

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760115

研究課題名(和文) 曲面を持つ立体折り紙の形状設計システムの開発および実用化のための研究

研究課題名(英文) A study on developing a design tool for curved origami

研究代表者

三谷 純 (MITANI, Jun)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40392138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：1枚の紙を折ることで形を作る「折り紙」は、ものをコンパクトに折りたたむ技術や、単一の素材から製品を作り出す技術に直結し、工学的にも有用である。本研究では、直線での折りだけでなく、曲線での折りや曲面形状を含む折り紙の設計技術に着目し、1枚の紙から新しい形を設計するための技術開発を行った。またさらに、細い切り込みを入れた紙による形状設計や、折り線の情報から折り工程を算出する手法の開発、素材の厚みを考慮することで、得られる形状を推定する技術など、折り紙の設計技術を発展させるための研究を行った。また、対話的なインタフェースを持つ設計支援ツールの開発なども行った。

研究成果の概要(英文)：Origami, which is known as a paper folding technique, is applicable for folding objects smaller or for constructing objects from a single flat materials. These are recognized as useful technologies for industrial applications. In our research, we gave attention not only to the standard origami, which only has straight creases and flat polygons, but also to the method for designing curved origami, which has curved creases and curved surfaces. Our research covers developing the following methods: a method for designing geometry from a flat material which has several slits, a method for generating folding processes from crease patterns, and a method for estimating folded shapes by taking consideration about thickness of material. Further, we developed several applications which have interactive design interface for origami design.

研究分野：形状モデリング

キーワード：形状モデリング 可展面 折り紙

1. 研究開始当初の背景

(1) 1枚の紙を折ることで形を作る「折り紙」は、日本の伝統的な遊びのひとつとして古くから幅広い世代に親しまれてきた。折り紙における、平面を折って形を創出する工程は幾何学的に奥深い問題を内包し、多くの数学者による研究の対象ともされてきた。工学的には、「折りたたみ」はものをコンパクトにする技術に直結し、ものの運搬や収納に要するスペースを抑えるために有効である。これまでの研究から得られた知見は、「ミウラ折り」に代表される人工衛星の太陽電池パネルの折りたたみや、自動車のエアバックの折りたたみ、飲料缶の表面の凹凸のデザインなどで幅広く活用され、さらにはステントなどの医療器具への応用も試みられている。

(2) 申請者はコンピュータサイエンス分野における形状モデリングの研究を主としており、その経験と知識を活用することで、これまでに無い折り紙形状の創出を実現してきた。特に、従来は扱うことが難しかった、曲線での折りと曲面を含む折り紙も設計できるようになってきた。その成果は研究発表だけではなく、ワークショップ、展示会を通して発信し、新しい服のデザインなどにも貢献した。このように、「折る」という単純な工程だけで新しい形を創り出す技術は、様々な発展の可能性を秘めている。しかしながら、曲線を含む折りに関する形状設計技術と実際のものづくりへの応用については、まだ研究の途上であり、素材の物理的な特性の考慮など、解決すべき問題が残されている。

2. 研究の目的

主に曲線での折り、および曲面を持つ折り紙の設計技術をさらに発展させ、1枚の紙による新しい形の創出を目指す。また、新しい試みとして、スリットを入れた紙による造形に関する研究を行う。さらに、折り紙の技術の普及のために、工業製品への応用に関する研究、作品展示やワークショップを通じた活動を並行して行う。具体的には、以下の各項目の実現および折り紙の幾何全般について取り組む。

- ・空間曲線を持つ折り紙の形状設計手法
- ・スリットの入った素材による形状設計手法
- ・対話的なインタフェースでの設計手法
- ・素材の厚さを考慮した形状設計手法

3. 研究の方法

(1) 伸縮しない1枚の紙で表現できる曲面は、あらゆる点でガウス曲率がゼロの曲面に限られ、折り紙で表現できる形は、このような曲面パッチの集合となる。複数の曲面パッチが、展開平面および3次元空間で連続する必要がある、この制約が形状設計を難しくしている。このような、折りを含む形状に関する研究を、微分幾何学の問題としてモデル化し、1枚の平坦な素材を伸縮させずに、折り操作

