

平成27年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

切開線入力を利用した可展面パッチを用いた
紙模型設計アプリケーションの開発

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 大垣 雅人

指導教員 三谷 純、金森 由博

要 旨

紙のように伸縮しない素材で作成できる曲面は可展面に限定されるため、紙を用いて立体を制作する際には、目的の形状を可展面パッチの集合で再構成する必要がある。これを実現するために、目的の形状との近似精度を考慮した自動処理や、手動による可展面の入力によって実現する手法が提案されている。しかしながら、パッチの境界は曲率が不連続になるだけでなく、制作の際には貼り合わせの必要が生じるため、完成物の見た目に大きな影響を与える。これまでのいずれの手法でもパッチの境界を意図した場所に配置することは困難であるため、本研究では、パッチの境界をユーザが指定できるような手法を提案する。提案手法では、パラメトリック曲線によって可展面パッチの境界の位置を指定するとともに、一部の可展面パッチの形状を測地線を入力することによって制御する。これらの情報に基づいて、残りの可展面パッチの形状が自動計算される。このような手法を実装したシステムを開発し、その有効性の評価を行った結果、いくつかの課題も明らかになった。

目次

第1章	序論	1
第2章	関連研究	4
2.1	自動生成によるパッチを用いた形状設計に関する研究	4
2.2	対話的に生成したパッチを用いた形状設計に関する研究	5
2.3	本研究の元となる既存研究	5
第3章	提案手法	8
3.1	境界壁について	8
3.2	提案システムの概要	8
3.3	曲線ネットワークの構築	12
3.4	境界壁の生成方法	14
3.5	隣接する可展面パッチの生成	16
第4章	結果	20
第5章	結論と今後の課題	25
5.1	結論	25
5.2	今後の課題	25
5.2.1	隣接する可展面パッチ生成の問題点	25
5.2.2	切開線の入力の改善	27
	謝辞	28
	参考文献	29

目次

1.1	1枚の可展面パッチを定義する要素	2
1.2	ペパクラデザイナーによる紙模型の設計例	3
2.1	細田の手法による可展面パッチの配置の例	6
2.2	細田の手法によるトリム処理の例	7
2.3	細田の手法によって生成された展開図による紙模型	7
3.1	提案システムで生成される境界壁の例	9
3.2	切開線と可展面パッチの位置関係の例	9
3.3	提案システムによる紙模型用立体形状の設計の流れ	10
3.4	Catmull-Rom スプライン曲線を用いた切開線の例	11
3.5	Half-Edge 構造の模式図	13
3.6	提案システムにおける拡張 Half-Edge 構造の模式図	13
3.7	隣接するパッチ同士がなす形状と各パッチの形状との関係の模式図	14
3.8	境界壁における掃引後の交点	15
3.9	隣接する可展面パッチを生成する際の掃引の流れの模式図	17
3.10	隣接する可展面パッチの生成例	18
3.11	既存の可展面パッチと境界壁の選択	19
4.1	提案システムによる試作に用いたリファレンスモデル、入力した切開線、生成された境界壁	21
4.2	提案システムによる試作の出力形状	23
4.3	提案システムによって生成された展開図と試作した紙模型	24
5.1	可展面パッチの不適切な自動生成の例	26

第1章 序論

紙模型は、紙に印刷された展開図による形状を切り取り、貼り合わせることで制作される。そのため、新しい紙模型作品を制作するためには、展開図を設計する必要がある。手動での展開図の設計は、実際に紙を切り貼りすることによって行われる。この作業は、試行錯誤を伴うものであるため、専門的な知識や技術が必要となる。そのため、計算機上で、紙模型用の立体形状をポリゴンメッシュや曲面の集合で設計し、それらを平面にマッピングすることで、展開図の生成を支援する研究が行われている。[1, 2, 3]

紙模型は伸縮しない紙を用いて組み立てられることを前提としている。そのため、立体形状を設計する際に用いる曲面として可展面を用いる。可展面は、1枚の平面を伸縮させることなく曲げるだけで作られる曲面である。紙模型として組み立てたい立体形状が可展面でない曲面を含む場合は、可展面の集合によって立体形状を近似する必要がある。

可展面は、直線を3次元空間上で連続的に動かした軌跡によって生成される、線織面の1つである。このとき、直線の移動する方向を表す曲線を測地線、各時刻における直線を直線エレメントと呼ぶ。

計算機上で扱う、1枚の可展面による形状、すなわち、紙模型を組み立てる際の1枚のパーツを可展面パッチと呼ぶ。1枚の可展面パッチを定義するためには以下の2つの要素を用いる。

- 可展面の形状を定義する測地線
- 隣接するパッチ間の境界を定義する輪郭線

図 1.1 のように、この2つの要素はそれぞれ3次元曲線によって構成されている。測地線は、可展面がどのように湾曲するかを定義する。測地線だけの情報では、パッチの大きさは無限であるため、パッチの輪郭を輪郭線によって定義を行う。輪郭線は、隣接するパッチ間の境界を定義し、1枚のパッチの形状を決定する。

紙模型用の立体形状を制作する際には、見本となるモデルをいかに高い精度で近似するかという点が重要な要素の1つである。しかし、最終的には出力された展開図を組み立てて完成した紙模型を鑑賞するという点から、パッチ1枚ごとの形状やパッチ間の境界の位置などにユーザの意図が反映された立体形状を設計しなければならない。例えば、市販のソフトウェアである「ペパクラデザイナー」[4]は、入力されたポリゴンメッシュから紙模型用の展開図を自動生成することができる。しかし、図 1.2 のように、出力された形状では、平面多角形の集合でモデルが構成されている。そのため、出力モデルの表面の形状は、入力モデルの形状に合わせた意匠性のあるものではなく、モデルの特徴が出力結果には反映されない。本研究ではこのようなパッチの境界の位置や可展面の形状などの、ユーザの意図が反映されやす

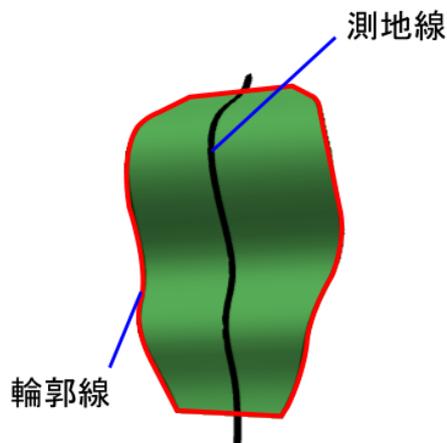
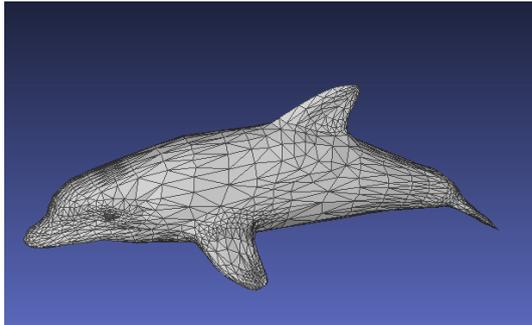


図 1.1: 1 枚の可展面パッチを定義する要素。測地線 (黒線) は可展面の形状を定義し、輪郭線 (赤線) は隣接するパッチとの境界を定義する。それぞれの曲線は 3 次元曲線である。

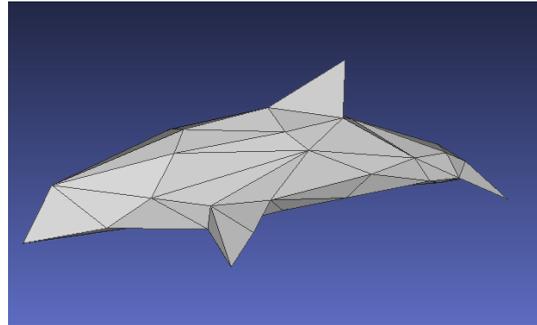
い形状設計を行うシステムの開発を行った。また、自動生成によってパッチを生成するシステムでは、システムに合わせてポリゴン数の削減や、一部の細かいパーツの削除など、入力用のモデルを編集する必要がある。本研究では、ポリゴンメッシュの形状を近似することでパッチを生成するのではなく、モデルを参照しながら可展面パッチを新しく配置することで立体形状を設計する。そのため、モデルを編集することなく紙模型の設計に利用することができる。

提案システムでは、可展面パッチを配置する前に、求める紙模型の切開線を入力する。切開線とは、紙模型を構成する各パッチ間の境界を表す曲線である。切開線の入力後、ユーザは一部の可展面パッチの測地線を入力することでパッチを配置する。ユーザが入力した情報に基づいて、システムは残りのパッチを自動生成する。本研究では、配置された各パッチ間の境界が、ユーザが入力した切開線に近い形状となるように、パッチの輪郭を制御することを目指した。境界線と測地線の入力の際には、既存の 3D モデルを、リファレンスモデルとして参照する。リファレンスモデルを用いることで、ユーザの入力をモデルの形状に沿ったものにする。

