

平成26年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

非多様体構造を許容した可展面パッチ集合による  
紙模型用形状モデルの構築

主専攻      ソフトウェアサイエンス主専攻

著者      細田 翔

指導教員   三谷 純

## 要 旨

立体形状をポリゴンメッシュまたは可展面パッチの集合で近似し、それらを平面にマッピングすることで紙模型用の展開図を生成できる。しかしながら、計算機で自動生成される紙模型は、専門家が手作業でデザインしたもの比べると作りやすさや形状の表現力の点で見劣りする。本研究では、この違いはポリゴン固有の凹凸感と非多様体構造の有無に由来するものであると仮定し、この差異を解決するための新しい紙模型用形状モデル構築手法を提案する。提案手法では、予め滑らかな可展面の集合で形を定義するので、完成した紙模型にポリゴンの特徴が表れない。非多様体構造を許容することで、一部のパーツを1枚の紙によって構成し、輪郭を自由に編集することができる。また、外からは目立たないような底のパーツなどを省略した穴の開いた構造を作ることができる。このような構造は専門家の手作業による作品によく見られる特徴であり、作品の構造を単純化し、組み立てやすさの向上を図ることができる。提案システム上の曲面は、制作者の意図を反映しやすいよう対話的に編集操作できるものとし、曲面同士が交わる箇所でのトリム処理を組み込んだ。これにより、意匠性を考慮した曲面配置が可能になるなど、紙模型用形状設計における、より高度なユーザ支援を実現した。

# 目次

第1章	序論	1
第2章	関連研究	3
2.1	紙模型用形状の自動生成に関する研究	3
2.2	可展面の対話的な操作に関する研究	4
2.3	対話的な紙模型用形状モデルの構築に関する研究	4
第3章	提案手法	5
3.1	提案システムの入力と使用方法	5
3.2	可展面パッチの構成	7
3.3	トリム処理	8
3.3.1	単一曲面によるトリム処理	8
	単一曲面によるトリム処理の例	8
	単一曲面によるトリム処理の実装	10
3.3.2	複数曲面によるトリム処理	11
	複数曲面によるトリム処理の例	11
	複数曲面によるトリム処理の実装	11
3.4	展開図の生成	12
3.4.1	uv座標から平面座標への展開	12
3.4.2	面の表裏の反転処理	14
3.4.3	のりしろの付け方の検討	15
第4章	結果	18
4.1	実験1	18
4.1.1	提案システムによる試作	18
4.1.2	市販ソフトウェアによる試作	18
4.1.3	市販ソフトウェアとの比較	20
4.2	実験2	22
4.2.1	提案システムによる試作	22
4.2.2	既存手法との比較	22
第5章	結論と今後の課題	26
5.1	結論	26

5.2	今後の課題	26
5.2.1	より自由度の高い曲面生成	27
5.2.2	展開図の改善	28
	隣接パーツとの連結によるパーツ数の削減	28
	線接触する箇所が目印の出力	29
	のりしろの出力	29
5.2.3	3D モデルデータの出力	29
	謝辞	31
	参考文献	32

# 目次

1.1	ポリゴンメッシュからの紙模型と可展面集合からの紙模型の比較 . . . . .	2
1.2	専門家の手作業による作品例 . . . . .	2
3.1	提案手法の流れ . . . . .	5
3.2	提案システムの画面 . . . . .	6
3.3	可展面パッチの基本構成 . . . . .	8
3.4	単一曲面によるトリムの例 . . . . .	9
3.5	単一曲面によるトリムの各ステップの完了状態 . . . . .	10
3.6	複数曲面によるトリムの例 . . . . .	12
3.7	複数曲面によるトリムの各ステップの完了状態 . . . . .	13
3.8	可展面パッチ (左) とその展開図 (右) . . . . .	13
3.9	展開図に対するのりしろの生成の実験 . . . . .	16
4.1	実験 1 の入力モデルと提案システムによるモデル . . . . .	19
4.2	実験 1 の提案システムと市販ソフトウェアによる紙模型の比較 . . . . .	20
4.3	実験 2 の入力モデルと提案システムによるモデル . . . . .	23
4.4	実験 2 の提案手法による展開図と紙模型 . . . . .	24
4.5	実験 2 の既存手法との比較 . . . . .	25
5.1	平坦な領域による連結をしたパッチ . . . . .	27
5.2	パッチ両端の法線 $N_0, N_1$ . . . . .	27
5.3	改善した展開図 . . . . .	29
5.4	可展面パッチのワイヤースケルトン表示 . . . . .	29

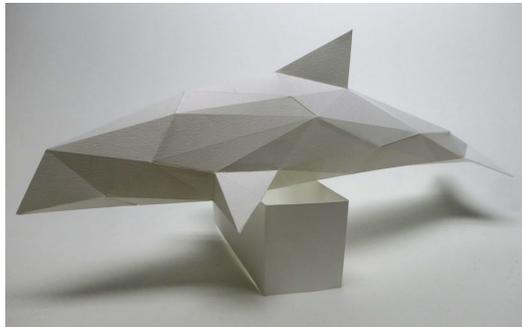
# 第1章 序論

紙模型の展開図の自動生成に関する研究はこれまで多く行われている。既存の手法では、立体形状をポリゴンメッシュまたは可展面パッチの集合で近似し、それらを平面にマッピングすることで紙模型用の展開図を生成できる [1, 2, 3]。一般には、その実現の容易さからポリゴンメッシュが用いられることが多い。現に、広く普及している市販のソフトウェア「ペパクラデザイナー [4]」は、ポリゴンメッシュから展開図を生成する。しかしながら、このようにして得られる紙模型は、専門家が手作業でデザインしたものと比べると機械的であり、作りやすさや形状の表現力の点で見劣りするものが多い。本研究では、この差異は非多様体構造の有無とポリゴンメッシュ固有の凹凸感に由来すると仮定した。そこで、この違いを解決するため、可展面パッチの集合による形状表現を用いることで、滑らかな曲面を持つ紙模型を制作できるシステムの開発を行った。

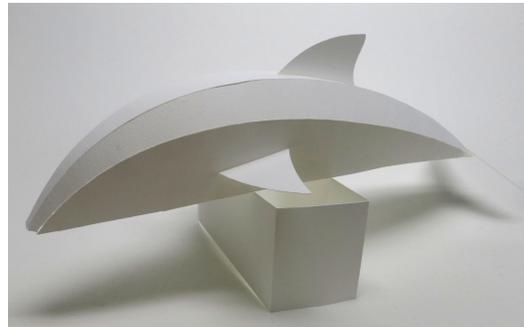
ペパクラデザイナーは、ポリゴンメッシュから展開図を生成し、可展面の要素として平面のみを用いるため、図 1.1(a) のようにポリゴンの凹凸が最終形状に現れてしまう。提案手法では、予め滑らかな可展面の集合で形を定義するので、図 1.1(b) のように完成した紙模型にポリゴンの特徴が表れない。

非多様体とは、表面を構成するポリゴン間に、点接触や線接触の構造、または隣接するポリゴンが存在しない境界部分が含まれる構造を指す。例えば、図 1.2(左) の専門家のデザインしたライオンの紙模型 [5] では、タテガミや耳のパーツに着目すると、1 枚の紙のパーツが顔のパーツに線接触した非多様体構造となっている。1 枚の紙でパーツを構成することで、輪郭を自由に編集することができる。これによって、多様体モデルでは複雑となってしまうタテガミのようなギザギザとした形状も容易に表現が可能となり、構造の単純化によるパーツ数を削減もできる。図 1.2(中, 右) の犬の紙模型 [6] では、外からは目立たない腹の部分のパーツを省略する専門家の作品による見られる技法が取り入れられている。一部のパーツを省略して空洞とすることにより、多様体の閉じた形状と比較して、のり付けの作業が容易になり、より組み立て易い作品となる。このように、専門家の作品の多くは非多様体構造を含んでいるが、上記で紹介した自動生成やペパクラデザイナーによる手法では、非多様体構造を許容した作品を設計することはできない。

提案システム上の曲面は、制作者の意図を反映しやすいように対話的に編集操作できるものとし、曲面同士が交わる箇所でのトリム処理を組み込んだ。これにより、意匠性を考慮した曲面配置が可能になるなど、紙模型用形状設計における、より高度なユーザ支援を実現した。

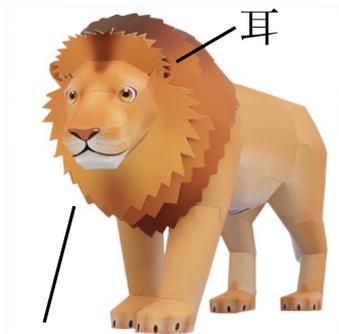


(a) ポリゴンメッシュから展開図を生成した紙模型



(b) 提案システムで生成した可展面集合からの紙模型

図 1.1: ポリゴンメッシュからの生成した紙模型と可展面集合から紙模型の比較。(a) はペパクラデザイナーによるポリゴンメッシュから展開図を生成したイルカの紙模型の写真である。(b) は提案システムで生成した可展面集合からの紙模型の写真である。



タテガミ



腹

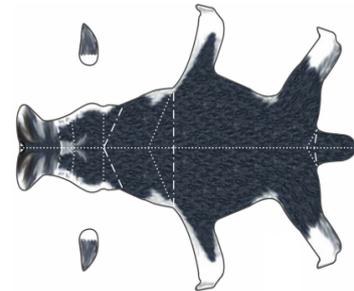


図 1.2: 専門家の手作業による作品例 (左) ライオン 画像出典: 文献 [5] (中, 右) 犬とその展開図 画像出典: 文献 [6]

## 第2章 関連研究

本章では本研究に関連する既存研究を紹介する。はじめに紙模型用形状の自動生成に関する研究について紹介し、次に可展面の対話的な操作に関する研究を紹介する。最後に対話的な紙模型用形状モデルの構築に関する研究について紹介する。

### 2.1 紙模型用形状の自動生成に関する研究

紙模型の展開図の自動生成に関する研究はこれまで多く行われてきた。これらの手法では、立体形状をポリゴンメッシュまたは可展面パッチの集合で近似し、それらを平面にマッピングすることで紙模型用の展開図を生成している。

Mitani らは入力されたポリゴンメッシュを形状特徴に基づいて細長い帯状の領域に分割し、必要に応じて、特徴を維持するための Cut-Line を追加した後、分割した後の領域を三角形の Strip にし、平面に展開することで展開図を生成する手法が提案した [1]。この手法で得られる形状は、細分割を繰り返しても滑らかなない個所が散在するため、厳密には滑らかな可展面とならない。

Shatz らは入力されたポリゴンメッシュを可展面の集合によって近似し、それらを平面にマッピングすることで展開図を生成する手法を提案した [2]。この手法では可展面のパーツの境界部分が滑らかになるような工夫も行われており、可展面要素として、平面と円錐面のみを使用する。可展面集合による滑らかな紙模型を得ることができるが、非多様体構造を許容した形状を許容することができない。

