

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

簡略化モデルによる折紙形状構築手法

田中 慎一

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 三谷純

2018年3月

概要

折紙を題材とした CG 画像または映像の制作には多大な手間を要する。この原因は、「紙を折って作られる形」という折紙作品のもつ幾何的な制約を満たす 3D 形状を従来の 3DCG ソフトウェアでモデリングすることの困難さにある。そこで本研究では、折紙のモデリングを簡易的に行う手法を提案する。

ポスターや映画のワンシーンのような CG の制作に用いるためのモデルであれば、外見に表れない内部の構造まで正確に再現する必要はなく、見かけの形状がそれらしく作られていれば十分である。そのため、既存手法のように、折紙作成の工程を計算機上で再現することで 3D モデルを作成するのは、CG 制作のためのモデリング手法としては無駄の多いアプローチであり、また、折紙のモデリングを複雑にしている要因であるとも考えられる。そこで提案システムでは、折紙の構造を忠実に再現するのではなく、見かけの形状をそれらしく作成することで、折紙の 3D モデリング作業を容易にすることを試みた。

提案システムにおいてユーザは、外観の形状と、各部位が「どのような折り方で作られているか」を説明するアノテーションの入力を行う。システムは、これらのユーザ入力から 3D モデルを生成する。この過程で内部構造は生成されないため、実際に紙を折ってできる形状を忠実に再現したものではなく、「指定された折り方で作られているように見える形状」が生成されることになる。これによって、ユーザは、2次元の簡単な入力によって、折紙の疑似的な、しかしながら CG 用には十分な 3D モデルを作成できる。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	2次元の画像から3Dモデルを生成する研究	3
2.2	折紙のモデル化に関する研究	3
2.3	折紙のCG用の幾何モデル生成に関する研究	4
2.4	折紙のレンダリングに関する研究	6
第3章	提案システム	8
3.1	システムの概要	8
3.1.1	ポリゴンの配置	8
3.1.2	アノテーションの配置	9
3.2	折り形状の生成	11
3.2.1	ポリゴンの配置変更	11
3.2.2	二つ折り	12
3.2.3	折り込み	13
3.2.4	沈め折り	14
3.2.5	中割り折り	15
3.2.6	かぶせ折り	16
3.2.7	段折り	17
3.2.8	豚の脚	18
第4章	結果	20
4.1	実装したアプリケーション	20
4.2	鏡像生成アノテーション	21
4.3	試作例	22
4.4	ユーザテスト	25
第5章	結論	27
5.1	まとめ	27
5.2	今後の課題	27
	謝辞	29
	参考文献	30

図目次

図 1-1: 提案システムの概略図。	2
図 2-1: ORIPA[8]により作成された折紙の展開図 (左) と折りたたみ後の形状 (右)。線分で分割された閉領域の折りたたみ後の重なり順を計算することで、折りたたみ後の形状を推定している。	4
図 2-2: 文献[12]の作品例。CG 制作ソフトウェア Maya を用いてモデリングとレンダリングを行う方を研究し、図のような作品の制作を行っている。	4
図 2-3: 文献[5]のシステムにより作成された作品例。マウスのドラッグ操作で頂点を動かすことで紙の形状を操作することができるインタフェースが開発し、図のような幾何モデルを作成している。	5
図 2-4: 文献[6]のシステムにより作成された作品例。マウスを用いて直感的に紙の折り操作を行うことのできるインタフェースが開発し、図のような幾何モデルを作成している。	5
図 2-5: 文献[7]のシステムにより作成された作品例。タッチパネル入力を用いて紙の形状を直感的に操作することのできるインタフェースが開発し、図のような幾何モデルを作成している。	5
図 2-6: 文献[13]の手法によるシミュレーションの様子。ヒンジで接続された剛体の面の動きをシミュレートし、そのように扱うことのできる折紙の幾何モデルを生成している。	6
図 2-7: 文献[15]の BSDF を用いたレンダリング結果。計測に基づく紙の BSDF が提案されており、それを用いることで図のようなレンダリング結果が得られている。 .	7
図 2-8: 文献[16]の手法による形状再構築前 (左) と形状再構築後 (右) のレンダリング結果。図左のように同一平面上に重なっているモデルの形状を再構築することで、図右のようにその構造が視覚的に把握できる画像を生成している。	7
図 2-9: 単純なレンダリング結果と文献[18]の手法によるレンダリング結果の比較。(a) のように自己干渉を起こしている折紙の幾何モデルに対して、文献[18]の手法を用いることで(b)のように表示することができる。(c)のようにエッジの表示も正しく行うことができる。	7
図 3-1: 提案システムのユーザインタフェース。	8
図 3-2: アノテーション (左) と構築されるグラフ (右) の例。	12
図 3-3: 二つ折り形状生成における面の追加の様子。	13
図 3-4: 折り込み形状生成における面の追加の様子 (左) とその断面図 (右)。	14
図 3-5: 沈め折りの外観。	15
図 3-6: 沈め折り形状生成における面の追加の様子 (左) と頂点の連結関係 (右)。 ..	15
図 3-7: 中割り折りの外観。	16
図 3-8: 中割り折り形状生成における面の追加の様子	16
図 3-9: かぶせ折りの外観。	17
図 3-10: 段折りの外観。	17
図 3-11: 段折り生成における面の追加の様子 (左) と Z 軸方向から見たf2の様子 (右)。	

.....	18
図 3-12: 豚の基本形の外観。	19
図 3-13: 豚の脚形状生成における面の追加の様子 (左) とその断面図 (右)。	19
図 4-1: 実装したアプリケーションのユーザインタフェース。	20
図 4-2: 鏡像生成の様子。	22
図 4-3: 試作結果。(出典: 1-3 段目『日本のおりがみ辞典』 [21]、4-5 段目『本格折り紙 √2』 [22])	23
図 4-4: 構造に忠実に制作したモデル (左) と内部構造を省略したモデル (右) の比較。	24
図 4-5: 図 4-4 に示すモデルの展開図。	24
図 4-6: シルエットパズルから作成したモデルの例。	25
図 4-7: ユーザテストで作成されたモデル。	26
図 4-8: ユーザテストで作成されたモデルのレンダリング結果。	26

第1章 序論

1.1 はじめに

折紙は古くから伝わる日本の文化の一つであり、それをコンピュータグラフィックス (CG) で表現することは文化的な価値がある。しかし、折紙を題材とした CG 画像または映像の制作には多大な手間を要する。この原因は、「紙を折って作られる形」という折紙作品のもつ幾何的な制約を満たす 3D 形状を従来の 3DCG ソフトウェアでモデリングすることの困難さにある。

Maya 等の高度な機能を多数備えた 3DCG 制作ソフトウェアは、CG クリエイターに広く利用されている。しかしながら、その扱いには知識と習熟が必要であり、一般のユーザにとって利用しやすいシステムであるとは言い難い。

その問題を解決するために、2 次元の画像を用いて 3D モデリングを行うことのできる手法が提案されている[1][2][3][4]。これらの手法は楕円体や一般円筒を変形させてできるような形状の 3D モデルの作成を容易にすることに成果を上げているが、折紙のような形状を扱うことのできる 2D-3D モデリングシステムはこれまでに開発されていない。

紙の形状モデリングを目的としたシステムとして、マウスやタッチインタフェースによって紙の折り操作をシミュレートするソフトウェアが開発されている[5][6][7]。これらのシステムでは、実際に作品を作る工程を再現することによって 3D モデルの作成を行う。しかし、得られる形状は平面上に多角形が配置された幾何モデルであり、実世界の折紙のように紙の厚みに由来した立体感を持たせるには、ポリゴンの交差を抑制しながら頂点位置を微調整する、という困難な作業が必要となる。

以上のことから、折紙の 3D モデリングは容易ではない。そこで本研究では、折紙の幾何モデルを簡易的な方法で作成できるシステムの開発を行った。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、折紙のモデリングを簡易的に行う手法を提案することである。しかしながら、折紙作品の取りうる形状の範囲は広く、すべての形状を包括的に扱うことのできるシステムの構築は現実的でない。そこで本研究では、一般に CG 制作の題材とされやすい動物をモチーフとした折紙作品を対象とすることとした。動物の折紙作品は左右対称である（平面に置いた場合は表裏対称と呼ぶ）ことが多く、そのおおまかな形状は側面の様子から捉えられる。このことに着目し、本研究では、折紙作品の側面の画像（写真や折り図のイラスト）から、その 3D モデルを生成する手法を提案する。

ポスターや映画のワンシーンのような CG の制作に用いるためのモデルであれば、外見に表れない内部の構造まで正確に再現する必要はなく、見かけの形状がそれらしく作られていれば十分である。そのため、既存手法のように、折紙作成の工程を計算機上で再現することで 3D モデルを作成するのは、CG 制作のためのモデリング手法としては無駄の多いアプローチであり、また、折紙のモデリングを複雑にしている要因であるとも考えられる。そこで提案システムでは、折紙の構造を忠実に再現するのではなく、見かけの形状をそれらしく作成することで、折紙の 3D モデリング作業を容易にすることを試みた。

提案手法の流れを図 1-1 に示す。提案システムにおいてユーザは、外観の形状と、各部位が「どのような折り方で作られているか」を説明するアノテーションの入力を行う。システムは、これらのユーザ入力から 3D モデルを生成する。この過程で内部構造は生成されないため、実際に紙を折ってできる形状を忠実に再現したものではなく、「指定された折り方で作られているように見える形状」が生成されることになる。これによって、ユーザは、2次元の簡単な入力によって、折紙の疑似的な、しかしながら CG 用には十分な 3D モデルを作成できる。

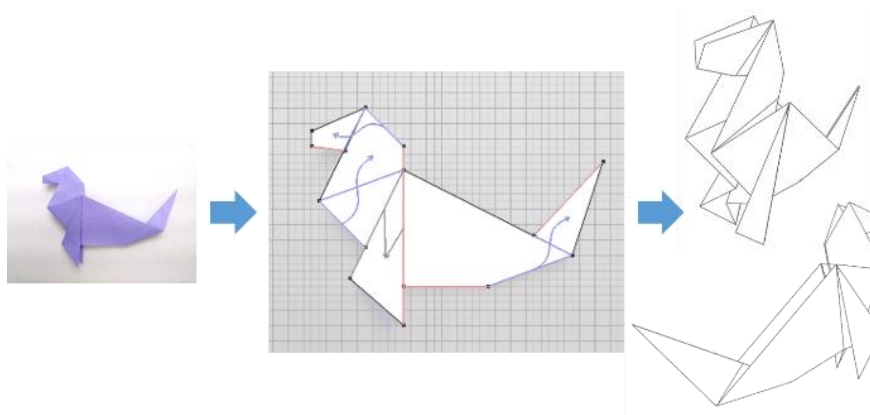


図 1-1: 提案システムの概略図。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含む全 5 章で構成される。第 2 章で本研究の関連研究、第 3 章で本研究の提案手法、第 4 章で結果、第 5 章で結論を述べる。

第2章 関連研究

本章では本研究の関連研究について記述する。以降 2.1 節で 2 次元の画像から 3D モデルを生成する研究について、2.2 節で折紙の形状を計算機上にモデル化する研究について、2.3 節で折紙の CG 用の幾何モデル生成に関する研究について、2.4 節で紙のレンダリングに関する研究について述べる。

