

修士論文

平成 16 年度 (2004)

不規則点群データによるポリゴンモデルの 形状編集が容易な曲面モデルへの再構成手法

東京工科大学大学院メディア学研究科

大久保 隆

修士論文

平成 16 年度 (2004)

不規則点群データによるポリゴンモデルの
形状編集が容易な曲面モデルへの再構成手法

指導教員 渡辺 大地 講師

東京工科大学大学院メディア学研究科

大久保 隆

論文の要旨

論文題目	不規則点群データによるポリゴンモデルの 形状編集が容易な曲面モデルへの再構成手法
執筆者氏名	大久保 隆
指導教員	渡辺 大地 講師
キーワード	特徴稜線 3次元再構成 CAD
<p>不規則点群データから構築した密で細かいメッシュからなるポリゴンモデルからの、意匠設計を考慮した形状編集が容易な三次元モデルの再構成手法を提案した。デザインにおいて重要な要素であるキャラクターラインを、モデリングの用途に合わせ特徴稜線により近似して抽出し、キャラクターラインを反映した綺麗なメッシュのモデルの構築を行うことで、編集の容易な曲面モデルを再構成することを可能とした。</p> <p>現在、3次元グラフィックスにおいて3次元モデルを構築する場合、モデリングソフトを用いてモデルを生成する方法と、3次元スキャナによって現実の形状を測定し、測定した点群データからポリゴンモデルを構成する方法がある。近年、形状デザインの分野においてもデザイナーが作成したモックアップモデルを3次元スキャナにより点群データを計測し、モデルを再構成してデザインを行う方法が注目されている。しかし、3次元スキャナによる点群からの再構成は短時間で精度の高い点群を計測することができるが、計測した頂点数が多いためポリゴンモデルが細かい密なメッシュとなり、デザイナーが求める編集しやすいモデルを構築することが難しい。また既存の手法の多くはポリゴンモデルを再構成することを目的としており、その後のデザインを意識した曲面モデルを構築する手法はそれほど研究されていない。本手法によって、既存の手法により点群から再構成したポリゴンモデルから、デザインを意識した形状編集の容易な曲面モデルの構築を可能とする。また、本手法を用いて作成したアプリケーションにより、その有用性を検証した。</p>	

A b s t r a c t

Title	Surface model reconstruction from unorganized points in consideration of editing
Author	Ryu Okubo
Advisor	Lectureler Taichi Watanabe
Key Words	Character line, 3D Reconstruction, CAD

This paper proposes a new method of reconstructing polygon model from unorganized points in consideration of design. When building 3D models in 3D computer graphics, there is the method of generating models using modeling software and the method of constituting a polygon model from point crowd data which measured actual form by using the hardware called 3D laser range scanner. In recent years, the method of measuring mock-up model created by designer using 3D scanner has come to be used positively in the field of form design. However, there are some problems for reconstructing polygon models using 3D scanner. The surface requested by designers can not be properly created because the number of points to be measured is numerous, and the model is composed of dense meshes. For this reason, it is difficult to edit the model by 3D CAD software after all the processing. A base mesh model is reconstructed from unorganized points, from which character line which is needed in the process of modeling is extracted in half-automatic. Then character line reflected 3D model which is composed of fine mesh is produced.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	デザインングの変遷	2
1.2	点群再構成手法の現状と再構成モデルの問題点	4
1.3	研究の目的と成果	5
1.4	論文の構成	7
1.5	論文内の表記	7
第2章	キャラクターラインと特徴稜線	9
2.1	キャラクターライン	10
2.2	特徴稜線	11
第3章	特徴稜線を用いた3次元モデル再構成手法	13
3.1	再構成の手順	14
3.2	初期メッシュからの特徴稜線抽出	15
3.3	特徴稜線を反映したメッシュ最適化	18
3.3.1	QEMメッシュ簡略化	19
3.3.2	特徴稜線を反映した最適化	21
3.4	メッシュペアリング	22
3.5	特徴稜線を反映した曲面フィッティング	23
3.5.1	細分割曲面	24
3.5.2	双3次Gregoryパッチ	27
3.5.3	曲面フィッティング	36
第4章	再構成結果	44
4.1	再構成手法の適用実験	45
4.2	考察	48
第5章	おわりに	51
	謝辞	54
	参考文献	55