本論文では、第 1 章で本研究の背景と目的を述べた。第 2 章では、関連研究と本研究との位置づけ、第 3 章では本研究の提案手法、第 4 章では試作による結果と考察、第 5 章では結論と今後の課題を述べる。



(a) 見本となるポリゴンメッシュ



(b) 入力用にポリゴン数を削減したモデル



(c) 出力された展開図による紙模型

図 1.2: ペパクラデザイナーによる紙模型の設計例 (出典 [8])。ポリゴンメッシュから展開図を生成しているため、モデルの滑らかな曲面が失われ、ポリゴンメッシュ同士の継ぎ目の多さが違和感を与える。また、システムに適した入力を行うために入力モデルのポリゴン数を削減する必要がある。

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、紙模型の各パッチを自動生成する手法に関する研究について述べる。次に、対話的にパッチを配置してモデルを設計する手法に関する研究について述べる。最後に、本研究の元となる既存研究について述べる。

2.1 自動生成によるパッチを用いた形状設計に関する研究

Mitani らは、入力されたポリゴンメッシュを帯状の領域に分割し、各領域のメッシュを削減することで三角形のメッシュの集合からなる Strip を生成し、展開図を設計する手法を提案した [1]。この手法で行う領域分割は、形状特徴に基づいてシステムが自動的に行うものであるため、ユーザは各領域の境界を指定することができない。また、帯状の Strip のみでモデルを近似するため、各領域の内部においてもパッチの切れ目が存在する。

Shatz らは、入力されたポリゴンメッシュを平面と円錐面の2種類の可展面パッチを用いることで近似し、展開図を生成する方法を提案した [2]。2種類の形状のパッチを組み合わせ、パッチ間の境界が滑らかなようになるように補正をすることで、表面が滑らかな紙模型用モデルを生成することができる。しかし、可展面でない形状を近似した際に小さなパッチが多く生成され、組み立てる際の容易さや完成したモデルの見栄えに問題がある。

Massarwi らは、入力されたポリゴンメッシュを領域分割する際に、動物の手足などの部位のような意味のある領域で分割し、分割した領域を三角形のメッシュの集合による柱面で近似することで展開図を生成する手法を提案した [3]。しかし、パッチ1枚ごとの形状は指定できないため、生成されたモデルは帯状のパッチを輪にしてつなげたような形状であるため、各領域でのパッチ形状にユーザの意図が反映されにくい。

Rose らは、求める紙模型モデルの形状特徴を表す立体表面上の曲線のネットワークを入力し、その間を補間するように三角形のメッシュの集合による可展面パッチが自動で配置されることでモデルが設計される手法を提案した [5]。出力された立体全体の形状は入力に近いものを得ることができるが、各パッチの形状は指定できないため、パッチ1枚ごとの形状にユーザの意図が反映されにくい。

ここまで紹介してきた、パッチを自動生成することで形状設計を行う研究では、可展面パッチ1枚ごとの形状を指定することはできない。そのため、完成した紙模型では、望ましくない位置にパッチ間の境界ができてしまうことが多い。紙模型の設計においては、入力モデルの近似精度も重要であるが、完成したモデルの表面に不自然な切れ目が存在しないようにパッチの形状を設計することも重要である。また、自動生成では、高い近似精度を求めるため、い

くつもの細かいパッチを組み合わせて曲面を表現しているが、細かいパッチが多いと組み立てるのが困難となる問題もある。本研究では、パッチ1枚ごとの境界を入力してから対話的にパッチを配置することで、近似精度とトレードオフではあるが、不自然な位置にパッチの境界が配置されることを防いだ。また、パッチの形状をユーザが指定できることから、設計段階で、実際に組み立てる際に困難な箇所が生じることを防ぎながら展開図を生成することを実現した。また、自動生成によってパッチを生成する手法では、入力に用いたポリゴンメッシュを可展面で近似することで展開図を生成する手法が多い。しかし、この手法では細かいパーツの多いモデルを入力に用いると、多数の細かいパッチによる展開図が生成される問題がある。そのため、適当な形状になるように、細かいパーツを削除するなど、モデルを編集してから入力に用いる必要があった。本研究の提案システムでは、可展面パッチを対話的に入力するため、細かいパーツはユーザがあえて無視して形状設計を行うことで複雑な展開図になることを防ぎ、様々な形状のモデルを元に紙模型用モデルを設計することができる。

2.2 対話的に生成したパッチを用いた形状設計に関する研究

Boらは、ベジェ曲線やB-スプライン曲線を測地線とした可展面パッチを生成し、ユーザが測地線の制御点を操作することで可展面の形状を編集できる手法を提案した [6]。この手法では1枚の長方形のパッチを変形することで形状設計を行うため、複雑な形状の設計は困難である。

Paczkowskiらは、タッチパネルで操作するインタフェース用に、可展面パッチの折りや曲げを行うことで形状設計をする手法を提案した [7]。この手法では、隣接するパッチを隙間なく配置する方法として、既に配置されているパッチの輪郭の一部を延長することで新たなパッチを生成する手法しかない。そのため、複数の既に配置されたパッチ同士を、隙間なく隣接させる方法がなく、紙模型用の設計システムとしては適していない。

これらの対話的にパッチを生成する手法では、パッチ間の境界を定義するためには、既存のパッチの輪郭の一部を掃引するか、パッチを切断するかのどちらかの方法しかなかった。そのため、複数のパッチを組み合わせた際に隙間が発生しやすい。パッチ間の境界に隙間が生じることは、組み立てた紙模型の見栄えに影響が出る。本研究では、以下に述べる既存研究で採用されている、可展面パッチ同士の交線によるトリム処理を行うことで、独立したパッチ間であっても、パッチ間に隙間が生じないように境界を定義することができる。

2.3 本研究の元となる既存研究

細田は、3次ベジェ曲線を測地線とする可展面パッチを配置し、可展面パッチ同士の交線でトリム処理を行うことで紙模型用モデルの設計を行う手法を提案した [8]。ユーザは、見本となる既存の3Dモデルを参照しながら測地線の制御点を入力することで可展面パッチを配置することで立体形状を設計する(図2.1)。配置された可展面パッチは、他のパッチとの交線上で切断することができ、これをトリム処理と呼ぶ。トリム処理を用いることで、2枚の配置さ

れたパッチの交線からパッチ間の境界を定義することができる(図 2.2)。立体形状を構成するパッチを、平面にマッピングすることによって紙模型の展開図が生成される。また、この手法では、非多様体構造を許容する。非多様体構造とは、パッチ間に、点接触や線接触の構造、または隣接するパッチが存在しない境界部分が含まれる構造を指す。非多様体構造を用いることで、複雑な構造を単純化し、容易に表現することができる(図 2.3)。この手法では、パッチ 1 枚ごとの形状をユーザが対話的に編集する。そのため、不自然な位置にパッチ間の境界が配置されないようにするなど、ユーザの意図が反映された形状設計を行うことができる。

この手法では、パッチ間の輪郭線は 2 枚のパッチの交線から得られる。意図した交線を得るためには、試行錯誤しながらパッチを手動で編集する必要がある。そこで本研究の提案システムでは、パッチ 1 枚ごとの境界を、紙模型の切開線としてあらかじめ入力する。入力された形状を、可展面パッチのトリム処理に利用することで、パッチ間の境界の設計を容易にすることを目指した。

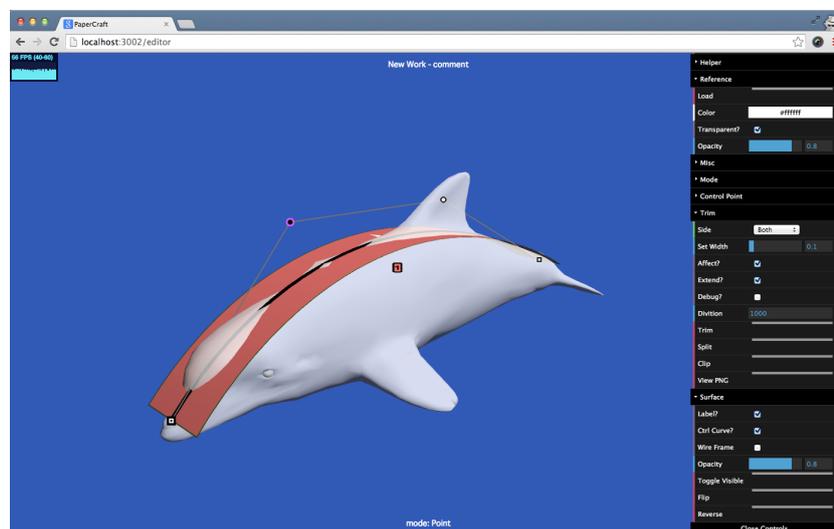


図 2.1: 細田の手法による可展面パッチの配置の例(出典 [8])。ユーザは既存の 3D モデルを参照しながら、可展面パッチの測地線の制御点を入力する。入力された制御点から、測地線が計算され、可展面パッチが生成される。

