作図を提案した [6]. ねじり折りに対するモジュールは以下で定義される.

定義 1. [6] 凸な多角形とその帯を含み以下の条件を満たすものを, ねじり折りに対するモジュールと呼ぶ.

- i) ねじり折りの帯とモジュールの辺は直交する.
- ii) ねじり折りの多角形と相似である.

図3にモジュールの例を示す. 図3で, 青の谷折り線の多角形である模様とその帯から成るねじり折りを取り囲む黒の一点鎖線の領域がモジュールである. 凸な多角形の種類は, 任意の頂点数の正多角形, 任意の三角形 [2], 正多角形を貼り合わせた多角形 [3] である. また, ねじり折りに対するモジュールを結合し(同じ長さのモジュールの辺を貼り合わせて帯を共有すること), モジュールを結合したユニットをタイルと見なすことで, 合同変換によるタイリングを活用したデザインの枠組みを提案した. なお, 折り紙の展開図は折り線とその交点からなる平面グラフであり, モジュールの辺や点は別のものとして表現されるが, 作図の際は重畳表示している.

2.4 関連研究

展開図からの折り途中の状態の可視化に対しては, 折りに応じた微少な変化を数値計算して描画するアプローチがある. Freeform Origami [14] は運動学に基づく折り途中の状態の制約条件を線形方程式として表現し, 共役勾配法を用いて制約を満たす解を求めて描画する. ま

た, Origami Simulator[15] ではバネモデルや素材のヤング率なども導入し, 運動学に加えて運動力学も考慮した物理シミュレーションを行うとともに, GPU を用いて高速な描画を実現している.

ねじり折りを組み合わせた平織りの展開図の生成に対しては, タイリングを用いて平面を敷き詰めた図形を生成し, この図形の縮小と回転に基づく手法 [16] を実装する Tess[8] がある. また, 平織りの展開図を三角形のねじり折りの集合と捉え, 平坦折り可能な別の展開図にパラメトリックに変形する手法 [17, 18] が提案されており, この手法を実装する Triangle Twist Pattern Maker[19] も公開されている. 三角形の接合による多角形のパターンやタイリングを用いた展開図の生成なども扱われているものの, 折りの過程の可視化は扱われてはいない.

展開図として表現する対象は限定されるものの, 本研究ではそれぞれの模様を布の表面の装飾として造形する花紋スモッキングに対し, モジュールに基づく手法 [6] のもとで折りの過程を可視化する作図を扱う. 運動学や運動力学に基づく数値計算ではなく, 角度と長さという幾何オブジェクトの基本的な性質に着目し, 鏡映や回転などの作図における基本的な操作だけを用いることにより, 簡単な幾何学操作で実現できるため折りの過程の可視化の実装が容易になると期待される.

3 花紋スモッキングの動的可視化

3.1 折りの様子を可視化するための作図

ねじり折り (模様とその帯) は全ての帯をねじるようにして折ることで造形される [13]. 金属に対する剛体折りとは異なり, ねじるために折り途中では多少伸縮するものの, 紙や布は破れないため折り前と折り後で帯の長さは等しくなる. また, ねじり角は模様ごとに異なるが, 模様の折り線での鏡映変換により, 折り前後で帯の方向はねじり角の 2 倍変化する. さらに, ねじり折りを組み合わせてデザインした場合 [2, 3, 6] は, 全てのねじり折りを一斉に折る必要がある.

全ての模様が一斉に造形される様子を可視化するため, 全ての帯をねじるように折る代わりに, 全ての模様を一斉に回転させるとともに, 折りの程度を表す模様の回転に応じて折り途中の様子が可視化されるよう, 2.3 節で述べたモジュールに基づき展開図を作成する手法 [6]

