

花紋スマッキングの展開図に基づく紐の生成

吉田哲也¹⁾ (正会員) 藤田真奈美¹⁾ (非会員)

1) 奈良女子大学

String Generation based on Petaloid Smocking Crease Pattern

Tetsuya Yoshida¹⁾ Manami Fujita¹⁾

1) Nara Women's University

概要

花紋スマッキングとは設計図に対応するパターンに指定される点をすくい縫って布を縫い絞り，縫い絞りで生成されるプリーツを整えて布の表面に花卉のような模様を造形する手芸技法であるが，布は柔らかいためプリーツの形状を整えて模様を制作することは容易ではないという課題がある．花紋スマッキングの制作支援に向けて，本稿では展開図から紐を生成する手法を提案する．花紋スマッキングに紐を通すことで，模様を装飾する制作物で折り前と折り後の形状を行き来しやすくなると期待される．これを実現するために，プリーツを平坦にする際に模様の頂点に重なる箇所を展開図に基づいて求める手法を提案してその性質を示すとともに，紐を生成するアルゴリズムを示す．提案法を **GeoGebra** を用いて実装し，装飾としての花紋スマッキングに加えて紐を用いる服飾雑貨の例としてバッグを制作した．花紋スマッキングに通した紐を用いることでバッグの容量を変える際に模様をつくりやすくなった．

Abstract

Petaloid smocking is a handcraft technique of constructing flower shapes over the surface of cloth based on sewing and pleats. However, since cloth is too flexible to sustain the shape, it is not easy to construct desired shapes on cloth by flattening and arranging pleats generated via sewing. Toward supporting the construction of petaloid smocking, we propose to generate strings for petaloid smocking based on its crease pattern. Based on the constraints on how pleats should be flattened according to the crease pattern, we propose algorithms to generate strings for enforcing the folding of pleats. The proposed method is implemented using **GeoGebra**, and applied to the design of a bag with strings. The generated strings were effective to transform the shape of the bag with petaloid smocking.

1 はじめに

布から被服を制作する際には、設計図に対応する型紙（パターンとも呼ばれる）に従って布を裁断し、裁断した布を針と糸で縫いとめるため、「裁縫」と呼ばれてきた。手作業で被服を制作する営みの1つとして、布を縫ってから糸を引き絞ること（以下、「縫い絞り」と呼ぶ）で生成されるプリーツ（衣服のひだや折り目）から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。著者らは、プリーツを整えて布に模様を造る操作と造形される模様に対して、折り紙に基づくアプローチを提案した [1, 2]。折り紙の花紋折りとの対比から、布の表面に造形される花紋の形状をした模様とその造形操作は「花紋スモッキング」と呼ばれる。折り紙の造形で設計図の役割を果たす展開図に着目して、花紋スモッキングのパターンを展開図から作成する手法と組み合わせのデザインを報告した。

展開図から花紋スモッキングのパターンをデザインすることは可能となったが、すくい縫う箇所を指定するパターンには縫い絞った布から模様を制作する手順は表現されていないという課題がある。また、紙や金属などと異なり布は柔らかく形状を維持することが困難なため、布の縫い絞りで生成するプリーツの形状を整えて模様を制作することは容易ではないという課題もある。

花紋スモッキングの制作支援に向けて、本稿では展開図から紐を生成する手法を提案する。花紋スモッキングに紐を通すことで、模様を装飾する制作物で折り前と折り後の形状を行き来しやすくなると期待される。これを実現するために、プリーツを平坦にする際に模様の頂点に重ねる箇所を花紋スモッキングの展開図に基づいて求める手法を提案する。文献 [3] では提案手法の正当性を示していなかったが、本稿では生成する紐の性質を証明とともに示す。また、以前は模様の頂点数が偶数と奇数の場合を個別に扱っていたが、本稿では手順を整理して可読性を向上した紐の生成アルゴリズムを述べる。

提案法を幾何学ソフトウェア GeoGebra を用いて実装し、装飾としての花紋スモッキングに加えて紐を用いる服飾雑貨の例としてバッグを制作した。これまで花紋スモッキングの形態を変えることは扱われてこなかったが、紐を通すことでバッグの容量を小さくする際に模様をつくりやすくなった。文献 [3] ではバッグの制作過程を示していなかったが、本稿ではバッグをデザインする過程と布から実制作する過程も述べる。

2 節で関連研究を述べ、3 節で花紋スモッキングを説明した後に、4 節で花紋スモッキングの展開図から紐を生成する手法を提案する。5 節で GeoGebra を用いた実装と服飾雑貨の制作について述べ、6 節でまとめと今後の展望を述べる。

2 関連研究

被服や服飾の制作では型紙やパターンの作成を支援するアパレル CAD (Computer Aided Design) が従来から用いられてきた [4]。近年では、インタラクティブな操作に基づいてパターンのモデリングと編集を行うこと [5] や、3D スキャナを用いて取得した人体の3次元情報を用いる研究がある [6]。また、被服を着た際の動きなどを物理モデルから予測する着装シミュレーションに関する研究もある [7]。

手作業で造形する手芸では、伸縮性に富む素材を編む技法を対象として、糸を手で編む“あみぐるみ”に対するモデリングと制作支援インタフェースが提案された [8]。また、細長いバルーンをひねって造形するバルーンアートを対象とする研究では、バルーンアートの構造をグラフ理論に基づいて定式化して用いる手法が提案された [9, 10]。