2.1 2次元の画像から 3D モデルを生成する研究

Igarashi ら[1]は、2次元のスケッチ入力によって 3D モデリングを行う手法を提案した。ユーザはストロークを入力するたびに作成される形状を確認しながら、絵を描くように 3D モデルを作成できる。Gingold ら[2]は、3D モデリングの難しさの原因がカメラ操作にあるとして、視点を動かさずに 3D モデルを作成する手法を提案した。このシステムにおいてユーザは 2次元のイラストの上にプリミティブとアノテーションを配置することで 3D モデルを作成できる。Entem ら[3]は、対象を四足動物に限定することで、動物の側面を描いた輪郭線から 3D モデルを生成する手法を提案した。Bessmeltsev ら[4]は、2D のキャラクターのイラストと 3D のスケルトンから 3D モデルを生成する手法を提案した。イラストでは他の部位に隠れて見えない部分の形状をスケルトンを用いて推定することで、キャラクターの 3D モデルの自動生成を可能にしている。

これらの手法によって、3D モデリングの難しさを緩和するために 2次元の画像を用いることの有用性が示されている。しかしながら、ここで挙げた既存手法はいずれも立体形状の作成に楕円体や一般円筒を用いており、折紙のように薄い紙が多層に折り重なってできるような形状を扱うことはできない。

2.2 折紙のモデル化に関する研究

平坦折紙の構造を計算機上にモデル化する研究がこれまでになされている。Kato ら[9]は、折り図画像に含まれる記号情報から折り操作を解析し、折紙モデルを逐次更新することで計算機上に折紙形状を取り込む手法を提案している。三谷[10]は、表裏に 2次元バーコードが分散配置された紙を用い、その折りたたんだ状態を撮影した画像から折りたたみ構造を認識して計算機上にモデル化する手法を提案している。また、三谷の開発した折紙の展開図専用エディタ ORIPA[8]には、平坦折紙の展開図を入力として、その折りたたみ後の面と面の重なり関係を構築する手法が実装されている (図 2-1)。

これらの手法でモデル化された折紙は、厚さの無い平面多角形の集合として表現され、紙の厚みにより生じる立体形状を持たない。そのため、これらのモデルに実世界の折紙のように紙の厚みに由来した立体感を持たせるには、追加の作業が必要となる。

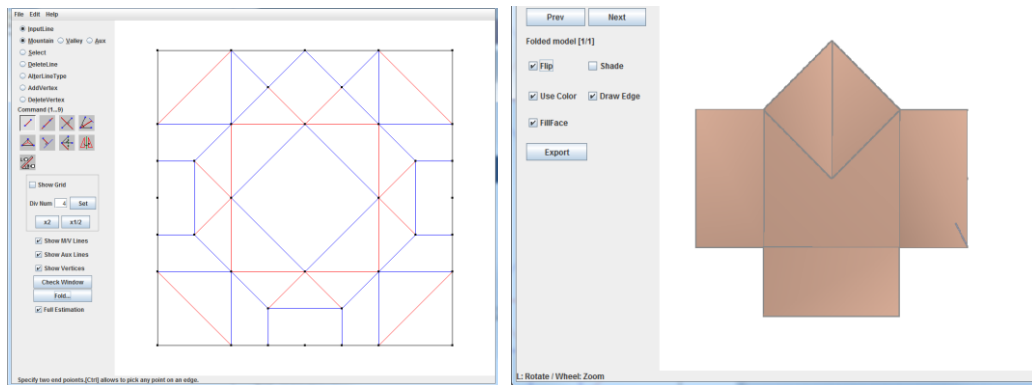


図 2-1 : ORIPA[8]により作成された折紙の展開図 (左) と折りたたみ後の形状 (右)。線分で分割された閉領域の折りたたみ後の重なり順を計算することで、折りたたみ後の形状を推定している。

2.3 折紙の CG 用の幾何モデル生成に関する研究

Nistch[12]は3DCG制作ソフトウェア Maya を用いて折紙の CG 作品を作成する方法について述べている。Nistch は Maya 8.0 に搭載されている機能を用いて、折紙をモデリングする方法と折紙らしい画像を生成するためのマテリアル設定について研究を行っている (図 2-2)。しかし、折紙のような面が多層に折り重なる幾何モデルを作成する際には、実際に紙を手で折る場合と比べて複雑で煩雑な操作が必要になることが多い。また、面の自己干渉が起りやすいということからも、手作業でモデリングを行うことは容易ではない。Miyazaki ら[5]や古田ら[6]は折紙のシミュレータの研究および開発を行っている (図 2-3・図 2-4)。また、Paczkowski[7]らはマルチタッチ・インタフェースを用いて、紙のような薄い素材のモデリングを行うためのシステムを開発している。

これらのシステムでは、紙の形状モデリングに特化することにより、簡単な構造の折紙であれば、直感的にモデリングできるようになっている。しかしながら、手作業で折紙のモデリングをすることが困難であるという問題は完全には解決されていない。

自動で折紙の形状を構築する手法としては、Tachi[13]の開発したシステムが挙げられる。Tachi は、紙の面と折り目をそれぞれ多角形の剛板とヒンジに置き換えることのできる折紙を対象として、その制約条件に基づく面の動きをシミュレーションすることで、折紙の展開図からそれを折ってできる形状を生成する手法を提案している (図 2-6)。



図 2-2 : 文献[12]の作品例。CG制作ソフトウェア Maya を用いてモデリングとレンダリングを行う方を研究し、図のような作品の制作を行っている。

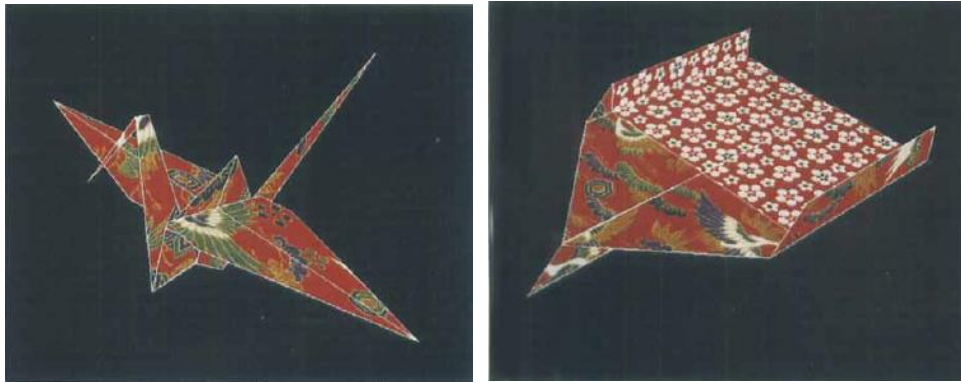


図 2-3：文献[5]のシステムにより作成された作品例。マウスのドラッグ操作で頂点を動かすことで紙の形状を操作することができるインターフェイスが開発し、図のような幾何モデルを作成している。

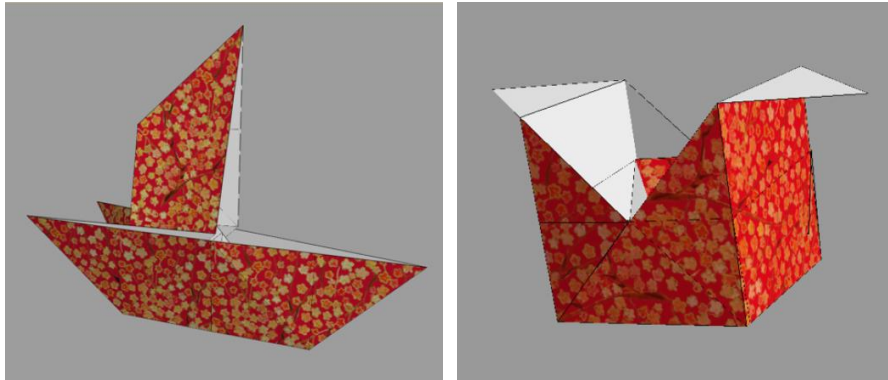


図 2-4：文献[6]のシステムにより作成された作品例。マウスを用いて直感的に紙の折り操作を行うことのできるインターフェイスが開発し、図のような幾何モデルを作成している。

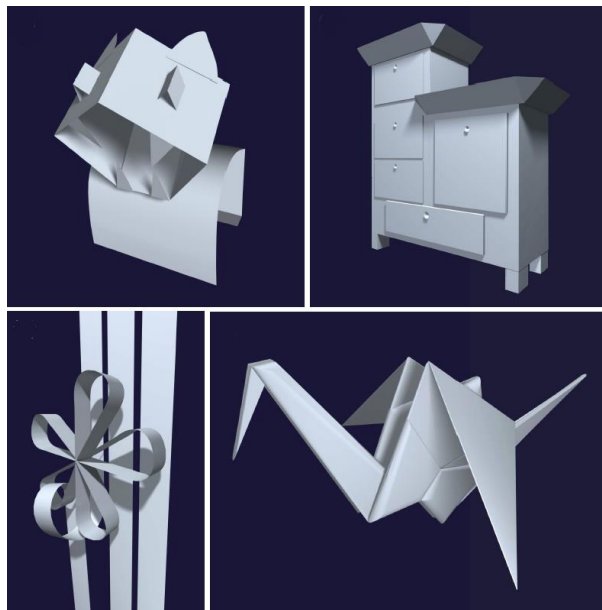


図 2-5：文献[7]のシステムにより作成された作品例。タッチパネル入力を用いて紙の形状を直感的に操作することのできるインターフェイスが開発し、図のような幾何モデルを作成している。

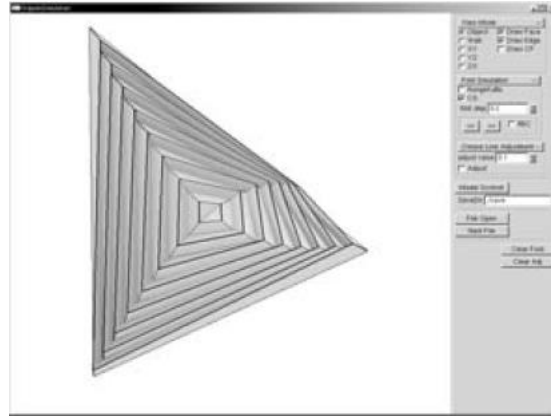


図 2-6:文献[13]の手法によるシミュレーションの様子。ヒンジで接続された剛体の面の動きをシミュレートし、そのように扱うことのできる折紙の幾何モデルを生成している。

2.4 折紙のレンダリングに関する研究

写実的な CG の制作にはレンダリング技術が重要であり、対象とする物体の質感を適切に設定する必要がある。Bartman ら[14]は、計測実験により、紙の反射がランバート反射ではないことを示している。Papas ら[15]は実際の紙を用いて計測を行い、その結果に基づいて紙の双方向散乱分布関数 (BSDF) を提案している (図 2-7)。

2.2 節で述べたような手法で折紙を計算機上に構築する場合、折紙は複数の平面多角形が同一平面上で重なっているような構造で表現されることが多い。三谷ら[16]は、そのような構造をもつ形状データの 3 次元構造を視覚的に容易に理解できるような、ノンフォトリアリスティックのレンダリング手法を提案している (図 2-8)。この手法はレンダリングを行う前にレンダリング対象とする折紙モデルの幾何形状を再構築する点に特徴がある。本稿第 3 章では、ここで提案されている手法を紙の厚みを持った折紙の幾何モデルの構築に用いた。また、三谷[17]は面の重なり順にサイクルを持つ平坦折紙を対象として、正面から見た状態を正しい折りたたみ構造で表示する手法を提案している。Furuta ら[18]は、幾何学情報よりも折紙の構造を優先して表示内容を決定することで、面の自己干渉が起こっている折紙の幾何モデルを構造的に正しくレンダリングする手法を提案している (図 2-9)。こちらは対象を平坦折紙に限定せず、立体的な形状のものも扱うことができる。

