

令和 4 年 5 月 31 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：2019～2021

課題番号：19K23547

研究課題名（和文）重力を考慮した折り紙構造の数値解析手法の開発

研究課題名（英文）Numerical analysis method of origami structures considering gravity

研究代表者

張 天昊 (ZHANG, TIANHAO)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：90845728

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、節点座標を未知数とした手法に基づき、折り紙構造の畳み込み運動過程を迅速かつ精確に追跡できる数値計算手法の確立を目的とする。時間のかかる一般逆行列の直接解法を回避し、近似解法を用いて構造物の運動過程の数値計算手法を導いた。同じ問題を違う数学の視点からアプローチすることで、効率の高い新たな解析手法を生み出した。さらに、提案した計算手法を折り紙構造の畳み込み計算に応用し、重力を節点力として直接導入できる畳み込み解析方法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今まで、折り紙の研究はあったが、建築の応用には至っていない。本研究は効率の高い新たな計算手法を生み出すことで、重力環境下で厚みを考慮した折り紙の運動挙動を把握することができた。本研究により、疎行列による折り紙構造の畳み込み解析が可能になり、重力を考慮した多自由度な不安定構造物の運動経路の解明へ発展させることができた。得られた新手法は、新たな構造形式や新規の施工工法につながる展望がある。

研究成果の概要（英文）：This study is to establish a numerical calculation method that can trace the folding process of an origami structure quickly and accurately. The unknown parameters are nodal coordinates. In this study, we derived a new numerical calculation method using the approximate method, rather than directly solving the generalized inverse matrix. By approaching the same problem from different mathematical perspectives, we have created a new efficient analysis method. Furthermore, we successfully introduce the nodal force directly to the origami structure by applying the proposed folding analysis method.

研究分野：建築構造

キーワード：折り紙 展開構造 可動構造 空間構造 不安定構造 構造デザイン 畳み込み 建築構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

折り紙の展開及び畳み込みの仕組みは、宇宙やロボット工学などの分野で活用されているが、建築分野での応用例は極稀である。建築の分野では、この性質を利用した経済的、かつ合理的な施工、解体などへの応用が期待されている。実用化を目指し、折り紙構造の畳み込み過程の解析に関して種々の研究が行われており、主に 折り線の回転角度を未知数とした方法、節点座標を未知数とした方法、の二種類に大別できる。この中で、後者は重力の作用を考慮することができるため、建築分野での使用環境において、より現実に近い数値モデルの解析が可能である。申請者らは、建築分野での実用を目指し、節点座標を未知数とした手法に基づき、折り紙構造をはじめとする不安定構造物の畳み込み運動について研究を行ってきた。外力を直接導入することで、形態不安定な折り紙構造の運動過程を追跡する手法を提案し、重力を考慮した畳み込み経路が明らかになった。しかし、従来の数値方法では、研究対象が複雑になると、解析時間が著しく長いことが、更なる問題の解明を妨げる隘路となっている。そこで、折り紙のような形態不安定な構造物の解析方法において、如何に高い解析精度を保ちつつ、計算効率を大幅に向上させるかが本研究の核心的な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究は、節点座標を未知数とした手法に基づき、折り紙構造の畳み込み運動過程を迅速かつ精確に追跡できる数値計算手法の確立を目的とする。

既往の研究と異なり、本研究は一般逆行列を直接求めることを回避し、線形写像との関係を用いて、構造物の運動過程の数値計算を行った。同じ問題を違う数学の視点からアプローチすることで、効率の高い新たな解析手法を生み出す。

### 3. 研究の方法

- (1) 一般逆行列の近似解法による不安定構造の運動追跡手法を導く。数値計算例による計算を行い、従来の手法と比較する。
- (2) 提案した計算手法を折り紙構造の畳み込み計算に応用し、節点力を直接導入できる畳み込み解析方法を提案する。
- (3) 三次元撮影方法を用いて、折り紙構造物の実物模型の畳み込み過程を測定する。

### 4. 研究成果

#### (1) 近似解法による畳み込み解析手法の確立

従来の折り紙構造の畳み込み解析で核心的な操作となる一般逆行列の計算は、疎行列 (Sparse Matrix) による計算ができないため、計算速度が遅い劣点があった。これを克服するために、新たに近似解法を用いた不安定構造の運動計算手法を導いた。

本研究では、近似解法を修正することで、一般逆行列を直接計算せずに不安定構造の運動経路を追跡できる数値手法を導出し、Improved approximation approach (IAA) と定義した[1]。この新しい手法は、疎行列による数値計算を用いることが可能であり、従来の行列計算の効率を大幅に上げることが可能である。特に自由度の多い柔軟な構造に対して、既存の手法では計算速度に制限されていたが、IAA により布のような柔らかい素材の運動挙動を追跡することも可能となった (図1)。