目 次

1.1	デザイニングの工程	2
2.1	キャラクターラインの例	11
3.1	特徴稜線の抽出	18
3.2	エッジコラプス	19
3.3	面の方程式	20
3.4	三角形メッシュのペアリング	23
3.5	Doo-Sabin 細分割ステップ	25
3.6	Doo-Sabin 細分割生成面	26
3.7	P'_i 計算ステップ	26
3.8	Gregory パッチ	28
3.9	G^1 連続の条件	30
3.10	Gregory パッチの接続	31
3.11	三角パッチの内挿	34
3.12	制御点間ベクトル	35
3.13	曲線メッシュ構造の頂点計算	37
3.14	曲線メッシュ構造の曲線計算	38
3.15	双 3 次 Gregory パッチの接続	40
3.16	基礎パッチ法における G^1 連続の条件	41
3.17	基礎パッチ法による曲面の内挿	42
4.1	生体部品に対する本手法の適用	46
4.2	特徴稜線を保持した曲面化	47
4.3	最適化による変形と特徴稜線の消失	49

第 1 章

はじめに

1.1 デザインングの変遷

デザイナーによる工業デザインの方法（以下デザインング）は、コンピュータによるデザイン支援を行う3次元CAD(Computer Aided Design)や形状の座標値を計測する3次元レーザレンジスキャナ等、技術の進歩により大きく変わってきている。図1.1に主に自動車業界におけるデザインングプロセスを示す。従来のデザインングは手作業が主で、デザイナーが初期の段階で手描きあるいはドローイングソフトで仕上げたデザインをもとに、工業用粘土で作成したクレイモデル（以下モックアップモデル）を作成する。次にモックアップモデルを元に、モデリングソフトと呼ぶ3次元CG(Computer Graphics)ソフトウェアにより3次元形状を始めからモデリングしてデジタルデータ化し、評価を行うという作業工程をとっていた。修正を行う場合にも、デザイナーがクレイモデルに対して施した修正を、モデリングソフトによって3次元モデルに再度反映していく必要がある。