折り紙は昔から手芸として親しまれてきたが、折り紙の数理的な特徴付けや応用などについても様々な研究がなされている [11, 12]。産業応用の観点からは金属などの素材を折りたたむ際に重要となる剛体折りが扱われることが多い [13]。また、多角形とそれをねじるようにして折る展開図を周期的に連結する問題は、平織り (Origami Tessellation) と呼ばれる分野で盛んに研究されてきた。たとえば、回転と縮小の操作を通じて Tessellation の展開図を生成する研究 [14, 15] があり、ソフトウェアも公開されている [16]。

3 花紋スモッキング

3.1 スモッキング



(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

スマッキングとは、布を縫い縮めて集めたギャザーを巻きこむように縫って「かがり」を入れたり、縫い絞ったプリーツを浮彫り風にする手芸の技法である [17]。これまでファッションにも多く用いられているが、一般に (1) ベーシックスマッキング (図 1 (a)), (2) イタリアンスマッキング (図 1 (b)), (3) ラティスマッキング (図 1 (c)), の 3 種類に大別される。

スマッキングの造形操作の概略を図 2 に示す。スマッキングでは生地を構成する数本の糸をすくい縫って布を固定する箇所が指定されるが、本稿ではこれをパターンと呼ぶ。図 2 に示すように、Step.1 でパターンを布に転写してから、パターンで指定される点 (図 2 の Step.1 における緑色の点) を順にすくい縫う。次に、すくい縫った全ての点を通る糸を引き締める縫い絞りにより一箇所に集め、すくい塗った糸がほどけないように糸の端をとめる「玉止め」して固定する (Step.2)。最後に、布の縫い絞りで生成するプリーツ (図 2 の Step.3 の左側における布ひだ) を平坦に整えて、布の表面に浮き上がる多角形の装飾 (本稿では模様と呼ぶ) を造形する (Step.3)。

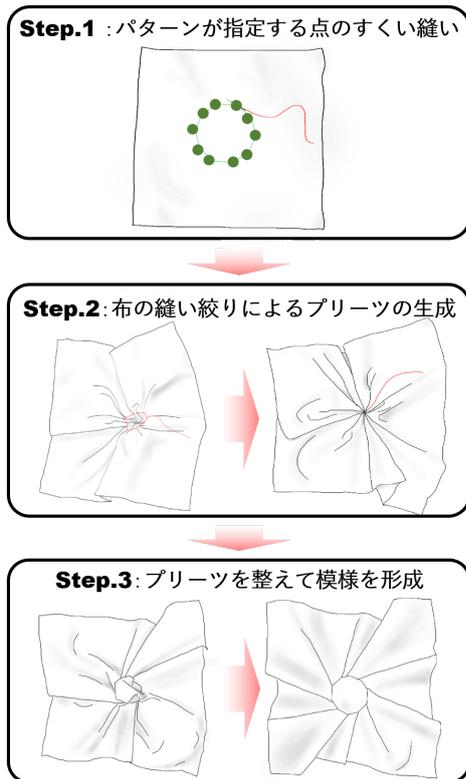
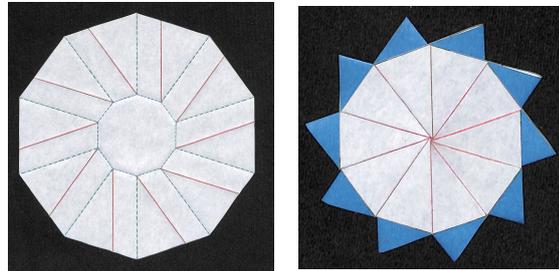


図 2 スマッキングの造形操作

3.2 折り紙に基づくスマッキングの造形操作の表現

折り紙とは紙を素材とする平面グラフを折って造る形状や折り操作のことであり、折り方を指定する線は折り線と呼ばれる。折り紙における平面グラフは展開図と呼ばれ、折り線の折り方には山折りと谷折りの 2 種類がある [18]。本稿では山折りを赤の実線、谷折りを青の破線で表す。

折り紙の展開図の例を図 3 (a) に、この展開図を折り線の山折り、谷折りのラベルに従って造った折り紙を図 3 (b) に示す。図 3 の折り紙は中央の正多角形の模様が花卉の形状に似ているため「花紋折り」と呼ばれる。折り紙の数理では任意の正多角形に対して花紋折りができ、花紋折りの条件や模様の性質などが知られている。



(a) 展開図 (b) 折った後の形状

図 3 花紋折りの例

3.3 花紋スマッキングのパターンと展開図

花紋スマッキングでは展開図の中央の多角形から平行に伸びる一対の山折り線と谷折り線と囲まれる領域が模様を造る際に重要となる。この領域を本稿では「スポーク」*1 と呼ぶ [1, 2]。花紋スマッキングで造る模様を正多角形から一般の多角形に拡張することも行われているが、本稿では対称性に基づいて考察しやすくするために正多角形の場合を扱う。本稿のアプローチを一般の多角形へ拡張することは今後の課題である。

4 展開図に基づく紐の生成

本節では花紋スマッキングの展開図から紐を生成する手法とその性質を述べるが、証明は付録で示す。山折りと谷折りの対称性から、本稿では展開図の正多角形の辺はすべて谷折りとする (図 3 (a) 参照)。

*1 模式図を用いた説明は後述する図 10 を参照されたい。

4.1 花紋スモッキングに対する紐

建材や太陽電池パネルなどに対する剛体折りとは異なり、伸縮可能な布のねじり折りで花紋スモッキングを造るため、プリーツ以外の箇所もねじられて模様になる。しかし、布はねじっただけでは形状を維持することができないため、プリーツを整えて模様を造ること（図2のStep.2）は容易ではないという課題がある。