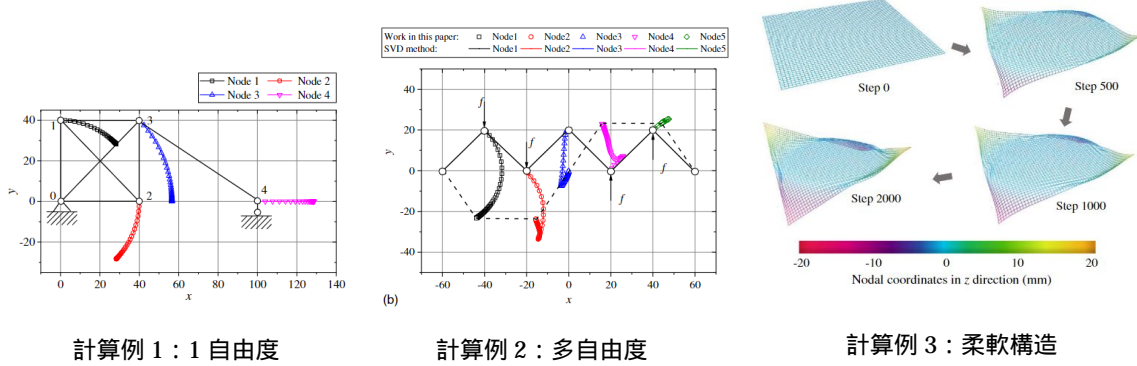


図1 IAAによる数値計算

解析精度と計算効率を指標とし、従来の手法から得られた結果と比較した。解析精度の面では、従来のSVD手法による一般逆行列の計算に劣らない計算精度が得られた。近似解法のため、近似の閾値が精度に関係することが分かる一方、この閾値は計算効率に影響を及ぼさないことも判明した。1自由度、多自由度、柔軟構造、などにおいて少ない計算量で精度の高い運動追跡ができた。

これによって、疎行列による数値手法を用いて、迅速かつ正確に不安定構造の運動追跡が実現できることを確認できた。節点を未知数とする折り紙構造の畳み込み解析の数値計算手法は理論的に可能であることを明らかにした。

### (2) 折り紙構造の畳み込み手法の構築

提出した手法を折り紙構造の畳み込み設計に応用した。厚みのある折り紙構造に着目し、ヒンジラインを面外へ移動することにより、折り紙の厚みを考慮できる数値モデルを創出した。節点間は伸び縮みが発生しないリンクで連結し、不安定フレームの剛体運動で厚みのある折り紙モデルの畳み込み過程の模擬に成功した[2]。節点力を直接導入することで、重力の影響を数値計算に取り入れることができた(図2)。