のみで構築可能な形状に関する研究を進める。またもう一つのアプローチとして、1枚の紙から作られるという制約の元で、意図した形状になるべく近い形を制約付き最適化問題と見なし、数値計算で形状を決定することも試みる。この結果に基づき、いくつかの設計パターンを確立し、計算機上での形状設計システムの構築を行う。これは、申請者がこれまでに蓄積してきた3DCGにおける形状モデリングの技術を活用することで実現する。このシステムでは、対話的な操作で、得られる形状および、その展開図を自動的に出力することを行う。

(2) スリットの入った素材を用いることで、制作可能な形状のバリエーションが大幅に増える。予め設定した幅と個数のスリットが入った平面素材を計算機内にモデル化し、これを折り曲げてできる立体形状を求める。例えば椅子の制作を行うには、得られる形が左右対称であり、座面の中央は水平面になる、などの制約を与える。場合によっては、素材の伸縮無しに意図した形をモデル化することがそもそも不可能なことがあるため、工学的に許容される誤差(素材の伸縮や擦れ)を考慮し、その範囲で意図した形状にできるだけ近い形を実現するアプローチも並行して検討する。これには、制約付き最適化問題の数値的解法に関するプログラムの実装を行う。

(3) 素材の厚さを考慮した形状設計のために、得られた形状に素材の厚さ分のオフセットを与え、体積を持つ立体形状とした時に、干渉が起きないかシミュレートするなどの機能を実現するための基礎的な理論の構築と検証システムを開発する。また、開発する設計支援ソフトウェアでは、対話的な操作を実現するためのインタフェースを追加する。本研究を通して開発されたシステムを用いて設計した形状を、実際に紙の素材、または不織布や薄い金属板などで試作する。開発したシステムは、インターネット上で公開することを前提に整備を進める。

4. 研究成果

(1) 複数の可展面の組み合わせで構成される立体形状を1枚の紙を折り曲げることで作れるようにするための基礎研究として、まず2つの交差する可展面から構成される形状を対象とした。これを、1枚の紙を切らずに作り出すために、2つの可展面の間を接続する第3の可展面を追加する方法を考案しシステムの実装を行った。第3の可展面を追加する際には、それぞれの構成面が展開図上で隙間なく接続する必要があるが、これを3次元の曲線折りの理論を離散表現し、隙間をゼロとする解を最適化手法で求めることで実現した。

(2) 折り線パターンから折り工程を復元する理論の考案を行った。折り線の情報から折った状態の形は復元できるため、折り線を減らしながら折りの形状を徐々に単純化し、その工程を逆にすることで、折り工程を再現することを實現した(図1)。

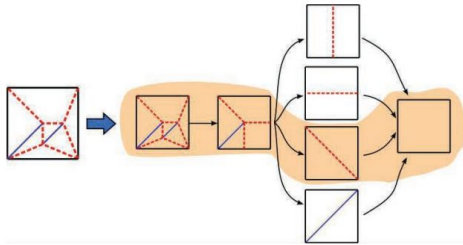


図1 折り線の解析

(3) 直交するプリーツ折りを対象とした、折り線配置の理論と設計インタフェースの開発に関する研究を行った。互いに直交するプリーツ折りから構成される形状は、素材の厚みをゼロと仮定すると完全に平坦に折りたたまれるが、実際には折りの重なり場所に生じる歪みなどから、立体的な造形を成す。折り線の配置は制限されるため、この造形は単純に、直線を折る順番によって決定される。この仕組みを解析するために、直交するプリーツの基本構成を1つのユニットとし、そのユニットには8種類が存在することを示し、これらの組み合わせで全体を再構成することを行った。この研究により、ユニットの配置の制約と、高さ方向の予測および、設計した構造を折り出すための順の自動算出を實現した(図2)。

