

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12677

研究課題名（和文）空間曲線を折り目に持つ折紙の形状設計および変形シミュレーション

研究課題名（英文）Shape Design and Deformation Simulation of Origami with Curved Folds

研究代表者

三谷 純 (Mitani, Jun)

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：空間曲線での折りを含む可展面の形状の設計支援を目指して主に以下の3つの課題に取り組んだ。(1)平面上に配置された折り目情報および形状生成に必要なパラメータ指定に基づいて折った後の立体形状を生成するシステムの開発、(2)変形過程をシミュレートし、折った後の立体形状を得るためのシステムの開発、および(3)対話的な操作で折り形状を操作する手法。いずれも、滑らかな曲面を平面四角形の集合に離散化することで行われている。これらの各種手法を通して、曲線折り形状を生成、操作、解析するための基盤づくりに貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

曲線の折り目を持つ可展面形状の設計、操作、解析に貢献するものであり、これまで計算機で設計可能とされてきた折り紙の形状のすそ野を大きく広げるものである。曲線で折ることは、すなわち平坦に折りたためないことを意味するため、ものをコンパクトに折りたたむ用途には適用できないが、金属板など工業的に広く用いられている素材を折るだけで作れる形状の設計対象が広がることによって、これまでになくデザインを活用した製品設計など、新しい応用が生まれるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The following three main issues were addressed with the aim of supporting the design of shapes of developable surfaces that include folding with spatial curves. (1) development of a system to generate a three-dimensional shape after folding based on crease information placed on a plane and specification of parameters necessary for shape generation; (2) development of a system to simulate the deformation process and obtain a three-dimensional shape after folding; and (3) a method to manipulate the folded shape interactively. All of these are done by discretizing smooth surfaces into a set of planar quadrilaterals. Through these various methods, we have contributed to the creation of a foundation for generating, manipulating, and analyzing curved fold shapes.

研究分野：形状モデリング

キーワード：折り紙 形状モデリング 可展面 曲面

1. 研究開始当初の背景

Origami という表記は国際的に広く使われており、平坦な素材を折って意図した形状をつくる技術に関する研究は国内外で広く行われている。また、折り紙に関する国際会議が定期的開催され、数学、工学、芸術など分野横断的な研究対象となっている。2012年には、アメリカ国立科学財団 (NSF) による折り紙プロジェクト (Origami Design for Integration of Self-assembling Systems for Engineering Innovation) が立ち上がり、おもに米国を中心に折り紙の工学的な応用に関する研究に目覚ましい進展があった。具体的には、self-folding (自己折り) というキーワードで表現される、外部からの力を用いずに素材を折り曲げる研究が進んだ。2018年9月に英国オックスフォードで開催された第7回折り紙の国際会議では、数学と工学を中心とした100を超える発表があり、Origamiに関する世界的な関心の高まりをうかがわせる。折り紙の技術は日本が最先端であるとの認識が、いつのころからか定着しているが、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。

折り紙に関係する、とくに形状設計手法についてもさまざまな研究が進められているが、その多くは平坦に折りたたみ可能なもの、または直線での折りに対象を限定したものが主流である。曲線での折りを持つ形状の設計手法については、その多くが平面曲線での折りに限られたため、空間曲線での折りを含む、より自由度の高い設計手法を実現することには、まだ課題が残されている。空間曲線での折りをもつ形状の幾何的な制約は明らかになっているが、その制約下で、意図した形を対話的に設計する技術や、その形状を実際に作るうえで平坦な状態から、どのような変形を経て、最終形状になるのかなどは明らかになっていない。

2. 研究の目的

空間曲線での折りを含む、新しい造形のための設計手法を提案することである。折り紙とえば、紙を平坦に折る (その結果、直線の折り目が得られる) ものであるとの固定観念はまだまだ根強く、国際的な研究でも、曲線での折りを対象としたものは多くない。しかし、曲線で折る折紙に注目すると、単純な曲線の配置で球体を近似した形状が作れることや、単純な幾何学処理で凹曲面を持つ立体形状を作れることが、これまでも示されている。本研究の目的は、このような曲線での折りをもつ折り紙形状の設計手法をさらに発展させるものであり、これまで計算機で設計可能とされてきた折り紙の形状のすそ野を大きく広げるものである。曲線で折ることは、すなわち平坦に折りたためないことを意味するため、ものをコンパクトに折りたたむ用途には適用できないが、金属板など工業的に広く用いられている素材を折るだけで作れる形状の設計対象が広がることによって、新しい応用の可能性も広がるものと期待できる。空間曲線での折りを含む形状の設計を支援するソフトウェアに関する基礎的なアルゴリズムなどの研究開発を行うこと、および、空間曲線での折りを含む形状の変形の過程をシミュレートするための理論およびアルゴリズムなどを開発することを目指す。