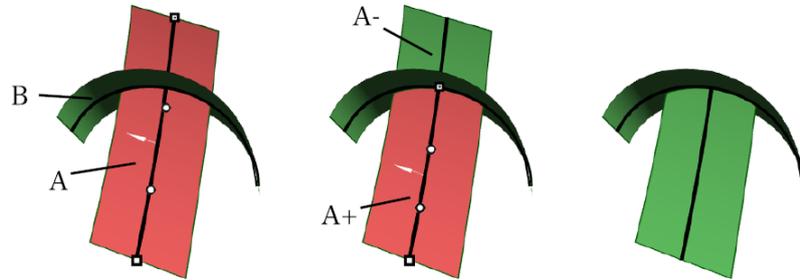


図 2.2: 細田の手法によるトリム処理の例 (出典 [8])。左の図では、A と B の 2 枚の可展面パッチがある。中央の図では、2 枚のパッチの交線によって、A が A+ と A- の 2 枚のパッチに分割されている。右の図では、手動で A- を削除することで、分割されたどちらのパッチを残すかを選択する。

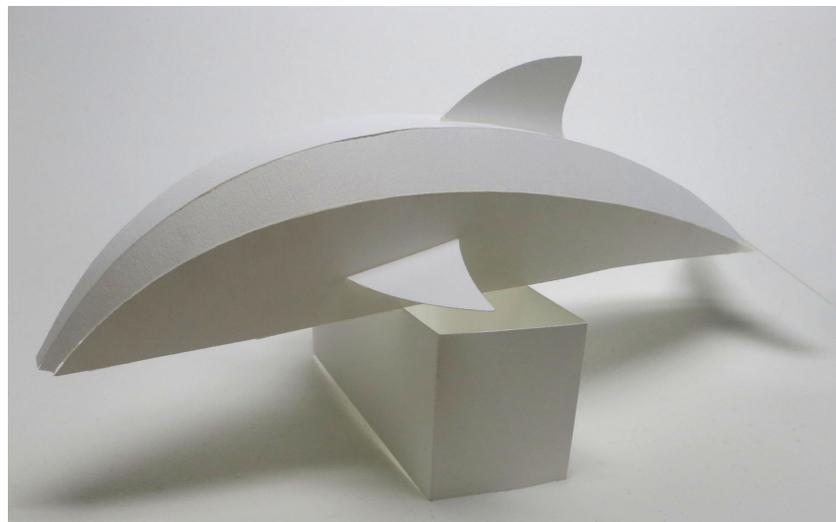


図 2.3: 細田の手法によって生成された展開図による紙模型 (出典 [8])。イルカのヒレを非多様体構造で表現することで、構造を単純化している。

第3章 提案手法

本章では、本研究で提案する、紙模型用立体形状の設計手法について述べる。まず、本研究において新しい概念として用いる、境界壁についての説明を行う。次に、提案システムによる形状設計の流れを説明する。その後、提案システムで用いる曲線ネットワークの構築、境界壁の具体的な生成方法、隣接する可展面パッチの生成方法について説明する。

3.1 境界壁について

境界壁は、図 3.1 で示すように、ユーザが入力した切開線をリファレンスモデルの外側に向けて掃引して生成される曲面である。切開線とは、紙模型を構成する各パッチ間の境界を表す曲線である。また、リファレンスモデルとは、目的とする立体形状を構築する際の見本となる、既存の 3D モデルである。提案手法では、切開線を入力した後に可展面パッチの配置を行う。この際、可展面上に切開線が乗らない場合がある (図 3.2)。切開線が可展面パッチ上に乗っていない状態では、切開線とパッチとの交線が閉じた曲線とならず、切開線によってパッチの輪郭を定義できない。そこで、切開線を掃引した曲面 (境界壁) を生成し、境界壁とパッチとの交線でトリム処理を行う。境界壁とパッチとの交線が、パッチの輪郭となるため、パッチの輪郭は切開線による形状とは一致しない。

3.2 提案システムの概要

提案システムによって、紙模型用の立体形状を設計する際の流れを図 3.3 に示す。提案システムによる形状設計は大まかに分けて 4 つのステップからなる。

Step 1

ユーザはリファレンスモデルを見ながら、求める紙模型の切開線を入力する (図 3.3(a))。リファレンスモデル上をマウスでクリックすることで、パラメトリック曲線の制御点が入力される。システムは入力された制御点の集合からパラメトリック曲線を生成することで、切開線が画面上に配置される。提案システムでは、切開線となるパラメトリック曲線について、Catmull-Rom スプライン曲線 [9] を用いた。Catmull-Rom スプライン曲線は、図 3.4 に示すように、入力に用いる各制御点を通過するように曲線が生成され、最初に入力した制御点と最



図 3.1: 提案システムで生成される境界壁の例。黒い曲面が境界壁を示す。リファレンスモデル上に配置された切開線を掃引することで境界壁が生成される。

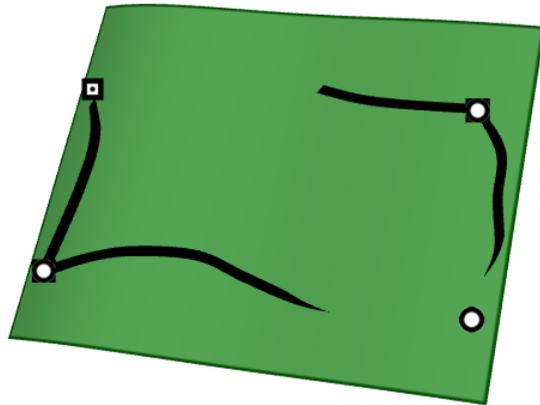


図 3.2: 切開線と可展面パッチの位置関係の例。切開線が可展面上に乗るように、パッチを配置できない。切開線とパッチとの交線が閉じた曲線とならないため、切開線によってパッチの形状を定義することができない。

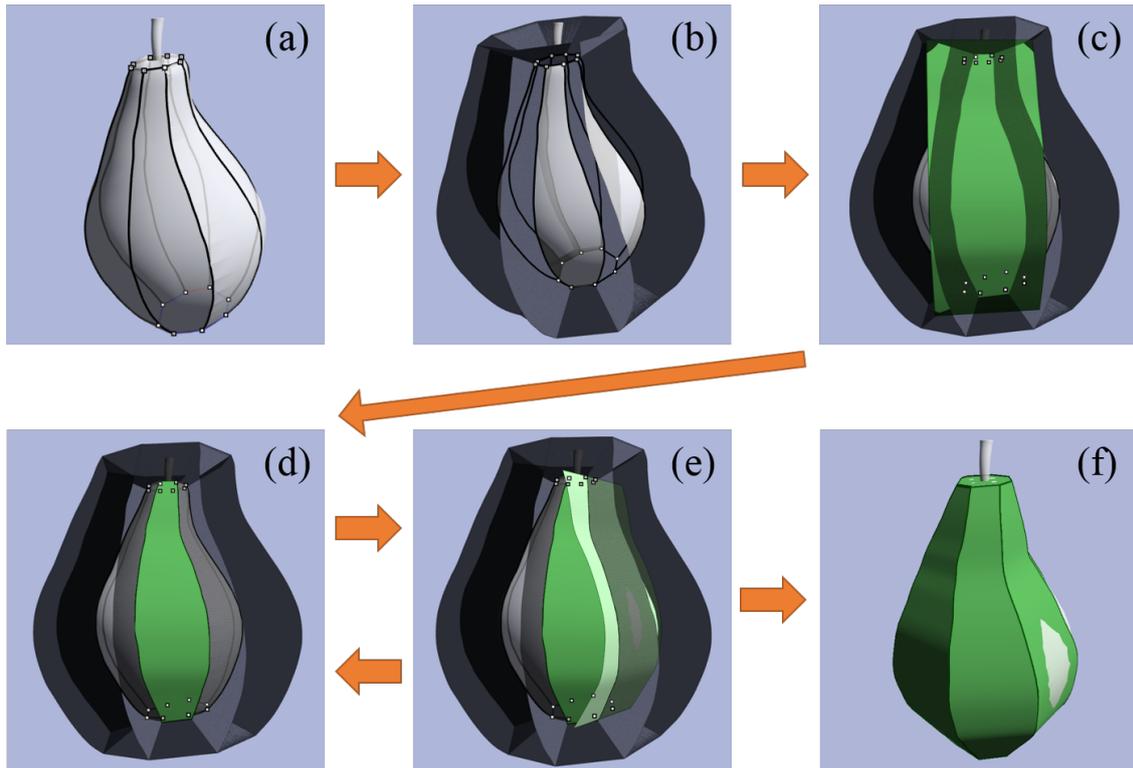


図 3.3: 提案システムによる紙模型用立体形状の設計の流れ。(a) 参照モデルを元に紙模型の切開線をユーザが入力する。(b) 入力された切開線より、システムによって境界壁が自動生成される。(c) 測地線の制御点をユーザが入力し、可展面パッチを生成する。(d) 可展面パッチを境界壁との交線(実境界線)によってトリムする。(e) 実境界線の一部を掃引することによって、隣接する可展面パッチを自動生成する。(f) パッチの自動生成とトリム処理の繰り返しによって、出力されたモデル。