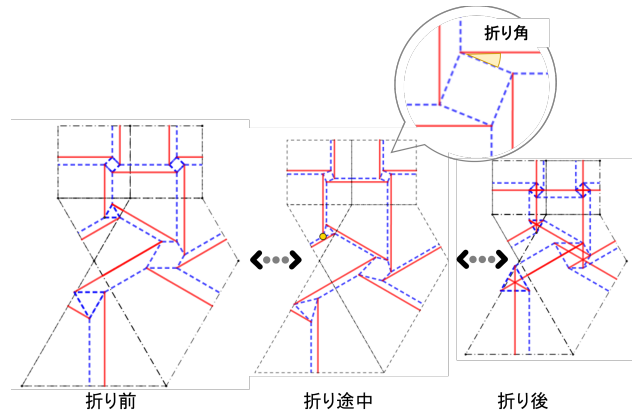


図 4 動的可視化を実現する作図の例

を拡張して作図するアプローチを提案する. 折りの程度に応じて動的に描画されるように作図した例を図 4 に示す. 図 4 左は折り前, 図 4 右は折り後の状態であり, 図 4 中央は折り途中に対応する. 図 4 右で折り線が交差しているように, 折り前は展開図に対応するものの, 折りの程度に応じて描画されるものは展開図ではない. 物理的に造形する際は帯を立体的にねじるが, 展開図と同様に 2 次元で折り途中の様子も表現するために, 本稿では折りの程度に応じて模様の変換と帯との角度が変化するよう作図し, この角度を折り角と呼ぶ. さらに, 折り前と折り後で全体の大きさも変化するため, 折り途中の様子も変化するよう作図する.

幾何的なオブジェクトを作図するためには, 一般に**角度**と**長さ (スケール)**を指定する必要がある. ねじり折りでは折り途中で伸縮する必要があるため折り線の長さは常に等長とは限らないが, 本稿では折り線の長さはそれぞれ折り前と折り後では等しくなるよう作図する. また, モジュールを連結した状態は維持するがそのスケールは変わるよう作図することで花紋スモッキングの動的な可視化を行う. 上記の制約を満たす作図が常に可能であることの証明は今後の課題であるが, 本稿では以下の規則で作図することを提案する.

- a) **模様** 全ての模様を一斉に回転させるために**折り係数** $f \in [0, 1]$ を定義し,

$$\text{模様の回転角} = \text{ねじり角} \times 2f \quad (1)$$

で定める角度で模様を回転させる.

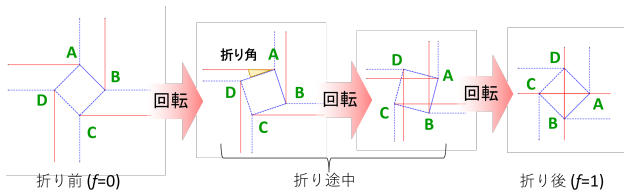


図5 作図した展開図の可視化の例：ねじり折りの模様は折り角に応じて回転して描画される。

b) 帯 回転させた模様に対する折り角を

$$\text{折り角} = \text{ねじり角} - (\text{ねじり角} \times 2f) \quad (2)$$

で定義し、模様から伸びる帯の方向を定める。他方、帯の長さは折り前と折り後で同一とする。

上記の規則で作図した例を図5に示す。式(2)の折り角が折り係数に応じて変化するため、図5のように作図した模様は回転して描画される。提案法で作図したねじり折りは以下の性質を持つ。

a) により、各模様は折り前から折り後までねじり角の2倍回転するが、回転は合同変換であるためそのスケールは変わらない。なお、模様のスケールにはそれぞれ自由度があるが、ねじり角に応じて帯の中から模様のスケールを定めたり、逆に模様のスケールから帯の中を定めることができる。このため、帯の共有に基づいてねじり折りを組み合わせた展開図では、1つの模様のスケールを定めるとその帯の中が定まり、また、帯の共有を通じて全ての帯の中が定まるためそれぞれの模様のスケールも定まる。

b) で定める折り角から帯の山折り線の方が定まり、折り前後で長さも変わらないため、模様から伸びる帯が定まる。また、方向は変わるものの長さが変わらないため、模様が重なることがないかを視覚的に確認できる。

上記の性質に加えて、以下が成り立つ。

定理 1. 規則 a), b) に基づいて作図する展開図では、折り係数を変えても帯の方向は不変である。

定理 1 の証明を付録 A に示す。

さらに、山折り線と谷折り線から構成される展開図に加えて、ねじり折りに対するモジュールを作図する。定義 1. ii) からモジュールとその模様は互いに相似であるが、模様と同様にモジュールのスケールにも自由度があ

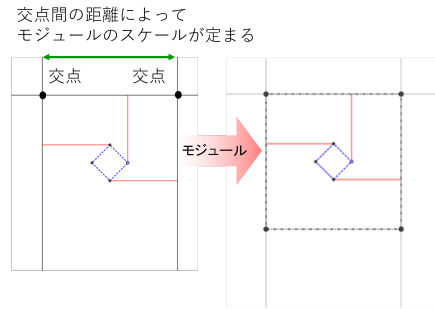


図6 単独のモジュールの作図：交点間の距離に応じてモジュールのスケールを定める。

る。帯の共有を通じて模様のスケールが帯の中から定まると同様に、モジュールの結合を通じて貼り合わせる辺の長さからモジュールのスケールが定まる。他方、最初に作図するねじり折りのように結合していない単独のモジュールは別途スケールを定める必要がある。このため、結合されるモジュールと連結していない単独のモジュールは分けて作図する。

c1) **結合されるモジュール** 貼り合わせる辺の長さでスケールを定め、模様と相似なモジュールを定義 1. i), ii) に従って作図する。

c2) **単独のモジュール** 模様の隣接する3つの頂点を選び、各頂点の式(2)の折り角の方向への山折り線と、それぞれの山折り線に直交する直線を作図する(定義 1. i)). これらの直線の交点からモジュールのスケールを定め、定義 1. ii) に従って模様と相似なモジュールを作図する(図6)。