これらの技術を組み合わせることができれば、写実的な折紙のレンダリングが可能になると予想される。しかしながら、レンダリングを行うためには対象の幾何形状を忠実にモデリングする必要があるが、折紙のような形状の幾何形状の生成が難しいという問題がある。そこで、本研究では折紙のレンダリング手法に関する考察は行わず、いかに簡単な方法で紙を折って作ったことが伝わるような折紙の幾何モデルを作成するか、という点に主眼を置いた。

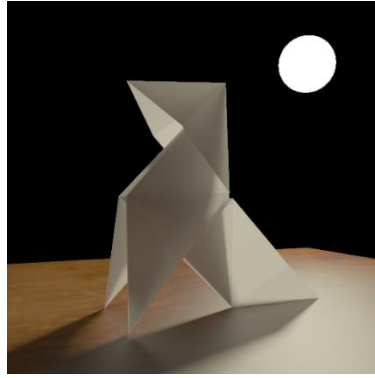


図 2-7: 文献[15]の BSDF を用いたレンダリング結果。計測に基づく紙の BSDF が提案されており、それを用いることで図のようなレンダリング結果が得られている。

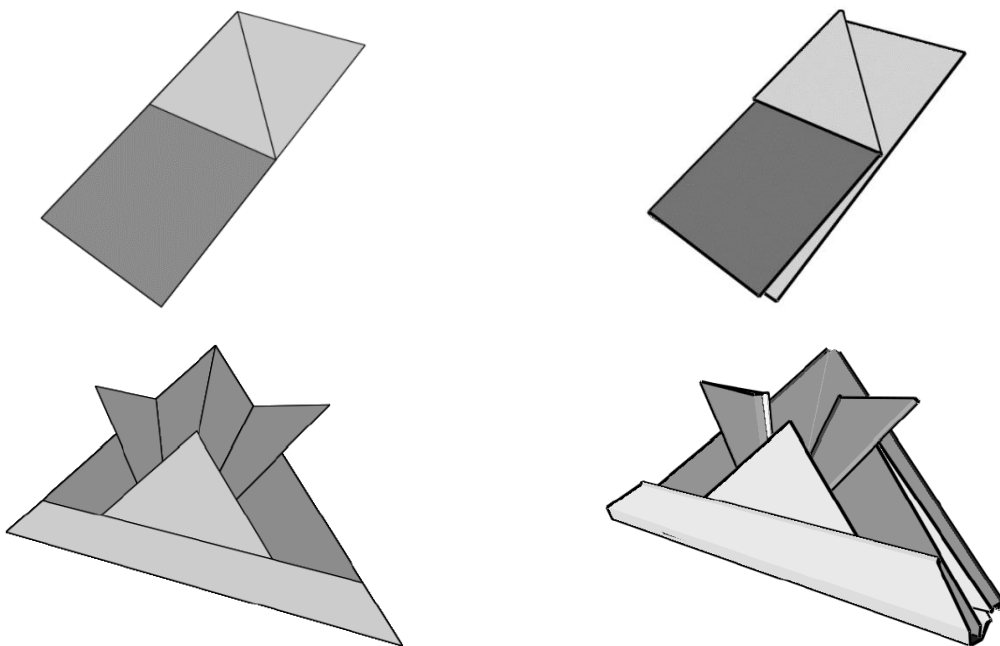


図 2-8: 文献[16]の手法による形状再構築前（左）と形状再構築後（右）のレンダリング結果。図左のように同一平面上に重なっているモデルの形状を再構築することで、図右のようにその構造が視覚的に把握できる画像を生成している。

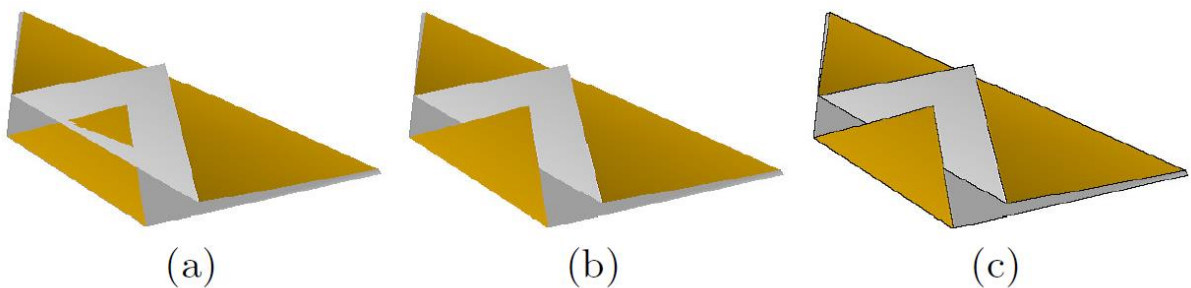


図 2-9: 単純なレンダリング結果と文献[18]の手法によるレンダリング結果の比較。(a)のように自己干渉を起こしている折紙の幾何モデルに対して、文献[18]の手法を用いることで(b)のように表示することができる。(c)のようにエッジの表示も正しく行うことができる。

第3章 提案システム

本章では本研究の提案システムについて述べる。はじめに 3.1 節で提案システムの概要を述べた後、3.2 節で折り形状の生成方法を詳細に説明する。

3.1 システムの概要

提案システムの外観を図 3-1 に示す。ユーザは、操作画面（図 3-1 左）で、形を構成するポリゴンの作図と、それらがどのように接続するかを示すためのアノテーションの配置を行う。

操作画面には、下絵画像を表示することができる。モデリングしたい折紙作品の写真画像がある場合は、その写真を参照しながらポリゴンの作図を行うことができる。操作画面で行った操作に対して、その時点の 3D モデルがプレビュー画面に表示され、ユーザは意図した折紙の形を対話的にモデリングできる。

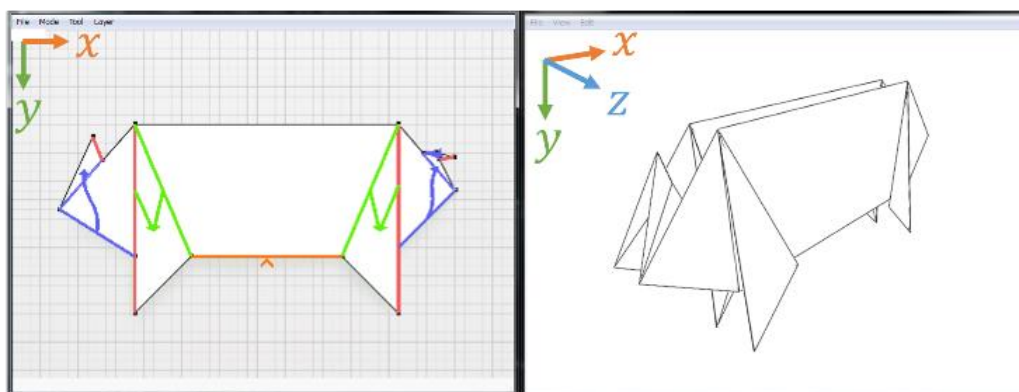


図 3-1: 提案システムのユーザインタフェース。

3.1.1 ポリゴンの配置

ユーザは必要に応じて下絵画像を参照しながら、XY 平面上でポリゴンの入力を行う。ポリゴンの入力は頂点位置をマウスクリックすることで行う。システムは、モデルが XY 平面に対して対称であるという仮定に基づき、ユーザが入力したポリゴンを 2 枚に複製し、それらを XY 平面を挟んで既定の距離 x だけ離して向かい合うように配置する。ここで距離 x は紙の厚みにより生じる隙間の大きさを表す。文献[11]の研究では、紙を 2 つ折りした際の紙の厚みは次式で表現すると実測値に近い値が得られることが示されている。

$$x = a \cdot d^{i-1} \quad (1)$$

式(1)において、 x は紙の厚さ、 a は折り曲げた紙の間に存在する紙の枚数、 d は基本の紙の厚さ、 i は実際の値とのずれを調整するパラメータである。文献[11]では、 $d = 0.5$ 、 $i = 0.8$ とした際に実測値とのずれが最小であったと述べられている。一方本稿の提案システムにおいては、内部に重なる面を省略することから、実際に生成するポリゴンの枚数よりも、式(1)における a の値を大きく見積もる必要があると考えられる。また、経験から、最適な紙の面の隙間の大き

きさは折紙作品によって異なることが予想される。このことから、提案システムでは x の初期値を 800×600 解像度の画面に対して 10 とし（これは式(1)において、 $a = 8.7, d = 0.5, i = 0.8$ とした値にほぼ等しい）、モデリング中にユーザが任意の値に変更できるようにした。

3.1.2 アノテーションの配置

提案システムでは、ユーザが選択可能な 8 種類のアノテーションを提供する。そのうちの 7 種類は「どのような折り方で作られているか」を示すものであり、折紙によく見られる、二つ折り・折り込み・沈め折り・中割り折り・かぶせ折り・段折り・豚の脚、の折り方を含む。

ユーザは、これらの折り方を適用するポリゴンの辺をクリックで指定し、メニューからアノテーションの種類を選択する。アノテーションを選択すると同時に、プレビュー画面の 3D モデルが更新され、操作画面には選択したアノテーションを示すための矢印などの記号が表示される。

各アノテーションによる形状操作の内容を表 3-1 に示す。各列は左から順に、アノテーションの名称、クリックによる辺の選択方法、配置されるアノテーションの表示、システムが行う形状処理の内容を表す。二つ折り・折り込み・沈め折り・中割り折り・かぶせ折りは、XY 平面の両側に対称な位置に配置されたポリゴン同士を接続するように機能し、段折り・豚の脚は、それぞれ指定した箇所に折りを追加する働きをする。なお、提案システムでは、既にアノテーションが配置されている辺の上に更にアノテーションを追加することはできない、という制約を設けた。これは、アノテーションによる形状操作が組み合わせあって、実際の紙では作成できないような形状が生成されることを防ぐためである。

表 3-1 : アノテーションによる形状操作

	ユーザ操作	表示	形状操作
二つ折り			
折り込み			
沈め折り			
中割り折り			
かぶせ折り			
段折り			
豚の脚			
鏡像			

3.2 折り形状の生成

本節では、ユーザ入力から3Dモデルを生成する方法について述べる。ユーザ入力としてモデルの2次元の概観が与えられているため、システムはこれを立体的にする処理を行うことになる。具体的には、ユーザが入力した2Dのポリゴンに対して、Z軸方向の配置変更とポリゴン間の隙間を補間するような面の追加を行う。配置場所や追加される面の形状はユーザの入力したアノテーションによって決定され、これらの処理によって、各アノテーションが対応する「折り方」の形状が作られる。しかしながら実際に1枚の紙を折ってできる形状を生成するのは容易ではない。そのためここでは内部構造を省略し、「指定した折り方で作られているように見える形状」を生成する。以降、はじめにポリゴンの配置変更について述べた後、各折り方についてそれぞれ説明する。

3.2.1 ポリゴンの配置変更

中割り折り・かぶせ折り・段折り・豚の脚の4種類の折り方は、紙の面に重なり関係を生じさせる。提案システムではこの重なり関係を基に、ポリゴンのZ軸方向での配置変更を行う。各折り方により生じるポリゴンの重なり関係は、表3-2の通りである。