後に入力した制御点の座標が曲線の両端の座標と一致する。切開線の両端の制御点は他の切開線の端の制御点と座標を共有し、共有した点は各パッチの輪郭線の交点となる。

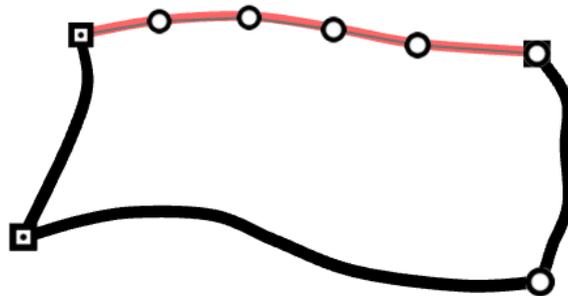


図 3.4: Catmull-Rom スプライン曲線を用いた切開線の例。四角や丸のスプライトが制御点を示す。各制御点上を通過するように、曲線の軌跡が計算される。そのため、最初と最後の制御点の座標は曲線の両端の座標と一致する。各切開線の両端の制御点は、他の切開線の端の制御点と座標を共有する。

全ての切開線を入力後、後述する曲線のネットワークの構築と境界壁の生成を行う (図 3.3(b))。

Step 2

ユーザは可展面パッチの測地線を手動で入力することで、パッチを配置する (図 3.3(c))。この時点では、Step 4 で述べる理由により、一部の可展面パッチのみを配置する。測地線の入力方法は細田の手法 [8] によるものと同様に、リファレンスモデル上をマウスでクリックすることで制御点を入力する。本研究の提案システムでは、入力された制御点から生成される測地線を 3 次ベジェ曲線から 4 次 B-スプライン曲線に変更することで、より複雑な形状の可展面パッチを生成できるようにした。

Step 3

配置された可展面は測地線のみが定義されており、トリム処理を行っていないため、輪郭線が定義されていない。そのため、可展面パッチと境界壁との交線を求め、交線上で可展面パッチのトリムを行う (図 3.3(d))。このとき、トリムに用いた曲線を、ユーザが入力した輪郭線と区別するため、「実境界線」と呼び、実境界線が実際に組み立てた際の紙模型の各パーツの輪郭線となる。

Step 4

Step 3 でトリムされたパッチに隣接する、新たなパッチを Step 2 のように手動で配置することは困難である。これは、可展面パッチの輪郭線は 3 次元曲線であるため、新たなパッチを、既に配置されたパッチに隙間なく隣接させることが困難だからである。隣接するパッチ間に隙間がある場合、紙模型用の立体形状を構成することができない。そこで提案システムでは、Step 3 においてトリムされた可展面パッチの実境界線の一部を、ユーザが指定した方向へ掃引することで、Step 3 でトリムされたパッチに隙間無く隣接する新たなパッチを自動生成する (図 3.3(e))。

Step 4 を行った後は Step 3 に戻り、自動生成されたパッチを境界壁でトリムする。そしてトリムされたパッチから、Step 4 にて隣接する新たなパッチを自動生成することを繰り返す。

3.3 曲線ネットワークの構築

提案システムでは、切開線の集合をユーザが入力することで各パッチの境界を定義した。しかし、後述する境界壁の生成のため、提案システムでは各パッチの隣接関係も定義する必要がある。ここでは、ポリゴンモデルのデータ構造に用いられる Half-Edge 構造 [10] を、提案システムの仕様に合わせて拡張して実装することで、各パッチ間の隣接関係を定義する。

Half-Edge 構造の模式図を図 3.5 に示す。Half-Edge 構造は、ポリゴンメッシュの各稜線に、稜線の両端点のうちの片方の点を始点、もう一方の点を終点とした Half-Edge の組を割り当てる。これにより、ある Half-Edge の組となる Half-Edge が含まれる面を探索することで、ある面に隣接する面を調べることができる。また、各頂点には、自身を始点とする Half-Edge の集合のリストが格納されているため、リストに含まれる各 Half-Edge が含まれる面を探索することで、ある頂点が含まれる面のリストを得ることができる。

提案システムでは、各パッチを「面」、パッチの境界を定義する切開線 1 本を「稜線」、2 本の切開線同士が共有する制御点を「頂点」と対応付けることで、Half-Edge 構造を構築する (図 3.6)。

提案システムにおける、Half-Edge 構造の具体的な構築方法について述べる。提案システムでは、ユーザが対話的に切開線を入力し、各パッチを構成する切開線の本数も不定である。そのため、各パッチと入力された切開線に対応付けるフォーマットが存在しない。そのため、あらかじめ決まったフォーマットから生成されるポリゴンメッシュ用の Half-Edge 構造と異なり、提案システムでは各パッチと切開線に対応付けてから Half-Edge 構造を生成する。はじめに、ユーザは 1 枚のパッチの輪郭を構成する切開線群をマウスで選択しリストに挿入する。この際、後述の処理のため、パッチの輪郭を一筆書きで 1 周するように切開線を順番に選択する。次に、切開線には曲線を描画するための始点と終点が存在するため、リスト内の 1 本の切開線の終点が次の切開線の始点と一致するようにする。一致しない場合は、切開線の制御点の順番を反転させることで、形状を変化させずに曲線を反転する。これによって、パッチの輪

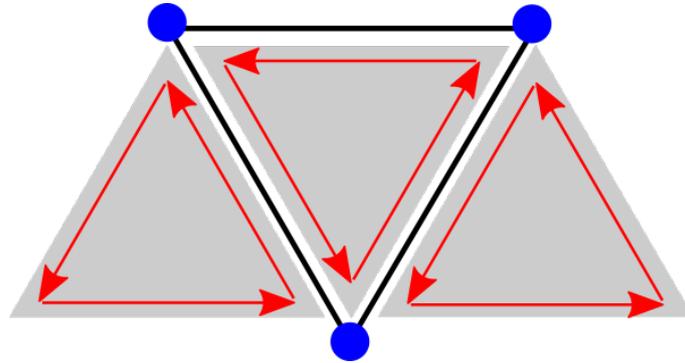


図 3.5: Half-Edge 構造の模式図。灰色の三角形が 1 枚の面、青点が頂点、黒線が稜線、赤矢印が Half-Edge を示す。1 本の稜線の両側に異なる頂点を始点とする Half-Edge の組が割り当てられる。組となる Half-edge が含まれる面を探すことで、隣接する面が得られる。また、各頂点を始点とする Half-Edge を探すことで頂点を含む面が得られる。

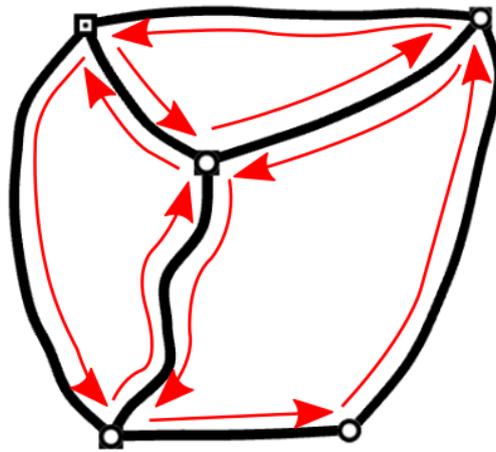


図 3.6: 提案システムにおける拡張 Half-Edge 構造の模式図。ポリゴンメッシュの辺の代わりに切開線を稜線とするため、稜線は曲線となる。切開線同士の交点が Half-Edge 構造における頂点となる。

郭を構成する切開線のリストをたどることで、パッチの輪郭を一筆書きで得ることができる。最後に、各切開線に対して Half-Edge の組を割り当てることで、Half-Edge 構造を生成する。

