

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05754

研究課題名(和文) 折り紙の技術を産業へ活用するための形状設計手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on shape design methods to utilize origami technology for industry

研究代表者

三谷 純 (Jun, Mitani)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40392138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：1枚の平坦な素材から目的の形を作り出す、または様々な形状を平坦に折りたたみ可能とするための各種手法の提案とシステムの実装を行った。任意の立体形状を平らな状態に折りたたみ可能とするために、与えられた立体形状を凸な立体の集合で近似したうえで、それぞれの立体を平坦に折りたたみ可能な構造に変換する手法を考案した。得られた形状に対して、素材の厚みを考慮した形状構築と、板素材を用いた試作を行った。また、素材にスリットを入れることで変形を行い、目的の形状を設計するシステムの開発、簡単なユーザー操作で折り紙形状を構築するシステムの開発など、折り紙の実用化に関する研究開発を複数並行して行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed methods for making intended shapes by folding a flat sheet material and making the shapes flat-foldable. We implemented the methods on a computer for evaluation. In order to make an three-dimensional shape flat-foldable, we approximated the given three-dimensional shape with a set of convex solids, and then we converted each solid into a flat-foldable structure. To confirm the validity of our approach, we constructed the obtained shape with thick material by considering the effect of thickness on the geometry. We also added the hinge mechanisms on the constructed model. In addition, we parallelized multiple research and development on the practical application of origami such as deformation of sheet material with slits, and development of an interactive design system.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：折り紙 形状設計

### 1. 研究開始当初の背景

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一つとして幅広い世代に親しまれ、海外でも origami という単語が広く認知されている。その一方で、平面を折って形を創出する工程は幾何学的な問題を内包し、多くの数学者による研究の対象とされてきた。工学的に、折りたたみは対象物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。また1枚の素材で作ることによる、高い防塵性能などの特性がある。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、飲料缶の表面の加工などで幅広く活用されている。2012年には、アメリカ国立科学財団(NSF)による折紙プロジェクト(Origami Design for Integration of Self-assembling Systems for Engineering Innovation)が立ち上がり、折り紙の工学的な応用に世界が注目している。折り紙の技術は日本が最先端であるとの認識が、いつのころから定着しているが、世界的に折り紙の研究は盛んに行われており、決して日本の技術が優位であるとは言えない状況にある。申請者は平成18年に、科学技術振興機構の個人型研究「さきがけ」に「折紙のデジタルアーカイブ構築のための基盤技術とその応用」という研究テーマが採択され、それ以降、継続して折り紙のデジタル処理に関する研究に取り組んできた。その成果として、従来は扱うことが難しかった、曲線での折りを含む折り紙の対話的な設計を実現した。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、新しい折り紙設計ソフトウェアを複数作り出し、一般にも広く公開している。その成果は研究発表だけではなく、作り出された形の芸術性も評価され、国内外での展示・ワークショップを実現している。さらに、新しい服のデザインにもつながった。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、数理的な側面から幾何形状の設計が実現できたとしても、産業への応用には未だ大きな障壁があり、例えば素材の物性の考慮や、折り工程のコスト低減など、解決すべき問題が多く残されている。

### 2. 研究の目的

折り紙の「折り」構造に注視し、またその一方で、従来の折り紙の概念では許容されない「切り込み」を積極的に活用することで、折り紙技術の工学的な応用を推進するための基礎研究を行う。

計算機を用いた折り紙の研究では、従来から紙の厚みをゼロと仮定することが一般的であった。しかし、実際にものを作る際には、

素材の厚さを無視することはできない。素材が複数の層で重なる場所においては、厚さの考慮が重要となる。このような、素材の厚さを考慮した設計手法の開発を目指す。

軸対称な立体(上面方向から見たときに正多角形に見える立体)については、押しつぶすことで平坦に折り畳める立体構造を簡単な仕組みで実現できることが知られている。これを、一般的な形に拡張することで、より変化に富んだ形状の折り畳みを実現する。

また、素材にスリット(切り込み)を設けることで、制作可能な形の自由度が増す。素材にスリットを設ける加工は容易であるため、このアプローチでの造形は製造コストの低減に貢献する。しかしながら、伸縮しない素材を用いる場合には、幾何的な拘束を考慮する必要があり、設計の難易度が高い。この問題を解決し、素材にスリットを加えることで意図した形を制作できる設計支援のシステムを開発することを目指す。