平行でない直線は平面上で交わるため、c)での3つの直線から誘導される2つの交点に基づいてモジュールのスケールを定めることができる。たとえば図6では正方形の模様の3つの頂点から山折り線を伸ばし、それぞれの山折り線に直交する3つの直線を作図すると、この3つの直線に対する2つの交点が必ず存在する。定義 1. ii) からモジュールの形状は模様と相似であるため、交点間の距離に応じてモジュールのスケールが定まる。

なお、模様のスケールは折り係数に不変であるが、模様の回転に応じて交点も変化するため、モジュールのスケールは折り係数に応じて動的に変化する。上記の規則で作図したモジュールに対しては以下が成り立つ。

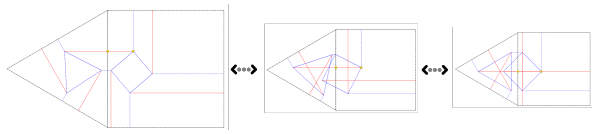


図7 模様が重なり布の表面の装飾として造形できない場合

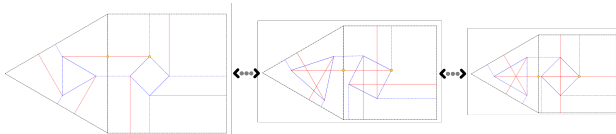


図8 配置を変えて模様が重ならないようにした場合

命題 1. モジュールを結合した図形は折り係数を変えても互いに相似であり、辺の方向は変わらない。

命題 1 の証明を付録 B に示す。

3.2 花紋スモッキングの作図プロセス

定理 1 と命題 1 から、図 4 に示すように折り係数に応じて花紋スモッキングを折る様子が動的に描画される。ただし、ねじり折りを組み合わせる場合は、局所平坦折りなどの制約を満たしても模様配置に自由度が残ることが多い。このため、それぞれのねじり折りの形状を定めても、一般には花紋スモッキングを一意に作図することはできない [6]。なお、平面上の各模様の位置には 2 つの自由度しかなく、帯を共有する度に自由度は 1 つ減るため、他の模様と 2 つの帯を共有する模様の位置は一意に定めることができる。また、タイリングのように合同変換を適用する場合には、合同変換した帯についても確認する必要がある。

モジュールを結合した後に自由度が残る場合は模様の配置を操作できるため、同じ 2 つのモジュールを結合しても模様の平行移動に対応する自由度により配置が異なる例を図 7、図 8 に示す。折り係数を変化させて途中の状態を描画することで、模様が重なり布の表面の装飾として花紋スモッキングを造形できない場合 (図 7) を確認できる。この例では全体的な配置以外に残る自由度が 1 と少ないが、図 14 に示す例では全体的な配置以外の自由度が 6 も残る。意匠の観点から自由度を活用して模様の配置をそれぞれ変更してデザインする場合には、折りの過程を確認することは模様が重ならず布の表面の装飾として造形できることの確認に役立つと考えられる。

ねじり折りに対するモジュールを単位として、折り途

- 1: 最初のねじり折りとそのモジュールを作図
- 2: **while** 意匠の観点から変更が必要 **do**
- 3: 追加するモジュールを作図
- 4: **if** 帯の交差がない **then**
- 5: 帯の山折り線上の任意の位置を基準とし、ねじり折りとそのモジュールを作図
- 6: **else**
- 7: 帯の交点で折り前後で山折り線の長さが不変な点を選び、ねじり折りとそのモジュールを作図
- 8: **end if**
- 9: **end while**

図 9 花紋スモッキングの作図プロセス

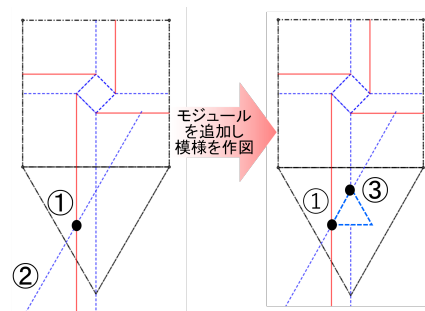


図 10 モジュールを追加し模様を作図 (帯の共有なし)

