

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22800009

研究課題名（和文） 折紙の数理に基づく展開および折畳み可能な機構の汎用デザインシステムの構築

研究課題名（英文） The General Design System of Deployable and Foldable Mechanisms based on Mathematics of Origami

研究代表者

館 知宏 (TACHI TOMOHIRO)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：50586740

研究成果の概要（和文）： 剛体折り可能性の理論的研究，変形動作の二次元パターンへの焼き付けのための手法の考案，デザインシステムの実装を通して，折紙機構を自由にデザイン可能とする汎用システムを構築し，折紙を工学応用する際の問題点を解決した。

研究成果の概要（英文）： We constructed general systems for freely designing origami mechanisms through the theoretical study on rigid foldability, the development of the methods for physically encoding transformational behavior to 2D patterns, and the implementation of the design systems, thereby solved problems that potentially occur when applying origami to engineering purposes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：折紙工学，コンピュータショナルデザイン，計算機科学，折り畳み，可動構造

1. 研究開始当初の背景

折紙が生み出す展開・折畳みなどの二次元状態と三次元状態が移り変わる性質は、高い工学応用可能性を持っている。このような折紙の可能性は近年再発見され、特にアダプティブな環境創生のための手段・表現の媒体として着目されている。しかし、既存の研究では特定の折紙パターン自体を応用するアプローチが主流であり、使用者や設計者が意図した三次元形態・機能を自在に得ることはできなかった。様々なデザインの文脈において折紙の幾何学を用いることのできる汎用的デザイン手法が求められる。

2. 研究の目的

既に一枚の紙から折れて平坦に畳めるような折紙形態を自由三次元形状にデザインす

るための研究を行ってきたが、変形のプロセスはデザインの対象外であった。そこで、本研究では折紙の持つ機構に特に着目し、折紙機構を自由にデザイン可能とする手法・システムを構築することで折紙を工学応用する際の問題点を解決することが目的である。これによって、例えば、具体的には(1)自由複合形状の高密度パッケージ (2) 限定された空間での三次元形状展開 (3) 特殊なトポロジーの機構などへの応用を可能とする。

3. 研究の方法

次の三つのフェーズにおいて研究を行う。

(1)経路の連続性と機構の追従条件に関する数理的研究

ディスク同相とその他の向き付け可能な多様体に関して、経路の連続性と自由度に関す

る数理的基礎研究を行う。折り線に囲まれる面が合同のまま連続変形する性質(剛体折り可能性)は折紙の機構を幾何学的に論じる上で最も重要な性質であるが、一般化した理論は未だに存在しない。剛体折りに関する一般化理論を導く。

(2)変形動作のモデル化と形状への焼き付け

変形動作をモデル化しその動作を折紙の形状・パターンに焼き付けるための手法を導く。展開を複数の動きのシーケンスとしてモデル化することを基本とする。

(3)デザイン手法・インターフェースの提案

自由度の高い変形動作のデザイン手法を構築する。展開形状、折畳み形状、中間形状などの形状指定、変形プロセスの指定、機構の複合やボリューム等の実現方法の指定などを勘案してデザインシステムを構築することで様々な分野での応用を可能とする。GUIのデザインシステムの実装を行いインタラクティブシステムを構築し、インタフェースを含んだデザイン手法を提案する。

4. 研究成果

下記(1)(2)(3)の研究を通して、折紙機構を自由にデザイン可能とする汎用手法・システムを構築し、折紙を工学応用する際の問題点を解決した。

(1) 経路の連続性と機構の追従条件に関する数理的研究

折り線に囲まれる面が合同のまま連続変形する性質(剛体折り可能性)は折紙の機構を幾何学的に論じる上で最も重要な性質であるが、一般化した理論は未だに存在しなかった。剛体折りに関する理論を一般化するべく経路の連続性と自由度に関する数理的基礎研究を行った。