3.4 境界壁の生成方法

境界壁は切開線を掃引して生成されるが、パッチをトリムした際の実境界線による輪郭を、ユーザが定義した、切開線による輪郭に近づけるためには、適切な方向に切開線を掃引する必要がある。境界壁によって可展面パッチをトリムする際、パッチは入力方法の都合上、リファレンスモデルよりもやや外側に配置される。そのため、最終的に出力される立体は、リファレンスモデルを拡大したような形状になることが予想される。

図 3.7 は、可展面パッチを理想的な形状で配置したと仮定した場合の模式図である。本研究では、隣接するパッチ同士がなす形状と各パッチの形状には以下の 2 種類のパターンがあると仮定した。

- 隣接するパッチ同士が凸形状を作る場合、リファレンスモデルの表面から離れるほど、パッチは切開線の外側へ変形する
- 隣接するパッチ同士が凹形状を作る場合、リファレンスモデルの表面から離れるほど、パッチは切開線の内側へ変形する

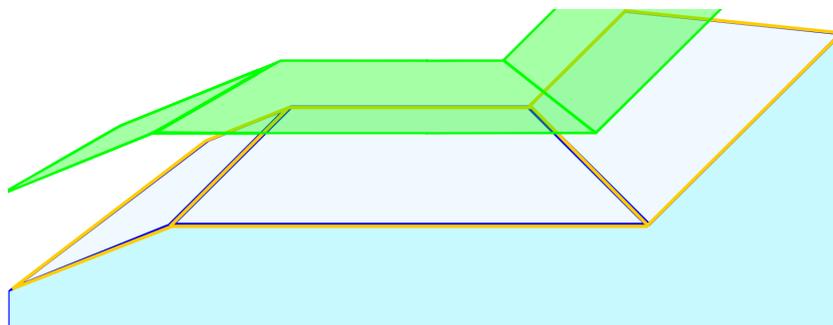


図 3.7: 隣接するパッチ同士がなす形状と各パッチの形状との関係の模式図。緑の面が可展面パッチ、青い立体がリファレンスモデル、黄色の線が切開線を表す。左のパッチと中央のパッチは凸形状を作り、中央のパッチと右のパッチは凹形状を作る。リファレンスモデルの表面から離れた場所にパッチが配置されることで、パッチの形状が切開線による形状から変形することが分かる。

一般に、紙模型を構成する 1 枚の可展面パッチは、複数のパッチと隣接している。このことから、1 枚のパッチの輪郭は、どのパッチと隣接しているかによって、複数の部分に分割することができる。隣接するパッチ同士でなす形状は、どのパッチと隣接しているかによって異なる。そのため、上記の仮定より、1 枚のパッチの輪郭は、隣接するパッチで分割した部分ごとに、異なる変形をすることが考えられる。

提案システムでは、境界壁を用いて可展面パッチをトリムすることから、境界壁は各パッチ間の境界を通過する。このため、境界壁を生成する際は、前述した隣接するパッチ同士の関係を考慮する必要がある。1枚のパッチの輪郭の各部分における異なる変形を、提案システムでは、切開線1本ずつを異なる方向に掃引することで表した。

提案システムでは、以下の2つの手順で境界壁の生成を行う。

1. 掃引によって切開線の交点から移動する点を求める
2. 1. で求めた点群の間を曲線で補間する

本研究では、図 3.8 で示すように、1. で求める点を、「掃引後の交点」と呼ぶ。

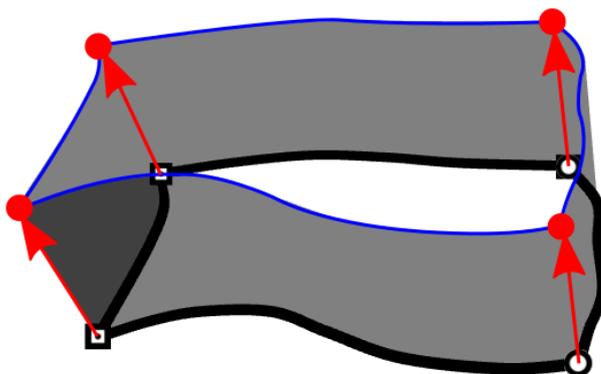


図 3.8: 境界壁における掃引後の交点。図中の赤点で示した、境界壁同士の交線の端点を、「掃引後の交点」と呼ぶ。切開線の交点から掃引後の交点へ、赤矢印の方向に掃引が行われる。青い曲線は掃引後の交点間を補間する曲線を示す。

掃引後の交点の座標を決定する方法について述べる。図 3.7 より、本研究では境界壁の掃引する方向を、隣接するパッチがそれぞれ大まかに向く方向の間であると仮定した。ここで、パッチが大まかに向く方向と表現したのは、可展面パッチは曲面で構成されているため、曲面の各部分で法線ベクトルが異なるためである。複数のパッチが交差する、切開線の交点が掃引される方向は、切開線の交点が含まれる切開線に隣接する各パッチが、それぞれ大まかに向く方向の平均ベクトルであると考えられる。

以上のことから、切開線のある交点 \mathbf{v} に対応する掃引後の交点 \mathbf{v}_s は以下の式で求める。 \mathbf{n}_p は1枚の可展面パッチの大まかな向きを表す。

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{v} + k \frac{\sum_{p \in P_v} \mathbf{n}_p}{\|\sum_{p \in P_v} \mathbf{n}_p\|}, \mathbf{n}_p = \frac{\sum_{n \in N_p} \mathbf{n}}{\|\sum_{n \in N_p} \mathbf{n}\|}$$

ここで、 p_v は交点 v が含まれる切開線に隣接する可展面パッチの集合、 N_p は可展面パッチ p の周囲の切開線が通過する座標に最も近い、リファレンスモデルのメッシュの法線ベクトルの集合である。リファレンスモデルの法線ベクトルは通常、モデルの外側に向いているため、その平均ベクトルが可展面パッチの大まかな向きと考えた。また、係数 k は境界壁の長さを指定する。リファレンスモデルのスケールによっては、境界壁の長さを変更する必要があるため、係数 k によって調整する。

全ての切開線同士の交点に対して掃引後の交点を求めた後は、求めた点群の間を曲線で補間する。補間に用いる曲線には、切開線を拡大縮小した形状を用いることによって、境界壁によってトリムされたパッチの実境界線（輪郭）が、切開線の集合によって入力された形状に近くなるようにした。拡大縮小する際の倍率は、 $\frac{\text{掃引後の交点間の距離}}{\text{切開線の両端の交点間の距離}}$ とした。

3.5 隣接する可展面パッチの生成

紙模型用の立体形状を構成するためには、パッチ間が隙間なく隣接する必要がある。対話的なパッチ編集において、パッチを隙間なく隣接させることが困難であることは3.2節で述べた。提案システムでは、既にトリムされている可展面パッチの実境界線の一部を掃引し、その軌跡を新たな可展面パッチとして扱うことで、隣接するパッチを自動生成する。

隣接する可展面パッチの具体的な生成方法について述べる。パッチの自動生成は以下の3ステップに分かれて行われる。

1. 平面を配置する。この平面には、新しく生成する可展面の測地線が乗る。
2. 新しいパッチが隣接する、既存のパッチと境界壁を選択する。以下の文章では、選択されたパッチを P_{exist} と呼ぶ。
3. P_{exist} の実境界線を掃引し、パッチを自動生成する (図 3.9)。自動生成されるパッチを P_{new} と呼ぶ。 P_{new} は、2. で選択された境界壁を介して、 P_{exist} と接続するように生成される。

このアルゴリズムで生成された可展面パッチの例を図 3.10 に示す。自動生成された P_{new} の測地線は、ユーザが配置した平面上に乗っている。また、 P_{new} の直線エレメントの方向は、平面の法線ベクトルと等しいことがわかる。 P_{new} は、全ての直線エレメントが、掃引する方向において平行であるため、可展面であることは明らかである。このアルゴリズムにより、2枚の可展面パッチの実境界線を合わせる作業を自動で行うことで、ユーザ支援を実現した。

各ステップの詳細な説明を述べる。

Step 1

図 3.10 において、黄色のワイヤーフレームで表す平面をユーザが配置する。この平面に、新たに生成される可展面の測地線が乗る。画面をマウスでクリックすることで、クリックし