Massarwi らは入力されたポリゴンメッシュを三角形の Strip で表現された円柱の集合で近似し、それらを平面にマッピングすることで展開図を生成する手法が提案した [3]。結果は入力形状を輪切りにしたものを組み合わせたような形となってしまう、機械的な印象を受ける。

Liu らは四角形メッシュモデルを平面性を持つ四角形の集合 (PQ メッシュ) で近似する手法を提案した [7]。PQ メッシュは細分割することで可展面に収束させることが可能であるため、可展面による形状モデルが実現できる。

これらの自動生成によって得られる展開図は専門家による手作業による展開図と比較すると、機械的な印象を受ける。また、手作業による紙模型の多くが含む非多様体構造を許容することができない。そこで本研究では、自動生成ではなく対話的な手法に着目した。提案システムでは、滑らかな可展面によって形状を構築し、非多様体構造を許容するようにした。また、対話的な手法に形状を構築するため、設計者の意匠性が含まれた結果を得ることができる。

## 2.2 可展面の対話的な操作に関する研究

可展面を直接用いるデザインは多くの産業用途から望まれており、様々なデザイン手法が数多く提案されてきた。

Boらは紙の折り曲げをシミュレートするために、ユーザが測地線を制御できる対話的な手法が提案した [8]。しかし、この手法の初期の形状は、ひときれの長方形に制限されており、動物などの具体的な形状の設計は難しい。

Solomonらは [9] 可展面を離散表現し、紙の折り曲げを対話的に行う手法が提案したが、この手法は折り紙のような形の決まっている一枚の可展面を折り曲げた形状の設計に特化しており、紙模型のような複数の可展面パッチを組み合わせた形状の設計には適していない。

そこで提案システムでは、曲面を制作者の意図を反映しやすいように対話的に編集操作できるものとし、曲面同士が交わる箇所でのトリム処理を組み込んだ。これによって紙模型用の形状の設計に特化したシステムとした。

## 2.3 対話的な紙模型用形状モデルの構築に関する研究

Roseらは領域の境界を表す3次元の曲線を入力として可展面を生成することで、可展面による対話的なモデル構築の手法を提案した [10]。しかし、この手法では入力された境界から可展面を生成するための処理に数分を要するため、ユーザはリアルタイムに結果を得ることができない。

Liuらはスケッチベースのインターフェースによって3次元の閉曲線を入力し、その3次元の閉曲線を補間する可展面メッシュを生成することによる対話的なモデル構築の手法した [11]。この手法の特徴は、内部に穴のあるようなパッチも許容することができ、スケッチベースのインターフェースによって初心者でも設計が可能な点にある。

これらの手法は、可展面による対話的なモデル構築という点では提案手法と同じであるが、アプローチが異なる。既存の手法では入力された境界や閉曲線から可展面を生成するのに対し、提案手法では予め可展面を配置するため、厳密な可展面を得ることができる。また、予め可展面を配置することで、既存手法のように入力を可展面によって近似するための時間や計算が不要であるため、リアルタイムに結果を得ることができる。

## 第3章 提案手法

本章では提案する紙模型用形状のモデル構築手法について述べる。はじめに、提案システムの流れを説明してから、提案システムの入力と使用方法を説明する。次に、提案システムで扱う可展面パッチの構成、トリム処理、展開図の生成方法について述べる。

### 3.1 提案システムの入力と使用方法

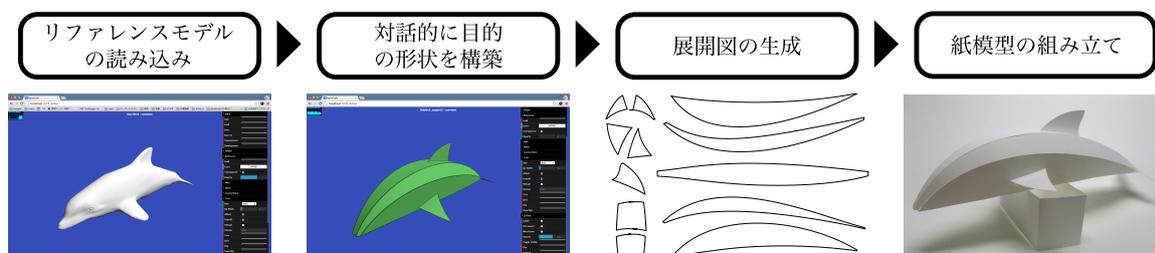


図 3.1: 提案手法の流れ。まず、リファレンスモデルを読み込み、次にリファレンスモデルを参照しながら対話的に目的とする形状を構築する。最後に設計したモデルを展開図に出力し、組み立てることで紙模型作品を得ることができる。

提案システムでは図 3.1 のような流れによって、紙模型用形状モデルの設計を行う。リファレンスモデルとは、目的とする形状を素早く構築するための支援を行うために参照する既存の 3D モデルのことである。リファレンスモデルとして、OBJ や PLY といった形式のファイルを読み込むことができる。図 3.2(a) の例では、既存のイルカの 3D モデル [13] をリファレンスモデルとして読み込んでいる。制御点の追加を行う際は、投影面上のマウスイカーソルの位置からスクリーンの視点方向にレイを飛ばし、リファレンスモデルとの交点を求め、交点から設定した長さだけレイの逆方向へ離れた位置に制御点を追加する。つまり、制御点の追加を行う際の奥行きを、リファレンスモデルとの交差位置に基いて自動決定できる。リファレンスモデルの読み込みは必須のステップでは無いが、何もない空間にパッチを配置する場合に比べ、より簡単にパッチを配置することができる。また、リファレンスモデルの透過度を自由に変更できるため、作業の邪魔になる場合は図 3.2(b) の不可視状態にできる。

ユーザは図 3.4(左) の 4 つの制御点の位置を操作することで配置された可展面パッチの形状をインタラクティブに制御できる。3.3 節で詳細を説明するが、提案システムでは、複数のパッチ同士が交わる箇所でのトリム処理を行うことができる。図 3.2(c) は、2 枚の可展面パッチ

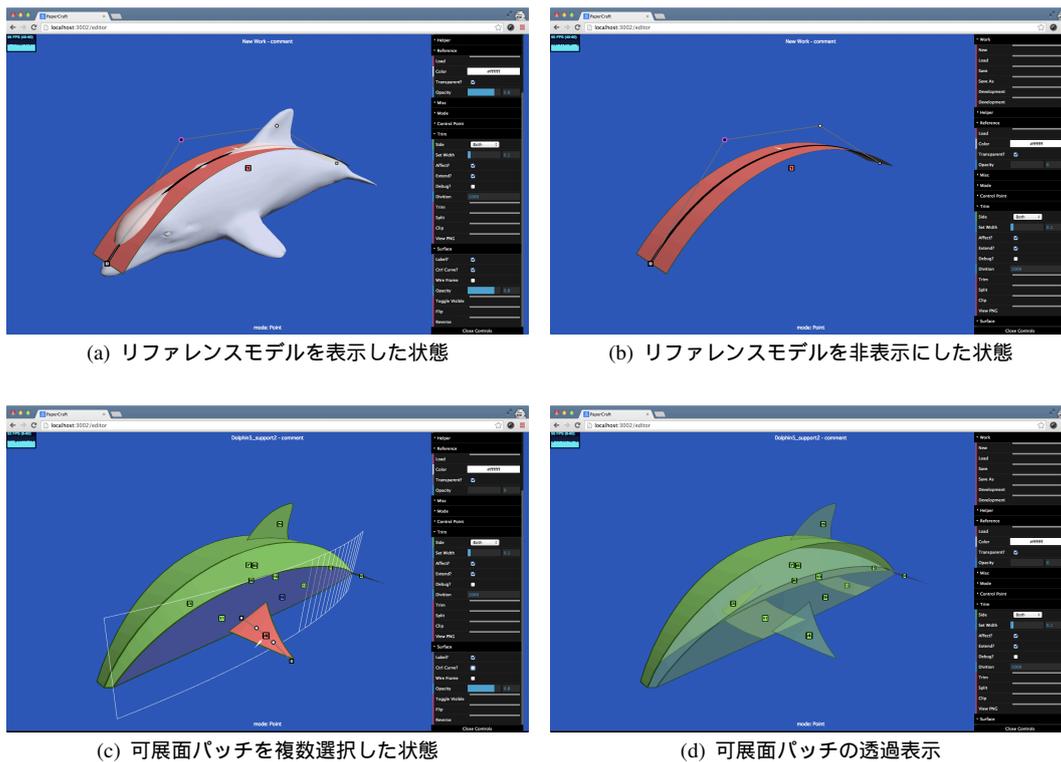


図 3.2: 提案システムの画面。(a) はリファレンスモデルを読み、リファレンスモデルを元に可展面パッチを 1 枚配置した状態である。(b) は (a) のリファレンスモデルを非表示にした状態である。(c) はイルカのモデルを設計し、モデルを構成する可展面パッチを 2 枚選択した状態であり、1 枚目に選択したパッチが赤色、2 枚目に選択されたパッチが青色で示されている。(d) はリファレンスモデルを透過し、裏側にある可展面パッチも見えるようにした状態である。

チを選択した状態である。提案システムでは、未選択のパッチは緑色で描画され、パッチを複数選択すると、最初に選択されたパッチが赤色となり、2枚目以降に選択されたパッチは青色で示される。トリム処理を行う際には、赤色のパッチが青いパッチとの交差曲線によってトリムされる。パッチ同士が交わる箇所でのトリム処理によって、曲面集合が線接触した形状を構築し、非多様体構造も許容する。なお、青色のパッチがワイヤースケルトン表示されているのは、実装上の都合により、トリムの交差判定を行うときには、青色のパッチのトリム領域は無視され、ワイヤースケルトン表示された長方形の形として判定を行うためである。また、図 3.2(d) のように、可展面パッチを透過することで、裏側にあるパッチも表示することができる。これらの機能と支援により、意匠性を考慮した曲面配置が可能になるなどより高度なユーザ支援を実現した。

操作モードには、「制御点モード」と「可展面パッチモード」の2種類があり、制御点モードでは、制御点単位の細かい調整ができる。可展面パッチモードでは、可展面パッチの形状を保ったまま、平行移動や回転を行うことができる。また、アンドゥ機能、リドゥ機能、作業状態の保存と復元機能などの基本的な機能を備えている。

開発には、CoffeeScript と WebGL を用いた。CoffeeScript は JavaScript 生成言語の一種（いわゆる altJS）である。提案システムは Web ブラウザ上で動作し、WebGL を利用したことによってハードウェアアクセラレーションによる高速な描画を行うことができる。

## 3.2 可展面パッチの構成

可展面パッチは「制御点」と「トリム情報」の2つの要素から構成される。可展面は3次元の制御点によって定義され、提案システムでは、図 3.3(左) に示した4つの制御点から3次のベジェ曲線を計算し、可展面の測地線とする。次に、式 (1) に示す文献 [8] の手法を用いて、測地線から図 3.3(左) に示した ruling 方向を計算し、可展面を導出する。