図4 模様の頂点に重なる箇所を糸で固定した様子

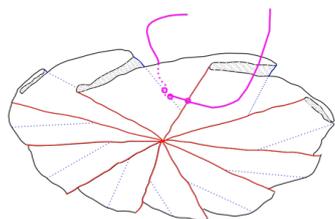


図5 模様の頂点に重なる箇所に糸を通した様子

花紋スモッキングの造形操作における「パターンで指定される箇所を針と糸で縫いとめる」という考え方を一歩進めて、プリーツを平坦にした際に模様の頂点に重ねるべき箇所を展開図から求めることができれば、それらを重ねることで布の表面の模様を制作しやすくなると期待される。これを実現するために、模様の各頂点に重なっている箇所に糸を通し、折りたんだ布を逆に平坦な状態に折り戻した際に糸から造られる形状を観察した。模様の頂点に重なる箇所に糸を通して固定した様子を図4に示す（色付きの糸での玉止め）。また、模様の頂点に重なる箇所に糸を通した様子を図5に示す。

模様の頂点に重なる箇所を糸で縫い止めた状態（図4）からプリーツを平坦な状態に折り戻す（図7参照）と、

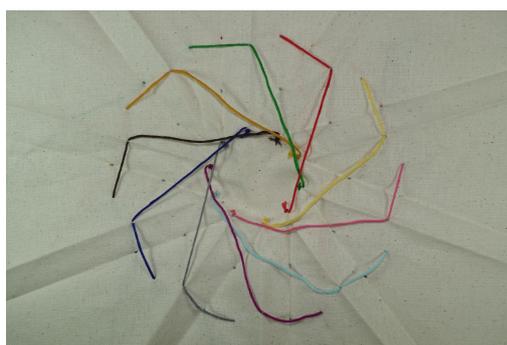


図6 模様の頂点に糸を通した模様を展開してつくられる紐

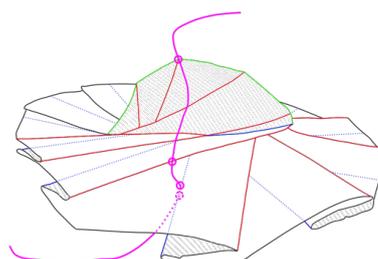


図7 模様の頂点に糸を通してから展開する様子

渦を巻くような形状（図6の色付きの糸）が造られることが観察された。花紋スモッキングの模様となる正多角形の頂点から伸びる渦を巻くような形状を、本稿ではそれぞれ「花紋スモッキングに対する紐」と呼ぶ。紐は正多角形の模様の各頂点に対して生成される（図6では頂点ごとに異なる色の糸で制作した）。

花紋スモッキングの紐は模様に対応する正多角形の頂点を端点とし、その頂点に重なる布の箇所をすべて通る。このため、図2の布の縫い絞りと同様、紐が通る箇所を引き絞って集めればプリーツから模様を制作することが容易になると期待される。このとき、以下が成り立つ。

命題1. 花紋スモッキングに対する紐は、それぞれ、開始点に相当する正多角形の頂点に加えて高々3点を通る。

付録Aに命題1の証明を示す。この性質から、花紋スモッキングの模様を造りやすくするために布に紐を通す際、それぞれの紐を縫う手間が際限なく増えてしまうことはないことがわかる。

4.2 展開図における閉路に基づく紐の生成

4.1節で述べた紐を展開図に基づいて考えると、模様の頂点に重なる箇所は展開図の折り線による鏡映変換で

決定される。折り紙とは平面の領域を展開図の折り線で鏡映変換して造るものであるため、紐を生成するアルゴリズムの評価を鏡映変換の回数から考えると、紐の開始点に相当する模様の頂点に重なってはいなくても、頂点から重なる箇所に至るまでの折り線で鏡映変換を繰り返す必要があるという課題がある。

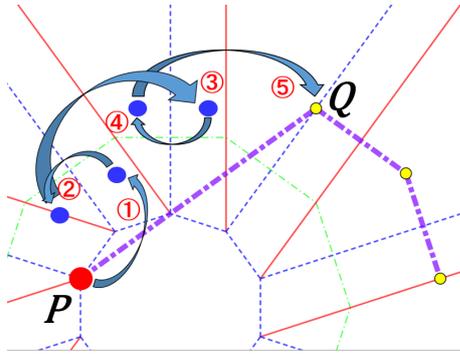


図8 花紋スモッキングに対する紐が鏡映変換の繰り返しでつくられる様子

例として、図8に鏡映変換の繰り返しにより紐(図8での紫の一点破線)がつくられる様子を示す。展開図の正多角形の各頂点に対して紐を考えることができるが、図8では見やすくなるように1つの紐だけ示している。青色の点は赤色の頂点(開始点)を鏡映変換して生成される途中の点に対応し、図中の番号は鏡映変換の順序を表す。なお、花紋スモッキングのパターンに対応する点を連結した線も緑の一点破線で示している。

紐は開始点(図8における赤色の点P)から高々3点(図8の黄色の3点)を通るが、図8で点Pと結ばれる黄色の点Qは折り線による鏡映変換を5回繰り返して求められる。鏡映変換の数は図8のPとQを重ね合わせる際に折り重なって挟み込まれるプリーツの数に依存し、この数は造形する模様に対応する正多角形の頂点数に応じて増える。このように、展開図の正多角形の頂点数を n とすると、それぞれの紐を生成するために必要な鏡映変換の回数は頂点数に比例した $O(n)$ となり変換の手間が増加するとともに、挟み込まれるプリーツに関する情報を記憶しておく必要がある。