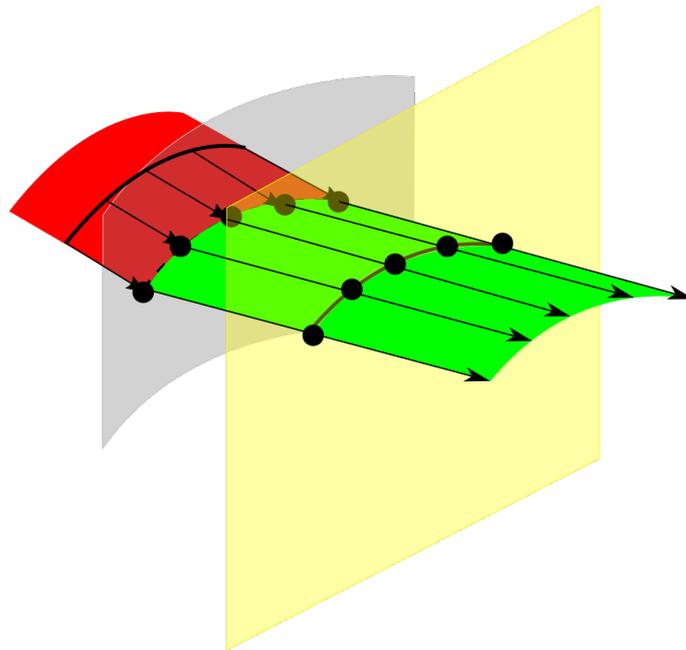


図 3.9: 隣接する可展面パッチを生成する際の掃引の流れの模式図。赤のパッチが P_{exist} 、灰色の曲面が境界壁、黄色の平面が 1. で入力した平面、緑のパッチが P_{new} を示す。 P_{exist} の測地線を掃引し、境界壁との交線 (実境界線) を求める。次に、ユーザが配置した平面の法線方向へ先に求めた交線を掃引し、得られた交線が P_{new} の測地線となる。それぞれの交線は点列の形で得られるため、 P_{new} の測地線は近似をすることで求める。

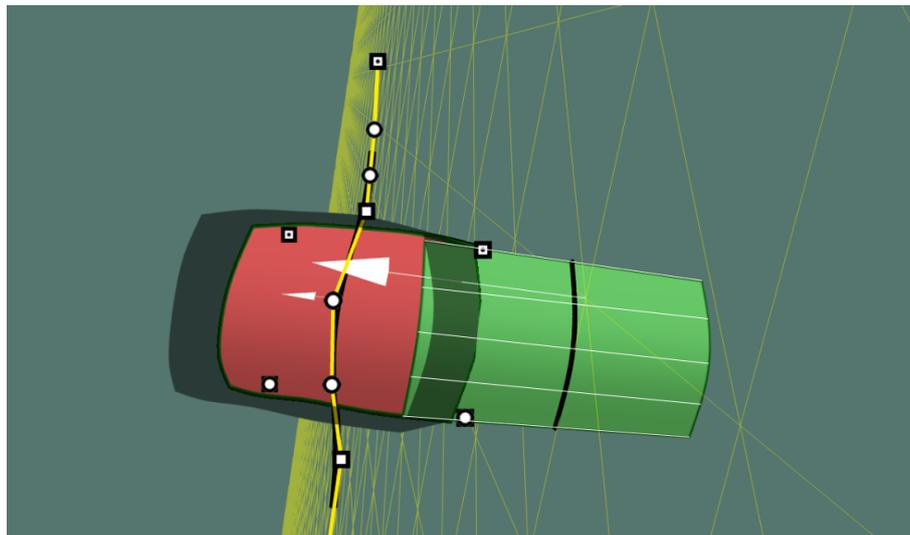


図 3.10: 隣接する可展面パッチの生成例。既に配置されたパッチ P_{exist} (赤) に対して、境界壁上で隙間なく交差するような可展面パッチ P_{new} (緑) を自動生成する。黄色のワイヤースケルトンで表す平面は、ユーザが配置した平面である。この平面上に、 P_{new} の測地線 (パッチ中央の黒曲線) が乗る。また、平面の法線ベクトル (平面から延びる白矢印) が、 P_{new} の直線エレメント (パッチ上の白い直線群) の方向となる。図中の黄色の太線は、 P_{exist} の測地線の制御点をつないだものである。 P_{exist} 上の白矢印は、 P_{exist} の直線エレメントの方向を示す。

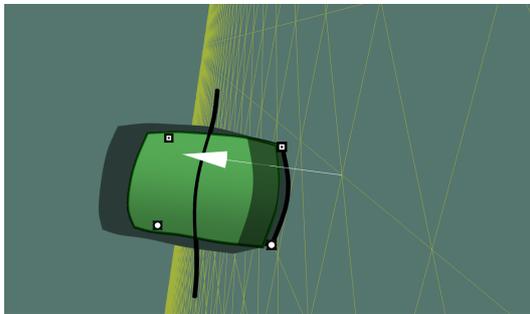
た座標を中心とする平面が配置される。配置された平面は、マウスによる操作で回転と平行移動をすることができる。

ユーザは、法線ベクトルの向きを操作することで、 P_{new} の直線エレメントの向きを制御できる。

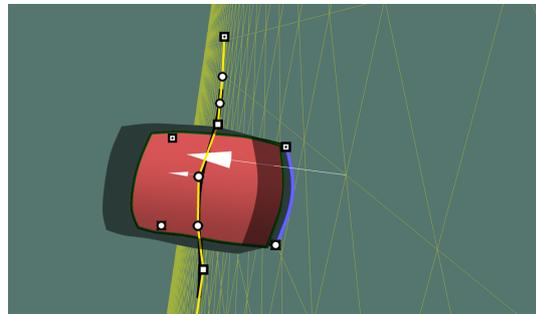
Step 2

ユーザは、既に配置されている可展面パッチのうちの1枚のパッチと、境界壁を選択する(図 3.11)。選択されたパッチが P_{exist} となる。

システムが P_{new} を自動生成する際は、 P_{exist} に隣接するように生成される。選択された境界壁が、 P_{exist} と P_{new} 間の境界を通過する境界壁となる。



(a) 未選択の状態の可展面パッチと境界壁



(b) 選択された状態の可展面パッチと境界壁

図 3.11: 既存の可展面パッチと境界壁の選択。赤い可展面パッチと、青い切開線を掃引して生成される境界壁が選択されている。

Step 3

システムは P_{exist} の実境界線の掃引を行い、 P_{new} の自動生成を行う。図 3.9 に示すように、 P_{exist} の実境界線のうち、選択した境界壁と交わる部分を求める。 P_{exist} の測地線上の座標から、 P_{exist} の直線エレメントの方向へレイを飛ばす。レイと境界壁との交点を求めることで、実境界線を表す点列が得られる。次に、実境界線を表す点列から、Step 1 で配置した平面の法線ベクトルの方向へ、レイを飛ばす。レイと平面との交点群を、文献 [11] を参考に、最小二乗法を用いて 4 次 B-スプライン曲線で近似する。近似して求められる曲線が、 P_{new} の測地線となる。測地線の近似を行う際は、任意の個数の制御点を持つ曲線で近似できるようにすることで、形状の複雑さに合わせて適切な測地線を生成できるようにした。

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、結果と考察について述べる。

図4.1(a)に示す、ワニのモデル [12] 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った。このモデルには、歯や背中のうろこなど、細かいパーツが多数存在する。他の研究に見られる、全てのパッチを自動生成することで展開図を生成する手法では、これらのパーツは細かい展開図が生成されないように削除する必要がある。提案システムでは、細かいパーツを無視して可展面パッチを配置することから、モデルの編集を行うことなくシステムに用いることができる。

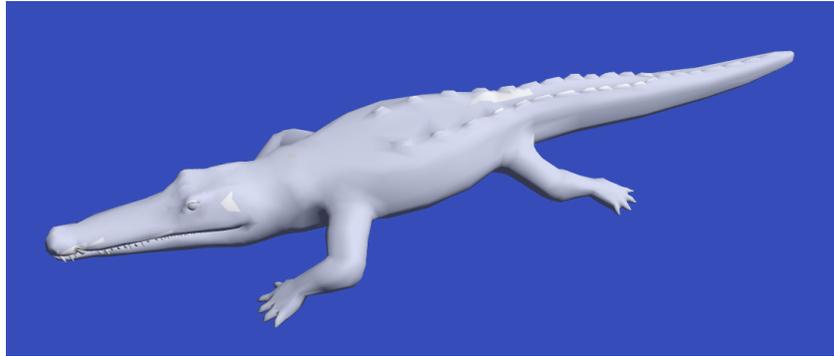
図4.1(b)は、リファレンスモデルの表面に切開線を入力した図である。前述したように、歯やうろこなどの細かいパーツは無視して切開線を入力することで、各パッチの形状を簡略化している。また、動物をモデルとして紙模型の制作を行うことから、完成した紙模型の表面にはパッチの境界が少ない方が鑑賞に適している。この試作では、頭から尾にかけて、1枚の連続したパッチで表現することで、最小限のパッチの境界で紙模型を制作することを目指した。ワニの足の部分は、非多様体構造を用いて設計することで、組み立てる際に容易になるようにした。