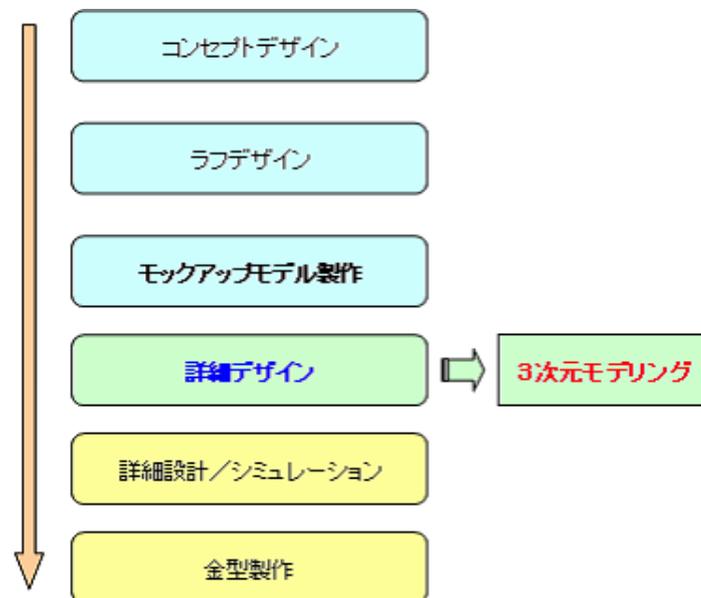


図 1.1: デザインングの工程

この工程はモデリング作業自体が手間がかかるとともに、構築した3次元モデ

ルの精度がデザイナーのモデリング能力に依存するといった問題があった。さらに、モデリングソフトを使ったデジタルデータ化が一般的となる前の工程に慣れているデザイナーにとって、新たにモデリングを習得することは敷居が高く、デザイン能力を十分に発揮できない場合もある。一般的に、モデリングを行う際には、デザイン能力とは別の能力が必要となる。モデルが3次元空間上でどのような配置となるかを頭の中で構成することができる高い空間把握能力や、モデリングソフト上での操作によりモデルがどのような挙動をするかを直感的に理解できるモデリング能力のことである。全てのデザイナーがこの能力を備えているわけではなく、それを補うための高い習熟度が必要となる。これはデザイナーにとって負担になることが多く、デジタル環境そのものを拒否してしまう現象 [1] も発生してしまう。

近年ではその手法に替わるべく、3次元スキャナによりモックアップから取得した表面の座標値を点群データとして取り込み、3次元モデルを再構成してデジタルデータ化するという手法が注目されている。以前からこの手法は提案されており、自動車業界では利用されていたが、機器が高価でその他の業界のデザイナーが気軽に利用することができず、広く普及することはなかった。しかし近年、3次元スキャナの小型化、低価格化により、自動車業界以外のデザイナーも利用することが容易になってきたため、他業界において新たなデザインプロセスの手法として注目されてきている。点群から3次元モデルを再構成すると、モデリング作業における手間を削減することができ、モデリングを行う際に必要となる高い空間把握能力やモデリングの素養や、高い習熟度を必要とせずに3次元モデルを作成することができる。モデルに対する修正も、モデリングソフトによって修正するのではなく、デザイナーがモックアップモデルに対して施した修正を、再度スキャニングによってコンピュータに取り込み3次元モデルを再構成することで簡単に行うことも可能となる。このようにスキャニングを用いたデザインは、モデリングによる詳細デザインの作業時間を短縮することができ、作業効率を大幅に向上することができる方法であるため、自動車業界以外のデザインプロセスにおい

ても注目されている技術である。

1.2 点群再構成手法の現状と再構成モデルの問題点

現在，点群から3次元モデルを再構成する手法は幾つか提案されており，不規則点群からの再構成 [2][3][4][5][6]，スリット状の点群データ構造からの再構成 [7][8][9] の2つに大別することができる．不規則点群とは，規則性をもたないランダムな点群座標値のデータ集合であり，測定する機器に依存することがない．3次元レーザレンジスキャナで測定した点群は不規則点群に属する．本研究は汎用的な点群データ構造に対応できることを特徴とするため，不規則点群から再構成した3次元モデルを対象とする．スリット状の点群データ構造から再構成した3次元モデルも，規則性を持つ分不規則点群から再構成した3次元モデルよりも質のよいモデルとなるため，本手法を適用することができるといえる．既存の不規則点群からの再構成手法には，Hoppeら [2] による不規則な点群から表面を近似するメッシュへの符号付き距離を求める陰関数を利用した手法，Boissonnatら [4] の点同士を結びつけて3角形群を形成するアルゴリズムである Delaunay 3 角形分割 [10] を3次元不規則点群に対して適用した手法，Bajajら [6] や Edelsbrunner と Mückeら [5] による Delaunay3 角形分割に凸包の概念を作った alpha-shapes がある．彼らの手法は一般的に広い範囲で不規則点群から3次元モデルを生成することができるが，大きい曲率を持つ部位や薄い部位等の再現性が悪く完全なモデルを再構成することができない．また，再構成した3次元モデルが密で細かいメッシュとなるので後の形状編集が難しく，形状意匠設計においてはそれほど有用ではない．芹田ら [11] のポリューミング手法を用いた再構成手法では，大きい曲率を持つ部位や薄い部位の再現の問題が解消されているが，やはり密で細かいメッシュとなることは変わらず，意匠設計は考慮されていない．このように，点群からの3次元モデル再構成は，現状ではモデルを完全に再構成することが難しく，計測した頂点数が多いため均一かつ密なメッシュによりモデルが構成されてしまい，デザイナーが想定した曲面を生成できない場合が多い．再構成モデルを3次元CADなどで編集