表 3-2 : 各折り方により生じるポリゴンの重なり関係。

	重なり関係
中割り折り	$f_1 > f_2$
かぶせ折り	$f_1 > f_2$
段折り	$f_1 > f_2$
豚の脚	$f_1 > f_2, f_3$

表1において、 f_i は、アノテーションを作成する際にユーザが選択した辺の属するポリゴン、 $i(i = 1 \sim 3)$ は選択した順序を表す。

次に、各ポリゴンの重なり順序を求める方法について説明する。提案システムではXY平面に関して左右対称にモデルを生成するため、以降はZ軸の正の側のポリゴンについてのみ記述する。まずはじめに、各ポリゴンをノード、ポリゴンの重なり関係を有向辺としたグラフを構築する。このとき各ポリゴンの重なり順序を、(グラフの高さ)・(対応するノードの最も近い根ノードからの高さ)+1とする。例えば、図3-2(左)のようにアノテーションが配置されている場合、図3-2(右)のようなグラフが構築される。このときポリゴンa~fの重なり順序は、それぞれ1,2,3,4,3,2となる。

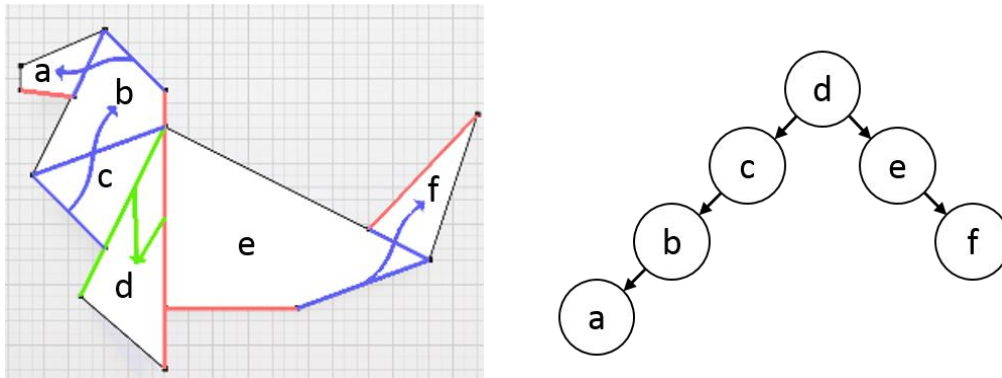


図 3-2 : アノテーション (左) と構築されるグラフ (右) の例。

ただし、ポリゴンの重なり順序がサイクルを持つ場合には、この方法では重なり順序を求めることができない。(例えば、「風車」や「ねじり折り」といった折紙作品は、紙の面の重なり順序にサイクルを持つ。) このようなケースに対しては面の重なり順序を用いない別のアプローチを考案する必要があるが、これらの折紙作品は本稿で扱う対象には含まれないため、ここでは考慮しないこととした。

重なり順序を求めた後、各ポリゴンの配置変更を行う。各ポリゴンの配置場所は、その重なり順序と x (x は初期配置のポリゴン間の隙間の大きさ) の積だけ XY 平面から離れた場所となる。配置変更は、ポリゴンを元の配置場所から求めた配置場所へ平行移動することで行う。

ポリゴンの重なり関係は、ユーザがアノテーションを配置するたびに追加される。そのため提案システムでは、重なり関係が追加されるたびに、すべてのポリゴンの配置場所を再計算することとした。

3.2.2 二つ折り

二つ折りは折紙における最も基本的な折り方で、本稿で対象とする表裏対象な折紙作品においては、動物の背の部分など様々な用途に用いられる。この折り方の形状特徴は、2枚の対称な面がある1辺を介して接続していることである。このような形状を生成するため、システムは以下の処理を行う。以降、ユーザが選択した辺を e 、 e と XY 平面について対称な辺を e' とし、 e および e' の両端点をそれぞれ v_1, v_2, v'_1, v'_2 とする

Step 1: 2 辺 e 、 e' を、その間の距離が元の距離の α 倍 ($0 < \alpha < 1$) となるように、互いに近づける。ここで α は初期値を 0.1 として、アノテーションをユーザが中ボタンドラッグすることによって (0, 1) の値を任意に変更できるようにした。

Step 2: 図 3-3 に示すように頂点 v_1, v'_1, v'_2, v_2 で構成される四角形の面を追加する。

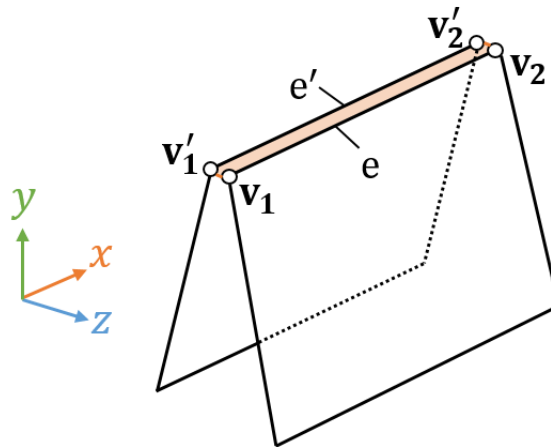


図 3-3: 二つ折り形状生成における面の追加の様子。

3.2.1 節で述べたように、各ポリゴンはアノテーションが追加されるたびに重なり順序に応じて Z 軸に沿う平行移動によって再配置される。この再配置処理はすべてのポリゴンが XY 平面に平行であることを前提としているが、本節で述べた二つ折り形状の生成過程にはポリゴンの形状や角度を変更するような形状操作が含まれるため、一度二つ折り形状を生成するとポリゴンの再配置を行うことができなくなる。そこで提案システムでは、他のすべてのアノテーションによる形状操作を行った後に二つ折り形状の生成を行うこととした。

3.2.3 折り込み

折紙作品の制作過程では、紙の端の部分を内側に折り込むことで概観に現れる面の形状を整えることが頻繁に行われる。内側に折り込まれる形状は折り込まれる前の面の形状に依存するため、提案システムにおけるユーザ入力からだけでは、どのような形状の折り込みが作られるかを計算することはできない。そのため、外観だけそれらしく見せる上では、内側に折り込まれている部分が存在することがこの形状の特徴として重要であるとして、次のような方法で折り込み形状を生成することとした。以降、ユーザが選択した辺を e 、 e の属する面において e と端点を共有する 2 辺をそれぞれ e_{prev} 、 e_{next} 、 e と XY 平面について対称な辺を e' とし、 e および e' の両端点をそれぞれ v_1, v_2, v'_1, v'_2 とする。

Step 1: 図 3-4 に示すような 2 頂点 v_a, v_b を生成する。はじめに、 v_1 と v'_1 の中点から、 v_1 から

e_{prev} へ向かう方向に、 e_{prev} の長さの $\frac{1}{4}$ の距離だけ離れた位置に v_a を生成する。その様子を

図 3-4 (右) に示す。次に、 v_2, v'_2, e_{next} から同様に v_b を生成する。

Step 2: 頂点 v_1, v_2, v_b, v_a からなる四角形の面と、頂点 v'_1, v'_2, v_b, v_a からなる四角形の面を追加する。

以上の処理によって、折り込まれている元の形状を特定せずに、折り込みらしい形状を生成することができる。

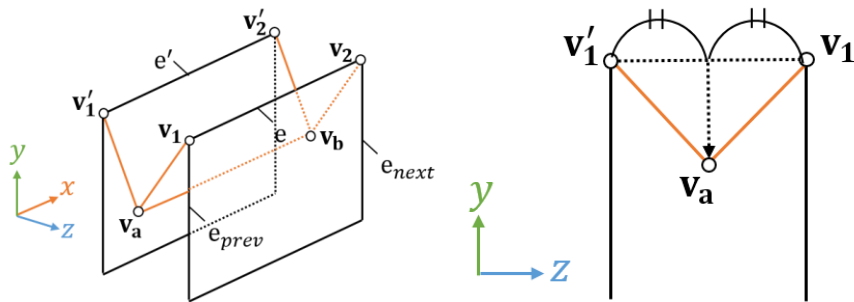


図 3-4: 折り込み形状生成における面の追加の様子（左）とその断面図（右）。

3.2.4 沈め折り

沈め折りは、折り目の重なる部分を内側に押しつぶす折り技法である。折り込みと同様、面の形状を整えるために用いられることが多い。沈め折りによって作られる形状は折り込まれた紙の面の形状に依存するため、ユーザ入力から正確な構造を求めることはできない。そのため、図 3-5 に示すような最も基本的な沈め折りの形状を基に、次のような方法でそれらしく見える形状を生成することとした。以降、ユーザが選択した辺を e 、 e と XY 平面について対称な辺を e' とし、 e および e' の両端点をそれぞれ v_1, v_2, v_1', v_2' 、 e の属する面に属する頂点のうち v_2 と隣り合う v_1 でない頂点を v_3 、 e の属する面を構成する頂点のうち v_1 と隣り合う v_2 でない頂点を v_4 、 e' の属する面を構成する頂点のうち v_2' と隣り合う v_1' でない頂点を v_3' 、 e' の属する面を構成する頂点のうち v_1' と隣り合う v_2' でない頂点を v_4' とする。

Step 1: 5 つの頂点 v_a, v_b, v_c, v_d, v_e を生成する。はじめに、4 頂点 v_1, v_2, v_2', v_1' の重心を中心に、辺 E に沿う方向に距離 d だけ互いに離れた位置に 2 頂点 v_a, v_b を生成する。ここで d は、 e の長さの $\frac{1}{10}$ の値とした。次に、4 頂点 v_3, v_4, v_4', v_3' から同様にして 2 頂点 v_c, v_d を生成する。

最後に、4 頂点 v_a, v_b, v_c, v_d の重心に v_e を生成する。

Step 2: 図 3-6（左）に示すような面の追加を行う。具体的には、 v_1, v_e, v_2 で構成される三角形、 v_1, v_a, v_e で構成される三角形、 v_2, v_e, v_b で構成される三角形、 v_1', v_e, v_2' で構成される三角形、 v_1', v_a, v_e で構成される三角形、 v_2', v_e, v_b' で構成される三角形、 v_1, v_4, v_c, v_a で構成される四角形、 v_2, v_b, v_d, v_3 で構成される四角形、 v_1', v_4', v_c', v_a' で構成される四角形、 v_2', v_b', v_d', v_3' で構成される四角形の計 10 枚の面を追加する。これらの面を追加した後の各頂点の連結関係を図 3-6(右)に示す。