①特異性のない三角形メッシュの剛体折り可能性について、その要素数と自由度との関係を一般の場合について示し、一時的に特異となる状態についての考察、それを避けるための条件などを示した。またデザインのバリエーションを提示した。研究成果は学会発表[2]として発表した。また、変形機構がピン接合で他の構造物と矛盾無く接合するための条件について考察し、機構から可能な接合の配置を計算することで、不静定な形状制御をするための手法を導いた((2)①参照)

②四辺形メッシュをベースとして、剛体折り可能となるための折紙の形状・パターンの汎用性のある十分条件を導いた。四辺形メッシュでは三角形メッシュとは異なり、拘束の数が変数の数を上回るため、その変形のためにはパターンの特異性が必要である。従来のミウラ折りの一般化ではその特異性を満たす十分条件を示していたが、可展性に依存した機構の提案にとどまっていた。そこで、Discrete Voss Surface と呼ばれる可動構造

との変形機構に適合性があることを明らかにして、これらを複合したシステムを「二方向平坦折り可能な四辺形メッシュ」として定義することで、そのデザイン方法を導いた。このようにして導かれた形状は必ず1自由度の機構となる。この手法は一般性が高く、条件をトポロジー的に拡張・一般化し、筒型構造、あるいはそれらを複合させた様々なトポロジーの曲面へと条件を拡張することができた。デザインの観点からは、特に折り線と補折り線の組み合わせを用いることで折り畳み状態のコントロールが可能となる((2)②, ③参照)。この研究成果は雑誌論文[1]として発表を行った。

③ディスク同相の剛体折紙の微小変形モードと自己釣り合いモードとの同一性を明らかにした。また、相反図と形状の座標値を同時に変数とし、モードの存在を幾何的拘束条件として、変数の摂動によって形状のバリエーションを得る解法を研究した。この研究成果は、Tomohiro Tachi, "Rigid Foldable Origami based on Reciprocal Figure"としてICGG2012(2012年8月)で発表予定である。

④剛体折り可能な折紙モデルに対して、その機構を失うことなく、厚みのあるパネルとヒンジで実現するための手法を考案した。厚みのあるパネルによって回転軸がシフトし、一点に集中しない状態が発生すると一般に拘束の数が2倍に増加する。ヒンジが必ず一点に集まるようにしつつ、折り変形が可能となるためのパネル形状について明らかにした((3)③参照)。雑誌論文[3]として発表を行った。

(2)変形動作のモデル化と形状への焼き付け

変形動作をモデル化しその動作を折紙の形状・パターンに焼き付けるための手法を提案した。

①多自由度折紙機構の変形動作を端部頂点の軌跡として表現する方法を考案し、端部頂点位置の足跡による全体の立体形状をコントロールを可能とした。通常は、端部頂点を固定することで不静定構造となるため、頂点の足跡を任意に定めることはできない。逆に立体形状から、足跡の含まれる平面への拘束を用いることで、形状バリエーションを求め、可能な配置のパターンを導くというアプローチを利用した。Tomohiro Tachi, Motoi Masubuchi, Masaaki Iwamoto, "Rigid Origami Structures with Vacuumatics: Geometric Considerations", IASS-APCS Symposium 2012, 2012/05/21-24として発表を行った。

②折り線と補折り線の二種類の変形パターンを組み合わせ配置し、二方向平坦折り可能な四辺形メッシュを構築し、特異性による不可逆性の問題をパターンの摂動によって

解決した。もし、摂動がなければ、折り線と補折り線は互いに排反の二つの動きをする事になるが、一自由度可動構造とすることで、二つの動きが連続的に繋がることになる。全体が一自由度の機構で連続変形し、二種類の折りの動きのシーケンスを保持する構造物をデザイン可能とした。

③空間曲線を元に機構を構築する方法を提案した。生成に用いる曲線を波形にすることで進展する構造、また曲線折りの離散化を行うことで曲率と振率が一定の比率で増加するような変形を可能とした。この研究成果は学会発表[3][7][8]にて発表した。

(3)デザイン手法・インターフェースの提案

新たにデザイン手法・インターフェースを考案・実装し、設計システム①②③を構築した。

①機構の形状をインタラクティブに探索する設計システム：マウスを用いた自由なインタラクションによって機構をデザインできるシステムを構築した。この設計システムは汎用性があり拘束の選び方によって次のようなデザインを実現できる。

