

三次元折紙設計ツールの開発

—1枚の折紙で自由三次元形状をつくる世界初のシステム—

1. 背景

折紙は、一枚の連続した平面を伸び縮みなく切り貼りなく、折ることのみによって様々な形態を作りあげるわざであり、芸術的表現としてあるいは工学的な応用において大きな可能性をもった技術である。現代の折紙創作現場では、立体的・二次元的な形状による表現、折り重なる襷による空間・陰影表現などの新しい表現の方向性が試され、作品は爆発的に多様となってきた。

一方で、折紙をデザインするための既存のシステムとしては、ツリー構造を実現するものとルールに基づいてタイルパターンを自動生成するものしか存在しなかった。これらのツールではユーザが自由にコントロールできる要素は非常に少なく、手法の汎用性・拡張性も乏しい。このため、自由な形・表現を実現するためにはノウハウに基づく設計や高度な仕上げの技に頼らざるをえず、実際の折紙のデザイン現場においてツールが使われることは稀であった。

このような背景から、折紙の設計的創作は限られた熟練者のみが可能なものであった。さらに熟練者であってもノウハウと技による試行錯誤的設計では限界があり、特に複雑な三次元形状の再現は不可能であった。

2. 目的

本プロジェクトでは、高度な技やノウハウを用いずに自由な形状を直感的に折紙化できるようにするための設計ツールの開発を目的とする。三次元形状の多面体表現を入力としユーザが直感的な対話を通じて展開図をデザインするシステムを開発する。得られた展開図からは描かれた折り目に従って折るだけで、意図したディテールを忠実に三次元的に再現する折紙作品ができあがる。

本ツールを使えば折紙設計の熟練者でなくとも簡単に三次元的な折紙を設計できるのみならず、ノウハウや仕上げ技の限界を超え今までの折紙では不可能であった完全に新しい表現を得ることができる。

さらに、手法の汎用性・拡張性を高くすることで、将来的には現在試行錯誤で行われている新しい表現技法を統合・拡張したり、既存の折紙パターンをパーツとして再利用したりするコンプレックス系折紙設計の基盤システムへの発展を目指す。

3. 開発の内容

入力された三次元モデルから二次元の折紙展開図を得るソフトウェア、“Origamizer”を開発した(図1)。

用いる折紙化手法は、連続したポリゴンを離して平面上に並べ、生じた隙間に特殊な折り線構造「襷分子」を挿入することで展開図を生成するというものである。この「襷分子」を折ると、離れて配置されていたポリゴンどうしが立体的に繋がり、もとの三次元形状が再現される。

折紙化が可能であるためには、二次元条件(面と折り線が重なったり干渉しない)及び三次元条件(襷が曲面内部に収まり必要な曲率が構築できる)という条件を満たさなくてはならない。開発にあたってこれらの条件を面の配置に関する等式条件・不等式条件として表すことで、リアルタイムの数値計算で解法可能とした。