この課題に対処するため、プリーツを整えて模様を造る際に重なる箇所を、折り紙の展開図における写像の性質[19]を用いて求めることを提案する。

定理 1. 展開図における閉路を考えることで、花紋スモッキングに対する紐を構成する点を、模様に対応する

正多角形の頂点数に依存しない定数時間で求められる。

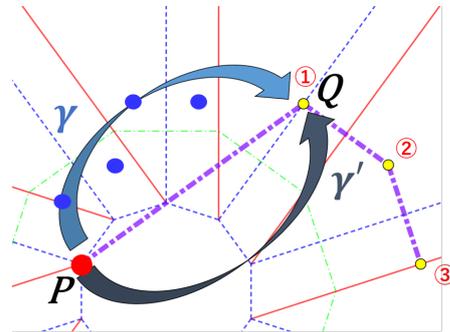


図9 展開図における2つの路

定理1の証明は付録Bに示す。たとえば図8の展開図でPからQへ複数回の鏡映変換を経由する路を γ 、PからQへのもう一つの路を γ' とする(図9参照)。QからPへ路 γ を逆向きに辿る路を γ^{-1} と表すと、路 γ' と路 γ^{-1} を繋げた路はPから始まる閉路となる。このとき、路 γ に沿った複数の鏡映の合成変換と路 γ' に沿った変換は同じ変換となるため、頂点数に依存しない1回の鏡映変換でQが求まる。さらに、この点を展開図の折り線で鏡映変換することで、紐が通る残りの点(図9の②と③)も定まる。

命題1で述べたように、花紋スモッキングに対する紐はそれぞれの紐の端点に加えて高々3点を通り、これらの点は端点に対する鏡映変換で定まる。その際、鏡映変換を行うための折り線をそれぞれ正多角形の頂点数に依存せずに決定できるため、定理1が成り立つ。

4.3 紐の生成アルゴリズム

定理1を用いて紐を構成する点を求めることはできるが、花紋スモッキングの模様の形状に応じてプリーツの整え方が異なるため、模様に対応する展開図の正多角形の頂点数(以下、単に頂点数と呼ぶ)の偶奇に応じて紐のつくられかたが異なる。

花紋折りの定義から、造形した際にスポークの山折り線はすべて1点で交わる[1]。また、図3のように模様が正多角形の場合はその中心が交点となる。さらに、頂点数が偶数の場合には、スポークの山折り線は中心を通過して正多角形の反対の頂点に重なるとともに、その頂点にはもう一つのスポークの谷折り線も重なる。他方、頂点数が奇数の場合には、スポークの山折り線や谷折り線が正多角形の別の頂点に重なることはなく、各頂点にはそれぞれ一つのスポークが重なる。

上記の性質に基づき、花紋スモッキングの模様の頂点数の偶奇に応じて紐を生成するアルゴリズムを提案する。本稿では展開図の頂点数の次数 (接続する辺の数) はそれぞれ 4 としており、各頂点に接続する辺のうち 2 つは正多角形を構成する辺である。これらは谷折り線のため、残りの 2 つの辺は川崎定理 [20] から山折り線と谷折り線となる。このとき、正多角形の頂点には 1 本の山折り線だけが接続する。そこで、この山折り線と平行な谷折り線とがなすスポークを、以下では「頂点に接続するスポーク」と呼ぶこととする。たとえば図 10 で水色で示す領域はどちらもスポークであるが、赤の頂点に接続するスポークは右側であり、このスポークが接する正多角形の辺は紫色の矢印で示す辺である。

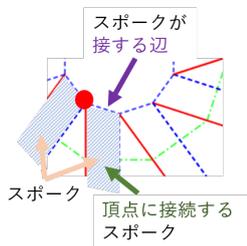


図 10 頂点に接続するスポークと、スポークが接する辺の例

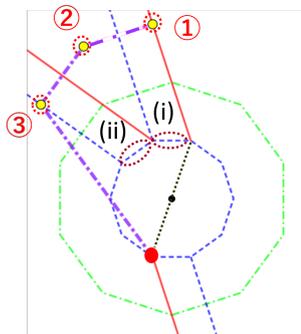


図 11 頂点数が偶数の場合の紐の生成手順

頂点数が偶数の場合の紐の生成手順を図 11 に示す。図 11 で赤色の頂点に対して、多角形の中心に点対称な頂点に接続するスポークを求める。このスポークが接する辺 (図 11 の (i)) で赤色の点を鏡映変換し、紐を構成する点の一つ (図 11 の ①) を作る。次に、スポークを構成する谷折り線で作成した点を鏡映変換して別の点を作る (図 11 の ②)。さらに、図 11 の辺 (i) のもうひとつの頂点に接続するスポークを求め、このスポークが接する辺 (図 11 の (ii)) で赤色の頂点を鏡映変換して残り点

(図 11 の ③) を作る。最後に、上記で作った点同士を正多角形の中心から時計回りに接続して紐を生成する。

上記で述べた手順は、展開図における接続関係などに基づいて点対称移動や鏡映変換で実現できる。これらの操作は頂点数に依存せず、正多角形とそのスポークの局所的な情報に基づくため、紐の生成は頂点数に依存しない定数時間で実現できる。上記の生成手順をアルゴリズムとして整理したものを Algorithm 1 に示す。