測地線であるベジェ曲線上の比率  $v \in [0, 1]$  を考える。図 3.3(右) の  $p(v)$  は  $v$  における測地線上の座標である。また、 $d(v)$  は  $v$  における ruling 方向であり、次の式 (3.1) により計算できる。なお、式 (3.1) から読み取れる通り、図 3.3(左) では1方向だけの ruling 方向が示されているが、特殊なケースを除いて同じ可展面パッチ中でも  $v$  によって ruling 方向が変化する。

$$d(v) = \frac{p''(v) \times p'''(v)}{\|p''(v) \times p'''(v)\|} \quad (3.1)$$

ここで、 $p'(v)$  は測地線の一階微分であり、 $p''(v)$  と  $p'''(v)$  はそれぞれ二階微分と三階微分である。 $\times$  記号はベクトルの外積を表す。

可展面パッチの曲面は、 $(u, v)$  の2つのパラメータによって、式 (3.2) のパラメトリック曲面として定義できる。 $(u, v)$  座標で定義された点の例を図 3.3(右) に示した。トリム情報はこの  $uv$  座標上の2次元の座標列を用いて、多角形として表現した。

$$X(u, v) = p(v) + ud(v) \quad (3.2)$$

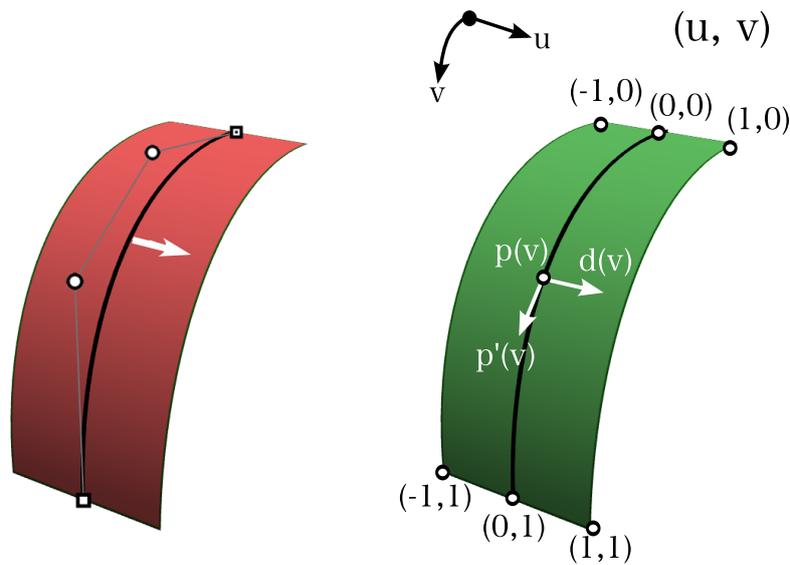


図 3.3: 可展面パッチの基本構成。(左)の可展面パッチは4つの制御点と ruling 方向の矢印を示した。可展面パッチの形状は4つの制御点によって対話的に操作できる。(右)の可展面パッチには、 $p(v)$ ,  $d(v)$  と  $uv$  座標の点の例を示した。

前述したとおり、 $v \in [0, 1]$  であるが、 $u \in [-\infty, \infty]$  となり、 $u$  は負の値を含めた全ての実数値をとりうることに注意されたい。

### 3.3 トリム処理

本節では可展面パッチ同士のトリム処理について述べる。非多様体構造を許容することで、多様体モデル同士には適用できるような従来のブーリアン演算は機能しなくなってしまう。そこで、非多様体構造に特化した可展面パッチ同士が交わる箇所でのトリム処理を考案した。考案したトリム処理には「単一曲面によるトリム」と「複数曲面によるトリム」の2種類がある。

#### 3.3.1 単一曲面によるトリム処理

##### 単一曲面によるトリム処理の例

単一曲面によるトリム処理は、他の単一のパッチとの交差曲線に沿ってパッチを2つに分割する処理である。図 3.4(左)では、A と B の2つの可展面パッチがあり、A が単一曲面によりトリムされるパッチ、B が単一曲面によりトリムするパッチである。図 3.4(中央)は、単一曲面によるトリム処理後の状態を示しており、A が2つのパッチ、 $A^-$  と  $A^+$  に分割され

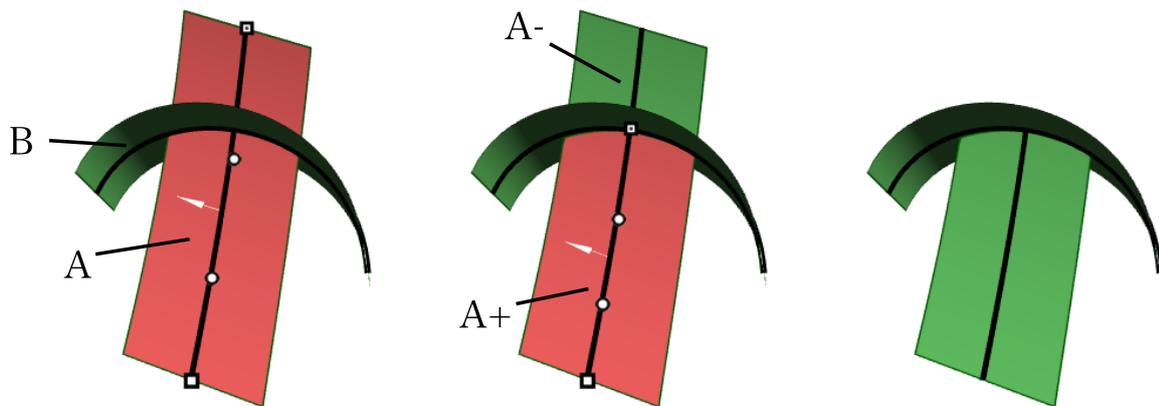


図 3.4: 単一曲面によるトリムの例である。(左)では、A と B の2つの可展面パッチがあり、赤色で示された A が単一曲面によりトリムされるパッチ、緑で示された B が単一曲面によりトリムするパッチである。(中央)は、単一曲面によるトリム処理後の状態を示しており、A が2つのパッチ、A<sup>-</sup> と A<sup>+</sup> に分割される。手動で A<sup>-</sup> を削除すると、(右)のような2つの可展面パッチが線接触で繋がっている状態を得ることができる。

る。手動で A<sup>-</sup> を削除すると、図 3.4(右)のような2つの可展面パッチが線接触で繋がっている状態を得ることができる。

### 単一曲面によるトリム処理の実装

単一曲面によるトリム処理は5つのステップによって行われる。1~4のステップが完了した時点の状態を図3.5に示す。

1. 単一曲面によるトリムするパッチとの交点群を求める。
2. 交点群を一続きの曲線となるように順序付けを行う。
3. 交線と単一曲面によるトリムされるパッチの輪郭線の交差判定を行い、交線の端の部分を切り落とし、輪郭線を2つに単一曲面によるトリムする。
4. パッチの輪郭線と端を切り落とした交線を結合し、2つの多角形にする。
5. 2つの多角形の領域をカバーする最小の長さになるように制御点の位置と測地線を更新する。

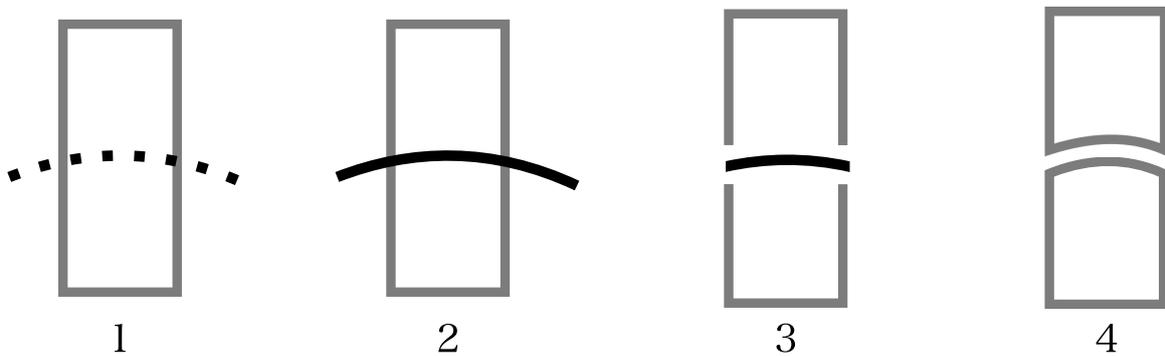


図 3.5: 単一曲面によるトリムの各ステップの完了状態。灰色で示されているのは、現在のトリム形状であり、黒色で示されているのは、他のパッチとの交差情報である。

ステップ1では、トリムされるパッチの  $uv$  座標上の交点群を求めるために、トリムするパッチとの交差判定を行う。 $v$  を少しずつ変化させながら、測地線上の  $p(v)$  から  $d(v)$  方向にレイを飛ばし、衝突したときの距離が  $u$  座標となる。また、同時に  $p(v)$  から、 $-d(v)$  方向にもレイを飛ばすことで、可展面上の全ての領域をカバーすることができる。この処理を行うことで、図3.5のステップ1で示されるパッチの  $uv$  座標上の点群が得られる。

ステップ2では、Seedとなる点を決め、それを長さゼロの初期曲線とし、それ以降、端点から最も近い点を順次連結していくことで交点群を一続きの曲線となるように順序付けを行う。

ステップ3では、多角形と曲線の交差判定を行う必要があるが、双方とも  $uv$  平面上の線分の集合として扱えるので、線分同士の交差判定によって処理できる。交線がパッチを横切る場合、交点は2点になるはずである。交線のうち、交点の2点の間の区間だけ残し、端の部分を切り捨てる。次に交点の位置によって輪郭線を2つに単一曲面によるトリムする。

ステップ4について、2つに単一曲面によるトリムされたそれぞれの輪郭線を端の切り落とした交線と結合すると、図3.5のステップ4のような、2つの多角形が得られる。最後に、得られた2つの多角形をトリム領域とする可展面パッチを作成する。

ステップ5では、測地線の最適化を行う。図3.4(中央)のA<sup>+</sup>のパッチの制御点を見ると、図3.4のA<sup>+</sup>のパッチから制御点の位置が変化している。これは、A<sup>+</sup>の領域は単一曲面によるトリム前のAの領域より小さいため、測地線がA<sup>+</sup>の領域の外にはみ出さないように制御点の位置と測地線を更新したためである。また、3.2節で示したようにトリム情報のv成分は測地線の比率であるため、測地線の更新に連動してトリム形状が変化しないように、トリム情報のv成分を更新する必要がある。このアルゴリズムでは、可展面パッチとの交線が2本以上になるようなケースでは対処できないが、交点のクラスタリングを行い、単一曲面によるトリム処理を複数回行うことで対処できると考える。