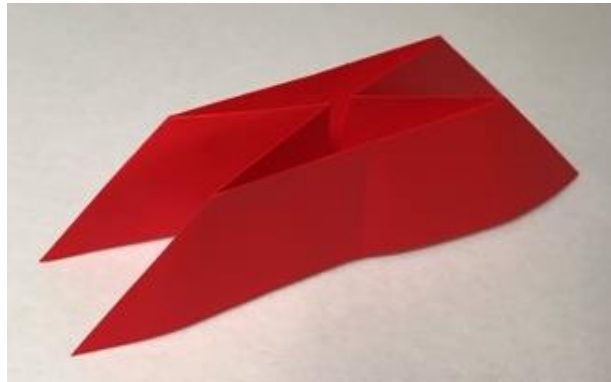


図 3-5: 沈め折りの外観。

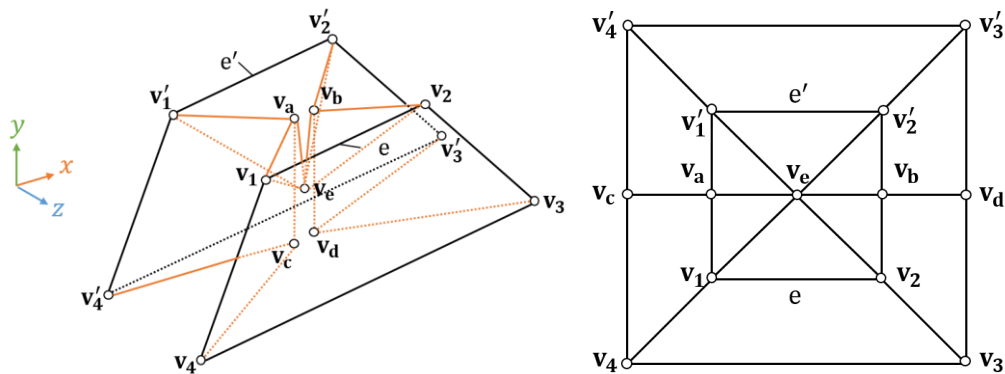


図 3-6: 沈め折り形状生成における面の追加の様子 (左) と頂点の連結関係 (右)。

3.2.5 中割り折り

中割り折りは折り目を内側に押し込むように折る技法で、「鶴」の頭部や動物の手足の形状を表現するために用いられる。その外観を図 3-7 に示す。提案システムでは、この折り方の形状特徴を、紙の面が内側に押し込まれていることであるとして、次のような方法で中割り折り形状を生成する。以降、 Z 軸の正の側のポリゴンについてのみ記述し、ユーザが選択した辺を選択した順に e_1, e_2 とし、 e_1, e_2 の属するポリゴンをそれぞれ f_1, f_2 とする。また、 e_1, e_2 は頂点 v を共有し、各辺の v でない端点をそれぞれ v_1, v_2 とする。

Step 1: f_1 と f_2 の間に、 $f_1 > f_2$ なる重なり関係を追加する。なお、2 面が共有する頂点 v は、面の配置変更の際には一時的にそれぞれの面ごとに分離して処理を行い、最終的に Z 座標最大の頂点にマージすることとした。

Step 2: 図 3-8 に示すような、3 頂点 v, v_1, v_2 からなる三角形の面を追加する。

Step 3: f_1 または f_2 に含まれる辺のうち、 v_1 または v_2 を端点に持ち、かつ e_1 または e_2 でない 2 辺 e'_1, e'_2 に、二つ折りアノテーションを追加する。

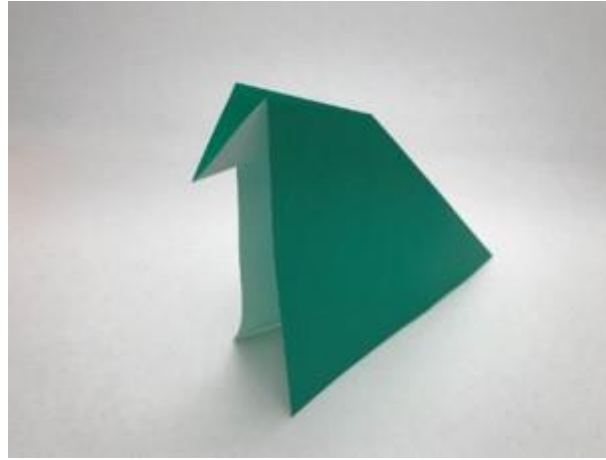


図 3-7: 中割り折りの外観。

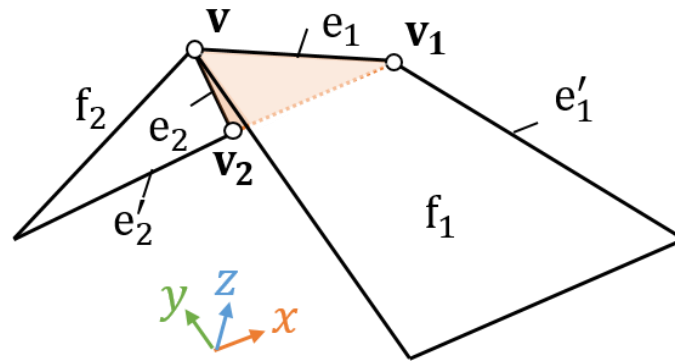


図 3-8: 中割り折り形状生成における面の追加の様子

3.2.6 かぶせ折り

かぶせ折りは、折り目の先端を開き、同じ折り目の外側からかぶせるように折り返す技法である。その外観を図 3-9 に示す。提案システムでは、この折り方の形状特徴を、中割り折りと同様、紙の面が内側に押し込まれていることとした。そのため、形状を生成するアルゴリズムは、3.2.5 節で説明した中割り折り形状生成のアルゴリズムと同じものを用いることとした。

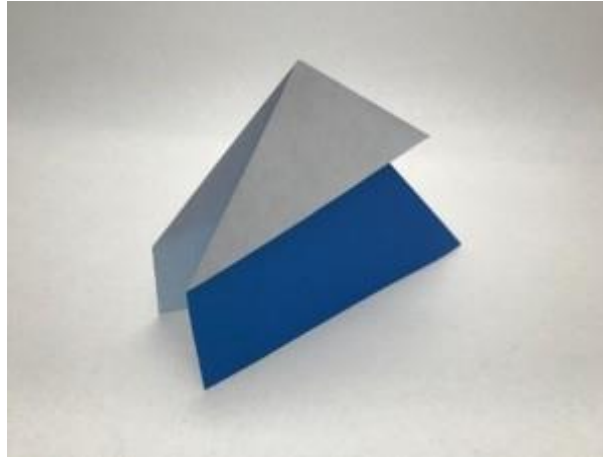


図 3-9: かぶせ折りの外観。

3.2.7 段折り

段折りは、紙の面に段差を生じさせるように折る技法である。その外観を図 3-10 に示す。内側に折り込まれる形状は段折りを適用する前の面の形状に依存するが、ここでは、内側に折り込まれている部分が存在することと、概観に現れる紙の面に高さの差があることがこの折り方の特徴であるとして、以下の方法で段折り形状を生成することとした。以降、Z 軸の正の側のポリゴンについてのみ記述し、ユーザが選択した辺を選択した順に e_1, e_2 、2 辺 e_1, e_2 の属するポリゴンをそれぞれ f_1, f_2 とし、 f_2 に属する e_2 でない 2 辺をそれぞれ e'_2, e''_2 とする。

Step 1: f_1 と f_2 の間に、 $f_1 > f_2$ なる重なり関係を追加する。

Step 2: 図 3-11 に示すような面を e_1 と e_2 の間に追加する。はじめに頂点 v_a, v_b を生成する。各頂点は、 e_2 および e'_2 のそれぞれの延長線上において、 e_2 からの距離が l となる位置にそれぞれ生成する (図 3-11 (右) 参照)。追加する面が f_1 からはみ出ることを防ぐため、長さ l は、 f_1 に属し e_1 と端点を共有する辺のうち長さが短い方の辺の長さの半分の値とすることとした。

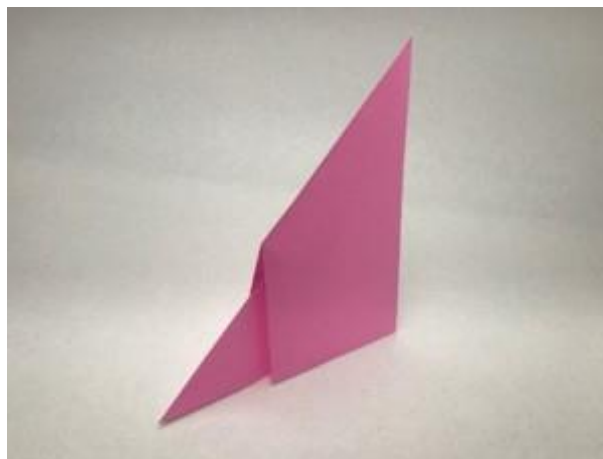


図 3-10: 段折りの外観。

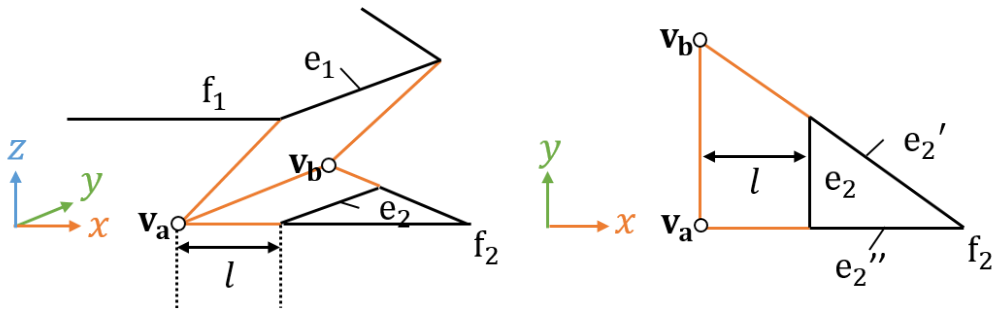


図 3-11: 段折り生成における面の追加の様子 (左) と Z 軸方向から見た f_2 の様子 (右)。

3.2.8 豚の脚

豚の基本形は、「豚」という作品を折る過程でできる形状で、これをもとに様々な折紙作品が作られている。その外観を図 3-12 に示す。特に豚の基本形の脚の部分の形状は、多くの折紙作品で用いられていることから、折紙らしいかたちを作るうえで有用であると考えた。そこで、豚の基本形の脚部分のみの折り方には広く知られた名前は付けられていないが、提案手法ではこれを「豚の脚」として、アノテーションで生成できる折り方として実装した。

提案システムでは、以下の手順で豚の脚形状を生成する。以降、Z 軸の正の側のポリゴンについてのみ記述し、ユーザが選択した辺を選択した順に e_1, e_2, e_3 とし、各辺の属するポリゴンをそれぞれ f_1, f_2, f_3 とする。また e_1, e_2, e_3 は頂点 \mathbf{v} を共有するものとし、 e_1 と端点を共有する辺のうち \mathbf{v} を端点に持たない辺を e_1' 、 e_2 と端点を共有する辺のうち \mathbf{v} を端点に持たない辺を e_2' とする。

Step 1: $f_1 > f_2$ および $f_1 > f_3$ なる重なり関係をそれぞれ追加する。なお、面の配置変更の際には、3 面が共有する頂点 \mathbf{v} を一時的にそれぞれの面ごとに計 3 つの頂点に分離して処理を行い、最終的に Z 座標最大の頂点にマージすることとした。

Step 2: 図 3-13 (左) に青色と赤色で示す面を追加する。はじめに、2 点 $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ を生成する。 \mathbf{v}_a は辺 e_2' を距離 l だけ延長した位置に生成し、 \mathbf{v}_b は \mathbf{v}_a から距離 h だけ Z 軸の正の方向に離れた位置に生成する。ここで l は e_2 と e_3 の両端点のうち \mathbf{v} でない 2 点間の距離の半分の値とし、 h は f_1 と f_3 の距離の半分の値とした。なお、これら 2 つの値は、Step 1. で述べた \mathbf{v} のマージ処理の前に取得する。次に、 e_2 の両端点と \mathbf{v}_a からなる三角形、 e_1 の両端点と \mathbf{v}_a からなる三角形、 f_1 に含まれる辺のうち頂点 \mathbf{v} を端点に持ち、かつ e_1 でない辺の両端点と \mathbf{v}_b からなる三角形、 e_3 の両端点と \mathbf{v}_b からなる三角形の計 4 枚の面を追加する。