Algorithm 1 頂点数が偶数の場合の紐の生成

Require: 花紋スモッキングの展開図の正多角形 G と、 G に接するスポーク

Require: G の頂点 v // 紐の開始点

- 1: v に対して G の中心に点対称な頂点が接続するスポークを求める。
- 2: 1. で求めたスポークが接する G の辺で v を鏡映変換して点を作る。
- 3: 1. で求めたスポークを構成する谷折り線で、2. で作成した点を鏡映変換して点を作る。
- 4: 2. で求めた辺のもう一つの頂点に接続するスポークを求める。
- 5: 4. で求めたスポークが接する G の辺で v を鏡映変換して点を作る。
- 6: v を開始点として、上記で作った点同士を G の中心から時計回りに連結して紐を生成する。
- 7: **return** 紐

頂点数が奇数の場合は、各頂点には 1 つのスポークが重なる。このため、スポークが接する辺に基づいて頂点に重なる箇所を求め、その箇所をスポークを構成する山折り線と谷折り線で鏡映変換して紐を生成する。

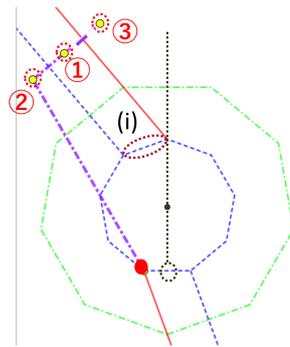


図 12 頂点数が奇数の場合の紐の生成手順

頂点数が奇数の場合の紐の生成手順を図 12 に示す。

図 12 で赤色の頂点に対して，スポークが接する辺の中点から正多角形の中心を通る半直線が交わる頂点を求める．このスポークが接する辺（図 12 の (i)）で赤色の点を鏡映変換し，紐を構成する点の一つ（図 12 の ①）を作る．次に，スポークを構成する谷折り線で上記の点を鏡映変換して別の点を作る（図 12 の ②）．さらに，スポークを構成する山折り線で最初に生成した点（図 12 の ①）を鏡映変換して残りの点を作る（図 12 の ③）．最後に，上記で作った点同士を正多角形の中心から時計回りに接続して紐を生成する．

上記で述べた手順も，頂点数が偶数の場合と同様，正多角形とそのスポークの局所的な情報に基づくため，頂点数が奇数の場合も頂点数に依存しない定数時間で紐の生成を実現できる．上記の生成手順を整理したものを Algorithm 2 に示す．

Algorithm 2 頂点数が奇数の場合の紐の生成

Require: 花紋スモッキングの展開図の正多角形 G と， G に接するスポーク

Require: G の頂点 v //紐の開始点

- 1: v に接続するスポークが接する G の辺の中点から G の中心を通る半直線が G と交わる頂点を求め，この頂点に接続するスポークを求める．
- 2: 1. で求めたスポークが接する G の辺で v を鏡映変換して点を作る．
- 3: 1. で求めたスポークを構成する谷折り線で，2. で作成した点を鏡映変換して点を作る．
- 4: 1. で求めたスポークを構成する山折り線で，2. で作成した点を鏡映変換して点を作る．
- 5: v を開始点として，上記で作った点同士を G の中心から時計回りに連結して紐を生成する．
- 6: **return** 紐

布の幾何的な操作で花紋スモッキングを造形するため，鏡映変換や点対称移動からアルゴリズムを評価し，提案するアルゴリズムが模様頂点数には依存しないことを示した．しかし，実制作する模様の頂点数が極端に多くなることはあまりないため，素朴に鏡映変換を繰り返すアプローチと比較した場合でも，実用上は計算時間の観点からのアルゴリズムの評価は今後の課題である．

4.4 花紋スモッキングの組み合わせに対する紐

複雑な装飾をデザインするために複数の花紋スモッキングを配置した際にスポークの折り線が交差すると，ス

モッキングを造形した際に布の表面にしわがよってしまう [1]．理論的な観点から折り紙を扱う場合と異なり，有限のサイズの布で制作する花紋スモッキングを考える際にはスポークを無限に伸ばしたときの交差まで考慮する必要はない．ただし，スポーク同士が交差しないように花紋スモッキングの組み合わせをデザインすることは一般には容易なことではない．しかし，組み合わせをデザインできた場合には，4.3 節で提案する手法を適用して紐を生成することが可能である．

命題 2. 花紋スモッキングを組み合わせたデザインでも，互いに十分離れている場合には，個々の花紋スモッキングに対する紐は展開図から互いに独立に生成できる．

付録 C に命題 2 の証明を示す．この性質から，複数の花紋スモッキングを組み合わせたデザインを作成できた場合には，その展開図に対しても本稿で述べた手法を適用できると考えられる．

5 服飾雑貨の制作

5.1 GeoGebra を用いた実装

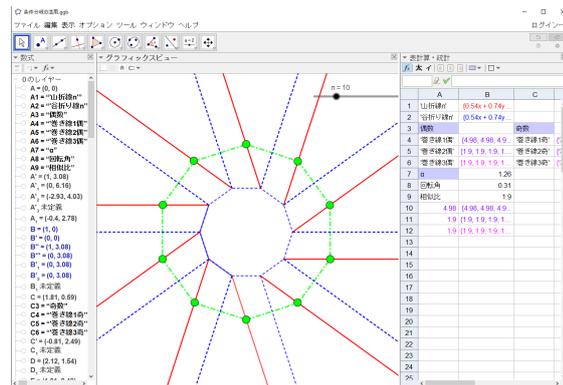


図 13 花紋スモッキングの展開図とパターンの作成

著者らは幾何的オブジェクトを操作できる GeoGebra [21] を用いて展開図に基づく花紋スモッキングのパターン作成と組み合わせのデザイン支援などを実装した [1, 2]．展開図の描画とパターン生成の例を図 13 に示す．図 13 で赤線は展開図の山折り線，青の点線は谷折り線を表す．また，花紋スモッキングのパターン（図 13 の緑色の点）を緑の一点破線で繋いでいる．