- (i) 一自由度構造設計：展開形状、折畳み形状、中間形状が互いに幾何拘束を受け、一自由度剛体折り可能性の条件を満たした形状探索を行う。
- (ii) 微小変形モードの存在を拘束条件として探索をすることで、剛体折り不可能だが、弾性変形を用いて可逆的変形機構として用いることのできる形態を設計する
- (iii) 多自由度の折紙機構のシミュレーション時の端部軌跡を用いて機構の自由変形を少ない自由度のコントロールで実現する。

設計システムの基本アルゴリズムは雑誌論文[2]として研究発表を行った。なおシステムは”Freeform Origami”としてホームページより無償公開している。入力は、obj形式の三次元のメッシュのほか、dxf形式の二次元の線画に対応しており、北南米、欧州、アジアの、建築家やデザインを学ぶ学生などが利用しており、肯定的なフィードバックが得られている。

②空間曲線を用いた機構のデザインシステム：CADプラグインとして、作成した空間曲線からリアルタイムで機構を生成しシミュレーション可能とするプロトタイプシステムを実装した。このシステムでは一自由度構造物の矛盾のない組み合わせによる複合的な機構をデザインするため、空間曲線を用いてその形状をコントロールできる。また空間曲線に沿った動きの生成に関しても限定的に実現可能であることを確認した。このシステムを用いた2日間のデザインワークショップ

プを曲線折紙のアーティスト・デザイナーの Gregory Epps と協働で、Advances in Architectural Geometry 2010 (2010 September)にて行った。30名弱の建築家や学生が参加し、5つのチームがそれぞれの一自由度機構のデザインを行った。

③②の手法を基本とした構築と、筒型構造の組み合わせによる構築の2種類の方法で、ボリュームを持つセル型の一自由度構造を実現した。研究成果は学会発表[4][5][8]において発表した。

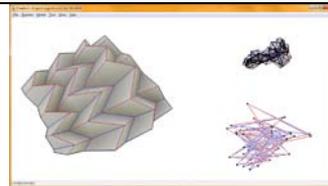
④厚みのない多面体メッシュとして定義された剛体折紙を実際に厚みのあるパネルで機構を作るためシステムを構築した。折りをシミュレーションしながら厚みを加え、パネルレイアウトを計算し、カッティングパターンを出力するシステムをCAD上のプラグインで実現した。



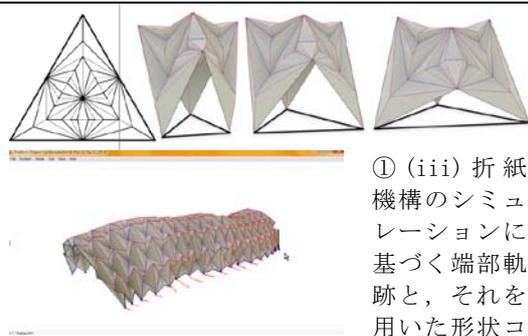
①(i)二方向可
畳四辺形メッ
シュによる非
可展の一自由
度構造



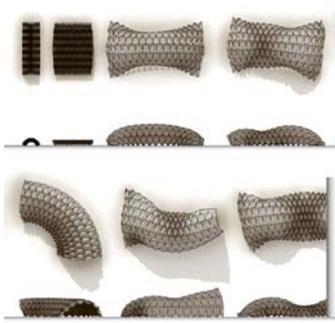
①(i)二方向可
畳四辺形メッ
シュによる筒
型に拡張され
た一自由度機
構



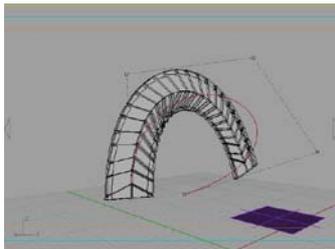
①(ii)微小変
形モードを利用
した、弾性変
形可能な可動
構造(右下は微
少変形モード
を表す相反図)



