

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 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：2012～2013

課題番号：24860024

研究課題名(和文) 弾性変形を考慮した折紙モデルに基づく新しい展開構造の開発

研究課題名(英文) Development of new deployable structures based on the elastic origami models

研究代表者

斉藤 一哉 (Saito, Kazuya)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：40628723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、弾性変形を考慮した折紙モデルに基づく自己展開折紙の設計手法について秋田かにした。得られた代表的な成果は以下の1～3に集約される。

【1.剛体折紙シミュレーションの拡張】：この成果によって、本手法に必要な「空」の面を有する剛体折紙モデルの解析が可能になった。【2.4角形メッシュ折紙を自己展開する設計法の一般化】：上記の成果と合わせ、任意のパネルで構成される4角形メッシュ折紙の折りたたみ過程におけるひずみが解析可能となった。【3.数値シミュレーションによる展開性能の確認】：これによって理想的なヒンジを持つモデルでは展開可能であることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new strategy for designing deployable structures by using partially elastic origami models. The outline of the results is as follows. First, extended rigid-origami simulation techniques that can treat the rigid-origami model with holes and ball joints were proposed. The extended technique is necessary to calculate the deformation of elastic parts, which are a key element of the proposed method. Second, the concept of the proposed self-deploying origami is explained using quadrilateral mesh origami. Finally, the numerical simulations using the finite-element method are conducted to confirm the deploying capabilities of the models.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：展開構造 構造設計 折紙工学 弾性変形

1. 研究開始当初の背景

近年、気象と災害の予測、超高速インターネット通信などを実現するため、アンテナ鏡面をはじめとする宇宙構造物には大型化と高精度化の2つの要求がされている。これを実現するためには宇宙構造物を輸送機に高効率で収納し、高い精度を保持したまま宇宙空間で展開する技術が必要である。

この課題を解決するために、平面から様々な立体を作り出すことのできる「折紙」の理論の応用が考えられる。折紙に対する数学的・幾何学的な研究はこれまでも数多くなされており、展開構造の最終形状と収納形状を自由に設計し、その展開図を作成することは多くの場合可能となった。この折紙モデルを現実の展開構造に応用するためには、折図の設計のみならず展開機構に関する工学的な研究が必要である。これまでの展開構造は、通常モーターなどの機械的な要素によってヒンジの角度を変化させることで駆動されてきた。しかし、折紙の場合折線が多く複雑となるため大量のアクチュエータが必要となり、重量の増加や信頼性の減少などの問題が生じる。この問題を解決するため、機械的な要素に頼らない自己展開折紙に関する研究がなされている。

しかしながらこれまで検討された展開機構はヒンジの角度を制御する手法のみであり、これは板状の形状記憶合金や形状記憶ポリマーなど高価で特殊な材料を必要とし、大型化も難しい。またこれらのモデルは多くの場合、折りたたみ過程ですべての面が変形しないという幾何学的条件を満たす剛体折紙(Rigid Origami)である。しかし、これまで提案されている様々な折紙モデルの中で、剛体折紙の条件を満たすモデルは一部に限られる。折りたたみ過程における面の变形に関する研究はこれまでも行われてきたが、弾性エネルギーを構造の自己展開に積極的に活用した研究はない。

2. 研究の目的

上記の研究背景を鑑み、研究代表者は剛体折り可能な折線パターンにあえて不整を与え、折りたたみ過程で一部の面のみが変形するように調節したパターンを用い、その変形を制御することで駆動される新しい展開構造を提案している。本研究の目的は、この不整入り剛体折紙に基づく自己展開折紙を、任意の枚数の4角形パネルで構成される一般的な4角形メッシュ折紙へ拡張し、その折線とアクチュエータの設計法の一般化を行うことである。この手法は従来のように複雑なアクチュエータを必要とせず、スプリングやSMAワイヤなどの簡単なアクチュエータで駆動可能できる利点があり、宇宙構造物、マイクロロボット、開閉ドームなどへの応用が