花紋スモッキングに対する紐についても，GeoGebra の鏡映や回転，平行移動などの幾何的な操作を用いて実装した．実装した画面の例を図 14 に示す．図 14 では

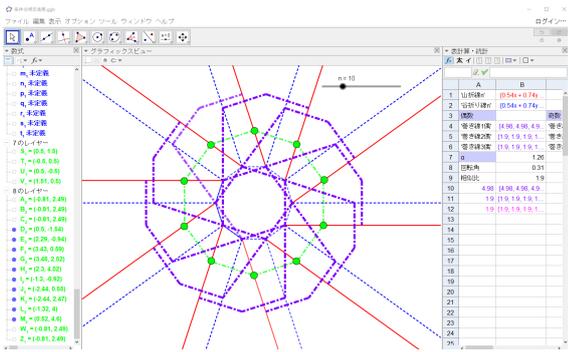


図 14 展開図から生成する紐を重畳表示した画面の例

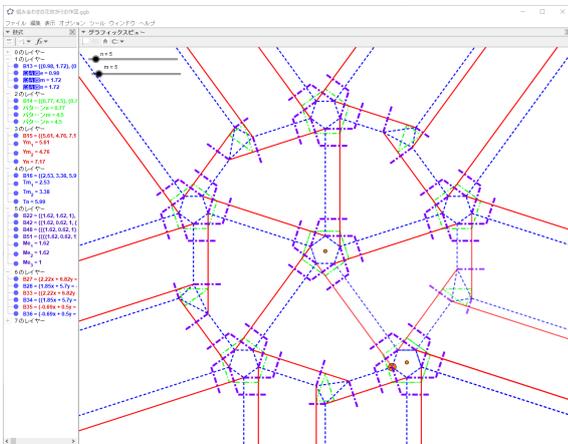


図 15 花紋スモッキングの組み合わせに対する紐の生成

正多角形の各頂点に対する紐を紫の一点破線で示している。図 14 右上のスライダーバーで花紋スモッキングの頂点数を変えることで任意の頂点数の花紋スモッキングに対して紐を生成できる。また、花紋スモッキングを組み合わせたデザインを作成した際にそれぞれの花紋スモッキングに対する紐を重畳表示した例を図 15 に示す。展開図と合わせて紐を提示することで、花紋スモッキングに対する紐が絡み合うことなく配置されているかを確認しやすくなると期待される。

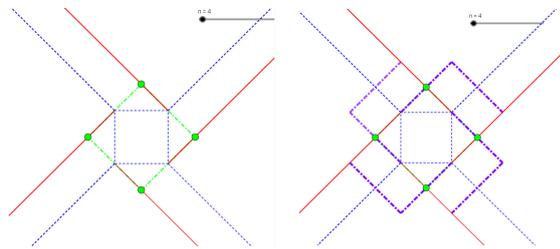
5.2 服飾雑貨の制作

本稿のアプローチを服飾雑貨に用いて検証するために、布の表面に花紋スモッキングを施すとともに、4 節で述べた紐を持ち手に利用して容量を変えられるバッグを制作した。制作したバッグを図 16 に示す。図 16 (a) は紐に対応する持ち手を引き絞って容量を小さくした状



(a) 持ち手を引いて容量を小さくした状態 (b) 布を広げて容量を大きくした状態

図 16 制作したバッグ



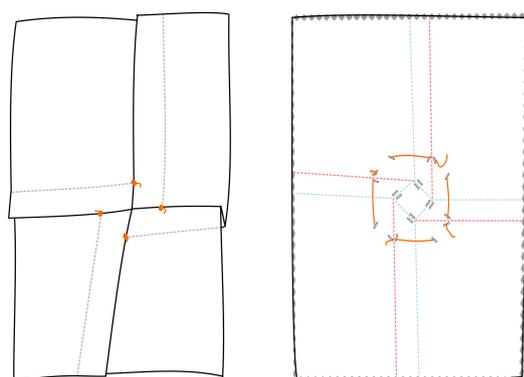
(a) バッグの展開図 (b) 展開図に紐を重畳表示した画面

図 17 制作したバッグの展開図と紐

態、図 16 (b) は広げて容量を大きくした状態である。布を折りたたんでバッグの容量を変える際、花紋スモッキングに通した紐を用いることで布に施した模様をつくりやすくなった。

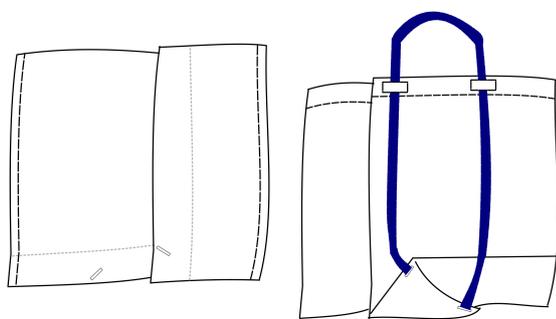
バッグをデザインする際には、まず図 13 の画面右上のスライダーバーで花紋スモッキングの模様頂点数を決めて展開図を作成し、展開図からパターンを作成した(図 17 (a) 参照)。次に、作成した展開図に基づいてそれぞれの頂点に対する紐を生成して展開図に重畳表示した(図 17 (b) 参照)。なお、折りたたみ傘などと同様、日常品として使う際には容量の変更に伴う手間を軽減することも重要であるため、プリーツの数が少ない正方形の花紋スモッキングとした。