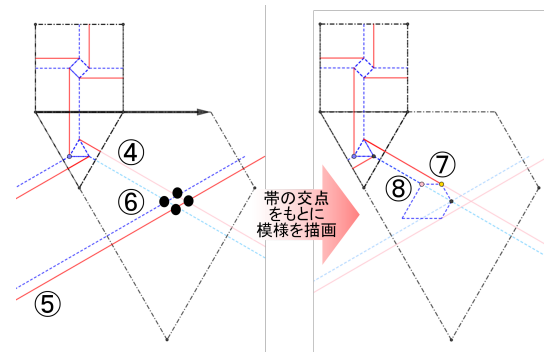


図 11 モジュールを追加し模様を作図 (帯の共有あり)

中の様子を動的に可視化するための花紋スモッキングの作図プロセスを図 9 に示す。合同変換によるタイリングを用いて作図する場合は、合同変換の種類やタイルの形状は意匠の観点から決めることになる [6]。なお、合同変換の対称性に基づく 2 次元の繰り返しパターン分類は壁紙群と呼ばれ、対称性の組み合わせによって 17 種類の壁紙群には pm などの名称が定められている [4]。

図 4 を例として作図する様子を説明する。図 4 の展開図は鏡映と並進による壁紙群 pm [4] のタイルであるた

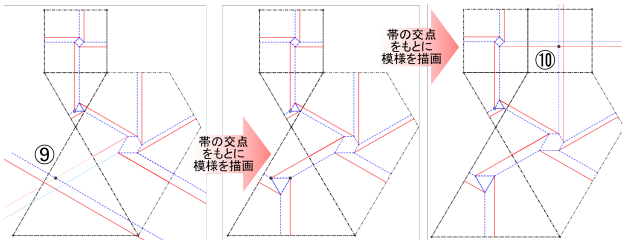


図 12 モジュールを追加し模様を作図 (帯の共有あり)

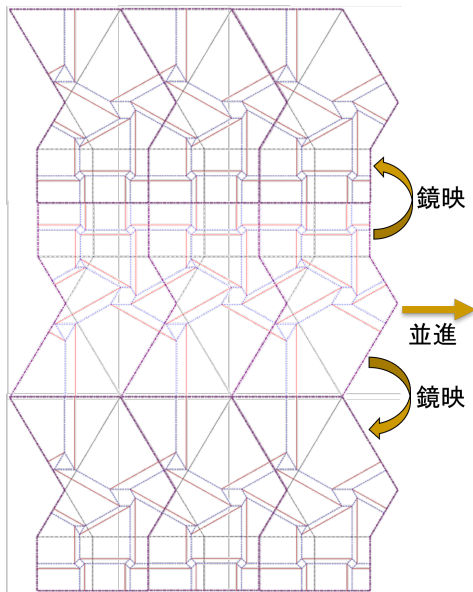


図 13 壁紙群 pm によるタイリングの例

め、並進で接するタイルの辺でも帯を共有するようにねじり折りを配置する必要がある [6]. 図 4 のタイルに鏡映と並進を適用したタイリングの例を図 13 に示す.

まず、図 6 のように最初のねじり折りとそのモジュールを作図した. 最初のねじり折りに対するモジュールはスケールの自由度があるため 3.1 節の **c2)** で作図した. 次に、図 10 のように正三角形の模様に対するモジュールを追加した. 追加するモジュールのスケールは貼り合わせる辺の長さで定まるため 3.1 節の **c1)** で作図した. この場合は帯の交差がないため、帯の山折り線上の任意の点 (図 10 の①) を基準とし、追加する模様の折り角から定まる谷折り線 (図 10 の②) を作図した (図 10 左). 式 (2) の折り角を用いるため、この谷折り線は折り係数に応じて回転することに注意されたい. また、帯の共有を実現するためには模様の隣接する 2 つの頂点が帯上にある必要があるため、2 本の谷折り線の交点から模様の

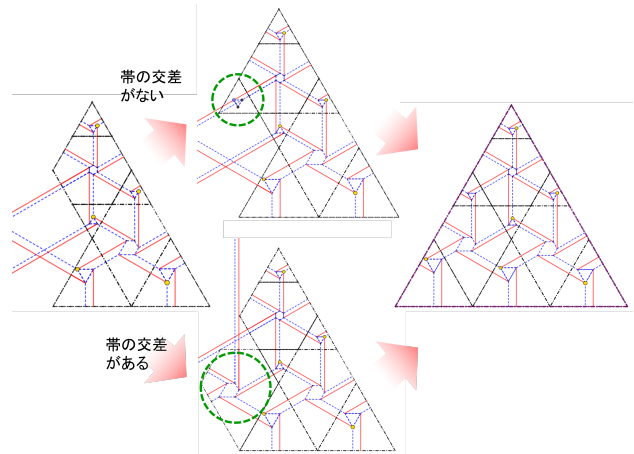


図 14 モジュールの追加順序

もう一つの頂点 (図 10 の③) が定まる. この 2 点を結ぶ線分から模様のスケールが定まるため、モジュールのねじり折り (模様とその帯) を作図した.