する際に非常に扱いづらく、修正作業を必要とする場合もある。そのため、点群から再構成したモデルをそのままデザインに用いるのは難しい。また、これらの手法は主に点群から3次元ポリゴンモデルを構築することを目的としており、その後のポリゴンモデルから曲面モデルを構築する過程についてはさほど研究されていないのが現状である。そのため、点群からの再構成は普及してきているとはいえまだ実用的であるとは言い難い。デザインにおいては曲面モデルを扱うことが一般的であり、点群から再構成したポリゴンモデルから意匠設計を考慮した、編集の容易な曲面モデルを構築する手法がデザイナーの間で求められている。

1.3 研究の目的と成果

本研究は、不規則点群データから再構成したポリゴンモデルからの意匠性を考慮した、後の形状編集が容易な曲面モデルの生成手法の確立を目的とする。ここでいう後の形状編集とは、デザインにおける形状の修正プロセスにおいて、モデルのメッシュの頂点を操作して形状を編集する作業のことを指す。形状編集が容易な曲面モデルは、メッシュが密でなく、少ない頂点数で形状の特徴が表われているモデルを想定している。既存の手法は不規則点群から形状を再構成するという点に重点を置いており、後の形状に対する編集の容易さといった意匠性は考慮されていなかった。既存の手法によって生成された3次元モデルは細かい密なメッシュとなり、形状の特徴部位などがわかりにくく、デザイナーがモデルを編集するのが困難で課題となっていた。また、不規則点群からポリゴンモデルを再構成する研究は数多くなされているが、その後の曲面モデルを生成する過程はそれほど多く研究されていない。そこで本研究では形状の意匠設計という点に着目し、再構成した密なメッシュにより構成されたポリゴンモデルからデザイナーの求める後の編集が容易な綺麗な曲面により構成された曲面モデルを生成することで、不規則点群からの再構成手法をデザイナーの視点から見てより実用的なものとする。ここで想定する入力データは、3次元スキャナ等で計測した不規則点群から再構成したポリゴンモデルとする。入力したポリゴンモデルより、デザインにおいて重

要な要素であるキャラクターラインをモデリングの用途に合わせ本研究内で定義した特徴稜線により近似して抽出し、キャラクターラインを反映した綺麗なメッシュのモデルの構築を行うことで、編集の容易な曲面モデルを再構成することを目標とした。デザインの分野により、デザイナーが求めるキャラクターラインは異なってくるが、特徴稜線の算出における評価関数パラメータの操作により、様々な特徴稜線を柔軟に抽出することが可能となっている。そのため特定の分野にとらわれない汎用的なキャラクターラインの抽出が行える。本手法により、従来は自動車業界でのみ用いられていたスキャニングによる詳細デザインを、その他の業界におけるデザインプロセスにおいても活用することができるようになるであろう。

検証実験として、デザインに用いるモデルを想定し、曲線や曲面の流れによるキャラクターラインが表れたモデルと直線や鋭角部を多用したキャラクターラインが表れた2種類のモデルに対して本手法を適用した。その結果、曲線や曲面の流れがメインのモデルに対してはアウトラインを曲面の流れに沿って抽出でき、細部の特徴も抽出することが実現できた。抽出した特徴稜線を適用した曲面モデルにより、特徴がよく表れた面積の大きなメッシュから構成されたモデルを生成することができた。これにより本手法を適用した形状データでは、曲線や曲面を操作することによる緻密な編集を容易にすることを実現できたといえる。一方直線を多用したキャラクターラインが表れたモデルに対しても、容易にアウトラインを抽出することができ、また意匠的特徴部も綺麗に抽出することができた。この際に、特徴稜線を明確に保持する操作により、直線部、鋭角部を完全に保存することを可能とした。この操作により最適化が施された初期メッシュに対しても適切な曲面を生成することが可能となった。これにより特徴稜線の明確な反映及び、柔軟な初期モデルへの対応が実現できた。以上の結果から、デザインにおける点群からの再構成が、本手法を適用することにより実用的になり、詳細デザインにおける作業時間を短縮することが可能となるといえる。自動車業界でのみ用いられていたスキャニングによる手法を他の業界におけるデザインプロセスに適用す

