

研究課題別評価書

1. 研究課題名

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

2. 氏名

三谷 純

3. 研究のねらい

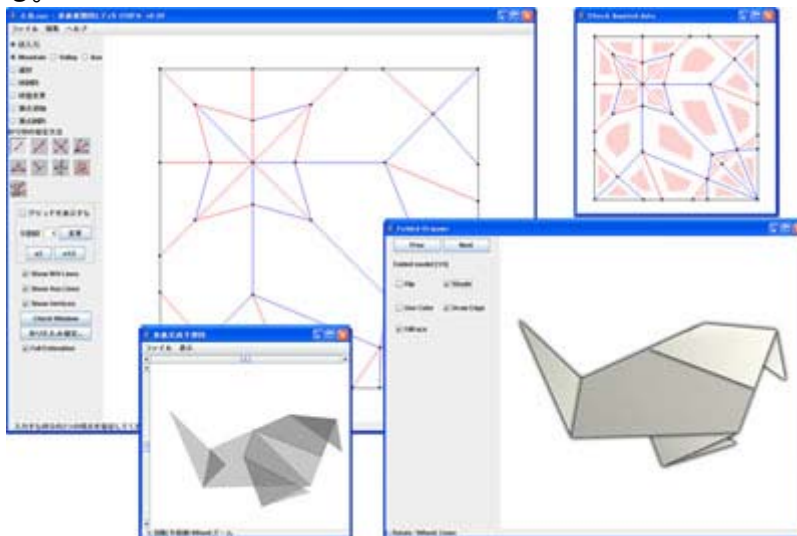
折紙は古くから幅広い世代の人に親しまれてきたが、特に近年では折紙の分野にも「設計」の概念が導入され、1枚の紙から驚くほど精巧な形が作り出されるようになってきている。折紙の技術は単に造形を楽しむためだけでなく、ものをコンパクトに折りたたむことが要求される場面において、工学的にも役立つ知見をもたらすことが可能である。このような折紙の幾何に関する情報を、デジタルデータとしてアーカイブすることができれば、今後の折紙の発展に資することが可能となると考えられる。本研究では、折紙の情報をデジタル化するための手法の1つとして展開図情報のデジタル化を挙げ、折紙の展開図を効率的に入力するための専用エディタの開発と展開図データベースのプロトタイプを作成を行う。また、これに関連して、展開図から折りたたみ後の形を推定するアプリケーションの開発、曲面を含む立体的な折紙の設計技法の研究などを行う。本研究で得られた成果を、折紙の新規作品の設計支援や折紙研究の基盤ツールとして役立てること、また折紙の理論をベースとした工学、数学、芸術、文化の領域へ発展させることを目指す。

4. 研究成果

本研究では、次のような成果があがった。

(1) 折紙の展開図エディタ ORIPA の開発

折紙の展開図をコンピュータ上で効率的に作図するための専用エディタ、ORIPA (Origami Pattern Editor) の開発を行った。開発初期のころから Web 上で一般公開し、期間中に 32 回の更新を通じた改良を行った。折紙の展開図に現れる折り線を効率的に入力するための機能を複数実装し、展開図データをデジタルデータとして保存できるようにした。展開図のデータフォーマットはオープンとなっており、ORIPA と連携したアプリケーションの開発が可能となっている。



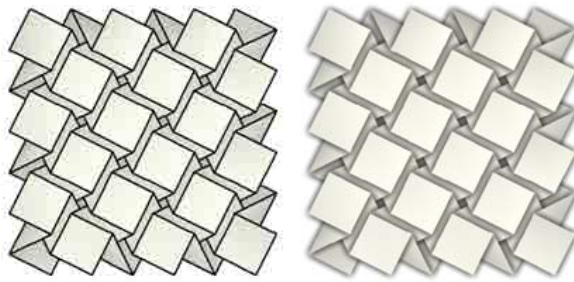
(2) 展開図データからの折りたたみ後の形状推定機能の開発

折紙の作品は、その最終形または最終形に至るまでの過程の大半において、平坦に折りた

ためるものがほとんどである。このような折紙作品に対して、ORIPA によって入力された展開図データを解析し、そのデータから折りたたみ後の形状を復元する機能の研究開発を行った。この復元においては、紙の重なり順の決定が非常に難しい問題であることが知られており、如何に処理を高速化するかが大きな課題であったが、新しいアルゴリズムを考案、実装することで、一般的な折紙作品については実用的な時間で結果を得られるようになった。与えられた展開図から、物理的に作り得る、紙の重なり方をすべて数え上げることも可能となった。

(3) 折りたたみ後の形状を画面表示するためのレンダリング手法の確立

平坦に折りたたまれる折紙が、紙の重なり順の中に閉じたループを含んでいる場合、その折りたたみ結果を適切に画面表示することは通常の CG の技術では難しい。そこで、紙の重なり関係を表す行列と、レンダリング領域における ID バッファを準備し、スキャンライン法によるピクセル単位での描画を行うことで、適切な画面表示を行う手法を開発実装した。また、表示結果をイラスト調にしたり、擬似的な陰影を付加することで紙の厚みを認識しやすい表示を行うなどの工夫により、平坦折紙の形を視覚的によりわかりやすく画面表示できるようになった。