3. 研究の方法

与えられた素材上に配置された曲線を折ることで、どのような曲面形状が得られるかを算出するシステムの開発を行い、その結果を可視化することで、曲線折りによる形状設計のための基盤を構築する。一般に、展開図上に与えられた曲線を折って得られる形状は一意に定まらず、折った後の曲線の形状と、各点における折り角度の情報が与えられることによって決定される。これらは相互に関係しており、どれか1つだけを自由に決定することができないという制約がある。そこで、このような形状を解析的に求めるために、初期状態の折り目を平面上のパラメトリック曲線と与え、折った後の空間曲線の形状を曲線上に定義される曲率および捩率の関数によって定める。空間曲線の曲率・捩率および折り角度を動的に変えることで、どのような形状が得られるかを評価し、変形の過程における自己交差の有無などが検証可能となる。ここでは、折る前の平面曲線と、折った後の空間曲線の形状、および折り角を対話的に操作できるようにすることで、形の変更をリアルタイムで行えるようにする。さらには、複数の折りが相互に関係する状況を扱えるようにすること、紙の干渉部分を検出し紙が突き抜ける現象が発生しないような調整を可能とすること、元の紙の形を自由に変更できるようにすること、などの機能を研究開発し、形状設計を支援するツールとして実用性の高いシステムの実現につなげる。

4. 研究成果

(1)

空間曲線での折りを含む形状の設計支援を目的とし、平面上に配置された折り目から、折った後の立体形状を生成するシステムの開発を進めた。折り目は、展開図上に2次元パラメトリック曲線として与えられ、各点における折り角度から、3次元空間上の折り目の形状および折り目の両側の曲面の形状を算出するものとした。計算機上では、曲線は離散表現され、曲面は区分平面の集まりで離散表現するものとした。ユーザーの立場からは、曲率定義関数を指定することで展開図上の折り目を指定し、さらに折りの角度を連続関数として指定することで形状設計を行い、可視化された3Dモデルを計算機の画面上で確認することになる。また逆に、ユーザーが3次元空間上の折り目の形状をその曲率および捩率を指定することによって、その形状を得るために必要な展開図上の折り線が算出できるようにもなっている(図1)。またさらに、得られた曲面上に追加の折り目を配置できる機能の実装も行った。実装したシステムによって得られた折りを含む形状は、離散表現による微小な数値誤差を含むものの、可展性をほぼ維持した形状であり、実際に紙などの平坦素材を折って制作できる形であることが確認された。その後、より多くの折り目が存在し、それらが端点を共有するようなケースに対応するための研究開発を進めた。一般的な折り目の配置に対応することは困難であることが予見されたため、対象を回転対称性を持つものに限定した。このことにより、システムの開発を進めることができ、形状変形の途中経過を可視化することができた。

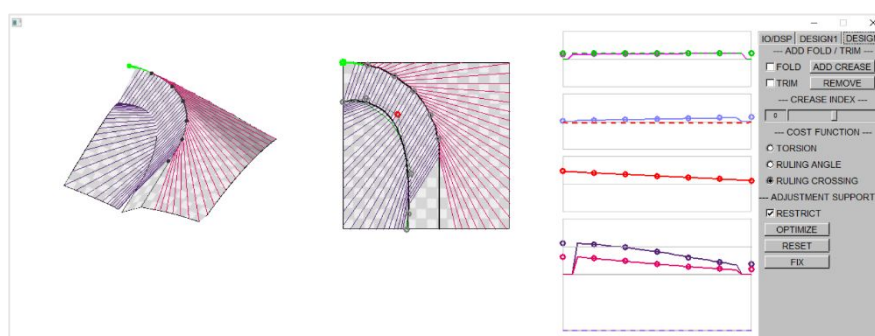


図1 曲線折りを含む形状の設計支援システムのGUI

(2)

厚さを無視できる程度に薄く、伸縮しない素材を曲線で折り曲げて得られる形状の折り操作による変形過程のシミュレーションの実現のために、形状を平面状に開いた展開図から折った後の形状を推定することを行った。折り線での折りの角度を指定し、変形過程をシミュレートすることで、曲線での折り目をもつ立体形状を得ることができる。しかし、計算機内でのシミュレーションでは、形状の離散化という前処理が必要であり、この処理をどのように実現するかが課題である。一般に、折り目を表現する曲線が複数存在する場合、それらを折った形状が存在するかどうかを判定することは困難であるが、素材の微小な伸縮を許容することで、実際には作ることができる場合が多い。このような現象を表現可能な、弾性体モデルでのシミュレーションを行うフレームワークの整備を行った(図2)。また、形状を決定する各種パラメータを対話的操作で入力する方法、構築された形状に含まれる直線エレメントの交差部分を除去するための最適化手法、ピローボックスと呼ばれるボックスデザインにおける曲線とボリュームの関係の研究など、研究課題に関係する内容についても取り組んだ(図3)。