ることが可能となり，デザインングの効率を向上することができるであろう．

1.4 論文の構成

本論文の構成は5章からなり，その内訳は以下の通りである．2章では，本手法で意匠性を考慮するために用いた概念であるキャラクターラインと特徴稜線について述べる．3章では，意匠設計を考慮した，特徴稜線を用いた3次元曲面モデルの再構成手法について述べる．4章では，本手法の実行結果と評価について述べ，課題について考察する．最後に5章では，本論文のまとめと実行結果を踏まえた手法についての今後の展望を行う．

1.5 論文内の表記

以下に本論文で用いる表記について述べる．本論文における数式表現は基本的には Spanier の著書 [12] に準拠するものとする．

- 三角形メッシュは (P, K) のペアで表現し， P は N 個からなる頂点集合であり， K は位相情報である複体を現す．
- ベクトルの内積は $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ ，外積は $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ のように表す．
- 座標値 p_i を持つ頂点位相を $\{i\}$ と表す．
- $|\overrightarrow{p_i p_j}|, |\mathbf{v}|$ を，それぞれベクトル $\overrightarrow{p_i p_j}, \mathbf{v}$ のノルムとする．
- 複体 K は頂点集合 $v = \{i\} \in K$ ，稜線集合 $e = \{i, j\} \in K$ ，三角形面集合 $f = \{i, j, k\} \in K$ の3種類の要素から成り立つ．ただし， $\{i, j\}$ は $\{i\}$ と $\{j\}$ を両端点にもち，三角形面 $\{i, j, k\}$ は $\{i\}, \{j\}, \{k\}$ を頂点にもつ．
- $\{i, j\} \in K$ つまり稜線 $\{i, j\}$ が複体 K 中に存在するとき， $\{i\}, \{j\}$ は隣接するという．

- $N_v(i)$ を以下のように定める .

$$N_v(i) = \{j \mid \{i, j\} \in K\}$$

すなわち , $N_v(i)$ は頂点 $\{i\}$ と隣接する頂点の集合である . また , $N_v(i)$ の個数を K_i とし , これを $\{i\}$ の次数と呼ぶ .

- $e = \{i, j\}$ において , $N_e(e)$ を以下のように定める .

$$N_e(e) = \{k \mid \{i, j, k\} \in K\}$$

すなわち , $N_e(e)$ は稜線 e を含む面の集合を構成する頂点のうち , $\{i\}$ と $\{j\}$ 以外のものを指す .

- $f = \{i, j, k\}$ において , $norm(f)$ を以下のように定める .

$$\begin{aligned} norm(f) &= norm(i, j, k) \\ &= \frac{\overrightarrow{p_i p_j} \times \overrightarrow{p_j p_k}}{|\overrightarrow{p_i p_j}| \cdot |\overrightarrow{p_j p_k}|} \end{aligned}$$

第 2 章

キャラクターラインと特徴稜線

本研究では意匠設計を考慮する際に重要となる要素を考察し、3次元形状の特徴を表す概念であるキャラクターラインに着目した。初期メッシュからキャラクターラインを特徴稜線として幾何学的、数学的に抽出して生成するモデルに反映することができれば、デザイナーの求める3次元モデルの復元が行うことができると考えた。本章ではキャラクターラインと特徴稜線についてその特徴および詳細を述べ、その定義を述べる。

2.1節ではキャラクターラインについて述べる。主にデザイナー用語として概念的に用いられることが多いキャラクターラインについて、その詳細を述べ、定義を行う。2.2節では特徴稜線について述べる。キャラクターラインを、数学的、幾何学的に近似するための特徴稜線について、その詳細を述べ、定義を行う。