さらに、図 11 のようにモジュールを追加した. この場合は、作図済みの模様から伸びる帯 (図 11 の④) に加えて、並進を適用した帯 (図 11 の⑤) も考慮する必要がある. 2 つの帯が交差するため 4 つの交点が生じる. 折り係数に応じて模様が回転するため交点の位置も変化するが、3.1 節の **b)** から折り前と折り後で長さが同じ帯上の点 (図 11 では⑥) を選び、この点をもとに模様を作図した. 帯上に制約される 2 つの頂点 (図 11 の⑦と⑧) に基づき、モジュールに相似な模様とその帯を作図した. 同様に、その後もモジュールの追加を繰り返し (図 12), 図 4 に示した作図を行った.

なお、同じ作図に対してもモジュールの追加順序には自由度があるため、図 9 の 3 行目で追加するモジュールを一意に定めることはできない. 図 14 に必ず鏡映面が集まる 3 回対称軸を持つ壁紙群 $p3m1$ [4] の対するタイル (図 14 の右) を作図した例を示す. 図 14 左の作図に対して、帯の交差がない箇所にモジュールを追加する場合 (図 14 の中央上) と帯の交差がある箇所に追加する場合 (図 14 の中央下) が考えられるが、どちらから図 14 右に示した作図をすることは可能である. ただし、展開図全体における模様の位置に対する自由度の制約から、前者ではいずれ 3 つ以上の帯間の整合性を満たすように作図する必要が生じることになる. このため、帯の交差か

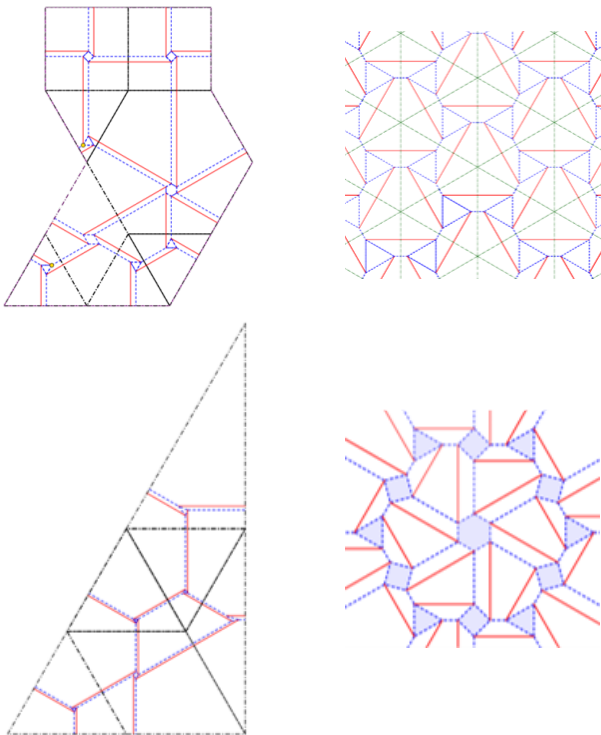


図 15 動的な可視化が可能な他の作図の例 (左上: 別の pm, 左下: p6m, 右上: p6, 右下: Fujimoto's Twist)

ら模様的位置が定まるモジュールを優先することが望ましいと考えられるが、証明などは今後の課題である。

3.3 他の作図例

図 4 と図 14 の作図に加えて、他の作図例を図 15 に示す。同じ壁紙群に対するタイリングを用いる場合でも、異なるモジュールを結合して作図することは可能である [6]。図 4 は壁紙群 pm に対する作図例であるが、図 15 左上に別の作図例を示す。これらの例からも、花紋スモッキングの作図を一意に定めることはできないことがわかる。図 15 の左下と右上はそれぞれ 60 度回転と鏡映を含む壁紙群 p6m, 60 度回転を含むが鏡映を含まない壁紙群 p6 に対する作図例である。また、図 15 の右下はスモッキングで有名な Fujimoto's Twist[1] の動的な可視化を行う作図例である。