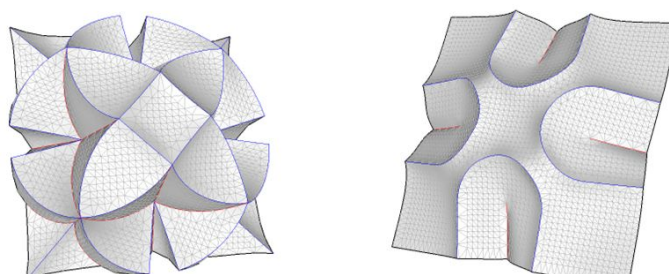


図2 曲線折り形状を弾性モデルでシミュレートした様子

レターパックサイズ (340mmx248mm) に入れられる容積の比較

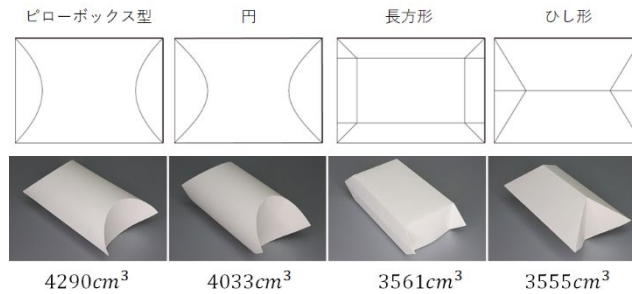


図3 ピローボックス型を含むパッケージ形状による最大容積の比較

(3)

曲線での折りを含む可展面の形状を幾何学的に定義する方法として、折り目を定義する 3 次元曲線(曲率関数と捩率関数)形状を 2 次元平面へ等長写像したときの折り目曲線(曲率関数)折り角度関数といった、幾何学的に形状定義可能なパラメータを指定する方法があるが、この方法は数学的に正確な形状を定義できる反面、形状設計者が形状を視覚的に把握し、変形操作などを対話的に行うことが難しいという問題がある。そのため、より直感的な操作ができること、また現実的な問題を解決するために有用なアプローチであることを目指して、設計者が初期形状として与えられたものに対して、その面上の点(control point)が指定した座標(target point)へと移動するようにして形状を変形できる手法の考案を行った。具体的には、設計者は初期形状上として与えられる曲線での折りを持つ可展面に対して、マウス操作によって複数の control point を選択し、それぞれが、どのような位置に移動することを期待するかを target point として指定する(図 4)。幾何的な制約下において、これらの対応する点間の距離が最小となるような形状を最適化手法によって生成する。ここで使用される最適化には、可展面を構成する ruling の交差を避けるように、ruling の方向を調整する工夫を入れることで、計算コストおよび精度の両立を実現した。評価実験を通し、提案手法は、設計者による形状操作のほかにも、曲線折りを含む形状の変形過程の可視化、複数の折り目が対称な位置に存在するケースへの応用などが可能であることが確認された。

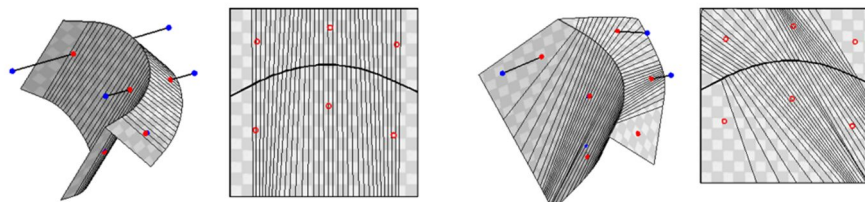


図4 制御点による曲線折り形状の対話的操作

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuka Watanabe, Jun Mitani	4. 巻 19
2. 論文標題 Fitting Single Crease Curved-Fold Model to the User Specified Points	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 387 ~ 404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2022.387-404	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuka Watanabe, Jun Mitani	4. 巻 17
2. 論文標題 Visualization of Folding Motion of Rotationally Symmetric Curved Folding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 513 ~ 524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2020.513-524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuka Watanabe, Jun Mitani
2. 発表標題 Fitting Single Crease Curved-Fold Model to the User Specified Points
3. 学会等名 the 18th annual International CAD Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 曲線折りに関する最近の研究の紹介
3. 学会等名 折り紙の科学を基盤とする アート・数理 および工学への応用 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺優香, 三谷純
2. 発表標題 曲線折り設計支援ツールの改良
3. 学会等名 第29回折り紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 ピローボックスに見られる折り線の形と容積に関する研究
3. 学会等名 第29回折り紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大橋芳, 三谷純
2. 発表標題 Rulingの交差を考慮した曲線折りの形状モデリング手法
3. 学会等名 第28回折り紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木好祐, 三谷純
2. 発表標題 Ruling配置の推定による曲線折りを含む展開図の折りのシミュレーション
3. 学会等名 第28回折り紙の科学・数学・教育研究集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 '曲線折りによる造形 - ピローボックスに関する考察 -
3. 学会等名 MIMS 現象数理学研究拠点 共同研究集会 折り紙の科学を基盤とするアート・数理 および工学への応用研究 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 折り紙の形状モデリングのための様々なアプローチ
3. 学会等名 精密工学会 第409回 講習会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 The Science, Art and Kansei of Origami
3. 学会等名 The 2020 International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三谷純
2. 発表標題 The Frontier of Origami Science
3. 学会等名 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 好祐, 金森 由博, 三谷 純
2. 発表標題 曲線折りを含む展開図からの 3 次元形状復元を目的とした Ruling 配置の推定
3. 学会等名 日本応用数学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------