2.1 キャラクターライン

キャラクターラインとは一般にはデザイナー用語であり、主に二つの意味として使用する。一つは物体の形状の特徴を現す面の流れや曲線という概念的な使い方をする。特に自動車のデザインを評価する際に用い、車体のフォルムや細部における曲面の流れが綺麗に表れた曲線や、車体の意匠的特徴を表す曲線を指してキャラクターラインと呼ぶ。図 2.1にキャラクターラインの例を示す。図 2.1(a)は曲面の流れによるキャラクターラインを表し、図 2.1(b)は意匠的特徴部におけるキャラクターラインを表す。キャラクターラインには機能的な意味は無いが、車体の印象を決定付け、スピード感や躍動感、力強さ等を演出する要素である。従来、形状デザインにおいて曲線を多様したモデルの作成は、技術的に難しく高価なCADソフト等も必要であったため、キャラクターラインは主に自動車などの限られた業界におけるデザインにおいてのみ用いることが多かった。しかし、近年は工業技術の向上とソフトの低価格化により、一般的な製品のデザインにおいても曲線を多様した形状が一般的となりつつある。そのため主に自動車のデザインの評価において用いてきたキャラクターラインを、一般的な製品の評価に用いるケースも増えてきている。二つ目は、モデリングにおける曲面形状のアウトラインや細

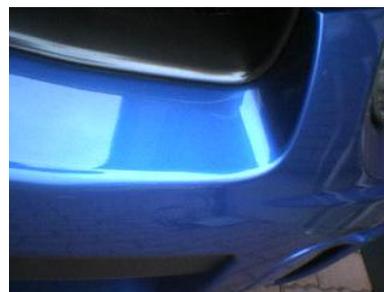
部の特徴を現す曲線の意味で用いる。モデリングを行う際、初めに芯やアウトラインとなるキャラクターラインを作成し、モデルの全体的な形状の概要を作成し、それに基づき曲面を生成していく過程をとることが多い。その後、細部における意匠的特徴を表すキャラクターラインを追加して精密なモデルを作成していく。このように、モデリングにおけるキャラクターラインは、デザイナーが曲面形状を定義する際に用いる曲線のことを指し、3次元形状を形作る重要な要素となる。これらの事項を踏まえ、本研究におけるキャラクターラインの定義を以下のものとする。

キャラクターラインの定義

- デザイニングにおけるデザインの評価の対象となる曲面の流れや曲線。
- モデリングにおける形状のアウトラインや意匠的特徴を表す曲線。



(a) 曲面の流れの表現



(b) 意匠的特徴部

図 2.1: キャラクターラインの例

2.2 特徴稜線

特徴稜線は本研究内で定義したもので、形状の特徴を表す稜線を指す。点群から再構成した密なポリゴンモデル(以下初期メッシュ)より、幾つかの評価関数を用いて幾何学的・数学的計算によって算出する。初期メッシュからキャラクターラインを抽出することができれば、キャラクターラインを反映させることで形状編集に適した曲面モデルを生成することができると考えられる。キャラクターライ

ンが表す形状のアウトラインや意匠的特徴部は主に曲率が大きくなっている部分，つまりより鋭角な部位に傾向がある．曲率は数学的に求めることが可能であるため，キャラクターラインを数学的に近似して求めることができる．そこで本研究では特徴稜線によりキャラクターラインを近似して表現することとした．以下に特徴稜線の定義を述べる．

特徴稜線の定義

- 初期メッシュが表現する形状において各部位の境界を表す稜線．
- 曲率や接ベクトルなどの幾何学的数値やベクトルが，設定する基準を満たした稜線．
- 曲面の流れベクトルに沿った稜線．形状の大々的な変化を表す．
- 形状の意匠的特徴部とそれ以外の境界を表す稜線．

初期メッシュから上記定義によって抽出した特徴稜線群をキャラクターラインとして，曲面モデルを生成する際に反映させることで，形状の意匠的特徴を考慮した曲面によって構成されたモデルを生成する．