4 実制作を通じた検証

4.1 GeoGebra を用いた作図

幾何オブジェクトを操作できる GeoGebra [10] を用いて花紋スモッキングを作図する様子を図 16 に示す。赤の実線は展開図の山折り線、青の破線は谷折り線を表す。

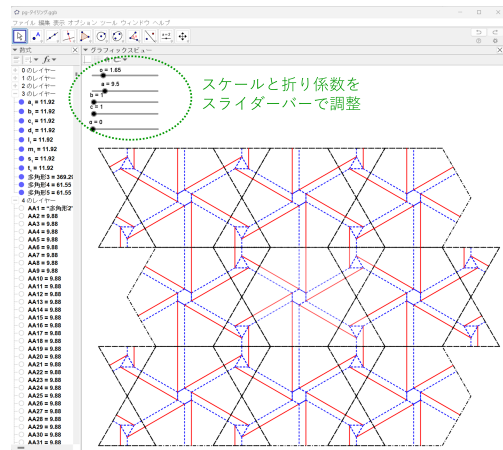


図 16 GeoGebra を用いた作図の様子



図 17 花紋スモッキングを施したバッグ

また、黒の一点鎖線はモジュールの辺であり、図 16 に示す例は壁紙群 pg[4] に対するタイリングを用いて作図した。模様とモジュールのスケールや、式 (1) の折り係数などは、作図後に図 16 に示すスライダーバーで変更できるように実装した。

4.2 服飾雑貨への活用例

本稿のアプローチを服飾雑貨へ活用して検証するために、布の表面にスモッキングを施すとともに、帯の折りたたみを通じてサイズを可変にできるバッグを制作した (図 17)。制作したバッグには図 16 に示すようにデザインした花紋スモッキングを施しており、図 17 左は折り前、右は折り後、中央は折り途中の様子である。

モジュールやタイルは制作時の部品にも対応するため、文献 [6] と同様、市販の布をタイルごと裁断し、裁断した布にスモッキングのパターンを転写した (図 18)。次に、裁断した布をパッチワークのように縫合して必要

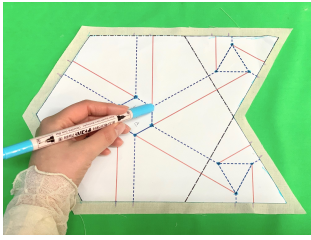


図 18 スモッキングのパターンを布へ転写



図 19 帯を固定するためのマジックテープ

なサイズを覆うパターン付きの布を造った。最後に、転写したパターンを縫い絞りで造るプリーツを平坦にして表面の模様をつくり、バッグを制作した。布は柔らかいため折り後の形状を維持することが難しいが、服飾の模様のようにパターンの点を糸で固定するとバッグのサイズを変更できなくなってしまう。このため、マジックテープを用いることにより、折り後の帯を固定したり折り前の状態に戻せるように制作した。図 19 左はマジックテープで帯を固定する様子、図 19 右はマジックテープをはがして折り前の状態に戻した様子を示す。また、布は柔らかいため、帯(服飾ではプリーツと呼ばれる)の折りたたみを維持しながらバッグの容量を変えるには慣れが必要であるが、図 20 のように折り途中の様子を確認することで変更しやすくなった。

花紋スモッキングの服飾雑貨への活用例としては、展開図から生成した紐をバッグの持ち手に用いて容量を変更できるようにした例もある [20]。しかし、装飾の意匠としては正方形のねじり折りが 1 つだけと非常にシンプルであった。また、持ち手の役割をする紐の引き絞りがパターンを縫い絞りに対応するため布の折りたたみでプリーツをつくりやすくなるものの、プリーツを整えて模様を造ったり模様を固定したりすることは扱われていなかった。他方、提案法により折り途中の様子を確認することで模様を造形する際のプリーツの動かし方をイメージしやすくなると期待され、また、マジックテープを用いることでプリーツを固定することもできるようになった。ただし、花紋スモッキングの制作支援としての定量的な評価は今後の課題として残されている。

4.3 考察

布の表面の模様となる花紋スモッキングの造形の妨げとなる模様の重なりを確認することに向けて、本稿では花紋スモッキングにおける折りの程度を動的に可視化

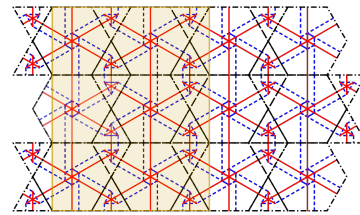


図 20 GeoGebra を用いた折り途中の確認

することを提案した。式 (1) の回転角と式 (2) の折り角を定義し、模様の回転と帯の長さを考慮した作図のアプローチを提案した。壁紙群 pm に対する図 4 の展開図と壁紙群 $p3m1$ に対する図 14 の展開図は文献 [6] でも報告されているが、折り前の展開図で帯の交差を考慮することに加えて、本稿では模様の回転と帯の長さも考慮して作図した。さらに、17 種類の壁紙群のうちの $p6m$ と $p6$ に対する作図の例も図 15 で報告した。

