

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 舘 知宏

審査委員会は、上記論文提出者が提出した博士学位請求論文

「Architectural Form Design Systems based on Computational Origami

(計算折紙幾何学に基づく建築形態デザインシステムに関する研究)」(本文は英文)に対し、本論文と提出者が審査委員に対し個別に行った説明、及びその時の質疑応答、論文発表会(口頭による最終試験)とその時の質疑応答、論文発表会後に開催した審査委員会での審議とそこからの指摘事項に対する提出者の応答、さらに電子メール上で行った審査委員同士の審議を通し、当該論文の審査を行った。その審査結果を下記にまとめる。

本研究は、折紙の幾何学的な手法に基づいて建築・工学へ応用可能な形態や機構を設計するための理論を「建築折紙」として提案し、これを主に計算機を用いて建築のデザインへと応用しようとするものである。折紙の工学的現象を様々なデザインの場面において利用可能なものとするため、折紙を多様なトポロジー・平坦状態・変形機構を可能とする形式に拡張して定義し、その抽象化された折紙とその条件を離散化し計算可能な形式で表すことを試みている。

また、現実のデザインの諸問題において求められるフレキシブル性を満たすため、諸条件・目的関数から必要な形態を導くという対話型の「設計」的アプローチを適用している。本論文では建築における折紙の利用を計算幾何学的に定義し、それらをもとにして三種類の問題、(任意形状の多面体を折り紙で実現する問題、剛体折り可能で可展かつ平坦折り可能な四辺形メッシュ構造の幾何学、剛体折り可能で平坦折り可能な四辺形メッシュ筒型構造の幾何学)に対して実用的な解法を与え、それぞれの解法を対話型形態デザインシステムとして構築することを試みている。さらにそのデザインシステムを用いた建築空間デザインを例示し、建築折紙の実用性を示している。

1章では、折り紙とその基礎理論に関する現状と背景、及び本論文の位置づけについて述べている。

2章では、折紙のトポロジーを拡張し、等長写像可能でホモトピックな少なくとも一つずつの平坦状態及び立体状態を持つ曲面として折紙を定義し、立体から平面、平面から立体という折紙の工学的現象を幾何学的にモデル化している。このモデル化によって、シート材料の折り曲げ加工を可能とする可展性の

条件、空間の平面への折り畳みを可能とする平坦折り可能性の条件、伸び縮みしないパネルと回転ヒンジによって作られる形状変形を表現した剛体折りの機構の拘束条件などを、各頂点まわりの局所的条件及びホモロジー基底を為す閉曲線上の積分量の条件として表現している。

3章では襞を内部に作ることで隙間のない三次元多面体を形作るアプローチを考え、さらに立体形状の入力に対し平面上のパターンを求めるという設計問題を解いている。非線形の等式および不等式として定式化し、それを解くための二段階のマッピングおよび稜線襞分子の再分割によるアルゴリズムを提案、二段階のマッピングにより問題を線形問題へと帰着し、LU分解の事前計算によって高速化することで、条件を満たした複雑な展開図パターンをリアルタイムかつインタラクティブに探索できるようなデザインシステムを実現している。例として374個の三角形からなるウサギの立体像(Stanford Bunny)を一枚の紙を折るのみで実現できることを示している。

4章ではミウラ折りに代表されるような、冗長な拘束による一自由度剛体折り機構を持ちコンパクトに折畳まれる自由形状の連続面に関する考察を行っている。この剛体折りに関する特異性を形態の対称性に依存しない形式へと一般化し、可展かつ平坦折り可能な四価頂点構造の剛体折り可能性が一つの非自明な三次元状態の存在と同値であることを証明している。さらに、バックグラウンドのリアルタイム計算で剛体折り可能性を保ちつつ、ユーザが直感的に自由に曲面を変形させる事のできるインタラクティブデザインシステムを考案している。また、機構を維持したまま面を厚みのあるパネルで置き換える手法も考案している。

5章では、4章での研究の発展として、剛体折り可能で平坦折り可能な四辺形メッシュ筒型構造およびそのバリエーションの設計手法を考案している。基本モデルとして、等方及び異方の二種類の筒型構造へと一般化し、等方な構造を一定厚の板を組み合わせたボリュームで実現する手法と、異方な構造を複合的断面に適用する事で、レイヤー構造や複合的構造を実現する手法を示している。既存の筒型折り畳み構造は形状変形が材料の柔軟性に依存しており、剛体折りできるものはなかったが、本研究で提案している筒型構造は、剛体折り可能で、スケールや用途に応じた構造的・環境制御的な特性を実現することが容易となっている。さらに、与えた断面曲線をリアルタイムにアップデートし構造を生成するシステムをCAD上に構築している。

6章では、第4章で構築したシステムを主に用いて、建築折紙を用いたデザイン提案の例を示している。既存の二つの建築物の間にアダプティブに付加する空間をデザインするという具体的な建築的問題を提示し、用途に応じてあるときは二つの建築物の開口を接続し一体化したギャラリースペースとして機能

し、あるときは半屋内的空間として用いられ、あるときはコンパクトに折り畳まれてファサードに同化する空間をデザインしている。

7章では結論として本論文で得られた研究成果を整理列記してまとめている。

以上の成果により、折紙の建築デザイン応用のための基礎理論を構築し、計算機の積極的な応用によるプログラミングと設計手法の基盤となる方向性を提示し、今後の発展的研究の指針を示すことで実用化への道を拓いていると評価できる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。