期待される。

3. 研究の方法

提案手法では、これまではアクチュエータ(空の面)を導入する位置が4隅に限られ、パネルの数に制約があった。これは4隅以外に空の面をつくる場合、折角を用いた従来のシミュレーション手法では折りたたみ過程をシミュレーションできないという問題と、面数が増えた場合、求める折りたたみモードに応じて適切な初期値を与えなければ解が求まらないという問題があった。本研究では「4角形メッシュ折紙における空の面のデザイン的一般化」と「剛体折りシミュレーションの拡張手法」によって上記課題を解決した。

4. 研究成果

(1) 剛体折紙の拡張

剛体折紙とは、折りたたみ過程での変形がすべて折線に集約され、各面が変形しないと仮定する折紙モデルである。剛体折紙は2種類の方法で数学的に表現できる。1つ目は各頂点を節点とし、折線と面をトラスに置き換え、各頂点の座標を変数とした不安定ト

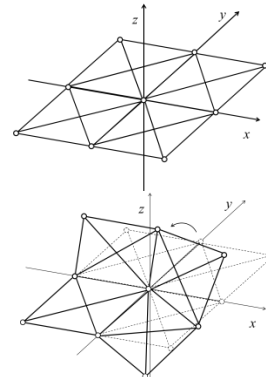


図1 不安定トラスモデルの解析イメージ

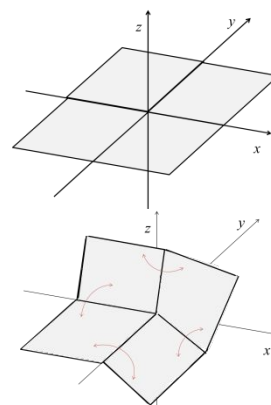


図2 回転角モデルの解析イメージ

ラスモデルである。(図1)このモデルではマクスウェルの式を用いてそのまま構造の自由度が計算可能であるという利点を持つが、山折りと谷折りの指定が難しい。2つ目は、剛体折紙を変形しない面と回転ヒンジで構成する回転角モデルである。(図2)

回転角モデルを用いた通常の剛体折りシミュレーションは、ひとつの面を折角に従って一周させた後、初期状態と一致していなければならないという幾何学的拘束条件の方程式を求めるとに集約される。これらの方程式は、穴のあいていない通常の剛体折紙の場合、各頂点周りに生じる拘束から与えられる。(図3, 式(1),(2),(3))

$$R_z(\rho_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho_i & -\sin \rho_i \\ 0 & \sin \rho_i & \cos \rho_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_x(\theta_i) = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\prod_{i=1}^n X_i = \prod_{i=1}^n R_z(\rho_i) \cdot R_x(\theta_i) = I \quad (3)$$

ミウラ折りは剛体折り可能な折紙の例として知られているが、マクスウェルの式(式(4))によって導かれる自由度が負であっても剛体折り可能となる場合がある。これを機構冗長性とよぶ。本研究ではこの機構冗長性を利用した自己展開構造を提案し、一般的な4角形メッシュ折紙全てに用いることができる汎用の設計法の開発を目指す。

まず図4に示す一般的な $m \times n$ の4角形パネルからなる4角形メッシュ折紙の機構冗長性を、トラスモデルを用いて計算すると、 $DOF = -(m-2)(n-2) + 1$ となり、取り除く必要のある部材数は $(m-2)(n-2)$ であるとわかる。次に取り除く位置については、4角形メッシュ折紙のパターンがそのまま応用できるように、面単位で取り除くことを考え、4角形の対角線の2本の部材をセットで取り除き空の面とする手法を提案する。ここで、対角線上の2本のうち片方しか取り除くことのできない面が生じることを避けるため、 m, n の少なくとも一方が偶数であるモデルを用いる。また、空の面はアクチュエータ