### 3.3.2 複数曲面によるトリム処理

#### 複数曲面によるトリム処理の例

複数曲面によるトリム処理は、他の複数のパッチ間の交差曲線から構成された閉曲線に沿ってトリムする処理であり、トリム処理されたパッチは閉曲線の内側の領域を残して切り抜かれる。

図3.6(左)は複数曲面によるトリムを行う前の初期状態であり、この例では、赤色で示された「トリムされる1枚のパッチ」と緑色で示された「複数曲面によるトリムする6枚のパッチ」の合計7枚のパッチがある。図3.6(中央)は複数曲面によるトリム処理後の状態であり、パッチが閉曲線に沿ってトリムされている。図3.6(右)は、複数曲面によるトリム処理の直前に、5.1節の単一曲面によるトリム処理を6枚のパッチにそれぞれ行い、余分なパッチを削除することで得られた状態である。提案システムでは、複数曲面によるトリム処理と同時に単一曲面によるトリム処理を組み合わせるオプションも存在するので、1回の操作で、図3.6(左)の状態から、図3.6(中央)のような6回の単一曲面によるトリム処理と1回の複数曲面によるトリム処理を行った状態にすることができる。

#### 複数曲面によるトリム処理の実装

複数曲面によるトリム処理は5つのステップによって行われる。1~4のステップが完了した時点の状態を図3.7に示す。

1. パッチごとの交点群を求める。
2. 交点群を一続きの曲線となるように順序付けを行う。
3. 交線同士の交差判定を行い、交線の端の部分を切り落とす。
4. 端を切り落とした交線群を結合し、1つの多角形にする。

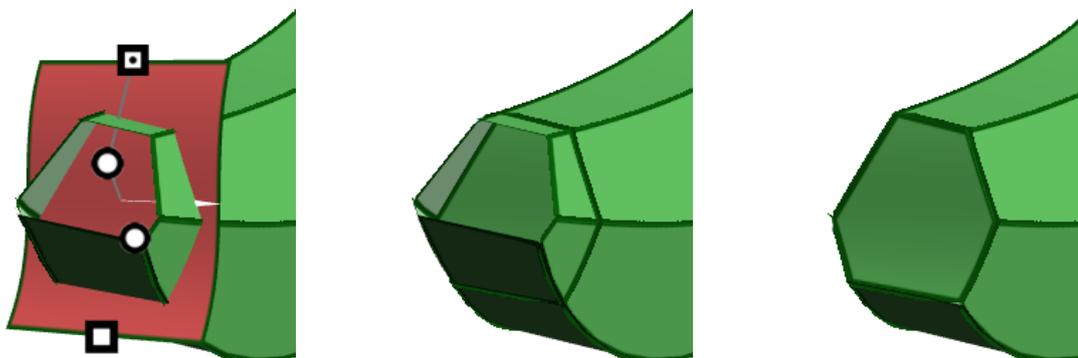


図 3.6: 複数曲面によるトリムの例。(左)は、複数曲面によるトリムを行う前の初期状態であり、赤色で示された1枚のパッチがトリムされるパッチであり、それ以外の緑色で示された6枚のパッチはトリムするパッチである。(中)は、トリム後の状態であり、先程のトリムされるパッチがトリムするパッチとの交差閉曲線によって切り抜かれた。(右)は、先程の6枚のトリムする側であったパッチを今度はトリムする・されるの関係を入れ替えて単一曲面によるトリムを行い、余分なパッチを削除することで得られた状態である。

#### 5. 多角形の領域をカバーする最小の長さになるように測地線を更新する。

各ステップの処理は単一曲面によるトリム処理とほぼ同じであるが、複数曲面によるトリム処理ではトリムされるパッチの輪郭線は使用せず、トリムするパッチとの交線から多角形を構成する。

また、交線が閉じていない場合でも、ステップ4の曲線同士の結合処理を行うときに、最近傍となる曲線の端点の組を見つけて結合することで対処できる。

### 3.4 展開図の生成

本節では可展面パッチから展開図を生成する手法について述べる。提案システムでは、可展面パッチを平面に展開した時の展開図を出力することができる。なお、出力形式としては、2次元ベクターイメージ用の画像形式である SVG を採用した。

#### 3.4.1 uv 座標から平面座標への展開

提案手法では、可展面を直接モデリングしているため、歪みのない展開図を得ることができる。しかしながら、3.2節で定義した uv 座標系は、あくまで可展面パッチを曲げた状態に

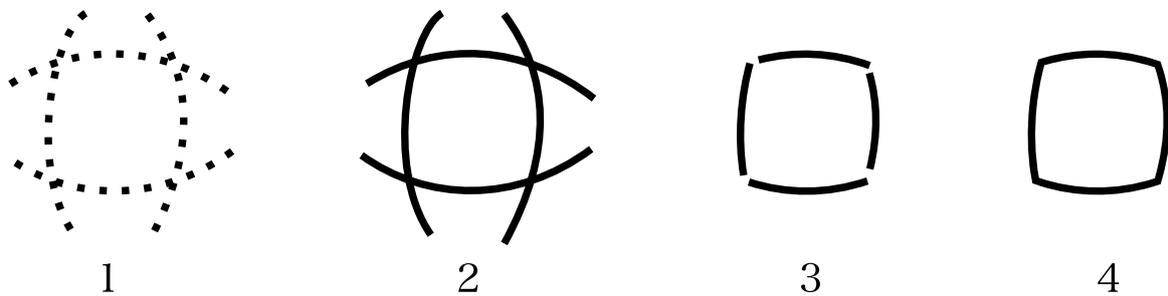


図 3.7: 複数曲面によるトリムの各ステップの完了状態。1 は交差判定によって得られた点群の様子で、2,3 のステップを踏むことで、4 の閉曲線の状態を得ることができる。

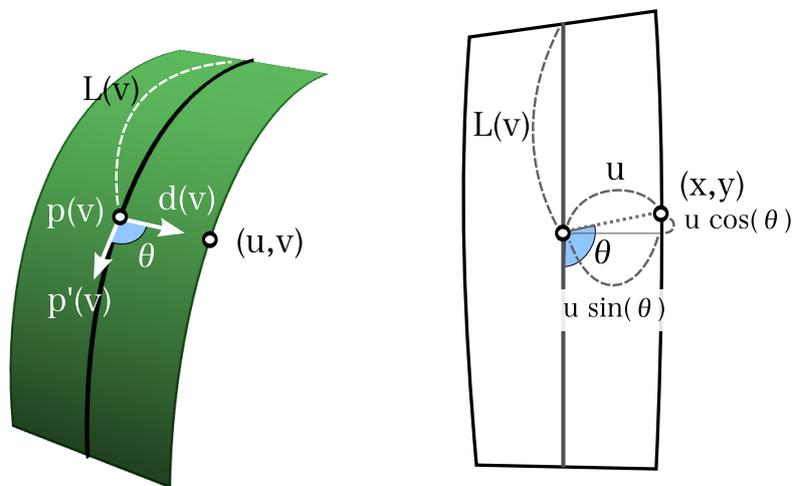


図 3.8: 可展面パッチ (左) と その展開図 (右)。 (左) は可展面パッチに  $\theta, L(v)$  の例を示した。 (右) は (左) の可展面パッチを展開図にした様子であり、平面に展開する前後での  $\theta, L(v)$  の対応関係が分かる。

おけるトリム情報を表現するための座標系であるため、パッチを平面に展開した展開図を得るためには、もう一段階の処理が必要となる。

まず、曲げた状態でのパッチ上の座標  $(u, v)$  を平面に展開したときの座標  $(x, y)$  に変換することを考える。平面に展開したときの座標  $(x, y)$  は、式 (3.3) によって求めることができる。

$$(x, y) = (u \sin(\theta), u \cos(\theta) + L(v)) \quad (3.3)$$

ここで、図 3.8 と式 (3.3) 中の  $\theta$  は  $p'(v)$  と  $d(v)$  のなす角であり、 $L(v)$  は  $p(v)$  における測地線の長さである。

式 (3.3) の三角関数を使った変換がなぜ必要であるかを説明する。可展面パッチを平面に展開すると、ruling 方向は展開図の図 3.8 のように常に水平となるわけではなく、ほとんどの場合は水平方向から少し傾いた方向となる。例外を挙げると、4 つの制御点が同一平面上にある時、可展面パッチは柱面となり、展開図上の ruling 方向が全て水平方向になる。柱面の場合は、全ての  $v$  において  $\theta = \frac{\pi}{2}$  となり、 $(x, y) = (u \sin(\frac{\pi}{2}), u \cos(\frac{\pi}{2}) + L(v)) = (u, L(v))$  とより簡単に表せる。

測地線を 3 次のベジェ曲線とした場合は  $L(v)$  を解析的に求めることはできないため、 $L(v)$  の近似値  $\dot{L}(v)$  を求める必要がある。 $\Delta v = \frac{1}{n}$  をステップとして  $v$  を 0 から 1 まで均等に变化させることでベジェ曲線上の点群を  $q_i = p(i \cdot \Delta v)$  として  $n+1$  個求め、それらの点を結んでできる  $n$  本の線分によって  $L(v)$  を近似的に求めた。 $n$  は正の自然数であり、大きくするほど計算結果の精度が上がるが、計算コストが増えてしまうトレードオフの関係にある。実験の結果、 $n = 30$  によって、十分な精度で  $L(v)$  を求めることが出来た。 $[x]$  は  $x$  を切り下げた整数を表すものとして、 $k = \lfloor v \cdot n \rfloor$  を計算する。最初の線分を 1 番目として  $k$  番目の線分までの各線分の長さの和である  $l_k = \sum_{i=1}^k \|q_i - q_{i-1}\|$  を計算する。同様に  $l_{k+1}$  も計算する。 $v$  に対応する  $k$  番目の頂点と  $k+1$  番目の頂点間の比率  $t \in [0, 1]$  を式 (3.4) により求める。

$$t = \frac{v - k \cdot \Delta v}{\Delta v} \quad (3.4)$$

$\dot{L}(v)$  は、 $l_k$  と  $l_{k+1}$  の間にある比率  $t$  に対応する値となり、式 (3.5) によって求めることができる。

$$\dot{L}(v) = (1 - t) \cdot l_k + t \cdot l_{k+1} \quad (3.5)$$

### 3.4.2 面の表裏の反転処理

測地線に対する ruling 方向によって、可展面パッチの表裏を定義することができる。本稿では、測地線 ( $v$  方向) が下向きであるとき、ruling 方向 ( $u$  方向) が右向きであれば、そのパッチは表を向いており、そうでなければ、裏を向いていると定義する。なお、提案システム上では、裏向きのパッチは表向きのパッチより薄い色で描画することで、表裏を区別できるように表現した。

提案システムでは、ruling 方向である  $d(v)$  が測地線の微分により自動的に決定されるため、制御点の操作によって、ユーザが意図したように表裏を操作することはほとんど困難である。したがって、面の表裏の反転機能は非常に重要な機能と言える。