布でバッグを制作する際には、まず生成したパターンを布に転写してスモッキングを施し、制作に必要な寸法を裁断した布に紐に対応する糸を通してから、紐が通過すべき箇所印をつけた(図 18 (a))。次に、スモッキ



(a) 紐の通る箇所 (b) 紐の通る穴の制作

図 18 スモッキングと紐が通る穴の制作



(a) 紐の通る穴の制作 (b) 引き絞りによる
スモッキングの制作

図 19 紐を用いるバッグの制作

ングの縫い絞りに用いた糸を引き抜いて布を平坦な状態に戻し、紐が通る箇所に穴を開けた。その際、バッグを持ちやすくするためにボタンホール（ボタンをはめるための穴）のように巾のある穴を作成した（図 18 (b)）。そして、布を再度折りたたんで花紋スモッキングの模様を施し、袋状にするために中表（模様が内側）となるようにして端を縫い合わせた（図 19 (a)）。最後に、端を縫い合わせた袋を返し、縁を三つ折りにしてミシン掛けをし、紐が安定するようにベルトループを作ってから穴に紐テープを通して持ち手を制作した（図 19 (b)）。

6 まとめ

花紋スモッキング制作支援に向けて、本稿では展開図から紐を生成する手法を提案した。布を縫い絞ったブ

リーツを平坦にする際に模様の頂点に重ねる箇所を展開図から求める手法を提案し、その性質を証明とともにを示した。さらに、模様の頂点数が偶数と奇数の場合の手順を整理して可読性を向上した紐の生成アルゴリズムを述べた。

提案法を GeoGebra を用いて実装し、装飾としての花紋スモッキングに加えて紐を用いるバッグを制作した。花紋スモッキングに通した紐をバッグの持ち手として用いることで容量を変える際に模様をつくりやすくなった。今後は他の服飾雑貨で紐を用いることや花紋スモッキングの制作支援の評価に取り組む予定である。

謝辞

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。また、実制作などの補助をした埴田美彩氏に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 吉田哲也, 藤崎千晶. 花紋スモッキングの組合せに対するデザイン支援の検討. NICOGRAPH2019, ポスター発表, P-4, 2019.
- [3] 吉田哲也, 藤田真奈美. 花紋スモッキングの制作支援に向けた紐の生成. NICOGRAPH2019, フルペーパー, C-1, 2019.
- [4] 文化服装学院 (編). アパレル生産講座〈6〉CAD パターンメイキング. 文化出版局, 2004.
- [5] Nobuyuki Umetani, Danny M. Kaufman, Takeo Igarashi, and Eitan Grinspun. Sensitive couture for interactive garment modeling and editing. *ACM Transaction on Graphics (SIGGRAPH 2011)*, Vol. 30, No. 4, 2011.
- [6] 山本高美, 中山雅紀, 藤代一成, 桂瑠以, 坂元章. 3d 人体計測データ分析に基づくスカート原型デザインシステムの開発. 芸術科学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 9–19, 2015.
- [7] 乾滋, 宮崎まゆこ, 堀場洋輔, 高寺政行. 衣服着装動作シミュレーション. *Journal of Textile Engineering*, Vol. 57, No. 4, pp. 115–112, 2011.
- [8] 五十嵐悠紀, 五十嵐健夫, 三谷純. あみぐるみのための 3 次元モデリングと製作支援インタフェー

ス. コンピュータソフトウェア, Vol. 26, No. 1, pp. 51–58, 2009.

- [9] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美. バルーンアートの構造解析と難易度評価手法の提案. 芸術科学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 143–150, 2009.
- [10] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美. バルーンアートのデザイン支援のための複数本バルーンモデルの構造化と制作手順の自動生成. 芸術科学会論文誌, Vol. 14, No. 5, pp. 238–247, 2015.
- [11] Erik D. Demaine and Joseph O'Rourke. *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Cambridge University Press, 2008.
- [12] 野島武敏, 萩原一郎 (編). 折紙の数理とその応用. 共立出版, 2012.
- [13] 館知宏. 剛体折紙と産業応用. 折紙の数理とその応用, 第5章. 共立出版, 2012.
- [14] Alex Bateman. Computer tools and algorithms for origami tessellation design. In *Origami 3: the 3rd International Meeting of OSME*, pp. 121–127. CRC Press, 2002.
- [15] 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.
- [16] Tess: origami tessellation software. <http://www.papermosaics.co.uk/software.html> (2020/5/6 確認).
- [17] 浪間幸井. 文化ファッション大系 服飾関連専門講座 8 手芸文化服装学院編. 文化出版局, 2004.
- [18] Robert J. Lang. *Twists, Tilings, and Tessellations*. A K Peters/CRC Press, 2017.
- [19] 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.
- [20] 川崎敏和. 平坦折り紙の山折り線と谷折り線の関係. 佐世保工業高等専門学校研究報告, Vol. 27, pp. 55–79, 1990.
- [21] <https://www.geogebra.org/> (2020/5/6 確認).



吉田 哲也

1991年東京大学工学部航空工学科卒業. 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科助手. 2004年北海道大学大学院情報科学研究科助教授. 2014年奈良女子大学研究院教授. 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.

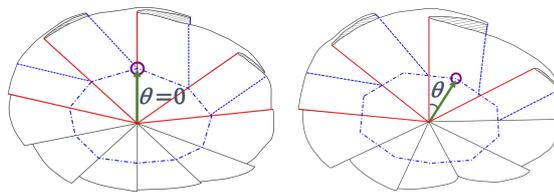


藤田真奈美

2019年奈良女子大学生活環境学部卒業. 被服の定式化とデザイン支援に興味を持つ.