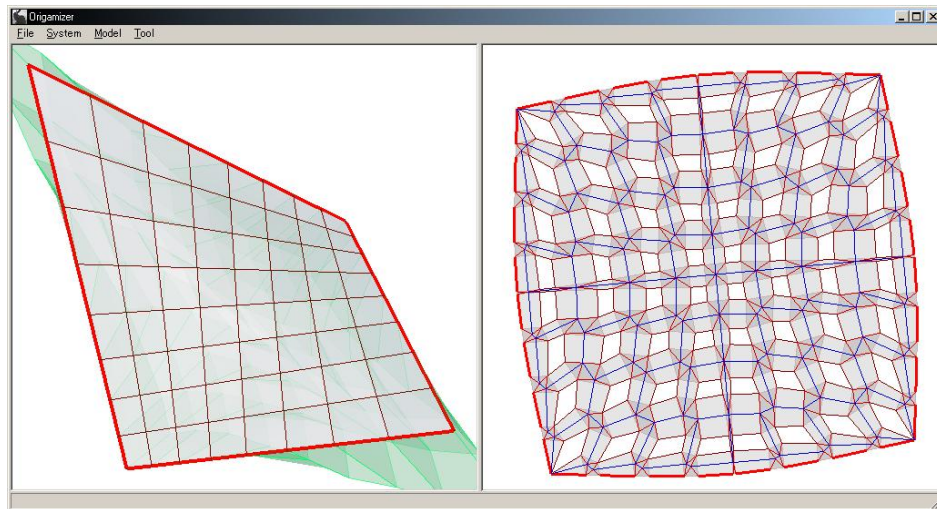


図 1 "Origamizer"操作画面。左で入力モデル、右で出力の展開図を表示する。

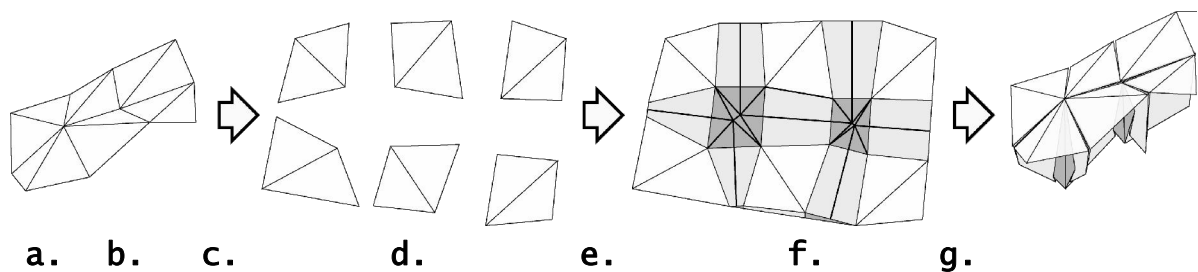


図 2 システムを用いた折紙化の手順

ソフトウェア利用の流れを以下に示す(図 2)。

- a. まず、ユーザは obj 形式のポリゴン三次元データをシステムに入力する。
- b. 次に必要があれば、マウス操作と既存輪郭からの最短経路計算を通じて三次元モデル上に現われる用紙輪郭位置を指定する。
- c. develop コマンドによってシステムはメッシュ上のポリゴンを平面上に自動的に展開する。
- d. ユーザはマウスドラッグによる面位置編集、襷領域分割などの対話的操作を行っていく。その中でシステムは、自動的に「二次元条件」及び「三次元条件」が満たされるようにバックグラウンドで計算を行い操作結果をリアルタイムに補正する。
- e. システムは決定した面配置を元に自動的に展開図を生成する。対応する頂点を折り重ねるための折り線パターン「襷分子」を展開された面と面の隙間に挿入

- する。展開図を表示したまま **d.** に戻って面配置編集を行うことも可能である。
- f.** 展開図を dxf 形式の二次元ベクタデータへと出力する。
 - g.** 展開図を紙へ印刷し、折り線に従って紙を折れば入力した三次元形状が折紙で再現できる。折りあがるプロセスを指で楽しみましょう！

本システムの技術的な特徴は、開発期間中に研究・提案した新規の展開アルゴリズムとそのインタラクティブ性である。展開時にポリゴン数に比例する数の条件を扱う必要があるが、本システムでは、展開図パターンを単純にする拘束条件(対称条件)をアルゴリズムの中心として自動展開アルゴリズム・二次元条件・三次元条件を記述することで、ほぼ自動的な展開・不等式条件の解法が行われるようにしている。またそれゆえにユーザインタフェースはリアルタイムで直感的である。