また、実際に紙模型を組み立てることを考えると、一般的な紙は表裏で違いがあるため、仮にパーツの面の向きを任意に指定できずに統一されていないとすると、完成したときの作品の表面側となる紙に表裏が混在してしまっていて、見栄えが悪い作品となってしまふ。

あるパッチの表裏を反転することを考える。先の定義に従えば、ruling 方向の符号を反転させるか、測地線の始点と終点を入れ替えれば、表裏を反転することができる。しかし、提案システムではより簡単な方法によって表裏の反転を実装した。

まず、各パッチに初期値を false とした boolean 型のフラグを持たせる。パッチの表裏を反転するときには、このフラグを反転し、描画を行う時に表裏の区別するための色だけを反転させる。描画の動作だけを変更するので、制御点やトリム情報の内部の状態は変化させる必要はない。展開図を出力するときに、先程のフラグが true であれば、 $x$  の符号を反転させ水平反転に出力する。こうすることで、実質的に面の表裏を反転を実現することができる。

### 3.4.3 のりしろの付け方の検討

展開図への、のりしろの付け方の検討を行なった。例として図 3.9(a) の提案システムで設計した形状から展開図を生成し、その展開図にのりしろを付けた。

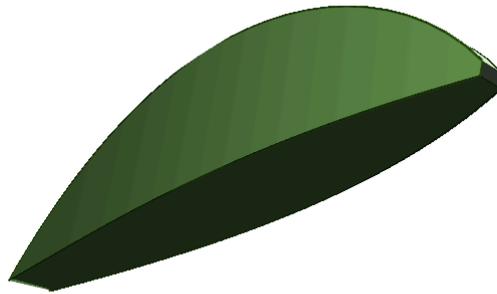
のりしろの三角形の計算について、まず 3.4.1 項で求めた展開図の多角形の頂点に対し、60 個間隔で 2 つの頂点の組  $\{q_0, q_1\} \in \mathbb{R}^2$  を取り出し、それぞれの組について、のりしろとなる突起となる頂点  $r \in \mathbb{R}^2$  を計算し、 $q_0, r, q_1$  の 3 頂点を結ぶことでのりしろを生成した。 $r$  の求め方については、頂点間のベクトル  $v = \frac{q_1 - q_0}{\|q_1 - q_0\|}$  を求めた後、 $v$  の垂直ベクトルである  $n = (-v.y, v.x)$  を計算し、これらを用いて  $r = \frac{q_0 + q_1}{2} + \alpha \cdot n$  として計算した。ここで、 $\alpha$  は突起の長さであり、ここでは  $\alpha = 0.04$  としたが、実際には展開図のスケールなどに応じて適当な値を設定する必要がある。この方法はトリム領域の多角形が時計回りの頂点によって構成されていることが前提となっているので、反時計回りの多角形が展開図中に含まれている場合、図 3.9(b) のようにのりしろの突起が内側を向いてしまうケースがある。

突起が内側になるケースに対処するため、文献 [12] の手法を用いて、トリム領域の多角形が時計回りかどうかを判定を行なった。多角形を構成する頂点列から等間隔に 3 頂点  $c, p, q$  取り出す。 $c, p, q$  が 2 次元の場合、式 (3.6) を計算し  $S < 0$  となっていれば、 $c \rightarrow p \rightarrow q \rightarrow c$  の三角形は時計回りと判定できる。

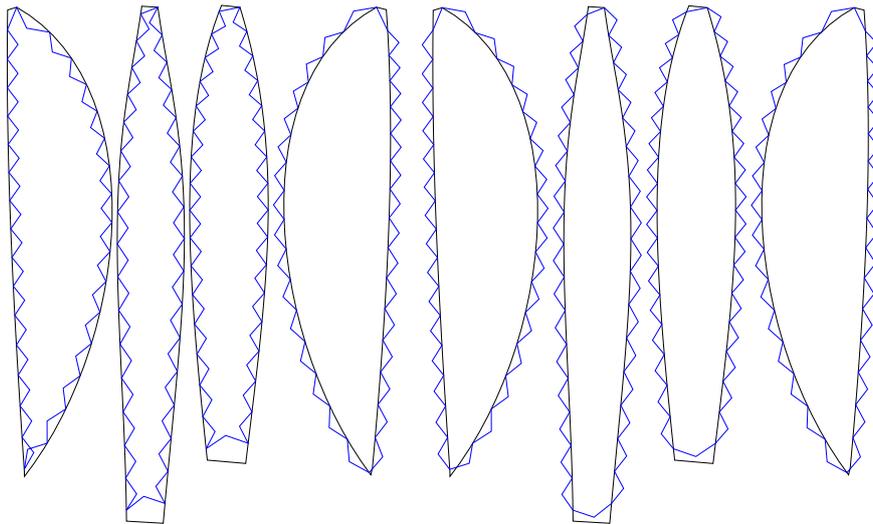
$$S = (p.x - c.x) \cdot (q.y - c.y) - (p.y - c.y) \cdot (q.x - c.x) \quad (3.6)$$

図 3.9(c) は、この時計回りの判定が False だった場合、 $n$  の符号を反転させる処理を加えて得られた展開図である。

さらなる課題としては、実際にはのりしろが必要のない部分までのりしろを生成しているので、不必要なのりしろを削除する必要がある。また、のりしろを構成する頂点を単純に等



(a) 提案システムで設計した形状



(b) 時計回りかどうかを考慮しない結果

(c) 時計回りかどうかを考慮した結果

図 3.9: 展開図に対するのりしろの生成の実験。(a) は実験のために提案システムで構築した形状である。(b) は時計回りかどうかを考慮せずに、のりしろ生成した (a) の展開図であり、のりしろが内側に入るケースがある。(c) は時計回りかどうかを考慮して、のりしろ生成した (a) の展開図であり、のりしろが全て正しく外側にある。

間隔で選んでいるだけであるため、トリムの輪郭が大きく変化する箇所ではのしりろの一部が内側に入ってしまうケースがある。頂点を単純に等間隔で選ぶのではなく、角なる箇所の頂点を必ず選ぶようにするなどの工夫を行えば解決するだろうと予測し、今後の課題として対応したい。

## 第4章 結果

本章では提案システムによって設計した紙模型用形状モデルを紹介し、その結果と考察について述べる。そして市販ソフトウェアや既存手法との比較を行なった。

### 4.1 実験 1

本章では1つ目の試作例として提案システムで設計したイルカの紙模型を紹介する。次に、同じイルカのモデルから市販ソフトウェアによって紙模型の試作を行い、比較と検討を行なった。

イルカを例として挙げた理由は、イルカの胴体は流線型の滑らかな形状をしており、提案システムの滑らかな可展面による紙模型の表現に適していると判断したためである。また、イルカのヒレは1枚のパッチとした非多様体構造の例に適しているため、提案システムの有効性を示すために適当な例であると考えた。

#### 4.1.1 提案システムによる試作

図 4.1(a) のイルカのモデル [13] をリファレンスモデルとして用いて、提案システムによる紙模型の試作を行なった。図 4.1(d) は提案システムでレンダリングを行ったイルカのモデル 3DCG である。また、下からの視点で見ると、図 4.1(e) のように、外からは目立ちにくい腹の一部のパーツを省略し、穴の空いた構造とした。設計に要した時間は 90 分であった。

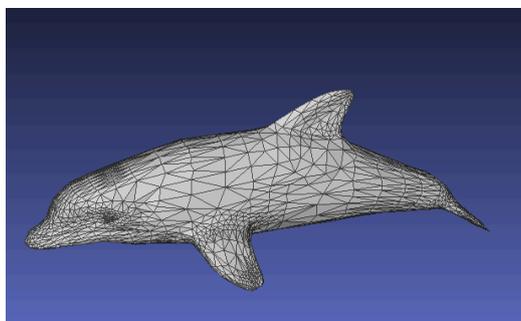
図 4.2(a) はその展開図であり、図 4.2(c) は実際に紙で組み立てた紙模型の写真である。

#### 4.1.2 市販ソフトウェアによる試作

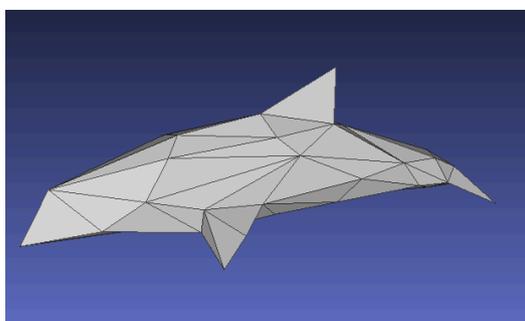
ペパクラデザイナーは、立体形状の展開図を出力し、紙模型の設計を支援するための市販ソフトウェアである。提案システムとの比較実験を行うため、ペパクラデザイナーを用いて、提案システムと同様に図 4.1(a) のイルカのリファレンスモデルを入力として紙模型を設計した。

ペパクラデザイナーにリファレンスモデルを入力する前に、モデルの面数を 4054 から 100 に減らした。このとき、メッシュ処理システム MeshLab[14] の Quadric Edge Collapse Decimation 機能を用いて、図 4.1(a) の面数 4054 のモデルを入力として、図 4.1(b) の面数 100 のモデルに変換した。

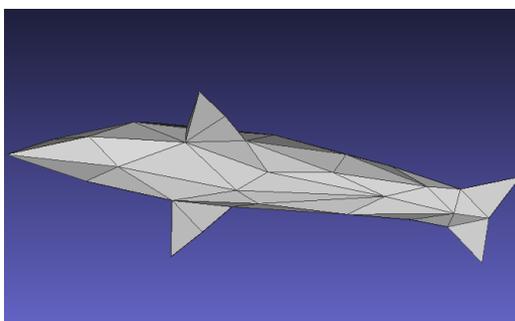
図 4.2(b) は図 4.1(b) のポリゴンメッシュから生成したペパクラデザイナーによる展開図である。組み立てやすくするためのパーツの分割を手動で行った。



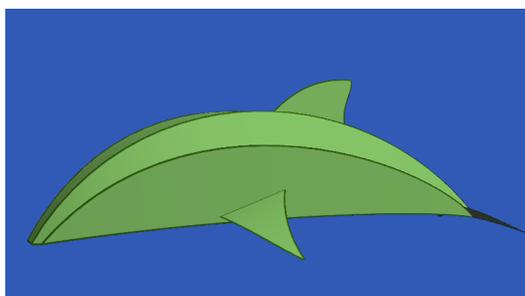
(a) リファレンスモデルとして用いたポリゴンメッシュ(面数 4054)



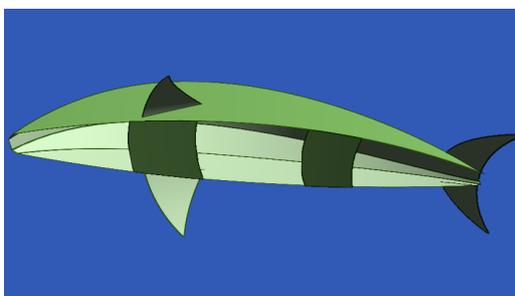
(b) モデル (a) の面数を削減して作成したポリゴンメッシュ (面数 100)