付録 A 命題 1 の証明

証明. 花紋折りの定義から, 展開図に従って造形した際にスポークの山折り線はすべて1点で交わることになる [1]. さらに, 正多角形の花紋折りの場合には, 山折り線はその中心を通ることになる. このとき, 正多角形の頂点数を n とすると, 対称性からスポークの山折り線同士の間角は $\theta_n = \frac{2\pi}{n}$ となる. そこで, 花紋スモッキングで造る模様を中心を座標系の原点とみなし, 中心を通る山折り線の1つを回転座標系の座標軸とみなして, 座標軸からの方位角が最小となる頂点までの角度を θ (≥ 0) とする.



(a) 頂点数が偶数の場合 (b) 頂点数が奇数の場合

図 20 模様と頂点との角度

頂点数が偶数の場合は1つのスポークの山折り線が着目する頂点に重なる. このため, この山折り線を座標

軸とみなすと、着目する頂点との角度は $\theta = 0$ となる (図 20 (a) 参照). また, 他のスポークの山折り線と座標軸との角度は少なくとも $\theta_n > 0$ となるため, 他のスポークの山折り線はこの頂点に重なることはない. ただし, 別の 1 つのスポークの谷折り線がこの頂点に重なる場合がある. 他方, 頂点数が奇数の場合は $0 < \theta < \theta_n$ となるため, スポークの折り線が模様頂点に重なることはないが, プリーツを整えて模様を形成する際に最大 2 枚の布が着目する頂点に折り重なることがある (図 20 (b) 参照).

上記より, 花紋スマッキングで造形する模様の頂点に重なる箇所は, 頂点に折り重なるスポークに接する領域も含めて高々 3 箇所となる. このため, 正多角形の頂点を端点とし, これらを結んで生成される紐は, その頂点に加えて高々 3 点を通る. □

頂点のほかに紐が通る点の数を具体的に示すと, 展開図における正多角形の頂点数 $n \geq 3$ に対して, $n = 3$ のとき 1, $n = 4, 5$ のとき 2, $n \geq 6$ のとき 3 となり, 命題 1 が成り立つ.

付録 B 定理 1 の証明

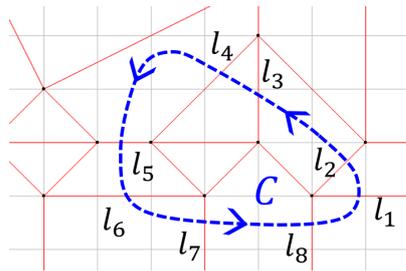


図 21 平坦折りの展開図における閉路の例

証明. 平坦折りできる折り紙の展開図において, 折り線 l_1, l_2, \dots, l_{2n} を順に横切るような閉路を考える (図 21 の例では, 折り線 l_1, l_2, \dots, l_8 を横切る閉路 C). このとき, それぞれの折り線 l_i に関する鏡映変換を $\mathbf{R}(l_i)$, 恒等変換を \mathbf{I} とするとき, 以下が成り立つことが知られている [19].

$$\mathbf{R}(l_{2n}) \cdots \mathbf{R}(l_2) \mathbf{R}(l_1) = \mathbf{I} \quad (1)$$

ここで, 任意の鏡映変換 $\mathbf{R}(l_i)$ に対して $\mathbf{R}(l_i) \mathbf{R}(l_i) = \mathbf{I}$ が成り立つことを用いて, 式 (1) の右から $\mathbf{R}(l_1)$ を掛けることで

$$\mathbf{R}(l_{2n}) \cdots \mathbf{R}(l_2) = \mathbf{R}(l_1) \quad (2)$$

が成り立つことがわかる.

図 2 に示した花紋スマッキングの造形操作を展開図から考えると, 布の縫い絞りで生成するプリーツに対応するスポークが折りたたまれて布の表面の模様の頂点に重なることになる. 図 9 に示した展開図の中央の多角形を固定して考えると, 紐を構成する点のうちの一つはスポークの折りたたみに対応する鏡映変換で生成される. このため, スポークの折りたたみに対応する鏡映変換を式 (2) における $\mathbf{R}(l_1)$ とみなし, 展開図の多角形の頂点のひとつをこれで鏡映変換することを考えると, 図 9 のように, その頂点から鏡映変換で生成される点に至る 2 つの路を考えることができる.

花紋スマッキングを造形する際には, 図 7 のように模様となる展開図の多角形の頂点数に応じて複数の布が挟み込まれるため, 図 8 のように鏡映変換を繰り返すことになるが, その合成変換は式 (2) の左辺のように表される. しかし, 上記の議論より, 合成変換は式 (2) の右辺の鏡映変換と等価であるため, 頂点数によらずに紐を構成する点の一つを求められる.

さらに, 命題 1 より紐は頂点数によらずに模様の頂点のほかに高々 3 点を通り, これらの点は上記で定まる点の鏡映変換で求められる. このため, 紐を構成する点を頂点数に依存しない定数時間で求められる. □

付録 C 命題 2 の証明

証明. 4 節で述べたように, 花紋スマッキングに対する紐は, それぞれ, 展開図における正多角形とそのスポークという局所的な情報に基づいて生成される. このため, 花紋スマッキングの展開図を組み合わせた場合でも, 組み合わせに用いる他の花紋スマッキングとの幾何的な関係は, 個々の花紋スマッキングに対する紐の生成に影響を与えない. このため, 紐同士が絡んだりすることのないように互いに十分離れている場合には, それぞれの花紋スマッキングに対する紐は互いに独立に生成できる. □