以上の処理によって、豚の脚形状が生成される。より本物らしい構造に近づけるならば、 \mathbf{v}_a はより f_3 に近い位置に、 \mathbf{v}_b はより f_1 近い位置に生成すべきであるが、これら 2 点は f_1 に隠れるため外観に現れにくいことや、内部に生成する面同士の干渉の発生しにくさを考慮し、上述した位置に生成することとした。

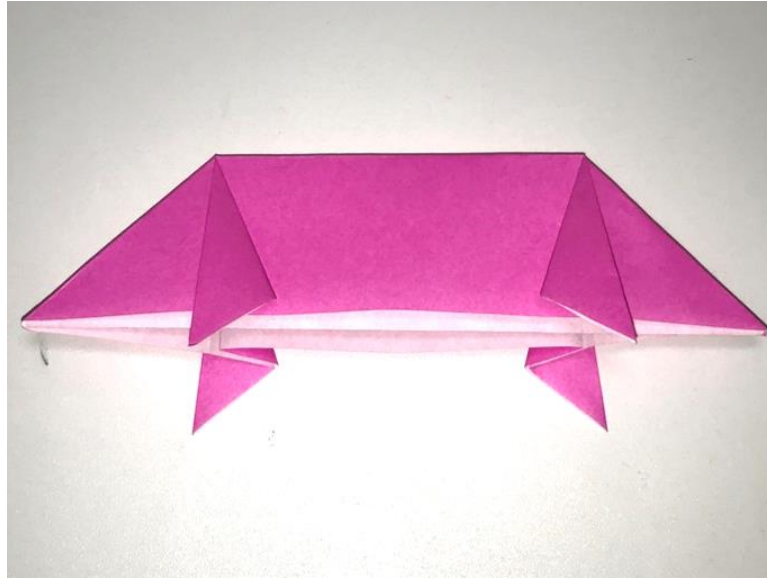


図 3-12: 豚の基本形の外観。

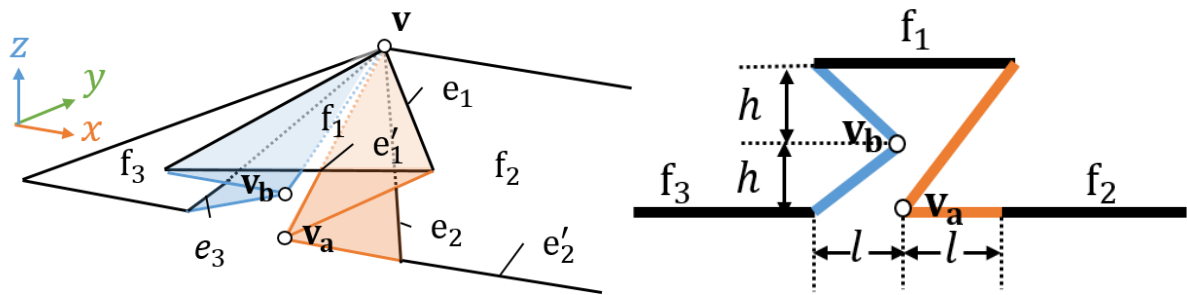


図 3-13: 豚の脚形状生成における面の追加の様子 (左) とその断面図 (右)。

第4章 結果

提案手法に基づくアプリケーションを実装し、検証を行った。本章ではその結果について述べる。

4.1 実装したアプリケーション

3章で述べた手法を実装したアプリケーションのユーザインタフェースを図 4-1 に示す。左のウィンドウでユーザはポリゴンとアノテーションの配置を行うことができ、それによって生成された 3D モデルが右のウィンドウに表示される。また、ダイアログにスピンボックスとスライダーを配置し、3.2.1 節で述べたポリゴン間の隙間の大きさを調節できるようにした。

ウィンドウ中のメニューバーの項目と機能の一覧を表 4-1 に示す。Polygon、Annotation、Edit の 3 つのモードを切り替えることで、それぞれポリゴンの配置、アノテーションの配置および、既に配置したポリゴンや頂点の位置調整を行うことができるようにした。なお、システムの実装には C++ を用い、ライブラリとして OpenGL、Qt を利用した。

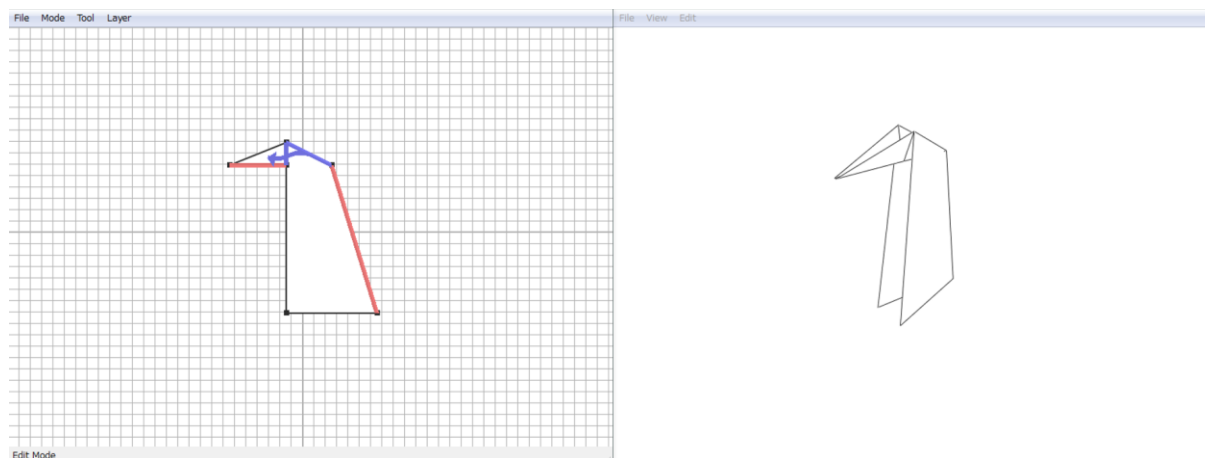


図 4-1:実装したアプリケーションのユーザインタフェース。

表 4-1: メニューバーの機能一覧

名称 1	名称 2	機能
File	Load image	画像を読み込む
	Save File	ファイルに現在のポリゴンとアノテーションを保存する。
	Load File	Save File で保存したファイルを読み込む。
Mode	Polygon	ポリゴン配置モードに切り替える。
	Annotation	アノテーション配置モードに切り替える。
	Edit	編集モードに切り替える。
Annotation	Half Fold	選択した辺の上に二つ折りアノテーションを配置する。
	Tucking	選択した辺の上に折り込みアノテーションを配置する。
	Sink Fold	選択した辺の上に沈め折りアノテーションを配置する。
	Inside Reverse Fold	選択した辺の上に中割り折りアノテーションを配置する。
	Outside Reverse Fold	選択した辺の上にかぶせ折りアノテーションを配置する。
	Pleat Fold	選択した辺の上に段折りアノテーションを配置する。
	Pigs Leg	選択した辺の上に豚の脚アノテーションを配置する。
	Mirror	選択した辺の上に鏡像生成アノテーションを配置する。
	Delete	選択したアノテーションを削除する。

4.2 鏡像生成アノテーション

3 章で述べた手法に加えて、平坦な形状を組み合わせることで立体的な構造を生成することのできる鏡像生成アノテーションを実装した。この鏡像生成の処理によって、折り鶴の羽のように、左右に広がった構造をモデリングできるようになる。

鏡像の生成は、他のアノテーションと同様にポリゴンの辺を指定することで行われる。

ユーザはまず、複製したいポリゴンの辺をクリックする（折り方を指定するアノテーションによって、そのポリゴンが他のポリゴンと連結している場合は、連結しているポリゴンも複製対象に含まれる）。

続いてユーザは、複製後のポリゴンを配置する位置を指定するために、その基準となる辺をクリックする。具体的には、この 2 回のクリックによって以下のような処理が行われる。

(1) 最初にクリックされた辺を、2 回目にクリックされた位置に移動させることで、複製したいポリゴンの位置を変更する（図 4a）

(2) 2回目にクリックされた辺を中心として、複製したいポリゴンを回転させる (図 4b)

(3) 複製対象となるポリゴンの、XY 平面に関する鏡像を生成する (図 4c)

その結果、図 4d に示すような構造を作り出すことができる。上記の手続きの(2)における回転は角度 30° を初期値として、ユーザが任意の角度に変更できるようにした。この操作では、ポリゴン同士の干渉が発生することがあるが、干渉している箇所が外部からは見えないことが多いため、干渉しないようにポリゴンを変形するような処理は行わない。

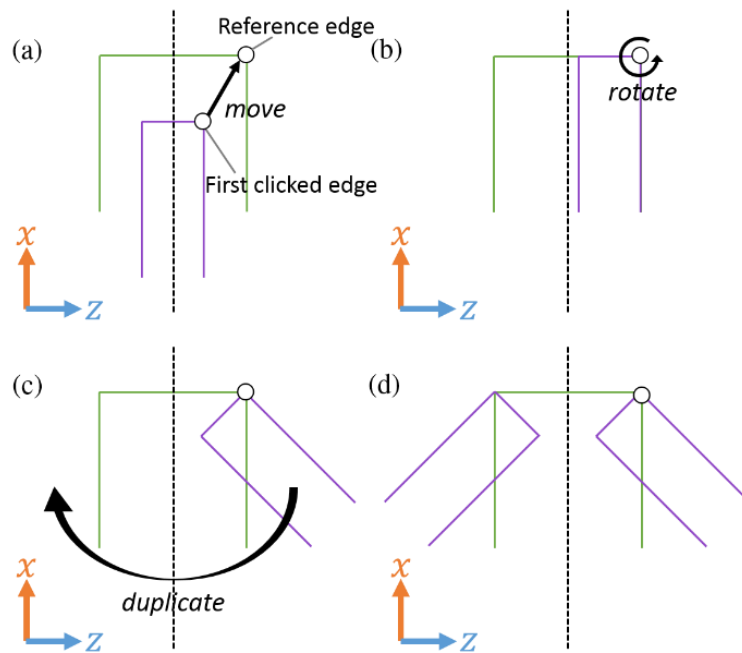


図 4-2: 鏡像生成の様子。

4.3 試作例

実装したシステムを用いて生成した 3D モデルを図 4-3 に示す。図の各列はそれぞれ、参照画像、ユーザ入力、生成されたモデルを表す。これらの制作時間はいずれも 3 分から 10 分程度であった。ここで示すモデルにはいずれも実際の構造とは異なる部分があるが、十分本物の折紙らしい見た目を再現できた。

次に、Maya[19]を用いて作成した内部構造に忠実なモデルと提案システムを用いて作成した見かけの形状モデルに、折り筋などを含むテクスチャを貼りつけてレンダリングした結果を図 4-4 に示す (レンダリングには mental ray[20]を用いた)。(a)のモデリングにかかった時間は約 2 時間、(b)のモデリングにかかった時間は約 4 分であった。これらのモデルの展開図を図 4-5 に示す。(a)のポリゴン数は 50、(b)のポリゴン数は 30 であった。この結果から、忠実に再現したモデルと比較しても遜色のないモデルを、構造を省略することによって短時間で作成できたといえる。

『日本のおりがみ辞典』に掲載されている動物をモチーフとした 58 種類の折紙作品のうち表裏対称性を持つものは 40 種類であり、このうち 38 作品の形状を提案システムによって生成することができた。「折り鶴」のような作品については、紙を膨らます前の形状であれば生