角度と長さという幾何オブジェクトの基本的な性質に着目し、鏡映や回転などの作図における基本的な操作だけを用いているため、提案法では 2 次元への射影として折りの途中の様子を表現している。しかし、物理的に造形する際は帯を立体的にねじるため、射影では面が重なるように見えても折りたためる場合もある。平織りでは面の重なりを用いたデザイン例もあるため [21, 17, 18]、画像認識のように幾何オブジェクト間の立体的な関係も考慮できるように拡張することは今後の課題である。

被服の装飾や服飾雑貨に用いる布は薄くて柔らかいことが多いため、折り後の形状を保持することが難しい。このため、4.2 節で報告した服飾雑貨への活用例ではマジックテープを用いて折り後の帯を固定できるように制作した。マジックテープに加えて、たとえば形状記憶可能な布を用いることで折りたたみを通じた容量の変更がしやすくなる可能性もある。布の折りたたみや折り後の形状の維持も考慮して適切な素材を用いることは今後の

課題である。

また、上記のように布は薄くて柔らかいことが多いため、本研究では布やマジックテープなどの厚みは考慮していない。しかし、金属などの堅い素材を折りたたむ構造物のデザインでは厚みを考慮することも重要になるため、厚みを考慮した剛体折りの研究なども提案されている [22]。折りたたむ素材の厚みも考慮した折り途中の状態の可視化は今後の課題として残されている。

5 まとめ

折りたたみに応じて模様と帯が変化することで折り途中の様子が可視化されるように、本稿では模様の回転と帯の長さに基づいて花紋スモッキングを作図するアプローチを提案した。提案法では帯をねじるように折る代わりに模様を一斉に回転させるとともに、折り途中の様子を表す帯が回転に応じて定まるように作図する。提案法による作図の幾何的な性質を示すとともに、この性質に基づいて作図するプロセスや作図例を示した。

本稿のアプローチを GeoGebra[10] を用いて実装し、花紋スモッキングを施した服飾雑貨を制作して検証した。制作したバッグではマジックテープで折り後の帯を固定するため、折り途中の様子を確認しながら折りたたむことでバッグの容量を変えることができる。今後は他の服飾雑貨への応用や定量的な評価に取り組んでいきたい。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科研費 (No.21K12542) の補助による。有益なご指摘を賜りました査読者の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] Jeffy Rutzky and Chris K. Palmer. *SHADOW-FOLDS*. Kodansha America, 2011.
- [2] 吉田哲也, 藤崎千晶. 花紋折りに基づくスモッキングのパターン作成と組み合わせのデザイン. 芸術科学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 9–24, 2020.
- [3] 冨田美彩, 吉田哲也. 正多角形の貼り合わせを用いた花紋スモッキングの組み合わせの拡張. 芸術科学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 40–48, 2020.
- [4] 川崎徹郎. 文様の幾何学. 牧野書店, 2014.
- [5] Branko Grünbaum and G.C. Shephard. *Tilings and Patterns*. Dover Books on Mathematics, 2016.
- [6] 吉田哲也, 冨田美彩. ねじり折りに対するモジュールに基づく花紋スモッキングの組合せ. 芸術科学会論文誌, Vol. 21, No. 2, pp. 77–86, 2022.
- [7] トーマス・ハル. ドクターハルの折り紙数学教室. 日本評論社, 2015.
- [8] Tess. <http://www.papermosaics.co.uk/software.html> (2023/9/15 参照).
- [9] Marshall Bern and Barry Hayes. The complexity of flat origami. In *Proc. of 7th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithm (SODA'96)*, pp. 175–183. SIAM, 1996.
- [10] Geogebra. <https://www.geogebra.org/> (2023/6/5 参照).
- [11] Reinhard Diestel. *Graph Theory*. Springer, 2006.
- [12] 川崎英文. 平坦折り紙の山折り線と谷折り線の関係. 数理解析研究所講究録, Vol. 2044, pp. 193–198, 2017.
- [13] Robert J. Lang. *Twists, Tilings, and Tessellations*. A K Peters/CRC Press, 2017.
- [14] Tomohiro Tachi. Freeform variations of origami. *Journal for Geometry and Graphics*, Vol. 14, No. 2, pp. 203–215, 2010.
- [15] Amanda Ghassaei, Erik Demaine, and Neil Gershenfeld. Fast, interactive origami simulation using gpu computation. In *Origami 7 (7th International Meeting of OSME)*, pp. 1151–1166, 2018.
- [16] Robert J. Lang and Alex Bateman. Every spider web has a simple flat twist tessellation. In *Origami 5: the 5th International Meeting of OSME*, pp. 455–473. CRC Press, 2011.
- [17] Yohei Yamamoto and Jun Mitani. Continuous deformation of flat-foldable crease patterns via interpretation as set of twist-patterns. *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 979–991, 2023.
- [18] 山本陽平, 三谷純. 文様折り紙テクニック. 日本評論社, 2023.
- [19] Triangle twist pattern maker. [http:](http://)