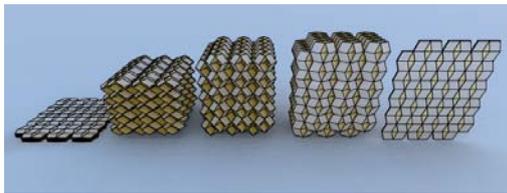
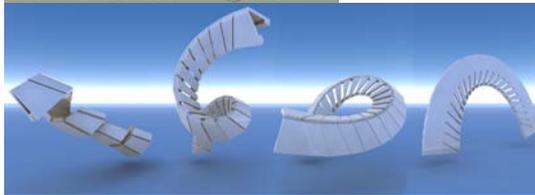
①(iii)折紙
機構のシミュ
レーションに
基づく端部軌
跡と、それを
用いた形状コ



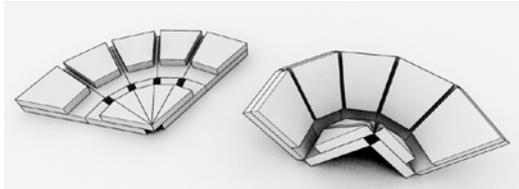
ントロール。
同じパターン
に対して、異
なる脚部配置
によって全体
形状をコント
ロールする。



②空間曲線を用いた機構のデザインシステム。振率と曲率が比例状態を保って増加する



③一自由度機構のボリュームを持つセル構造への発展。複合的な機構であるが、構築の対称性から一自由度になる。



④オリジナルの機構を失わず、厚みのあるパネルで構築される折紙機構

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] Tomohiro Tachi, Freeform Variations of Origami, Journal of Geometry and Graphics, 査読有, 14(2) 巻, 2010, 203-215.
- [2] Tomohiro Tachi, Freeform Rigid-Foldable Structure using Bidirectionally Flat-Foldable Planar Quadrilateral Mesh, Advances in Architectural Geometry 2010, 査読有, 1 巻, 2010, 87-102.
- [3] Tomohiro Tachi, Rigid-Foldable Thick Origami, in Origami⁵, 査読有, 1 巻, 2011, 253-263

[学会発表] (計 9 件)

- [1] 館 知宏, 二方向平坦折り可能な剛体折り四価頂点メッシュ構造, 日本応用数理学会 2010 年度年会, 2010/9/8, 東京
- [2] Tomohiro Tachi, Geometric Considerations for the Design of Rigid Origami Structures, IASS Symposium 2010, 2010/11/12, 上海, 中国.
- [3] Tomohiro Tachi and Gregory Epps, Designing One-DOF Mechanisms for Architecture by Rationalizing Curved Folding, ALGODE 2010, 2011/3/14 (postponed to 2011/11/13-14), Tokyo, Japan
- [4] Koryo Miura and Tomohiro Tachi, Concept of Foldable Structures Synthesized by Symmetry Operation, 2011/5/15-16, Teheran, Iran.
- [5] Tomohiro Tachi and Koryo Miura, Cellular Origami Structure from Foldable Tubes, 7th International Seminar of the Structural Morphology Group, 2011/9/17-18, London, UK.
- [6] Tomohiro Tachi, One-DOF Rigid Foldable Structures from Space Curves, IABSE-IASS Symposium 2011, 2011/9/20-23, London, UK.
- [7] 館 知宏, 曲線折りを用いた剛体折紙構造, 第 10 回折紙の科学・数学・教育研究集会 (日本折紙学会), 2011/7/3, 東京
- [8] 館 知宏, 空間曲線に基づく剛体折紙構造の設計, 日本図学会 2011 年度秋季大会, 2011/11/26-27, 大阪
- [9] 館 知宏, 展開図からの剛体折り判定一渡邊予想の反例, 第 11 回折紙の科学・数学・教育研究集会 (日本折紙学会), 2011/12/4, 東京

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://system.c.u-tokyo.ac.jp/common/professor/tachi.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

舘 知宏 (TACHI TOMOHIRO)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：50586740

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者