(4) 折紙の展開図データのアーカイブ構築

ブラウザからの簡易なユーザインタフェースで折紙作品およびその展開図データを検索・登録・削除などを行える Web ベースの展開図データベースを想定し、そのためのプロトタイプシステムを構築した。また、各種折紙関係の資料から折紙作品を抽出し、その折紙作品の情報収集および展開図データのデジタル化を行い、試作データベースへの登録作業を行った。このシステムに基づき、折紙の展開図データをアーカイブする際には、どのようなシステムが妥当であるかの評価を行った。例えば、類似作品の検索、作品と作者の関係の管理などに応用が可能と考えられる。

(5) 画像処理に基づく展開図の入力および類似展開図の検索システムの開発

実際に折って開いた折紙をスキャナで読み込み、その画像から展開図情報を再構築する手法の研究開発を行った。画像から得られる線分の集合には誤差が含まれ、そのままでは折りたたみ推定などの別処理に渡すことができないため、この誤差の修正を自動で行うアルゴリズムの開発を試みた。また、展開図データを画像として扱うことで、異なる展開図間で類似度を算出し、類似した展開図を検索するシステムの開発などを行った。

(6) 同じ形の展開図から異なる直方体が組み上がるケースの探索

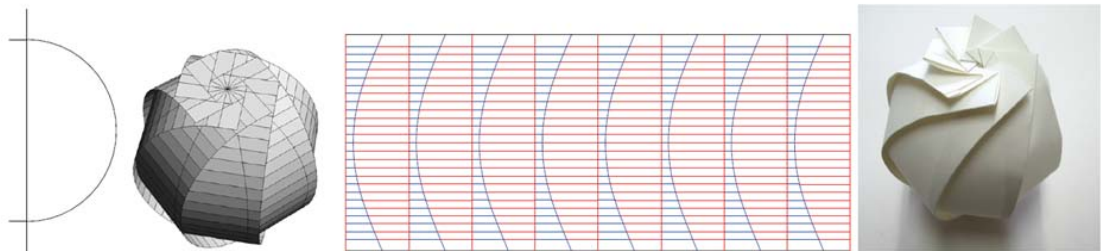
同じ形の展開図から、異なる 2 つの直方体を組み上げられるケースが存在することが過去に知られていたが、それらを効率的に見つけることは実現できていなかった。直接折紙の研究に関係するものではないが、展開図とそれを折ってできる立体の関係に関する知見に基づき、条件を満たす展開図を効率的に探索するアルゴリズムの開発を実現することができ、結果として数千個もの解を短時間で見つけ出すことに成功した。

(7) 展開図に対して平坦に折りたためる条件を満たすような自動修正手法の検討

そのままでは平坦に折りたたむことができない展開図に対して、内包される頂点が局所平坦条件を満たすように修正を施すプログラムの開発を行った。頂点ごとに設定される局所平坦条件を制約付きの最適化アルゴリズムによって近似解を求めることで、実際に平坦に折りたたまれる解が求まることを確認した。これにより、コンパクトに折りたたむことが可能な形状を作り出すことができ、物の可搬性を高めることに役立てることができると考えられる。ただし、制約を満たすのは局所的な条件だけであるので、大局的には干渉して折りたたまれない形状が出力されることがある。この問題を回避することが課題であり、また具体的な応用例の検討も今後の課題として残されている。

(8) 軸対称形状を内包する立体折紙の設計手法の確立

ある軸を中心とした回転対称な立体形状を内包する折紙作品を計算機で設計するためのアルゴリズムを実装し、1つのアプリケーションとして完成させた。形状生成手法の異なる、円柱タイプ、および円錐タイプの2種類を生成できるようにした。このシステムを用いることで、曲面を含む立体的な折紙作品を簡単な操作で設計できるようになった。また、完成イメージを3DCGで表示できるようにしたことで、実際の試行錯誤の手間を大幅に減らすことに成功した。この手法で作成した折紙作品の展示などを各所で行った。



(9) 軸対称形状を内包する立体折紙の応用

前項で確立した手法によって設計した立体折紙の活用方法として、ランプシェードや、服飾デザインへの応用、パッケージやラッピングなどへの応用が考えられる。現時点では、まだ商品化が決まったものはないが、検討を進め、具体的な商品化を模索している。レーザー加工によって折り筋の付いた型紙の量産を行い、一般の人々が実際に折り上げることができるか、などの評価を行った。

(10) 展開図データ群からのデータマイニング手法の開発

アーカイブされた展開図データを有効活用するための手法を検討した。各展開図に含まれる折れ線情報と、それに付随する作者名や年代、折った後の形から、系統図の生成や、類似する展開図の検索、作者ごとの特徴の抽出、クラスタリングなど、各種データマイニングを行うことで、折紙に関する新しい知見が得られるのではないかと考えられる。展開図の類似度評価については実現できたが、それ以外の点においては、今後の課題として残されている。