最後にこのシステムを使って作った立体折紙作品の例を示す(図 3)。

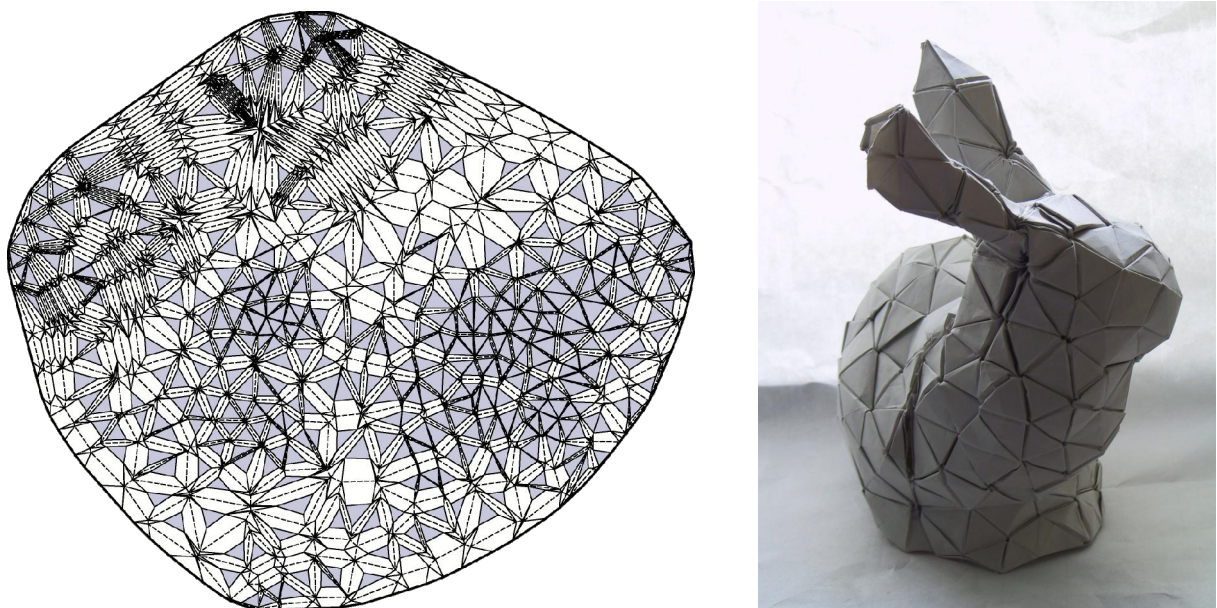


図 3 本ソフトウェアを用いて設計した例 (約 400 ポリゴンの Stanford Bunny)

左：ソフトウェア出力の展開図

右：折紙展開図を実際に折った世界初の Origami Stanford Bunny

4. 従来の技術（または機能）との相違

開発成果によって、今まで不可能であった折紙の三次元表現がはじめて可能になった。得られる三次元的な折紙表現は、本ソフトウェアのサポートが無ければそもそもありえなかった革新的なものである。例えば図 3 に示す Stanford Bunny は世界初の折紙化である。

欲しい形状の折紙をデザインする既存のソフトウェアでは具象物を一次元的な樹状構造としてしかモデル化できず、二次・三次元的表現は勘や経験に頼る必要があった。そのため最終的な折紙は表現の広がりには大きな限界が存在した。一方、本ソ

フトウェアは自由な三次元的な表現を直接扱うことでその限界を無くした。どの方向から見ても完璧なフォルムと繊細な曲率によるディテールを折紙にもたらすことに成功した。

5. 期待される効果

本ソフトウェアは今まで独立に存在していた折紙デザインの手法を拡張・統合する。例えば、本ソフトウェアの折紙表現は具象的表現に代わる表現の新しい方向性として近年着目されている二次元折紙手法の Origami Tessellations を三次元へと拡張したものと解釈できる。本ソフトウェアは既存設計手法に新しい解釈を与え、今まで統合することが出来なかった折紙のノウハウを統一的な枠組みで相互に連結可能とする。さらに、この統一的な枠組みを通して折紙創作を再解釈することで、アーティストが新しい折紙表現を発見する助けとなることが期待される。

また波及的研究によって、折紙の工学的利用におけるデザインの可能性の広がりが見込める。折紙の数理には工学的な応用可能性が高いが、これまでの折紙工学のアプローチでは既に与えられた特定の折紙パターンの利用可能性を探るという順方向のものが主流であった。本ソフトウェアは折りあがった形からパターンを求めるといった一般的な逆問題を解くものであり、折紙工学にデザイン可能性を与えるための一つの重要なアプローチを示している。

6. 普及（または活用）の見通し

2007 年度中にウェブ上で無償公開の予定である。それぞれ数百人規模の折紙作家を中心とするコミュニティ (Origami USA, 日本折紙学会, その他海外の団体, ネット上のコミュニティ) などで、折紙アーティスト・研究者・愛好家からのフィードバックを得ながら、折紙設計の統合的なツールを目指したアップグレードを行う。最も高度に折紙に取り組むユーザ (数十人程度と想定される) の反応によって、折紙の創作法の融合や新規の手法の開拓等を期待する。

より長期的な展望としては、通常の折紙と同様またはそれ以上に一般的な趣味としての普及を図る。公開された展開図をパズルゲームのように楽しみ、さらに自分だけのオリジナルな作品を折って楽しむ事を想定する。独特の手法で紙と手との対話を通して立体的な形を顕在化させるので、ペーパークラフトと違う、またこれまでの折紙とも違った魅力を持った遊びとなるはずである。現開発段階で既に、簡単に折紙の展開図が得られるシステムを実現できているので、更に研究のうえ改良を重ねることで、折紙入門者でも折れる程度に簡単な展開図を出力するソフトウェアを目指す。

7. 開発者名（所属）

舘 知宏（東京大学大学院工学系研究科建築学専攻）
（参考）<http://www.tsg.ne.jp/TT/>