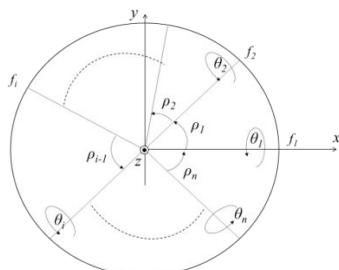


図3 頂点周りの拘束に用いる変数

として作用するため、展開力が構造全体に分散して働くように、隣り合わない面を交互に取り除く方法を考える。

通常の剛体折りシミュレーションでは、変数は折線の回転角のみであり、拘束条件も1軸の周りの回転の組み合わせで表現される。しかしながら提案手法で用いる折紙モデルは、ボールジョイントによる接合部を含むため、これまで提案されてきた上記の手法では取り扱うことができないモデルである。そこで、剛体折りシミュレーションをこれらの特殊な折紙に拡張する事を考える。まず、ボールジョイントで接合された2面間の関係を表すため、新たな未知数としてボールジョイント部にオイラー角を導入する。オイラー角は

$$DOF = 3s - m - r \quad (4)$$

(m :部材数 s :節点数 r :支点反力)

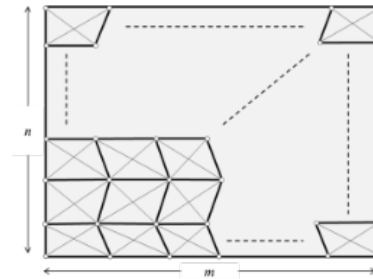


図4 $m \times n$ の四角形メッシュ折紙

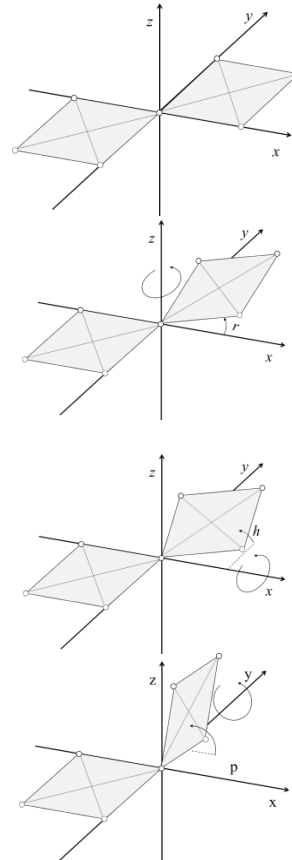


図5 オイラー角を用いた軸周りの回転

3つの角度で1組となっている姿勢を表す手法であり、それぞれx軸周りで角度 p 、y軸周りで角度 h 、z軸周りで角度 r の回転を表す。(図5、式(5)、(6)、(7))

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos r & -\sin r & 0 \\ \sin r & \cos r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos p & -\sin p \\ 0 & \sin p & \cos p \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos h & 0 & \sin h \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin h & 0 & \cos h \end{pmatrix} \quad (7)$$

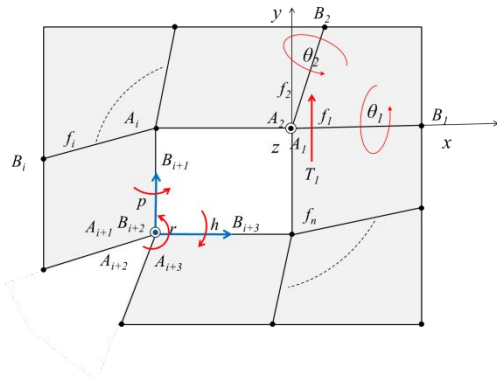


図6 穴周りの拘束に必要な変数

穴周りの拘束条件について考える。穴周りはボールジョイント部を含む場合も含まない場合も同様に、拘束条件は回転運動と並進運動に還元できる。まず回転運動の拘束では、折角による回転マトリクスだけでなく、ボールジョイント部のオイラー角による3つの回転マトリクスを合わせた積を求め、これまでと同様に単位行列と比較する。並進運動の拘束条件は1つの頂点が回転後に初期位置に戻ることを用いて記述できる(図6、式(8)、(9)、(10))。