(c) モデル (b) を底面から見たポリゴンメッシュ



(d) 提案システムで作成したモデル (側面)



(e) 提案システムで作成したモデル (底面)

図 4.1: 実験 1 の入力モデルと提案システムによるモデル。(a) は提案システムのリファレンスモデルとして用いたイルカのポリゴンメッシュであり面数は 4054 である。(b) は (a) を MeshLab で面数 100 に削減したポリゴンメッシュであり、(c) はモデル (b) を底面から見たポリゴンメッシュである。(c,d) は (a) をリファレンスモデルとして提案システムで作成したモデルであり、それぞれ側面と底面からの視点の図である。

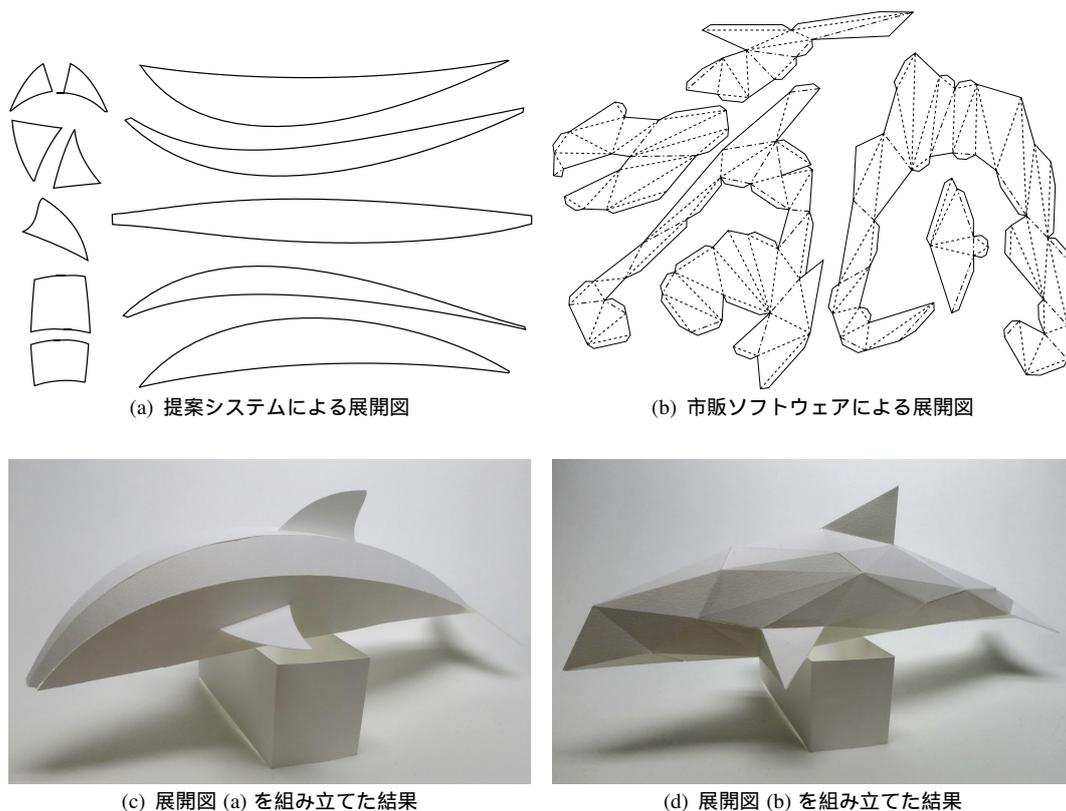


図 4.2: 実験 1 の結果である提案システムと市販ソフトウェアによる紙模型の比較。(a,b) はそれぞれ提案システムにより生成した紙模型と市販ソフトウェアにより生成した展開図である。(c,d) はそれぞれ (a,b) の展開図を組み立てた結果に得られた紙模型作品である。

#### 4.1.3 市販ソフトウェアとの比較

筆者自身が提案システムとペパクラデザイナーで設計したイルカの紙模型の組み立てを行い、組み立てる難易度を検証した。

完成写真を比較すると、図 4.2(c) の提案システムによる作品は滑らかにカーブしたパッチによって構成されているため、ポリゴンの凹凸感はない。一方、図 4.2(d) のペパクラデザイナーによる作品では、平面のパッチのみで構成されているため、ポリゴンの凹凸感が表れている。ヒレのパーツに着目すると、図 4.2(c) では、ヒレが 1 枚の紙で構成され、胴体に線接触した非多様体構造となっている。一方、図 4.2(d) のペパクラデザイナーによる作品では、三角錐の立体構造となっている。

筆者の主観であるが、非多様体構造を含んだ提案システムによる作品の方が組み立てやすさの点で優れていた。図 4.2(b) のペパクラデザイナーによる展開図はパーツ数は少ないものの、各パーツの形状は複雑に入り組んでいるため、紙から切り取る工程や対応するエッジを見つけることが難しく手間を要した。その点において、図 4.2(a) の提案システムによる展開図はパーツは単純な形状をしており、切り取りや対応する面を見つけることが容易だった。非

多様体構造を許容した提案システムではヒレが1枚の紙となっているため、構造が単純化され組み立てることが容易となった。また、底の部分が穴となっていることで、ペパクラデザイナーで生成した多様体の閉じたモデルと比較して、パーツ同士を貼り付ける作業も容易となった。このような理由によって、非多様体構造を含んだ提案システムによる作品の方が組み立てやすさの点で優れていると感じた。

## 4.2 実験 2

本節では2つ目の試作例として、スタンフォード・バニーの紙模型を紹介する。2.1節で紹介した紙模型用形状の自動生成に関する既存研究のいくつかにおいて、スタンフォード・バニーを例とした試作が行われていた。そこで同じモデルを入力として用いて、提案システムと既存手法との比較検討を行うために、スタンフォード・バニーを例として選んだ。

### 4.2.1 提案システムによる試作

図 4.3(a) のスタンフォード・バニーのポリゴンメッシュをリファレンスモデルとして使用した。図 4.3(b), 図 4.3(c), 図 4.3(d) は、提案システムによって設計したモデルで、それぞれ正面、後面、底面からの視点から見た図である。設計に要した時間は130分であった。

図 4.3(d) のように、今回モイルカの例と同様、外からは目立たない底のパーツの一部を省略し、底が広がらないための2本のサポートを持つ構造とした。また、耳のパーツはそれぞれ1枚のパッチとし、顔のパーツに線接触した非多様体構造を使って表現した。

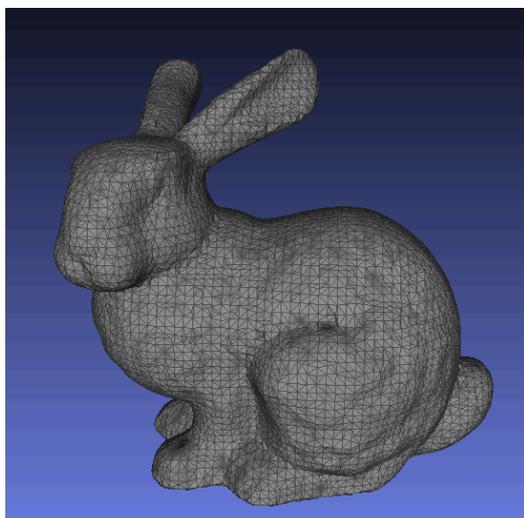
### 4.2.2 既存手法との比較

スタンフォード・バニーを例として、提案手法と既存手法による紙模型作品の比較を行なった。図 4.5 に各手法における展開図と紙模型の写真をまとめた。図 4.5(a) は提案手法による展開図と紙模型であり、図 4.5(b) は Mitani[1] らの手法による展開図と紙模型である。そして、図 4.5(c) は Shatz[2] らの手法による展開図であり、図 4.5(d) は単純にポリゴンメッシュから生成した展開図と紙模型である。

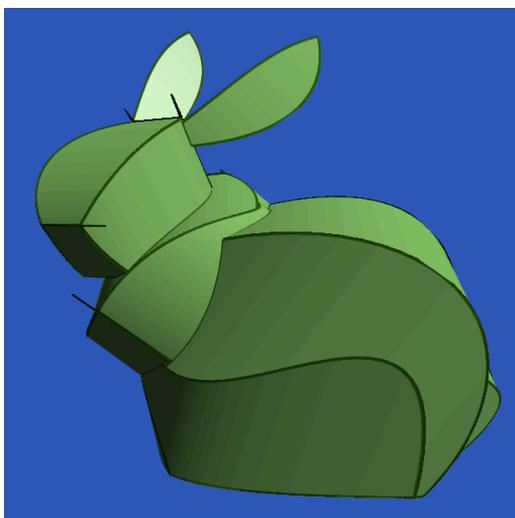
ポリゴンの凹凸感に着目すると、図 4.5(d) は可展面要素として平面のみを用いているためポリゴンの凹凸感が残るが、図 4.5(a) や図 4.5(c) では滑らかな可展面集合による作品であり、図 4.5(b) では可展面に近似された帯状領域による作品となっているため、ポリゴン凹凸感はない。

非多様体構造に着目すると、図 4.5(a) の提案システムによる作品は耳のパーツが顔に接触した非多様体構造となっているが、その他の手法では非多様体構造を含んでいない。

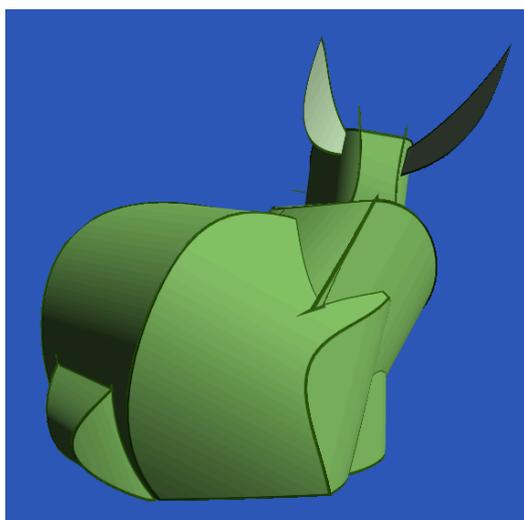
本研究では計算機で自動生成される紙模型と専門家が手作業でデザインした紙模型の違いとして、ポリゴン固有の凹凸感と非多様体構造の有無に注目したが、提案手法のみが滑らかな可展面集合によって構成されポリゴン固有の凹凸感が無く、かつ非多様体構造を含んだ作品となっている。これによって、従来手法よりもより専門家の手作業に近い紙模型用形状を設計できたと考える。