第 3 章

特徴稜線を用いた 3 次元モデル再構成 手法

本章では、特徴稜線を用いた不規則点群からの3次元モデル再構成手法について解説する。3.1節では、手法の概要と再構成の手順について述べる。3.2節では、特徴稜線の抽出手法について述べる。初期メッシュから特徴稜線を抽出するための方法と各関数について解説する。3.3節では、特徴稜線を反映したメッシュの最適化手法について述べる。まず3.3.1項にて、メッシュの最適化手法の一つである、QEMを用いたメッシュ簡略化手法について解説する。次に3.3.2項にて、特徴稜線を反映したメッシュの最適化する手法について述べる。3.4節では、メッシュペアリングについて述べる。滑らかな曲面を構築するために、三角メッシュにより構成されている初期メッシュを結合して四角形化する手法について解説する。3.5節では、後の形状編集を視野に入れた曲面化について解説する。まず3.5.1項にて曲面内挿の基本となる細分割曲面とDoo-Sabin細分割手法について解説する。次に3.5.3項で、内挿曲面である双3次Gregoryパッチについて解説する。また、Gregoryパッチの接続手法と三角形面への内挿であるGregory三角パッチについて解説する。最後に3.5.3項では、曲面化についての詳細を述べる。初期メッシュから丸め操作を用いてBézier曲線により構成された曲線メッシュ構造を構築し、曲線メッシュ構造に対しGregory曲面を内挿した曲面構造を生成する手法について詳細を述べる。

3.1 再構成の手順

本手法では、大別して2つのステップにより目的とする3次元モデルの作成を行う。まず始めに、キャラクターラインを特徴稜線として初期メッシュから抽出する。次に求めた特徴稜線を保存した曲面を生成し、新たに特徴稜線を反映した曲面モデルを作成する。具体的な手順としては以下のステップとなる。

1. 初期メッシュからの特徴稜線抽出
2. 特徴稜線を適用した曲面モデルの生成
 - (a) 特徴稜線を反映したメッシュ最適化

- (b) メッシュペアリング
- (c) 細分割曲面化
- (d) 特徴稜線を反映した曲面フィッティング

最初のステップにおいて、初期メッシュからキャラクターラインを近似した特徴稜線を算出する。以降のステップは抽出した特徴稜線を適用した曲面モデルの生成手順となる。まず、特徴稜線を反映した最適化を初期メッシュに対して行う。本手法の曲面数はメッシュ数に比例しているため、初期メッシュの膨大なメッシュ数では曲面数が膨大になってしまう。また、密なメッシュは形状を編集する際に妨げとなり、意匠性を大きく下げる要因でもある。そのため、メッシュ最適化を施してメッシュ数を削減し、同時に編集しやすい綺麗な面を再構築する。次にメッシュペアリングを行う。メッシュペアリングは滑らかな曲面フィッティングを実現するとともに、単純にメッシュ数を半分にする効果もある。最適化である程度密でなくなったメッシュを、さらに編集しやすい面にすることも期待できる。最後に、最適化とメッシュペアリングを施して綺麗になった面に対して細分割化を行い、初期メッシュに対応した境界曲線と曲面の制御点を求め、曲面を内挿する。以下に、各ステップの詳細について述べる。

3.2 初期メッシュからの特徴稜線抽出

ここでは、特徴稜線を抽出する手法について述べる。本研究で用いている特徴稜線抽出手法は、渡辺らの手法 [13] を改良して行った。渡辺らは大域的な特徴を抽出できる位相距離を考慮した部分領域の湾曲を検出する関数を用いているが、本研究内ではキャラクターラインを近似するための局所的な特徴抽出がより重要なため、ガウス曲率を評価する関数に置き換えて特徴稜線抽出を行った。これにより、大域的な特徴が抽出されないかわりに、局所的な特徴部がよりの確に抽出できる。

特徴稜線の抽出は次の評価関数を用いて行う．

$$E(e, W) = w_v E_v(e) + w_{gauss} E_{gauss}(e) + w_{poly} E_{poly}(e) + E_{select}(e) \quad (3.1)$$

ここで， $E_v, E_{gauss}, E_{poly}, E_{select}$ は稜線の評価値を得る関数であり， $W = [w_v, w_{gauss}, w_{poly}]$ は関数の重み付けを行うための実数パラメータである．判別する稜線に対し、特徴稜線か否かを決定するしきい値を設定し，しきい値を満たす稜線を特徴稜線として抽出する．