成できたが、膨らました後の曲面からなる形状を生成することはできなかった。このような形状の生成手法については今後の課題としたい。

また、折紙でないものの画像からモデルを生成することを試みた結果を図 4-6 に示す。図の各列はそれぞれ、参照画像、ユーザ入力、生成されたモデルを表す。このように、実際には折紙でないものからも、折紙のように見えるモデルを生成することができた。元の目的からは離れるが、この「折紙でないものに折紙らしさを付与することができる」ということは興味深い結果であり、折紙テイストの CG キャラクターを作り出すうえで有効であると考えられる。

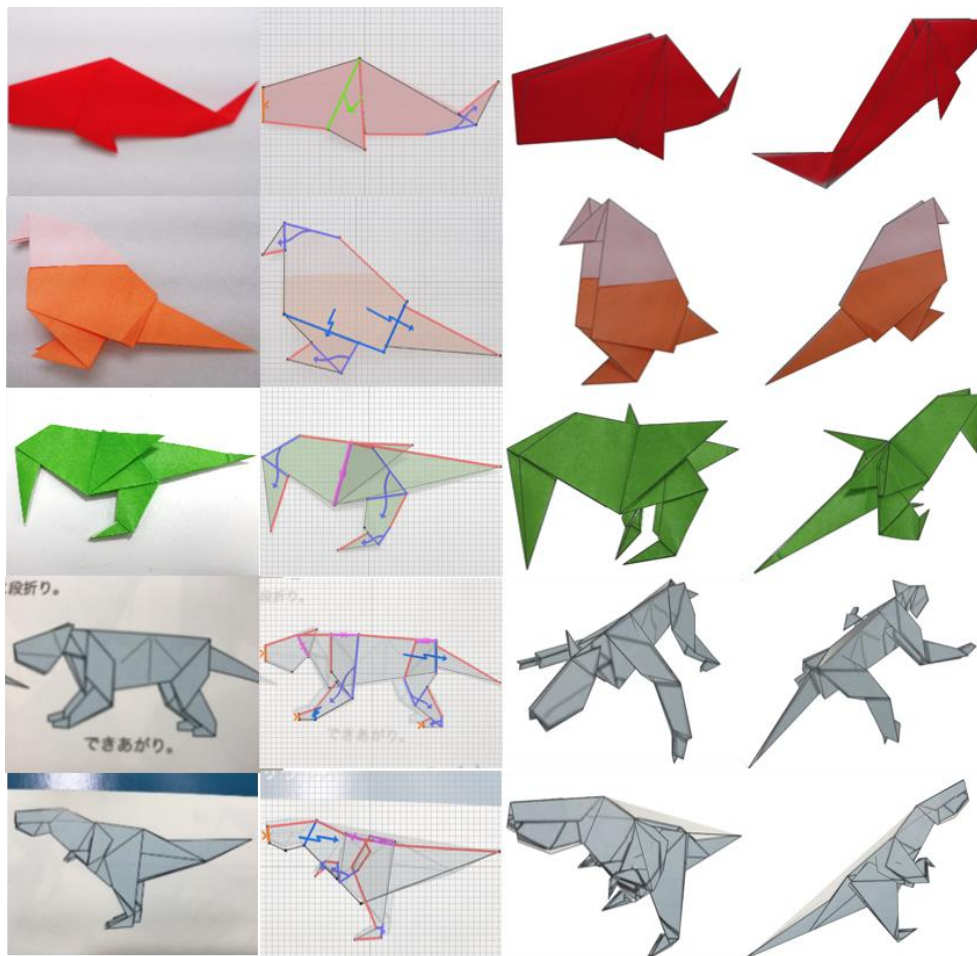


図 4-3: 試作結果。(出典：1-3 段目『日本のおりがみ辞典』[21]、4-5 段目『本格折り紙√2』[22])

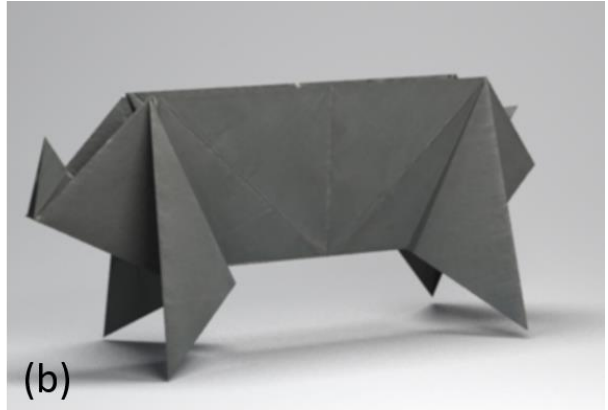
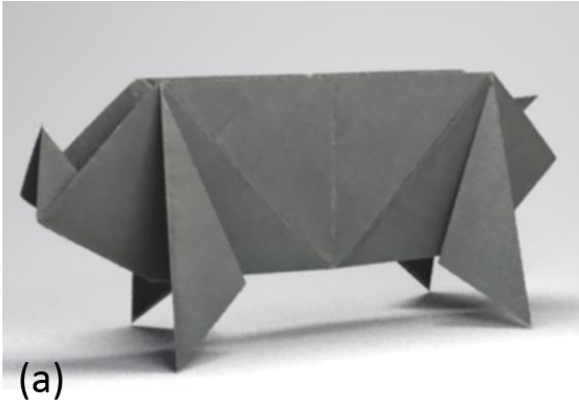


図 4-4: 構造に忠実に制作したモデル (左) と内部構造を省略したモデル (右) の比較。

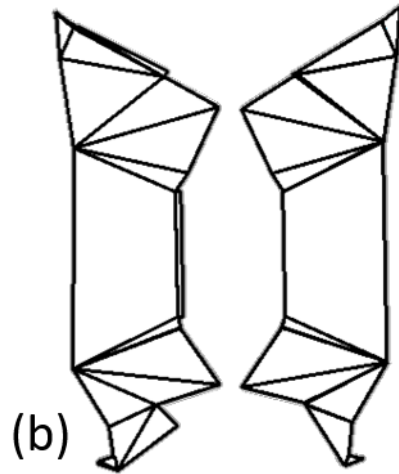
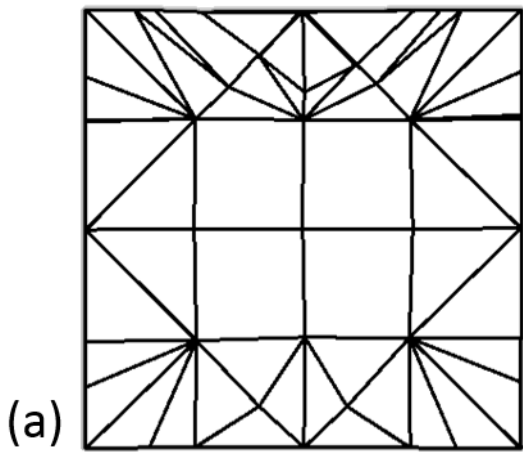


図 4-5: 図 4-4 に示すモデルの展開図。

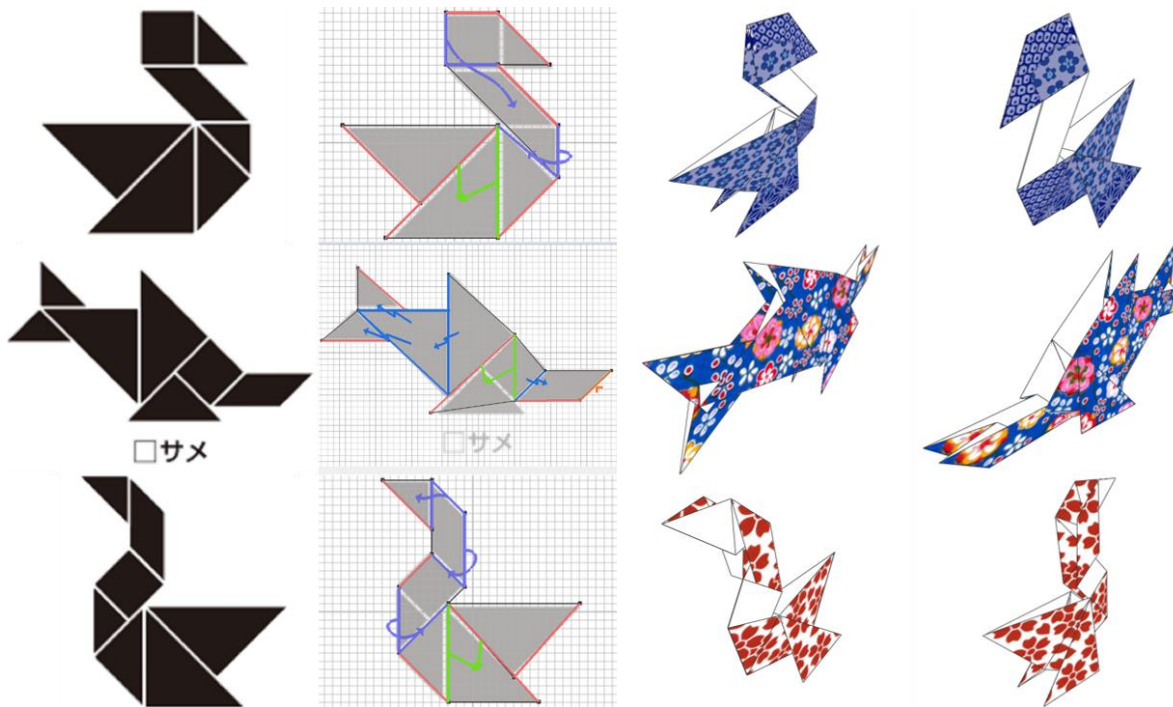


図 4-6: シルエットパズルから作成したモデルの例。

4.4 ユーザテスト

提案システムの評価を行うため、被験者 3 人の小規模なユーザテストを実施した。それぞれの折紙の経験については、1 人が現在も頻繁に折紙を折ることがあり（折紙経験あり）、他の 2 名は幼少の頃に折ったことがあるという程度（折紙経験なし）であった。また、3D モデリングの経験は 3 人ともなかった。

10 分程度の操作説明によって、ユーザは提案システムでモデリングを行うことができた。各ユーザが作成したモデルを図 4-7 の 1-3 段目に示す。図の各列はそれぞれ、参照画像、ユーザ入力、生成されたモデルを表す。それぞれの作業時間は、1 段目のモデルが 7 分半（折紙経験なし）、2 段目のモデルが 3 分半（折紙経験あり）、3 段目のモデルが 4 分半（折紙経験なし）であった。これにより、3D モデリングの経験がないユーザが提案システムによって折紙の 3D モデリングを短時間で行えることを確認できた。

上記のテストの後、折紙経験なしのユーザ 1 名に、シルエットパズルを参照画像として、モデリングを行ってもらった。その結果を図 4-7 の最下段に示す。作業時間は 15 分であった。実際の折紙を参照画像とした場合と比べて作業時間は長くなったが、折紙経験のあまりないユーザであっても、提案システムによって、折紙でない画像から折紙のようなモデルを作成できるということが確認できた。

最後に、ユーザテストで作成されたモデルを mental ray によってレンダリングした結果を図 4-8 に示す。このことから、提案システムで作成したモデルを写実的な折紙の CG 制作に利用できることが確認できた。