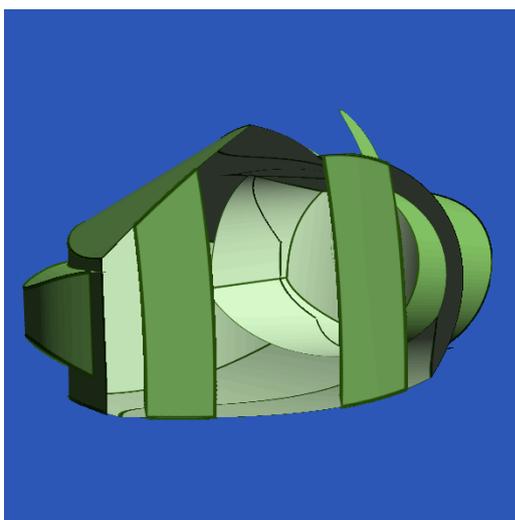
(a) リファレンスモデルとしたポリゴンメッシュ(面数 16301)



(b) 提案システムによる正面から視点のモデル

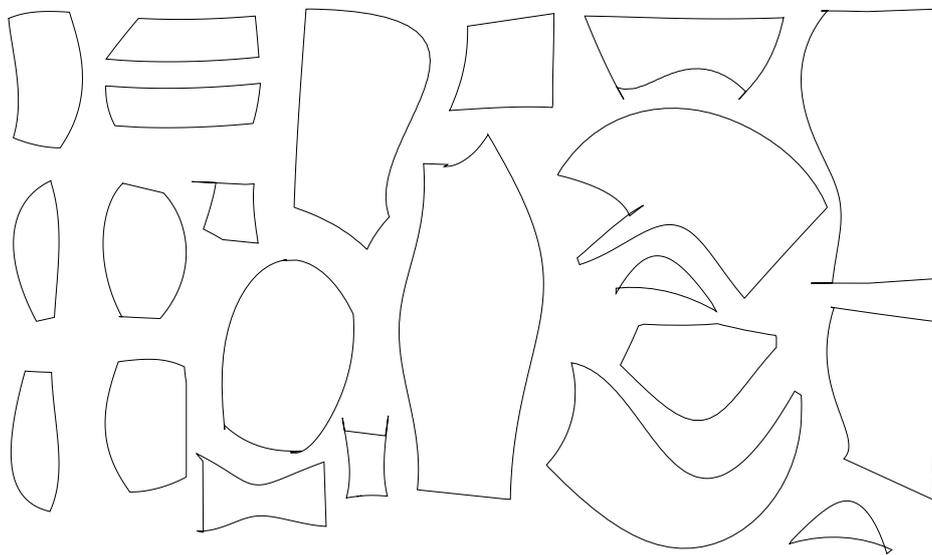


(c) 提案システムによる後面からの視点のモデル



(d) 提案システムによる底面からの視点のモデル

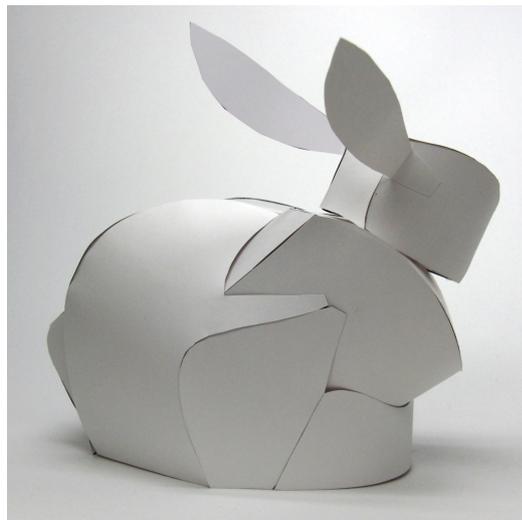
図 4.3: スタンフォード・バニーの入力モデルと提案システムによるモデル。(a) はリファレンスモデルとして入力に用いたスタンフォード・バニーのポリゴンメッシュである。(b,c,d) は提案システムによって設計したスタンフォード・バニーのモデルであり、それぞれ正面、後面、底面からの視点からの図である。



(a) 展開図



(b) 正面から撮影した紙模型



(c) 背面から撮影した紙模型

図 4.4: 実験 2 の提案手法による展開図と紙模型。(a) はスタンフォード・バニーをリファレンスモデルとして提案手法による展開図である。(b,c) は (a) を組み立てて完成した紙模型であり、それぞれ正面と背面から撮影した写真である。

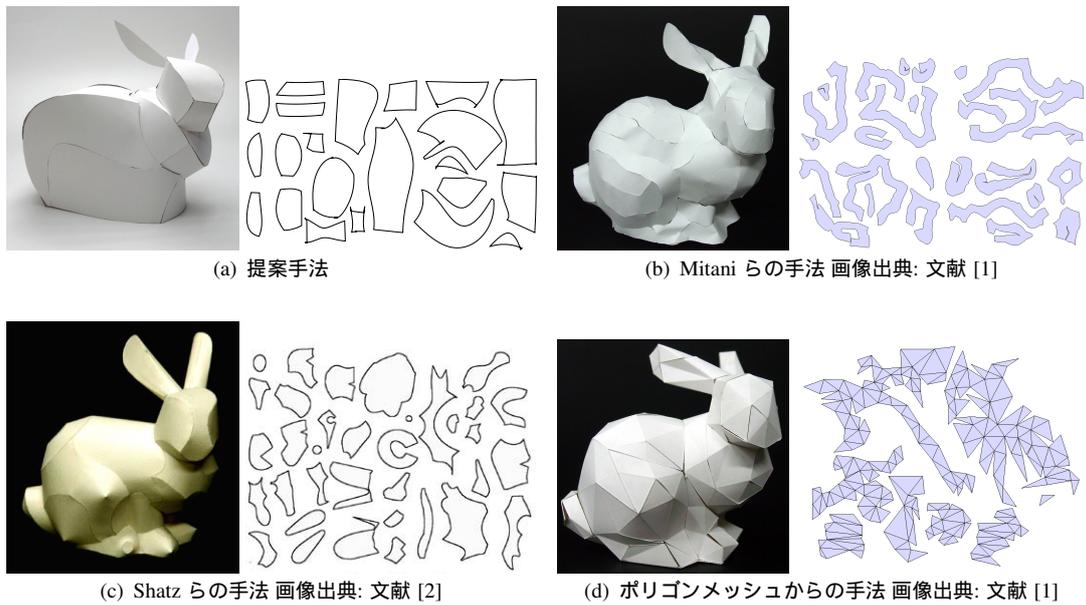


図 4.5: スタンフォード・バニーを例とした既存手法との比較。(a) は提案手法による紙模型。なお、他の手法による紙模型と向きを統一するために写真を水平反転した。(b) は Mitani らの手法による紙模型。(c) は Shatz らの手法による紙模型。(d) は単純にポリゴンメッシュから生成した紙模型。

## 第5章 結論と今後の課題

本章では本研究の目的と手法を整理し結論を述べた後、今後の課題について説明する。

### 5.1 結論

本稿では、滑らかな可展面パッチの集合を対話的に配置し、紙模型形状を構築する手法を提案した。提案システムでは予め滑らかな可展面によって形状を定義するので、既存のポリゴンメッシュから展開図を生成する手法のようなポリゴンの凹凸感が結果に表れない。提案システム上の曲面は、制作者の意図を反映しやすいように対話的に編集操作できるものとし、曲面同士が交わる箇所でのトリム処理を組み込んだ。トリム処理を行う際に、非多様体構造を許容することで、一部のパーツを1枚の紙によって構成し、輪郭を自由に編集することができる。また、外からは目立たないような底のパーツなどを省略した穴の開いた構造を作ることができる。このような構造は専門家の手作業による作品によく見られる特徴であり、作品の構造を単純化し、組み立てやすさの向上を図ることができる。これによって、既存の手法と比較して、より職人の手作業による作品に近い結果を得ることが出来た。システム面においては、意匠性を考慮した曲面配置が可能になるなど、紙模型用形状設計における、より高度なユーザ支援を実現した。

### 5.2 今後の課題

提案システムによって、既存手法よりも手作業に近い紙模型用形状を設計することができた。しかしながら、現状のインターフェースの操作は簡単であるとは言えず、設計に長い時間を要してしまうという課題が残った。提案システムにおける可展面パッチの操作は制御点によって行うため、操作に慣れるためにはある程度の熟練を要す。この問題を解決するために、例えばリファレンスモデルによる可展面パッチの制御点を配置の支援をさらに発展させ、リファレンスモデルの一部を選択することによって、選択部分にフィットするように自動で可展面の変形を行う支援などが考えられる。また今後実現したい課題として、より自由度の高い曲面生成、展開図の改善、3Dモデルデータの出力などが挙げられるため、以下の節で説明していく。

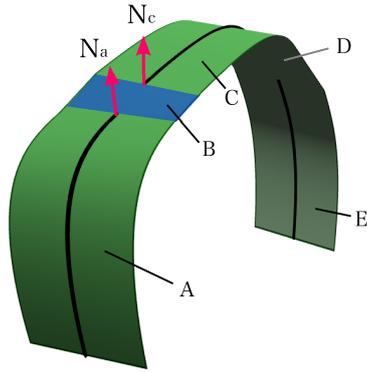


図 5.1: 平坦な領域による連結をしたパッチ。カーブを持つ領域 A,C,E の間に平坦な領域 B,D を入れて連結をした。各領域の連結部分は  $C_0$  連続となり、滑らかではない。

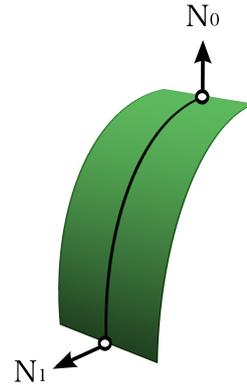


図 5.2: パッチ両端の法線  $N_0, N_1$ 。  $v = 0, 1$  における法線をそれぞれ  $N_0, N_1$  とした。

### 5.2.1 より自由度の高い曲面生成

今後の課題として、3次ベジェ曲線で作れる曲面よりも自由度の高い曲面の生成するために、可展面パッチを平面領域で連結することが挙げられる。提案システムで測地線としている3次ベジェ曲線は、3次の多項式として表現されるので、原理的に3回以上曲がった曲線を表現することはできない。したがって、曲面の自由度が制限されてしまう。また、ベジェ曲線の次数を増やしすぎると、制御点による制御が難しくなってしまう。そこで、パッチの間に平坦な領域を入れて連結することで、図 5.1 のように、より自由度の高い曲面を生成した。図 5.1 では、カーブを持つ領域 A,C,E の間に平坦な領域 B,D を入れて連結している。

現状の実装では、カーブした領域の間に単純に平坦な領域を入れただけであるため、カーブした領域と平坦な領域の接続部分の連続性が失われて  $C_0$  連続となってしまう。今後の課題として、 $C_1$  連続を保つようにパッチ同士を連結したいと考えている。