図4.1(c)は、入力した切開線から、提案システムが生成した境界壁の図である。図4.1(b)で入力した切開線は、隣接するパッチ同士が構成する立体形状が凸形状となるように入力されている。そのため、生成された境界壁は、リファレンスモデルの表面から離れるほど、1枚のパッチの形状が大きくなるようになっている。

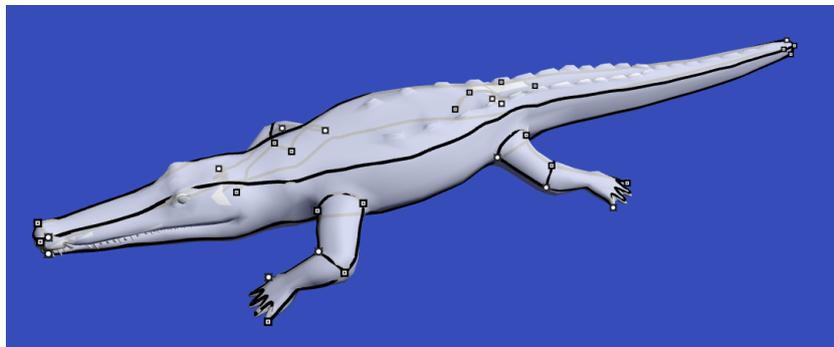
図4.2は可展面パッチを配置し、トリム処理を行った結果の立体形状である。図4.2(a)の左下の部位に見られる切れ目は、トリム処理の問題で切断できなかった部分である。切開線を配置した際の意図通りに、頭から尾までを連続したパッチの組み合わせで表現していることがわかる。自動生成でパッチを生成する手法とは異なり、モデルの表面には、立体を構成する最小限のパッチの境界のみが存在する。この試作では、胴体の底面や、頭と尾の先端部など、一部の可展面パッチを、境界壁によるトリムではなく、可展面パッチ同士のトリムによって編集している。この問題については、今後の課題にて後述する。

図4.2(b)はリファレンスモデルと境界壁とともに表示した図である。パッチが境界壁によってトリムされることで輪郭を決定していることがわかる。この手法では、各パッチはリファレンスモデルの外側に配置されることを想定しているが、可展面や切開線の形状によっては、パッチがリファレンスモデルの内側へ食い込む部分も存在する。

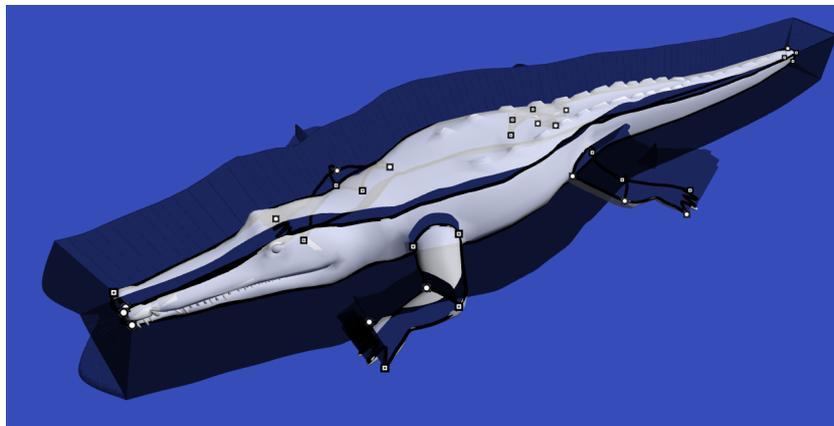
図4.2(c)は足の部分の拡大図である。細田の手法と同様に、非多様体構造によって足を表



(a) リファレンスモデルとして用いた既存のモデル



(b) 提案システムによって入力した切開線

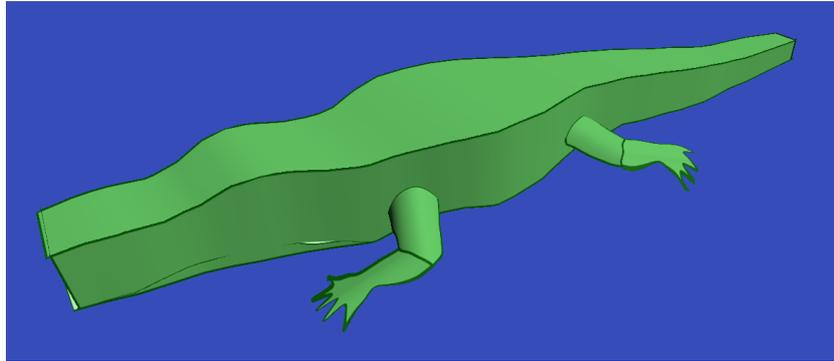


(c) 入力された切開線から生成された境界壁

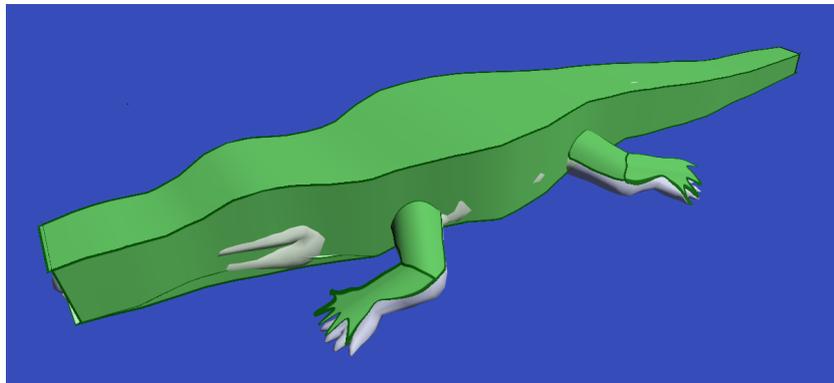
図 4.1: 提案システムによる試作に用いたリファレンスモデル、入力した切開線、生成された境界壁。(a) は提案システムのリファレンスモデルとして用いたワニの 3D モデルである。歯やうろこが 1 つずつ細かなパーツとして表現されている。(b) は提案システムによって、ユーザがリファレンスモデルの表面に切開線を配置した図である。(c) は配置された切開線から、システムが生成した境界壁である。

現している。しかし、細田の手法では、つま先のような細かい形状は、多数のパッチをトリム用に配置する必要があった。提案システムでは、入力の容易な切開線を元にした境界壁でトリムを行うため、細かい形状でも容易に設計することができる。

図 4.3 は提案システムによって生成された、紙模型の展開図と組み立てた紙模型である。実装の問題で輪郭が正しく生成されていない部分もあるが、細かなパーツが存在せず組み立てるのが容易になっていることが分かる。



(a) 提案システムで作成した立体形状 (全体図)

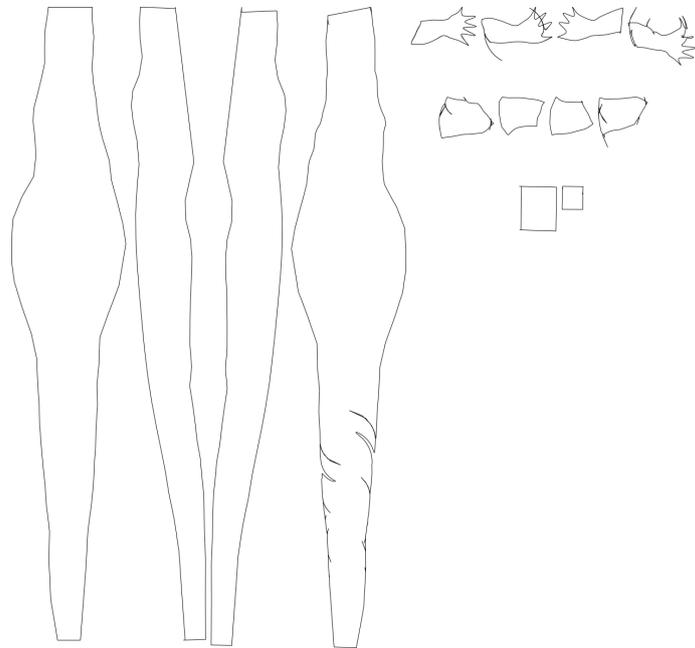


(b) 提案システムで作成した立体形状とリファレンスモデル、境界壁

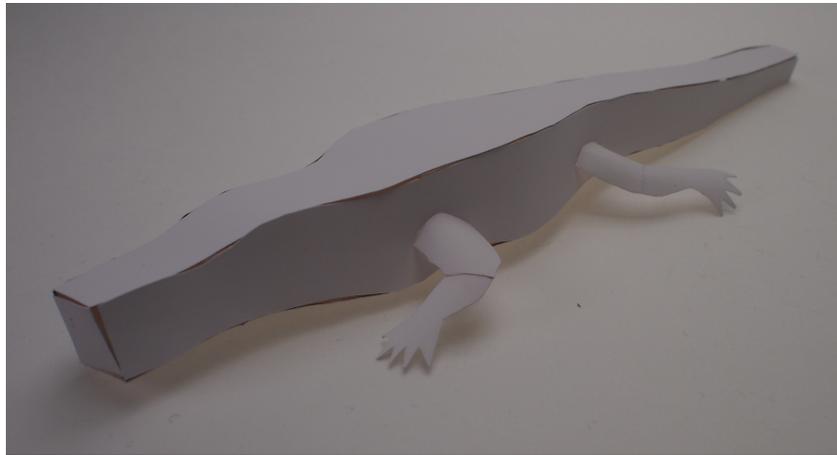


(c) 提案システムで作成した立体形状 (足)