5. 自己評価

本研究により、展開図データのデジタル化のためのツールである専用エディタを一般公開し、展開図から折りたたみ形状を復元するアルゴリズム、および折紙作品を画面表示するための手法を確立できたことから、当初の目標であった、折紙のデジタルアーカイブを構築するための基盤技術の確立は、ほぼ達成できたものと認識している。さらに「研究成果」にまとめたような、折紙の研究に関する各種の成果をあげることができ、今後の折紙の研究に貢献できるものと考えている。とくに、軸対称形状を内包する立体折紙の設計技法を確立できたことは、曲面を含むこれまでに無い折紙の形の設計を可能とし、今後ますますの発展が期待できる。一方で、今後の課題として残されたテーマもあり、アーカイブされた展開図データについ

ては、著作権に関する問題の対処および、その活用方法について、今後の検討が必要と思われる。また、本研究によって得られた知見を、工学、数学、芸術、文化などの領域に展開していくことが今後の大きなテーマとして挙げられる。

6. 研究総括の見解

日本の伝統的な遊びであり、工学的な利用も拡がり始めた折紙に関するユニークな研究である。折紙は、通常の遊びでの簡単なものから近年では精巧で複雑な芸術的な作品まで広い分野がある。今回の研究では、折紙の展開図情報をデジタル化することにより、折紙のアーカイブを行い、折紙研究の基盤構築とその活用に取り組んだ。

折紙の展開図情報をデジタル入力する専用エディタとして ORIPA(Origami Pattern Editor)が開発された。本エディタでは9通りの操作で折り線の線分を入力することにより、展開情報の効率的な入力が可能になった。またソフトウェアは、Web 上でソフトを一般公開し、32 回もの改良を重ねることにより完成させた。折紙のように数学、工学、教育、文化など様々な領域が係わる研究において、公開し改良するという研究プロセスは、それ自体が成果と言えるものである。さらに、折紙がデジタル的にアーカイブされたことにより、技術の伝承だけでなく、類似作品の検索や作品と作者の関係管理が可能になった。このことは折紙の分野に新たな研究を開いたものと言える。

折紙の背景には数学とりわけ幾何学の裏づけがある。本研究でも多くの論文が発表され、受賞したことは評価される。また研究は展示会、著書、メディアで広く一般の人たちにも紹介された。今回得られた基盤技術をもとに、折紙文化への貢献や折紙の産業・商業などへの応用が期待される。

7. 研究成果リスト

A. さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

(1)論文(原著論文)発表

- ・ Jun Mitani, "A Design Method for 3D Origami Based on Rotational Sweep", Computer-Aided Design and Applications, Vol.6, No.1, pp.69-79, 2009.
- ・ 三谷純: "折紙の展開図専用エディタ(ORIPA)の開発および展開図からの折りたたみ形状の推定", 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.9, pp.3309-3317, 2007.
- ・ 三谷純: "平坦折り折紙から再現される形態数の数え上げ手法", 日本図学会, 図学研究, Vol.41, No.1, pp.27-33, 2007.
- ・ Jun Mitani: "Rendering method for flat Origami", the 29th annual conference of the European Association for Computer Graphics, pp.291-294, 2008.

(2)受賞

- ・ 第4回日本図学会論文賞, 三谷純, "平坦折り紙の展開図から再現される形態数の数え上げ手法", 2009.
- ・ 2009 年度日本図学会春季大会研究奨励賞, 三谷純: "回転スイープ形状を内包する立体折紙の展開図自動生成手法", 2009.
- ・ 第8回 NICOGRAPH 春季大会 優秀ポスター賞, 三谷純, "回転スイープ形状を内包する立体折紙の展開図自動生成", 2009.
- ・ 2007 年度 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会 優秀研究発表賞, 三谷純, "平坦折紙のための, 重なり順に閉ループを持つ平面集合のレンダリング手法", 2008.
- ・ デジタルコンテンツシンポジウム船井賞, 三谷純, "身近な折り紙がサイエンスに、そして新たなアートへ～ORIPA/Computational Paper Craft", 2007.

(3) 展示発表

- ・「科学でひろげる折り紙の世界 ～立体的な折り紙に挑戦！～」, まなびピア埼玉 2009, さいたまスーパーアリーナ, 2009/10/30～11/3
- ・「折紙の幾何: 折り線のパターンから生まれる形」, 予感研究所 2, 日本科学未来館, 2008/7/26～30
- ・「身近な折り紙がサイエンスに、そして新たなアートに」, 第 10 回メディア芸術祭協賛展「先端技術ショーケース'07」, 東京都写真美術館, 2007

(4) 著書

三谷 純 (著) “ふしぎな 球体・立体 折り紙”, 二見書房, ISBN 4576091611