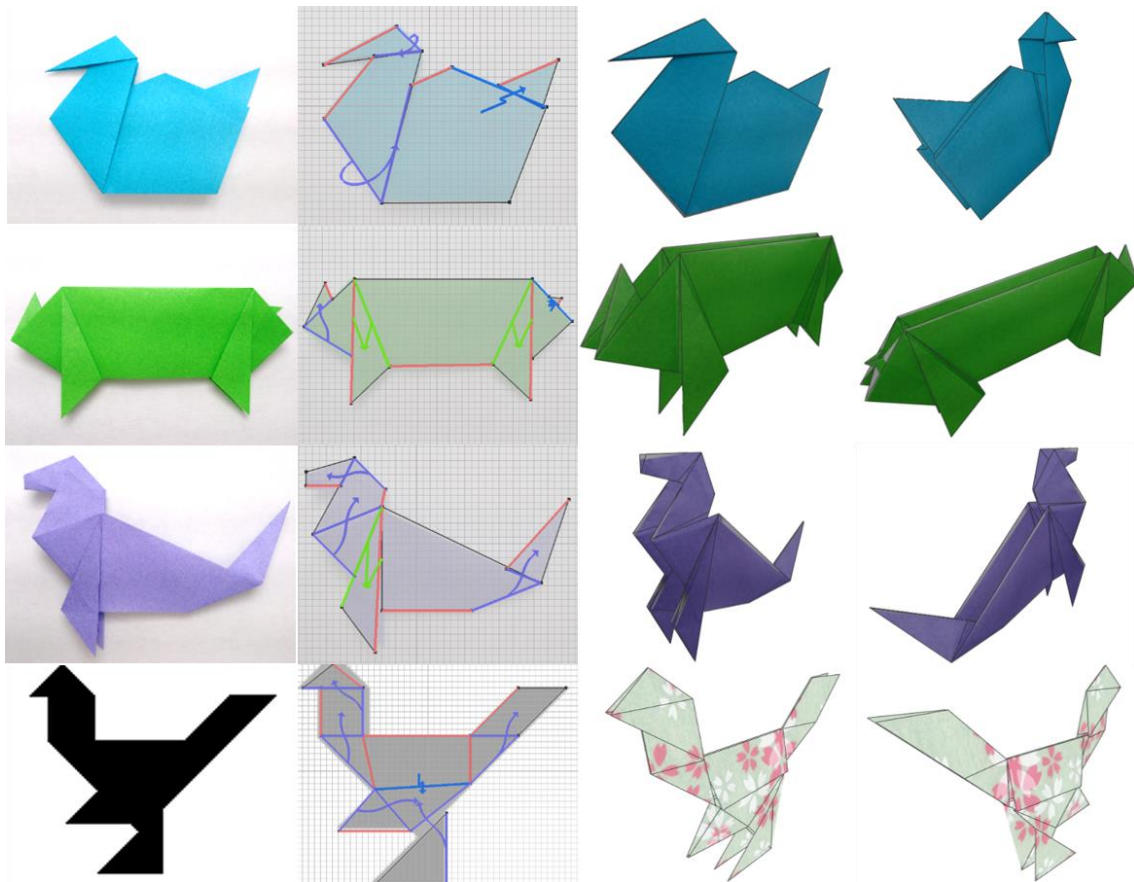


図 4-7: ユーザテストで作成されたモデル。

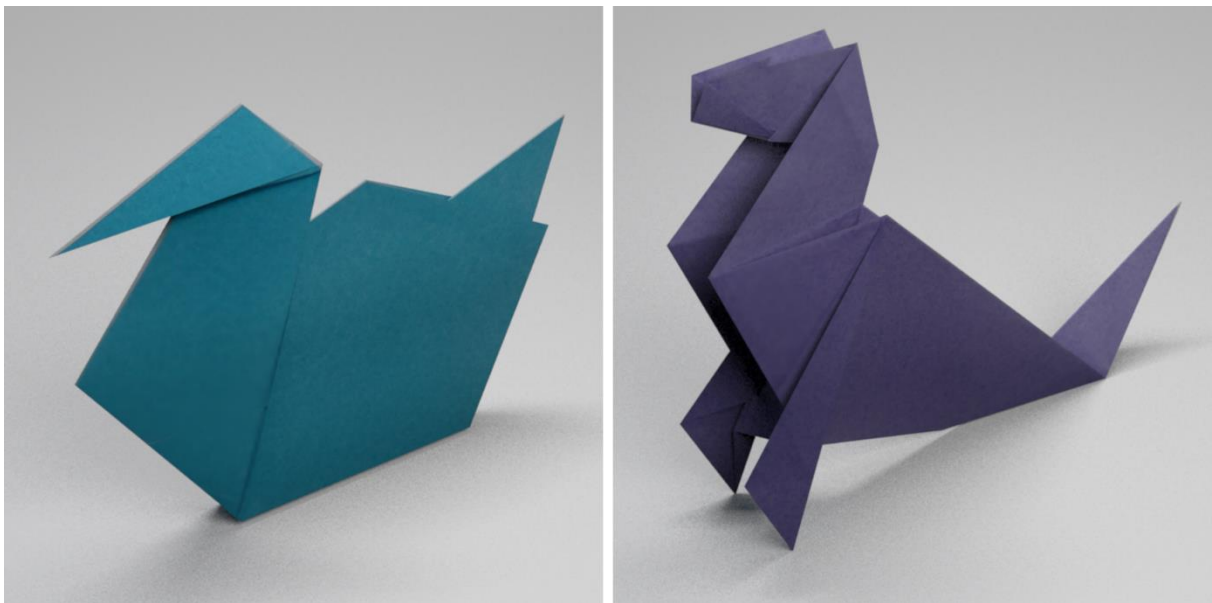


図 4-8: ユーザテストで作成されたモデルのレンダリング結果。

第5章 結論

5.1 まとめ

本稿では、動物のような対称性を持つ折紙作品を簡易な操作でモデリングできる手法を提案した。また、提案手法に基づくシステムを実装し、モデルの試作とユーザテストによって、手法の有効性を確認した。

提案システムでは、実際に紙を折ってできる形状を忠実に再現したものではなく、「指定された折り方で作られているように見える形状」が生成される。この「折紙らしく」見せる技術を発展させることで、広告や映画のワンシーンのような、本当に折って作ったものである必要がない場面で用いるための疑似的な折紙作品を、簡易な方法で生成することが可能になると考えられる。

5.2 今後の課題

本稿の提案システムで扱うことができる折紙作品は、実際に作成するために必要な折りの手数が高々20-30程度の、折紙作品の中では比較的単純なもののみであった。そのため今後の課題は、より多くの折紙作品に対応することである。この課題を解決するために必要な項目を以下に記述する。

- ・ 曲面の扱い

提案システムには曲面を生成する方法が存在しない。そのため、図 5-1 に示すような、曲面を含む折紙作品の形状を扱うことができない。このような形状の扱いを可能にするためには、ユーザの入力した多角形ポリゴンにサブディビジョンを適用するなどして、紙の膨らみや曲げを再現できるようにする必要があると考えられる。



図 5-1: 曲面を含む作品の例。

- ・ 多層に折り重なる形状の表現

折紙作品には、幾重にも紙を折り重ねることで特定の部位を作り上げるものがある。例えば図 5-2 に示すような作品の顔や手足、羽などがこれに該当する。このような、単に一つの折り方を再現することでは対応できない、しかしながら折紙作品には頻繁に見られる形状を表現できるようにすることが必要であると考えられる。



図 5-2: 紙を多層に折り重ねる作品の例 (悪魔[前川淳])。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた三谷純教授、金森由博准教授、遠藤結城助教に感謝します。先生方には研究の方針から文章の構成まで丁寧に指導して頂き、感謝に堪えません。また、非数値処理アルゴリズム研究室の皆様には、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T.Igarashi, S.Matsuoka, and H.Tanaka. "Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design." *Proc. ACM SIGGRAPH* (1999), 409-416.
- [2] Y.Gingold, T.Igarashi, and D.Zorin. "Structured annotations for 2D-to-3D modeling." *ACM Transactions on Graphics*, 28.5 (2009), 148.
- [3] E.Entem, L.Barthe, M.P.Cani, F.Cordier, and M.Van de Panne. "Modeling 3D animals from a side-view sketch." *Computers & Graphics*, 46 (2015), 221-230.
- [4] M.Bessmeltsev, W.Chang, N.Vining, A.Sheffer, and K.Singh. "Modeling Character Canvases from Cartoon Drawings." *ACM Transactions on Graphics* , 34.5 (2015),162.
- [5] S.Miyazaki , T.Yasuda , S.Yokoi. and J.Toriwaki , "An Origami Playing Simulator in the Virtual Space", *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 7.1 (1996), 25.
- [6] 古田陽介, 木本晴夫, 三谷純, 福井幸男, "マウスによる仮想折紙の対話的操作のための計算モデルとインタフェース", *情報処理学会論文誌*, 48.12 (2007), 3658-3669.
- [7] P. Paczkowski, J. Dorsey, H. Rushmeier, and M. H. Kim. , "Paper3D: Bringing Casual 3D Modeling to a Multi-Touch Interface. ", *Proc. the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology* (2014). 23-32.
- [8] 三谷純. 折紙の展開図専用エディタ(ORIPA)の開発および展開図からの折りたたみ形状推定. *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.9, pp.3309-3317,(2007).
- [9] Kato, J., Watanabe, T., Hase, H. and Nakayama, T.: Understanding Illustrations of Origami Drill Books, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.6, pp.1857-1873, (2000).
- [10] 三谷純: 二次元バーコードを用いた紙の折りたたみ構造の認識とモデル化; *情報処理学会研究報告*, 2005-CVIM-150, pp. 115-122, (2005).
- [11] 横山卓弘, 高井昌彰. 厚さを持った折り紙シミュレーションとその評価. *グラフィックスと CAD*, 101-4,pp.19-24, (2000).
- [12] Nitsch, E. J. When pigs fly: a study of computer generated paper folding. M.S. thesis, Texas A&M University, (2008).
- [13] Tomohiro Tachi. Simulation of rigid origami. *Origami*, Vol. 4, pp. 175-187, (2009).
- [14] Bartman F. L., Chaney L. W., Surm M.: Reflectance of Kodak White Paper. Tech. rep., University of Michigan, (1964).
- [15] Papas, Marios, Krystle de Mesa, and Henrik Wann Jensen. A Physically - Based BSDF for Modeling the Appearance of Paper. *Computer Graphics Forum*. Vol. 33. No. 4. (2014).
- [16] 三谷純, 鈴木宏正. 折り紙の構造把握のための形状構築と CG 表示. *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.1,pp. 247-254, (2005).
- [17] 三谷純. 平坦折紙のための重なり順に閉ループを持つ平面集合のレンダリング手法. *情報処理学会研究報告グラフィックスと CAD(CG)*. pp.47-52, (2007).
- [18] Yohsuke Furuta, Jun Mitani, and Yukio Fukui. A Rendering Method for 3D Origami Models using Face Overlapping Relations. *Smart Graphics*, pp.193-202, (2009).
- [19] Autodesk,Inc. Maya. <http://www.autodesk.co.jp/products/maya/overview> (参照 2016-1-20).
- [20] NVIDIA Corporation. mental ray. <http://www.nvidia.co.jp/object/nvidia-mental-ray-jp.html>(参照 2016-1-20).
- [21] 山口真, *日本のおりがみ辞典*, 株式会社ナツメ社 (2013).
- [22] 前川淳, *本格折り紙 $\sqrt{2}$* , 日貿出版社 (2009).