$$\prod_{i=1}^3 X_i = I \quad (8)$$

$$T_{i+1} = X_i(T_i - B_i) + B_i \quad (9)$$

$$T_{n+1} - T_1 = 0 \quad (10)$$

(2) 数値計算

回転角モデルの拘束条件はいずれも三角関数を用いて記述されるため、非線形連立方程式の近似解を数値的に求めるアルゴリズムであるNewton-Raphson法を用いる。しかし、与える初期値によっては異なる解へと収束するため、式の性質を理解した初期値、

つまり折紙モデルを解析する場合、折りたたみモードを理解した適切な初期値が必要となる。そこで、折紙モデルの基としたミウラ折りと折りたたみモードが近いと考え、ミウラ折りの折りたたみ過程における折角とオイラー角の変化を計算し、初期値として与えた。

(3) 収納/展開シミュレーション

折線に与える不整の与え方によってひずみの変形率と、増減パターンは変化する。本研究では形状記憶合金による単調な変化によって収納状態から完全に展開することを確認するため、変形率が数%以内である単調増加・単調減少モデルを用いて考察する。しかし、直感的に単調増加・単調減少へと導く不整を与えることは難しいため、端部を除く各頂点に乱数に基づく不整を与え単調増加・単調減少であるかを確認し、与える不整を決定する。

6×6モデルを用いて展開性能について検討する。はじめに構造自由度を1とするため内部の面を8つ取り除いた。(図7)ここで取り除いた16本の部材をアクチュエータとみなし、それぞれ $L_1 \sim L_{16}$ とする。図8に示す θ_i を変化させ、剛体折りシミュレーションを用いて構造全体を収納/展開シミュレーションを行った。この過程での $L_1 \sim L_{16}$ のひずみ率を調べ、すべての弾性部材が単調増加・単調減少となるモデルのひとつが、図7に示す不整を与えたモデルであった。この $L_1 \sim L_{16}$ のうち

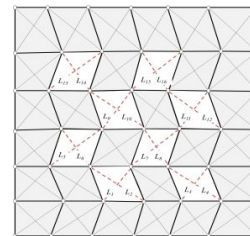
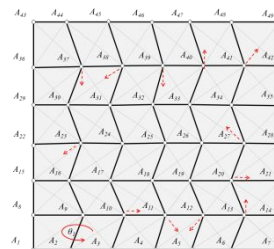


図7 検討した6×6モデル

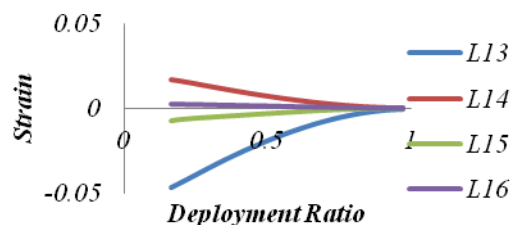


図8 展開過程におけるひずみ

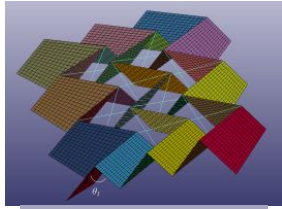


図9 展開シミュレーション

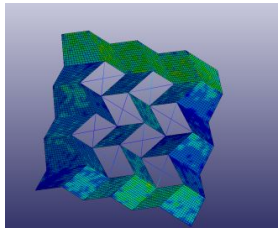


図10 展開過程における応力分布

最大のひずみ率を示した結果を図8に示す。ここで横軸の *Deployment Ratio*(展開率)は、二面角を用いて表される。

次に有限要素法解析ソフトLS-DYNAを用いて、収納状態に $L_1 \sim L_{16}$ のひずみ量を与え、展開シミュレーションを行った。弾性部材部にはバネ定数 $10[\text{N/mm}]$ のバネが取り付けられたアルミニウム合金板を想定している。図9に示すように、 6×6 モデルが収納状態から展開していることがわかる。また展開過程に発生するミーゼス応力を表しており、最大で約 $34[\text{N/mm}^2]$ を示しており、アルミ合金板パネルの弾性変形域内である(図10)。

