

京都大学	博士 (工学)	氏名	早川 健太郎
論文題目	Design and Geometrically Nonlinear Analysis of Rigid Origami Structure with Multiple Degrees of Freedom (多自由度剛体折紙構造の設計と幾何学的非線形解析)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、剛な面と折線で構成され、面を変形させずに平面に展開できる多面体構造の一種である剛体折紙構造を用いて曲面を近似するための方法と、その展開経路を追跡して安定性を判別するための幾何学的非線形解析法を提案したものであり、6章からなっている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、折紙に関する学術的背景と剛体折紙の構造体への利用を概説し、用語を定義するとともに、本論の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、剛体折紙構造をモデル化するための回転ヒンジモデル、トラスモデル、有限要素モデルとフレームモデルの概要を示して比較するとともに、第3章以降で用いるフレームモデルの基礎式と、変形の適合条件および微小変形メカニズムの条件を導出している。形状生成に使用するフレームモデルの独立な節点座標成分は、節点座標に関する幾何学的な線形制約条件式の係数行列の Reduced row echelon form から得られ、不安定な変形の自由度 (不安定次数) と微小変形メカニズムは適合行列の特異値分解によって得られることを示している。</p> <p>第3章では、平面に展開できる剛体折紙構造で目標曲面を近似する手法を提案している。剛体折紙構造の多面体形状は、平面に展開できる条件 (可展条件) を制約条件とし、目標曲面の近似誤差を目的関数とした最適化問題を解くことで生成する。可展条件は内部頂点での離散ガウス曲率、四つ以上の辺を有する面を分割する三角形面の単位法線ベクトルの外積のノルム、および切り目の辺の長さと同面の内角を用いて定式化している。また、ベジエ曲面で定義された目標曲面と多面体の形状誤差を、多面体頂点と曲面の距離に加えて、面の法線ベクトルと曲面の面積を用いて見た目の近似度に対応する指標を用いて評価し、不安定次数が小さい剛体折紙構造によって曲面形状を近似するため、初期の三角形メッシュから逐次除去 (固定) する折線 (ヒンジ) を選択する方法を提案した。固定ヒンジの選択において、曲面を近似する多面体を平面に展開する際に変形がロックする可能性が小さいものを選択するための指標として、剛体折紙の折線に回転剛性を与えたヒンジでモデル化した場合のフレームモデルの剛性行列の固有値の回転剛性に関する微分係数を用いた指標と、剛性行列の固有ベクトルから得られる微小変形メカニズムモードの成分を用いた指標の2種類を提案した。上記の指標に折線の折り角に関する指標もあわせて、可展条件を満たす解に収束しやすく、かつ変形がロックしにくいヒンジを固定することで最適化問題を解く回数の低減を図っている。本手法は、4つ以上の辺を持つ面で構成された多面体を対象とすることができ、三角形や四角形に限定した従来の手法より一般的な折線パターンを生成可能である。さらに、不安定次数の小さい剛体折紙構造を生成することで建築の屋根構造に適用したときの施工性にも配慮した手法である。</p> <p>第4章では、第3章で提案した手法を用いてさまざまな形状の曲面を近似するとともに、固定する折線選択のための指標の有効性を確認している。ランダムに生成された曲面、双曲放物面とドーム型曲面を目標曲面とし、折線選択指標を用いることにより、少ない変形自由度で平面に展開できる剛体折紙による多面体曲面を生成できることを例示した。初期の三角形メッシュの折線パターンには格子状とランダム性を有するパターンの2種類を考え、多面体頂点から曲面までの距離には鉛直方向と目</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	早川 健太郎
<p>標曲面の法線方向の2種類を考えている。ランダムに生成された曲面に対する結果から、平面に展開する際に変形がロックする可能性を低減するためには、多面体の形状と変形メカニズムの両方を考慮した指標が最も有効であることを示した。また、双曲放物面とドーム型曲面に対する結果から、目標曲面までの距離を求める際の向き、および近似誤差関数における面積と法線ベクトルの誤差の重み係数が解の個数と近似精度に与える影響を例示した。さらに、外部境界上の頂点に接続する辺に切り目を入れることによって、曲面の近似精度が大きく向上することを示した。</p> <p>第5章では、剛体折紙の折線に回転剛性を与えたヒンジでモデル化したフレームモデルを用いて、剛体折紙の展開過程を荷重増分法でエネルギー最小化により追跡する手法を提案している。ヒンジのばねのひずみエネルギーと外力仕事によって全ポテンシャルエネルギーを定式化し、変位の適合条件を等式制約として拡張ラグランジュ関数に導入している。釣合い状態の安定性は、拡張ラグランジュ関数のヘッセ行列の固有値で判定できる。不安定な釣合い状態でヘッセ行列の0の固有値に対応する固有ベクトルから得られる変形モードが1次の微小変形メカニズムであることを確認するための数値的な手法もあわせて提案している。簡単な剛体ばねモデルによって、釣合い状態の安定性を判別して分岐荷重を求めることが可能であることを示し、Waterbomb形の単位セルの平面状態に形状初期不整を与えて面内の荷重を載荷する解析により、異なる微小変形不安定モードの方向に形状初期不整を与えても大変形後には同一の形状に収束する場合があることを示している。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	早川 健太郎
----	--------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、剛な面と折線で構成され、面を変形させずに平面に展開できる多面体構造の一種である剛体折紙構造を用いて曲面を近似するための方法と、その展開経路を追跡して安定性を判別するための幾何学的非線形解析法を提案している。以下、その内容と得られた結果を記す。

(1) 剛体折紙構造をフレームモデルでモデル化し、平面に展開できる制約条件の下で目標曲面の近似誤差を目的関数として最小化する最適化問題を定式化した。また、不安定な変形の自由度が小さいモデルによって曲面を近似するため、折線を逐次除去(固定)する方法を提案した。本手法は、4つ以上の辺を持つ面で構成された多面体を対象とすることができ、三角形や四角形に限定した従来の手法より一般的な折線パターンを生成可能である。

(2) 剛体折紙の折線を回転剛性を有するヒンジでモデル化し、その剛性行列の固有値と、微小変形メカニズムに対応する固有モードを用いて、平面に展開する際に変形がロックする可能性が小さい固定ヒンジを選択するための指標を提案した。また、その指標を用いることにより、少ない変形自由度で平面に展開できる剛体折紙による多面体曲面を生成できることを、双曲放物面とドーム型曲面を用いて例示した。

(3) 切り目のある剛体折紙構造を対象として、平面に展開する際の切り目のまわりの適合条件を導出した。また、切り目を入れることによって曲面の近似精度が向上することを示した。さらに、剛体折紙による目標曲面の近似精度を定量化するため、折紙頂点と曲面の距離に加えて、曲面と多面体の面積の誤差および法線ベクトルの誤差を用いて、見た目の近似度に対応する指標を提案した。

(4) 剛体折紙の折線を回転剛性を有するヒンジでモデル化したフレームモデルについて、剛体折紙の展開過程を全ポテンシャルエネルギー最小化と荷重増分法によって追跡する手法を提案した。その際、適合条件を拡張ラグランジュ関数に導入し、そのヘッセ行列の固有値によって、釣合い状態の安定性を判別して分岐荷重を求めることが可能であることを示した。Waterbomb形の単位セルの解析により、異なる微小変形不安定モードの方向に形状初期不整を与えても大変形後には同一の形状に収束する場合があることを示した。

本論文は、多面体構造の剛体折紙構造を用いて曲面を近似するための方法と、その展開経路を追跡して安定性を判別するための幾何学的非線形解析法を提案したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。