新しい形をデザインする際には、容易に操作のやり直しができること、およびリアルタイムに3次元形状を視覚的に確認できることが重要である。そこで、形状設計時に対話的な操作でデザインを行えるインタフェースを設計システムに実装する。対話的な操作のバックグラウンドで、折り紙に固有の幾何拘束を満たすような自動補正をシステムが行う。

さらに、単純な箱の組み立てであっても、現在は人手で行うことが多いため、大量生産に必要な製品の製造工程に「複雑な折り」を含めることはコストの問題が大きい。意図した形を、より少ない折り手順で実現する方法や、折りそのものを簡略化する手法の開発を行う。

### 3. 研究の方法

申請者がこれまでに研究開発を進めてきた折り紙の設計支援ソフトウェアをベースとし、これに厚みの考慮や折りたたみ機構の付与などの付加機能を追加実装していく。新しい形状の設計を支援する際には、対話的なインタフェースでの形状操作を実現する。

本研究では、素材に対するスリットの追加や、折りたたみ及び展開のための機構の組み込みまでを考慮したシステムなどの開発を行い、その妥当性を試作を通して検証する。いくつかの機能は相互に関係するため、同時進行で進める。得られた成果は積極的に国内外で発表し、また折り紙の研究を広く知ってもらうためのアウトリーチ活動として、展示やワークショップの開催も適宜行う。本課題と並行して、可能であれば民間企業との連携によって、産業への応用を積極的に模索する。

折り紙の形状設計では、紙の厚みをゼロと仮定することが一般的であるが、これに対して本研究では厚さを考慮した形状設計を行う。アプローチは、素材が自由に变形する布や皮革のような柔物体と、そうではない厚板

を基本とする剛体とで異なるが、基本的には厚みをゼロと仮定して設計した幾何形状に対する変形処理で対応する。例えばスチレンボードのような数ミリ厚の剛体とみなせる素材を用いた造形物の制作においては、対象形状の構成面にオフセットを設け、厚さを加味したカット面の付与などを行う。これまでに、厚みを考慮せずにデザインされた幾何モデルを、厚さのあるスチレンボードで構築するための研究を過去に行ったことがあるため、この経験を活かした形状設計手法の実装を行う。これに折りの機構を与えるために、ヒンジを組み込むことを行う。

また、上下方向からの力によって折りたたみと展開が可能な立体構造の設計手法についても研究を行い、平坦折りの理論に基づく立体設計法を開発する。ものを素早く折りたたむには、複雑な折り手順を踏むのではなく、上下方向から力を加えるだけで、簡単に折り畳めることが望まれる。軸対称で凸な立体であれば、対称な切り込みを付与することで容易にこれを実現できる。申請者は、非凸な立体であっても、折りたたみ可能とすることをこれまでに実現している。そこで本研究では、これをさらに一歩前進させ、軸対称でない立体に対しても、複数の立体の組み合せによって、折りたたみ可能とすることを目指す。

#### 4. 研究成果

1枚の平坦な素材から目的の形を作り出す、または、様々な形状を平坦に折りたたみ可能とするための各種手法の提案と、システムの実装を行った。任意の立体形状を平らな状態に折りたたみ可能とするために、与えられた立体形状を凸な立体の集合で近似したうえで、それぞれの立体を平坦に折りたたみ可能な構造に変換する手法を考案した。凸な立体の集合での近似は、元の立体の特徴を維持することと、立体の数とのバランスをとるようにした。その後の、折りたたみ可能な構造への変換では、底面と上面が平行になること、および、それぞれの立体が互いに面で接合されることを条件とした、多面体モデルへの変換を行った後、各面がバラバラにならずに折りたたまれるような形状変換を最適化問題として定式化し、その解を求めることを行った。その結果、動物のぬいぐるみのような丸みを帯びつつも凹凸のある立体や、幾何学的な図形などであっても、統一的な手法で、平坦に折りたたみ可能な形へ変換できることを確認した。

この手法においては、厚みをゼロと仮定して設計した形状に対する幾何処理によるものであるが、得られた形状に対して、素材の厚みを考慮した形状構築と、板素材を用いた試作を行った。厚みを考慮したオフセットの付与と、ヒンジ部の加工により、実際に折りたたみが可能であることを確認した。また一方で、スムーズな展開および十分な強度の確保のための課題も確認された。

また上記とは別に、与えられた曲面を、三角形の集まりから成る基本的な折り紙の構造体の集合で近似する手法も考案した。曲面をパラメトリック表現した時に、U座標およびV座標を等間隔に区切り、パラメトリック座標における矩形で定義される領域に、折り紙の構造を埋め込んだのち、最適化処理によって、隙間が生じないように頂点移動を行った。この処理によって、与えられた曲面を少ない誤差で、折り紙の構造を持つ多面体モデルで近似できるようになった。その結果、対称性の無い、自由曲面であっても、水風船の基本形、と呼ばれる折り紙の構造の集合で表現できるようになった。