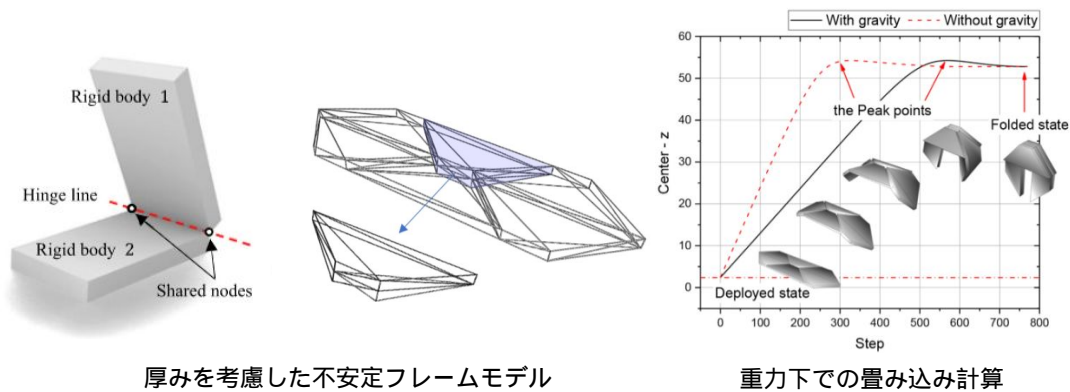


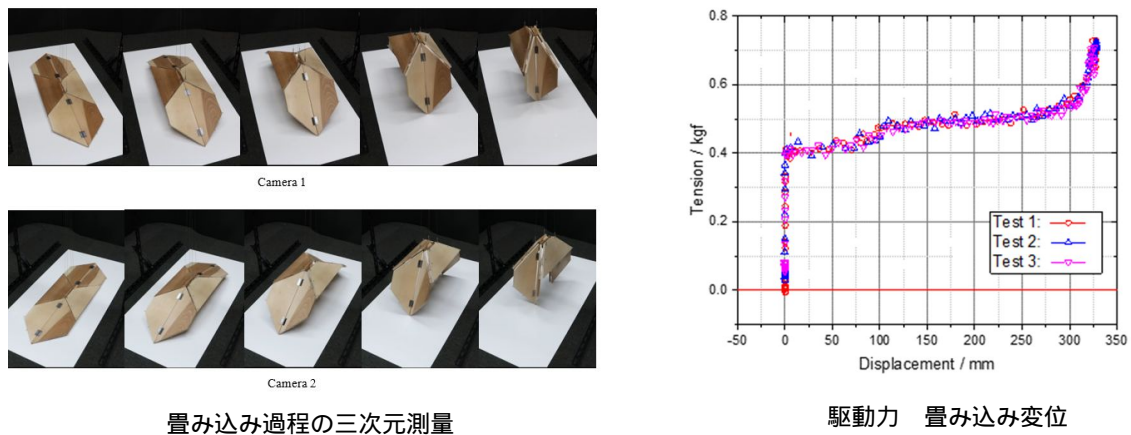
図2 厚みと重力を考慮した折り紙モデル

厚みのある1自由度のミウラ折りモデル、多自由度のヨシムラ折りモデルにおいて、重力下での畳み込み経路計算と畳み込みモード解析を行い、本手法は誠実に構造の特徴を表すことができると判明した。また、実際に設計へ応用するため、提案された解析手法をもとに、Grasshopperのコンポーネントを作成し、研究成果が広く応用できるよう公開した。

### (3) 実物モデルの畳み込み実験による数値手法の検証

不安定な折り紙構造物の実物模型を作製し、実際に畳み込み実験を行った。畳み込み実験では、ステレオカメラによる三次元撮影方法を用いて、節点運動を追跡することにより畳み込み過程を測定した。これと同時に、駆動力と展開経路を同時に測定し、重力環境下における畳み込み過程

の力学挙動を把握した(図3)。実験で得られた結果と解析の比較により、実際の運動経路は本研究で提案した数値手法による畳み込み経路とほぼ同じであることから、数値手法の妥当性が検証できた[3]。これにより、本研究の手法を用いることで、厚みを持つ折り紙構造の設計を行うことができると判明した[4]。また、外力を導入することで、重力環境において予め求められた運動経路に沿って畳み込むことを確認できた[5]。さらに、重心位置、材料の厚さと畳み込みの関係から、建築構造への応用を議論した。本研究の成果をもとに、疎行列による折り紙構造の畳み込み解析が可能になり、重力を考慮した多自由度な不安定構造物の運動経路の解明へ発展させることができた。



畳み込み過程の三次元測量

駆動力 畳み込み変位

図3 実物モデルの畳み込み実験

< 引用文献 >

- [1] T Zhang, K Kawaguchi, M Wu, Improved approximation approach for folding analyses of structures with kinematic indeterminacy, *Journal of Engineering Mechanics* 148 (5), 04022021, 2022.
- [2] 張天昊、川口健一、呉明兒、不安定骨組による折り紙構造の畳み込みに関する基礎的研究、*日本建築学会大会梗概集、構造 I*、997-998、2019
- [3] T Zhang, K Kawaguchi, Folding analysis for thick origami with kinematic frame models concerning gravity, *Automation in Construction* 127, 103691, 2021.
- [4] 張天昊、川口健一、呉明兒、重力と厚みを考慮した折り紙の畳み込みに関する基礎的研究、*日本建築学会大会梗概集、構造 I*、911-912、2020
- [5] 張天昊、川口健一、厚みを持つ折り紙の運動経路に関する基礎的研究、*日本応用数理学会研究部会連合発表会*、2021

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhang Tianhao, Kawaguchi Ken'ichi	4. 巻 127
2. 論文標題 Folding analysis for thick origami with kinematic frame models concerning gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automation in Construction	6. 最初と最後の頁 103691 ~ 103691
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.autcon.2021.103691	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 -

1. 著者名 Zhang Tianhao, Kawaguchi Ken'ichi, Wu Minger	4. 巻 148
2. 論文標題 Improved Approximation Approach for Folding Analyses of Structures with Kinematic Indeterminacy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Engineering Mechanics	6. 最初と最後の頁 4022021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002106	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 張天昊, 川口健一, 吳明兎
2. 発表標題 重力と厚みを考慮した折り紙の畳み込みに関する基礎的研究
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会梗概論文(シェル・空間構造関連部門)オンライン発表会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 張天昊, 川口健一
2. 発表標題 厚みを持つ折り紙の運動経路に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本応用数理学会 2021年 研究部会連合発表会
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 張天昊, 川口健一, 吳明兎
2. 発表標題 不安定骨組による折り紙構造の畳み込みに関する基礎的研究
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://zhang-th.wixsite.com/main>

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