連続性を保つための方針を説明する前に、可展面パッチの法線の計算について述べる。パッチ両端の法線を図 5.2 のようにそれぞれ  $N_0, N_1$  とする。参考文献 [8] によると、 $N_0, N_1$  は、式 (5.1) のように端点を含めた3つの制御点により決定される。

$$\begin{aligned} N_0 &= \lambda(P_1 - P_0) \times (P_2 - 2P_1 + P_0) \times (P_1 - P_0) \\ N_1 &= \lambda(P_n - P_{n-1}) \times (P_n - 2P_{n-1} + P_{n-2}) \times (P_n - P_{n-1}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで、 $n$  はベジェ曲線の次数であり、 $P_i$  は  $i$  番目の制御点の座標である。また、 $\lambda = n^3(n-1)$  である。

3つの制御点によって法線が決定されるので、ベジェ曲線の頂点が6個以上となるようにすれば、 $N_0, N_1$  は独立した状態となる。 $N_0, N_1$  が独立すれば、一方の法線の補整を行なった

時に、もう一方の法線が影響を受けなくなるので都合が良い。以降、可展面パッチの測地線を5次のベジェ曲線としたものとして、 $C_1$ 連続性にするための最適化について説明する。

図5.1の3領域A,B,Cの2つの連結部分において $C_1$ 連続させる方針について説明する。まず、ユーザは連続性を考慮せずパッチを配置した後に、システム側でなるべく元の形状を保ったまま $C_1$ 連続を保つように制御点の補整を行う機能を組み込むことを予定している。図5.1のように、領域AとBの連結部分の領域Aにおける正規化した法線を $N_a$ とする。同様にCとBの連結部分の法線を $N_c$ とする。ここで、この2つの連結部分において、 $C_1$ 連続となる条件は、 $N_a, N_c$ が平行であることである。まず、2つの法線の平均 $\bar{N} = \frac{N_a + N_c}{2}$ を求める。そして、 $N_a, N_c$ にそれぞれ $\bar{N}$ に近づけるような最適化を行う。カーブした領域の法線が $\bar{N}$ となれば、平坦な領域の法線も連動して $\bar{N}$ となるので、2つの接続部分はどちらも $C_1$ 連続を保つようになるはずである。

式(5.1)により、 $N_a, N_c$ はそれぞれ領域Aの3つの制御点と、領域Cの3つの制御点によって決定される。このAとCの合計6個の制御点を $Q_0, \dots, Q_5$ と表すことにする。また、 $\Delta X = (\Delta Q_0, \dots, \Delta Q_5)$ は最適化のために各制御点に加算するベクターとする。これらを用いて、式(5.2)の $f(\Delta X)$ を最小化する $\Delta X$ を準ニュートン法などによって見つけることで、 $C_1$ 連続とするための補整ができると考えている。

$$f(\Delta X) = |N_a - \bar{N}|^2 + |N_c - \bar{N}|^2 + \lambda \cdot |\Delta X|^2 \quad (5.2)$$

ここで、 $|\Delta X|^2$ はパッチの形状の変化を緩やかにするための項であり、 $\lambda$ はその影響度の係数である。適切な $\lambda$ は実験によって調査する必要がある。

同様にして、C, D, E間の連結部分も $C_1$ 連続になるような制御点の最適化を行えば、一連のA, B, C, D, E領域全体において、 $C_1$ 連続性が保たれるはずであると考えている。

## 5.2.2 展開図の改善

この項では、今後の課題として挙げられる展開図の改善について述べる。展開図の改善として、隣接パーツとの連結によるパーツ数の削減、線接触する箇所が目印の出力、のりしろの出力が挙げられるため、それぞれ述べていく。

### 隣接パーツとの連結によるパーツ数の削減

また、パーツ数を減らした展開図を出力するために、一部を平面にすることによる隣接パーツ同士の連結が挙げられる。提案システムで出力した図4.2(a)の展開図では、1つの可展面パッチにつき、1つのパーツになっている。職人が設計したペーパークラフトの多くは、隣り合う複数の可展面パッチを結合することで、パーツ数を削減している。パーツが多数あると、ユーザはパーツの切り取り作業や構造の把握に手間や時間がかかってしまい、組み立てることが難しくなってしまう。今後の課題として、可展面パッチ同士を結合して図5.3のようなパーツ数を減らした展開図を出力することが挙げられる。

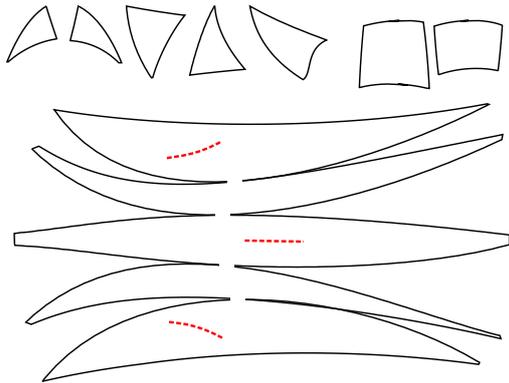


図 5.3: 改善した展開図。現状の提案システムから得られる展開図を改善し、隣接パーツとの連結によるパーツ数の削減を行い、線接触する箇所での目印を示した。なお、この展開図は既存の展開図を2Dのドロソフトで手動で編集したイメージ図であるため、実際には組み立てることは出来ない。

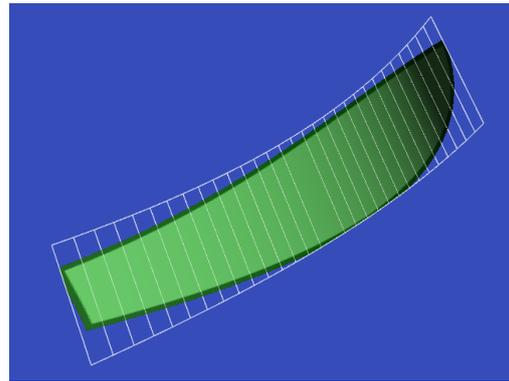


図 5.4: 可展面パッチのワイヤーフレーム表示。提案システムの可展面パッチの形状は内部的にはワイヤーフレームで示された長方形となっており、トリムはテクスチャマッピングによって表現している。

#### 線接触する箇所の目印の出力

より組み立て易い展開図を出力するための今後の課題として、線接触する箇所の目印の出力が挙げられる。図 4.2(a)、図 4.4(a) の現状の展開図だと、例えばイルカのヒレは胴体に線接触しているが、展開図には線接触している箇所が示されていないため、組み立てる際に自分で位置を測る必要がある。これでは、組み立てることが難しくなってしまうので、今後の課題として、図 5.3 のように線接触した箇所を展開図で示すことが挙げられる。

#### のりしろの出力

3.4.4 項では、のりしろの付け方の検討を行なったが、不必要な部分にもりしろが生成されるという問題と、三角形の突起が内部にも入るといった問題が残った。今後の課題として、これらの問題を解決し、展開図上にのりしろを付けることが挙げられる。

#### 5.2.3 3D モデルデータの出力

今後の課題として、提案システムで設計した形状を OBJ 形式などの汎用的な 3D モデルデータとして出力することが挙げられる。

図 5.4 は、可展面パッチの描画にワイヤーフレームの描画を加えて、実際の形状が分かるように表示した結果である。提案システムでは、トリム形状の形を持つアルファチャンネル付きの画像を、トリム前の長方形の形状に UV マッピングすることによって、トリムを表現し

ているいる。つまり、内部ではトリムがされていない形状として可展面パッチを扱っているため、実際の形状を OBJ 形式などにそのまま出力することができない。

3次元の立体形状は、頂点と面によって定義されるが、トリム領域の輪郭上にある頂点は容易に計算できるため、これらの頂点を結ぶことでパッチの内側を覆うような面を計算することが実現できれば、3D モデルデータの出力が可能になると考えている。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり三谷純先生、金森由博先生には多くのご助言やご指導を頂きました。特に三谷純先生には研究の方針や論文の執筆に至るまで丁寧なご指導を頂きました。心より感謝致します。また、非数値処理アルゴリズム研究室の皆様にも大変お世話になり、日頃から貴重な助言やご意見を頂きました。特に加瀬悠人先輩には貴重な時間を割いて、本論文の作成にあたり厳しくも優しい指導を頂きました。ここに深く感謝致します。最後に、これまで自分を支えてくれた家族や恋人、お世話になった多くの友達に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] Jun Mitani and Hiromasa Suzuki. Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding. *ACM Transactions on Graphics* 23, 3 (2004), 259-263.
- [2] Idan Shatz, Ayellet Tal, George Leifman. Paper Craft Models from Meshes. *The Visual Computer* 22, 9-11 (2006), 825-834.
- [3] Massarwi, F., Gotsman, C. and Elber, G. Papercraft Models Using Generalized Cylinders. *15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*(2007), 148-157.
- [4] 多摩ソフトウェア. ペパクラデザイナー. <http://www.tamasoft.co.jp/pepakura/>, (参照 2014-10-3).
- [5] Katsuyuki Shiga. スマイルアニマル 動物, ぴのアートのペーパークラフト, 2009. [http://www.pinoart.jp/papercraft\\_img/animal/index.html](http://www.pinoart.jp/papercraft_img/animal/index.html), (参照 2014-9-25).
- [6] Hiroshi Haruki. Miniature Schnauzer 犬と猫のペーパークラフト, 2008, <http://homepage3.nifty.com/hhr/ppc/Schnauzer.htm>, (参照 2014-12-6).
- [7] Yang Liu, Helmut Pottmann, Johannes Wallner, Yong-Liang Yang and Wenping Wang. Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces. *ACM Transactions on Graphics* 25, 3 (2006), 681-689.
- [8] Bo P, Wang W. Geodesic-controlled developable surfaces for modeling paper bending. *Computer Graphics Forum* 26, 3 (2007), 365374.
- [9] Justin Solomon, Etienne Vouga, Max Wardetzky, Eitan Grinspun. Flexible Developable Surfaces. *Computer Graphics Forum* 31, 5 (2012), 15671576.
- [10] Rose, Kenneth and Sheffer, Alla and Wither, Jamie and Cani, Marie-Paule and Thibert, Boris. Developable Surfaces from Arbitrary Sketched Boundaries. *Eurographics Symposium on Geometry Processing* (2007), 163-172.
- [11] Yong-Jin Liu, Kai Tang, Wen-Yong Gong, Tie-Ru Wu. Industrial design using interpolatory discrete developable surfaces. *Computer-Aided Design* 43, 9 (2011), 10891098.

- [12] noocyte. 3点の座標から簡単に角度と回転方向を求める . ( $2 \cdot 3 \cdot N$ 次元, 外積を用いる方法). <http://www5d.biglobe.ne.jp/noocyte/Programming/Geometry/RotationDirection.html>, (参照 2015/1/19)
- [13] umar6419. Dolphin 3d model, TF3DM - 3D Models for free, 2011, <http://tf3dm.com/3d-model/dolphin-91252.html>, (参照 2014-9-25).
- [14] Visual Computing Lab ISTI CNR. MeshLab. <http://meshlab.sourceforge.net/>, (参照 2014-10-3).