図 4.2: 提案システムによる試作の出力形状。(a) は全体図、(b) は試作に用いたリファレンスモデルと境界壁とともに表示した図である。(c) は非多様体構造である、足の部分の拡大図である。



(a) 提案システムによって生成した紙模型の展開図



(b) (a) の展開図を組み立てて作られた紙模型

図 4.3: 提案システムによって生成された展開図と試作した紙模型。(a) は提案システムにより生成された展開図である。(b) は (a) の展開図を組み立てて作られた紙模型である。

第5章 結論と今後の課題

本章では、本研究の結論を述べた後、今後の課題について説明する。

5.1 結論

本研究では、紙模型用の立体形状の設計において、切開線の入力を用いることで、パッチの境界を制御する手法を提案した。提案システムでは、ユーザが入力した切開線から生成される境界壁によって、可展面パッチをトリムすることで、パッチ間の境界の制御を行った。境界の制御を行うことにより、パッチ1枚ごとの形状を指定でき、意匠性に優れた紙模型を制作できる。一部のパッチの生成に、対話的に編集する手法を取り入れることで、モデルの形状に合わせた、凹凸の少ないパッチを設計できる。また、既に配置されたパッチと境界壁の情報をを用いることで、隙間なく隣接するパッチを自動生成する手法を考案した。隙間なくパッチを隣接させることは、紙模型の設計において重要な要素である。対話的にパッチを生成する手法では、パッチ間の境界を任意の形状にする操作が困難であったため、ユーザ操作の支援に繋がると言える。

5.2 今後の課題

提案システムでは、可展面パッチ間の境界の制御を行ったが、その形状はごく簡単なものに限られる。これは、提案システムで取り扱う可展面が、全ての直線エレメントが平行である、柱面のみを対象としているためである。より複雑な形状を制作するためには、Shatzらの研究のように、円錐面のような、異なる種類の可展面も扱えるようにすることが必要となる。提案システムでは境界壁の生成は自動で行われ、ユーザが調整をすることができなかった。より意匠性の高い形状を作成するためには、掃引後の交点の座標を手動で調節して、境界壁の形状を操作する機能などが必要になると考えられる。また今後の課題として、隣接する可展面パッチの生成の問題点と切開線の入力の改善について述べていく。

5.2.1 隣接する可展面パッチ生成の問題点

本項では、隣接する可展面パッチの生成についての問題点を述べる。まず、境界壁の形状による、自動生成されるパッチへの制約について述べる。次に、自動生成されるパッチが複数のパッチに隣接するように設計することができない問題について述べる。

境界壁の形状による、自動生成されるパッチへの制約

図 5.1 は、結果の章で試作に用いた、ワニの紙模型の足の部分の拡大図である。赤い可展面パッチから、緑の可展面パッチを自動生成した状態を示す。提案システムのアルゴリズムでは、既存のパッチと境界壁との交線を掃引することで新たなパッチを生成している。この手法では、図に示すように、新しく生成されるパッチの、境界壁との交線の長さは、既存のパッチとの交線の長さを超えることができない。そのため、図のように、境界壁の形状によっては、自動生成されたパッチの大きさがトリムのために十分でない場合がある。結果で示した立体形状では、測地線の制御点を手動で追加することで、可展面パッチを延長して設計した。この問題の解決方法としては、既存のパッチと境界壁との交線の両端に、曲線データを追加することで、掃引する交線を延長することが考えられる。



図 5.1: 可展面パッチの不適切な自動生成の例。新しく生成されたパッチ(緑)の大きさが十分ではないため、境界壁によるトリムを行うことができない。

複数のパッチに隣接するパッチを生成できない問題

現在の隣接するパッチの生成方法は、既存の 1 枚のパッチとの関係のみを考慮してパッチの生成を行っている。しかし、実際の設計においては、新しく生成したいパッチに隣接するパッチが、既に 2 枚以上存在するような場合が発生する。結果の作例では、既存の 1 枚のパッチに隣接するように、新たなパッチを自動生成した後、残りの隣接する可展面パッチに対しては、パッチ間の交線によるトリム処理を行うことで隙間なく隣接するようにした。しかし、

この方法では、パッチ間の交線によるトリム処理を行ったパッチとの境界を制御できない問題がある。

5.2.2 切開線の入力 of 改善

結果で示した作例では、切開線の制御点の入力に、ユーザがマウスでクリックした座標をそのまま使用しているため、切開線がなめらかでない。そのため、制御点を入力した後に平滑化処理を行うことで、切開線をなめらかに修正し、紙模型の仕上がりが綺麗になるようにすることが改善点として挙げられる。また、今回用いたワニのモデルのように、形状に対称性があるモデルでは、対称性を考慮した入力を行うことで、よりよい結果が得られることが期待できる。

また、切開線の入力の支援の1つとして、Zhuang らの手法 [13] を利用することが考えられる。この研究は、形状特徴に基づいて、領域分割用の曲線ネットワークを作成するものである。形状特徴に基づく領域分割は、リファレンスモデル上に切開線を配置する操作に非常に近いものである。そのため、Zhuang らの手法を応用することで、切開線の配置の支援を行うことが期待できる。しかし、本研究では、モデル内の細かいパーツはあえて無視して設計することで組み立てる際の形状の簡略化を行う。形状特徴を利用した領域分割は、細かいパーツの影響を受けるため、形状特徴を利用するモデルの領域をユーザが指定するなどの改良が必要になると考えられる。

謝辞

本論文の執筆に当たり三谷純先生、金森由博先生には多くのご指導、ご助言をいただきました。特に三谷純先生には研究内容に関することから、論文の執筆まで多くのご指導を頂きました。心より深く感謝いたします。非数値処理アルゴリズム研究室のOBである細田翔氏には、ソースコードの提供や研究内容についての助言など、多くのご協力をいただきました。ここに感謝いたします。また、非数値処理アルゴリズム研究室の皆様には、日頃から多くの研究に関する有益なご意見をいただきました。ここに感謝いたします。最後に、これまで自分を支えてくれた両親に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Jun Mitani, 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] Fady Massarwi, Craig Gotsman, Gershon Elber. 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 2016-1-2).
- [5] Kenneth Rose, Alla Sheffer, Jamie Wither, Marie-Paule Cani, Boris Thibert. Developable Surfaces from Arbitrary Sketched Boundaries. *Proc. of 5th Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP'07)*, 2007, 163-172.
- [6] Pengbo Bo, Wenping Wang. Geodesic-Controlled Developable Surfaces for Modeling Paper Bending. *Computer Graphics Forum* 26, 3, 2007, 365-374.
- [7] Patrick Paczkowski, Julie Dorsey, Holly Rushmeier, Min H. Kim. Paper3D: Bringing Casual 3D Modeling to a Multi-Touch Interface. *Proc. of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, 2014, 23-32.
- [8] 細田 翔. 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. 筑波大学, 2014, 38p. 学位論文. http://www.npal.cs.tsukuba.ac.jp/thesis/2014/thesis2014b_hosoda.pdf, (参照 2016-1-4).
- [9] Christopher Twigg. Catmull-Rom splines. *Computer* 41, 6, 2003, 4-6.
- [10] Xianfeng Gu. Halfedge Mesh Library. <http://www3.cs.stonybrook.edu/~gu/software/MeshLib/index.html>, (参照 2016-1-11).
- [11] David Eberly. Least-Squares Fitting of Data with B-Spline Curves. Geometric Tools, LLC. <http://www.geometrictools.com/Documentation/BSplineCurveLeastSquaresFit.pdf>, (参照 2016 1-9).

- [12] umar6419. Crocodile 3d model. TF3DM - 3D Models for free, 2011. <http://tf3dm.com/3d-model/crocodile-27619.html>, (参照 2016-1-24).
- [13] Yixin Zhuang, Ming Zou, Nathan Carr, Tao Ju. Anisotropic geodesics for live-wire mesh segmentation. *Computer Graphics Forum* 33, 7, 2014, 111-120.