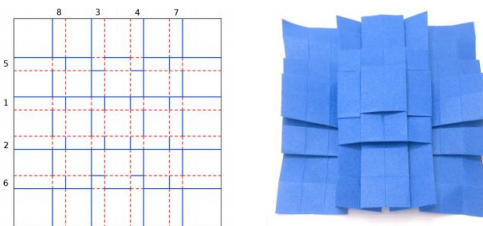


図2 直交プリーツの折り線情報(左)から得られる形状(右)

(4) 一般の折り紙は正方形であることから、折った後に得られる形状は、4回の回転対称性を持つものが多い。産業への応用を考えた際には、元の紙を正方形に制限する必要はないため、より一般的な多角形からの折り形状の設計理論が必要となる。そこで、これまでの折り紙界の資産を有効活用するために、正方形の紙で作られる形を正多角形へ一般化することを行った。元の折り線の情報を分解して再構成し、構成後の折り線が平坦折り可能条件を満たすような修正を、頂点の移動によって行った。この頂点の移動量を求めるために、数値最適化手法を用いた。

(5) 平行な切り込みの入った矩形の素材を曲げることで得られる幾何形状を対話的操作で實現するためのシステム開発を行った。素材から得られる形状を三角形メッシュ表現し、素材が伸縮しないという制約の元で滑らかな曲面形状が得られるよう、メッシュを構成する頂点の座標を数値最適化手法で求めることを行った。その結果、椅子形状などを設計できることを確認し、塩ビ素材を用いた試作を行った。また、これ以外にも、小さなスリットを入れるだけでトーラス形状などを容易に制作できることを確認した(図3)。



図3 矩形の紙に小さな切り込みを入れることで制作されたトーラス状の折り紙

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Naoya Tsuruta, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Interactive Design of 3D Geometry Made by Bending Inextensible Sheet Material Containing Slits", The International Journal of CAD/CAM (IJCC), Vol. 13, No. 2, pp. 23-29, 2013.

Lifeng Zhu, Takeo Igarashi, Jun Mitani, "Soft Folding", Computer Graphics Forum, Vol. 32, Iss. 7, pp. 167-176, 2013.

鶴田直也, 三谷純, 金森由博, 福井幸男, "形状列挙に基づく幼児向け折り紙作品の創作支援システム", 折り紙の科学, Vol. 2, No. 1, pp. 33-44, 2012.

〔学会発表〕(計12件)

Naoya Tsuruta, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Simple Flat Origami Exploration System with Random Folds", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Shuang Tang, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Designing Nth Order Rotational Symmetry Origami From 4th Order Symmetric Crease Patterns", The 6th International Meeting on

Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Jun Mitani, "Self-Intersecting Origami with Cuts", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Hugo Akitaya, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Curved Origami for Developable Surface Coupling", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Tianyi Wang, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "A Study on Orthogonal Pleat Tessellation and Its Folding Sequence", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Hugo Akitaya, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Generating Folding Sequences from Crease Patterns of Flat-Foldable Origami", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Yuto Kase, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Flat-Foldable Axisymmetric Structures with Open Edges", The 6th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, Univ. of Tokyo, Tokyo, Aug.10-13, 2014.

Naoya Tsuruta, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "A Monte Carlo Method for Exploring Tiny Origami Pieces", International Conference on Simulation Technology, Sep.11-13, Univ. of Meiji, Tokyo, 2013.

Hugo Akitaya, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Origami Diagrams and 3D Animation from Flat-Foldable Crease Patterns Sequences", International Conference on Simulation Technology, Sep.11-13, Univ. of Meiji, Tokyo, 2013.

Naoya Tsuruta, Jun Mitani, Yoshihiro Kanamori, Yukio Fukui, "Interactive Design of 3D Geometry Made by Bending Inextensible Sheet Material Containing Slits", 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, Dec.6-8, Hilton Niseko Village, Niseko, 2012.

〔その他〕
ホームページ等
<http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/>

6 . 研究組織
(1)研究代表者
三谷 純 (MITANI, Jun)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：4 0 3 9 2 1 3 8