//www.cgg.cs.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_y/orihole/application/ttp_maker.html
(2023/9/15 参照).

- [20] 吉田哲也, 藤田真奈美. 花紋スモッキングの展開図に基づく紐の生成. 芸術科学会論文誌, Vol. 20, No. 1, pp. 10–20, 2021.
- [21] Eric Gjerde. *ORIGAMI TESSELLATIONS*. CRC Press, 2009.
- [22] Yan Chen, Rui Peng, and Zhong You. Origami of thick panels. *Science*, Vol. 6246, pp. 396–400, 2015.

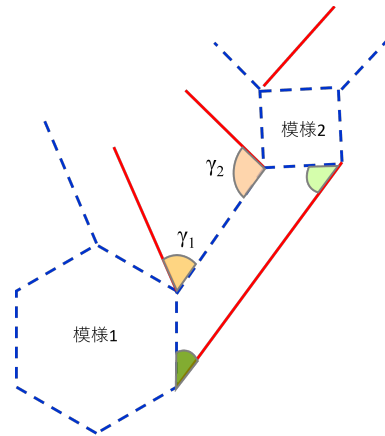


図 21 帯の方向の不変性



吉田 哲也

1991 年東京大学工学部航空工学科卒業. 1993 年エジンバラ大学大学 MSc 修了. 1994 年東京大学大学院修士課程修了. 1997 年東京大学大学院博士課程修了. 工学博士. 同年大阪大学大学院基礎工学研究科助手. 2001 年大阪大学産業科学研究所助手. 2004 年北海道大学大学院情報科学研究科助教授. 2014 年奈良女子大学大学院教授. 主に機械学習, データマイニング等に興味を持つ. 人工知能学会, 情報処理学会, 芸術科学会, 建築学会会員.



中西彩子

2023 年奈良女子大学生活環境学部卒業. 折り紙の工学的応用に興味を持つ.

付録 A 定理 1 の証明

証明. ねじり折りの定義から, それぞれのねじり折りでは全ての帯のねじり角が等しいため, 式 (2) で定義する折り角も全て等しい.

まず, 最初に作図するねじり折りについて考える. 模様は折り係数に応じて式 (1) だけ回転するが, 帯は回転した模様に対して相対的に式 (2) で定める方向となる. このため, 固定座標系に対しては, 式 (1) と式 (2) を足し

た角度が帯の方向となるため, 折り係数を変えても不変である.

次に, 帯の共有に基づいてねじり折りを組み合わせた展開図を考える. 展開図の多角形の頂点の次数はすべて 4 で帯は平行であるため, 模様の各頂点においては, 川崎定理から模様の内角に向き合う角度 (図 21 の γ_1 や γ_2) は $\pi -$ 模様の内角 となるため不変である. 最初に作図したねじり折りを図 21 の模様 1 に対応させて帰納法の基礎段階とみなすと, このねじり折りの帯の方向は折り係数を変えても不変である. また, この帯を共有するねじり折り (図 21 の模様 2) は, 折り係数に応じて模様は回転するものの, γ_2 が不変であるため, 模様 2 から伸びる帯の方向は変わらないことになる. よって帰納段階も成り立つ. このため, 帯の共有に基づいてさらにねじり折りを組み合わせた展開図でも定理 1 が成り立つ. \square

付録 B 命題 1 の証明

証明. 定理 1 から, a) と b) に基づいて作図した展開図では帯の方向は不変である. モジュールの定義 1. i) からモジュールの辺は帯と直交するため, モジュールの辺の方向も折り係数を変えても不変となる.

次に, 3.1 節で述べたように, 折り係数に応じてモジュールのスケールも変化する. しかし, 定義 1. ii) から各モジュールの形状はその中の模様と相似であり, モジュールの結合によりモジュール同士の関係も変わらないため, モジュールを結合した図形は折り係数を変えても互いに相似である. このため, 命題 1 が成り立つ. \square