さらに、スリットを入れることで形状変形が可能にするための工夫を施した形状の設計支援を行うシステムの開発や、折り紙で作れる形状を簡単な操作で構築するシステムの開発など、折り紙の実用化に関する研究開発を複数並行して行い、次項の主な発表論文等に示すとおり、各種の論文発表を行った。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

Yan Zhao, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "Design and Motion Analysis of Axisymmetric 3D Origami with Generic Six-crease Bases", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 59, pp. 86-97, 2018 (査読有) .

Yan Zhao, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "Geometry of Axisymmetric 3D Origami Consisting of Triangular Facets", *Journal for Geometry and Graphics*, pp107-118, 2017 (査読有) .

松川 剛久, 三谷 純, "平坦折り紙の数理", *日本応用数学会論文誌*, Vol.27, pp.333-353, 2017 (査読有) .

Emi Miyamoto, Yuki Endo, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "Semi-Automatic Conversion of 3D Shape into Flat-Foldable Polygonal Model", *Computer Graphics Forum*, Vol.36. pp.41-50, 2017 (査読有) .

Yoshihisa Matsukawa, Yohei Yamamoto, Jun Mitani, "Enumeration of Flat-Foldable Crease Patterns in the Square/Diagonal Grid and Their Folded Shapes", *Journal for Geometry and Graphics*, Vol.21, No.2, pp.169-178, 2017 (査読有) .

Yan Zhao, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "Geometry of Axisymmetric 3D Origami Consisting of Triangular Facets", *Journal for Geometry and Graphics*, Vol. 21, No. 1, pp. 107-118, 2017 (査読有) .

〔学会発表〕(計 12 件)

Shinichi Tanaka, Yuki Endo, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "A generation method of origami model for CG," In Proc. of ICMMA2016: International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2016 'Origami-Based Modeling and Analysis,' Nov. 9-12, 2016, Tokyo.

Yan Zhao, Yuki Endo, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, "Triangle-based Axisymmetric 3D Origami Design," The Japan Society for Industrial and Applied Mathematics Annual Conference, Sept. 6-8, 2017, Tokyo.

田中 慎一, 遠藤 結城, 金森 由博, 三谷 純, "簡略化モデルによる折紙形状構築手法," Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, 2017/23-24, 東京

宮本 恵未, 遠藤 結城, 金森 由博, 三谷 純, "3次元形状を折りたたみ可能な立体へ自動変換する手法の提案," Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2017, 2017/6/23-24, 東京.

Yan Zhao, Yoshihiro. Kanamori, Jun Mitani, "A Computational Design Method for Tucking Axisymmetric 3D Origami Consisting of Triangle Facets," The Japan Society for Industrial and Applied Mathematics Annual Conference, Sept. 12-16, 2016, Kitakyusyu.

田中慎一, 遠藤結城, 金森由博, 三谷純, 折紙のCG用幾何モデルの生成手法, 2016年度日本図学会秋季大会, 2016/11/26-27, 東京.

上村紳一郎, 遠藤結城, 金森由博, 三谷純, 帯状三次元座標取得装置を用いた曲線折り形状の対話的な生成インタフェースの開発, 2016年度日本図学会秋季大会, 2016/11/26-27, 東京.

松川剛久, 金森由博, 三谷純, "45°系格子パターンに含まれる形式的折り線図の平坦折り可能性評価手法", 情報処理学会 第78回全国大会, 2016/3/10-12, 横浜.

大垣雅人, 金森由博, 三谷純, "境界線を入力とした可展面パッチ集合による形状設計", 情報処理学会 第78回全国大会, 2016/3/10-12, 横浜.

田中慎一, 金森由博, 三谷純, "折り紙のCG用幾何モデルの自動生成手法", 情報処理学会 第78回全国大会, 2016/3/10-12, 横浜.

松川剛久, 三谷純, "45度系格子パターンから作りだされる平坦折り形状の折

り畳み可能性について", 第19回折り紙の科学・数学・教育 研究集会, 2015/11/7, 金沢.

田中慎一, 三谷純, "CG制作のための折り紙の形状モデリングに関する研究", 第19回折り紙の科学・数学・教育 研究集会, 2015/11/7, 金沢.

〔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: 40392138