(4) まとめ

本研究では、不整を与えた剛体折紙モデルに基づく自己展開折紙の設計手法について研究した。

得られた代表的な成果を以下にあげる。

剛体折紙シミュレーションの拡張: この成果によって、本手法に必要な不可欠な「空」の面を有する剛体折紙モデルの解析が可能になった。

4角形メッシュ折紙を自己展開する設計法の一般化: 上記の成果と合わせ、任意のパネルで構成される4角形メッシュ折紙の折りたたみ過程におけるひずみが解析可能となったため、単純なアクチュエータを用いた自己展開構造が設計可能となった。

数値シミュレーションによる展開性能の確認: これによって理想的なヒンジを

持つモデルでは展開可能であることが確認できた。

得られた成果によって、今後は円形膜など異なるモデルも解析可能となると考えられる。

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]"Kirigami auxetic pyramidal core: mechanical properties and wave propagation analysis in damped lattice", Fabrizio Scarpa, Morvan Ouisse, Manuel Colle, and Kazuya Saito, ASME Journal of Vibration, 査読有, vol. 135, (2013), doi: 10.1115/1.4024433.

[2]「弾性折紙モデルと展開構造」, 斉藤一哉, 塚原彬, 岡部洋二, 生産研究 65(6), 査読無, (2013), pp. 107-110.

[3] "Manufacture of Arbitrary Cross-Section Honeycomb Cores Based on Origami Techniques", Kazuya Saito, Sergio Pellegrino, Taketoshi Nojima, ASME Journal of Mechanical Design, 査読有, vol. 136, (2014). doi: 10.1115/1.4026824.

〔学会発表〕(計5件)

[1] "New Deployable Structures Based on An Elastic Origami Model", Kazuya Saito, Akira Tsukahara, Yoji Okabe, ASME IDETC/CIE2013, DETC2013-12901, Portland, 2013/8/7.

[2] 「弾性変形を考慮した折紙モデルに基づく新しい展開構造」, 斉藤一哉, 塚原彬, 岡部洋二, Dynamics and Design Conference 2013 (D&D2013), 九州産業大学, 543, 2013/8/29.

[3]「弾性変形を考慮した折紙モデルに基づく形状可変構造の開発」, 斉藤一哉, 塚原彬, 岡部洋二, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学, J045065, 2013/9/10.

[4] 「弾性折りを利用した展開構造の設計」, 斉藤一哉, 岡部洋二, Dynamics and Design Conference 2013 (D&D2013), 慶應義塾大学, 2012/9/18.

[5] 「弾性折りを利用した新しい展開機構に関する研究」, 斉藤一哉, 岡部洋二, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢大学, 2012/9/11.

〔図書〕(計2件)

[1] 斉藤一哉, 野島武敏, 「折紙の構造強化機能: 新しいコア材の開発— 空間充填で得られるコア材の特性」, in 応用数理ハンドブック, pp. 303-304, ISBN978-4-254-11141-5, 朝倉書店 (2013).

[2] 斉藤一哉, 野島武敏, 「折紙の構造強化機能」 in 折紙の数理とその応用, pp.215-235, ISBN 4320019520, 共立出版 (2012).

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：「変形構造物」
発明者：斉藤一哉
権利者：東京大学
種類：特許
番号：2013-017004
出願年月日：2013 年 1 月 31 日 .
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6 . 研究組織

(1)研究代表者

斉藤 一哉 (Kazuya Saito)
東京大学 生産技術研究所 助教
研究者番号：4 0 6 2 8 7 2 3