以下に各関数の詳細について述べる．

頂点連続性

対象稜線がより次の稜線に滑らかに接続されているかを検出する場合に $E_v(e)$ 関数を用いる． $e = \{i, j\}$ としたときに $E_v(e)$ は次のようにして求める．

$$E_v(e) = 2 + \min_{k \in N_v(i)} \frac{\overrightarrow{P_i P_j} \cdot \overrightarrow{P_i P_k}}{\left| \overrightarrow{P_i P_j} \right| \left| \overrightarrow{P_i P_k} \right|} + \max_{l \in N_v(j)} \frac{\overrightarrow{P_j P_i} \cdot \overrightarrow{P_j P_l}}{\left| \overrightarrow{P_j P_i} \right| \left| \overrightarrow{P_j P_l} \right|} \quad (3.2)$$

この関数は，稜線の両端点の頂点において，接続されている稜線が近似的に G^1 連続性を保つか否かを判定し，評価値を得る関数である．より不連続に稜線が接続されている場合，つまり形状の鋭角な部位や意匠的特徴を持つ部位を判別することができる．

近似ガウス曲率

稜線 e の両端点における尖度を検出する場合に $E_{gauss}(e)$ 関数を用いる．稜線 e の両端の頂点をそれぞれ V_0, V_1 としたときに $E_{gauss}(e)$ は次のように求める．

$$E_{gauss}(e) = \frac{a_0}{S_0} + \frac{a_1}{S_1} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} a_i = 2\pi - (\text{頂点 } V_i \text{ に集まる面の隅の角度の総和}) \\ S_i = (\text{頂点 } V_i \text{ に集まる面の面積の総和})/3 \end{cases}$$

稜線の両端点における曲率を求め、その和を評価値とする関数である。頂点連続性関数と同様に形状の鋭角な部位や意匠的特徴を判別する。三角形メッシュの面積が均一であれば正確に判別することができるが、それ以外の場合はそれほど正確でない場合もあるという特徴を持つ。本研究で対象としている点群から再構成した初期メッシュは、三角形メッシュの面積が均一になっている場合が多いため、ガウス曲率による検出は有効となる。

隣接面角度

モデルのエッジなど鋭角な部位を検出する場合に $E_{poly}(e)$ 関数を用いる。
 $e = \{i, j\}$, $N_e(e) = [\{k_0\}, \{k_1\}]$ としたとき、 $E_{poly}(e)$ は次のようにして求める。

$$E_{poly}(e) = 1 + norm(i, j, k_0) \cdot norm(j, i, k_1) \quad (3.4)$$

稜線 e を挟んで隣り合う三角形面の角度の余弦値から評価値を得る関数である。稜線に対する局所的な特徴を抽出する。

指定稜線

対象稜線が特徴稜線か否かを直接指定する場合に $E_{select}(e)$ 関数を用いる。

$$E_{select}(e) = \begin{cases} 1 & \text{if selected} \\ 0 & \text{not selected} \end{cases} \quad (3.5)$$

上記、3つの関数は幾何学的、数学的計算によって特徴稜線を判別しているため、デザイナーのもとめるキャラクターラインを近似できないことも十分想定できる。そのため、デザイナーがアプリケーションに対して直感的に特徴稜線として指定することを可能とする関数である。

以上の関数に対し、重み付けパラメータ W を対話的な操作により設定することにより、デザイナーが直感的に、求めたいキャラクターラインを特徴稜線として求めることができる。特性の違う4つの関数を用いているので、用途によって異なる特徴稜線を柔軟に抽出することが可能である。デザインの分野によってデザイナー

が求めるキャラクターラインは異なってくるが，パラメータを操作して調整できることにより，求めたい様々なキャラクターラインに柔軟に対応することができる．図 3.1 に，この手法により抽出した特徴稜線を示す．図 3.1(a) は初期メッシュを表し，図 3.1(b) は抽出した特徴稜線を表す．

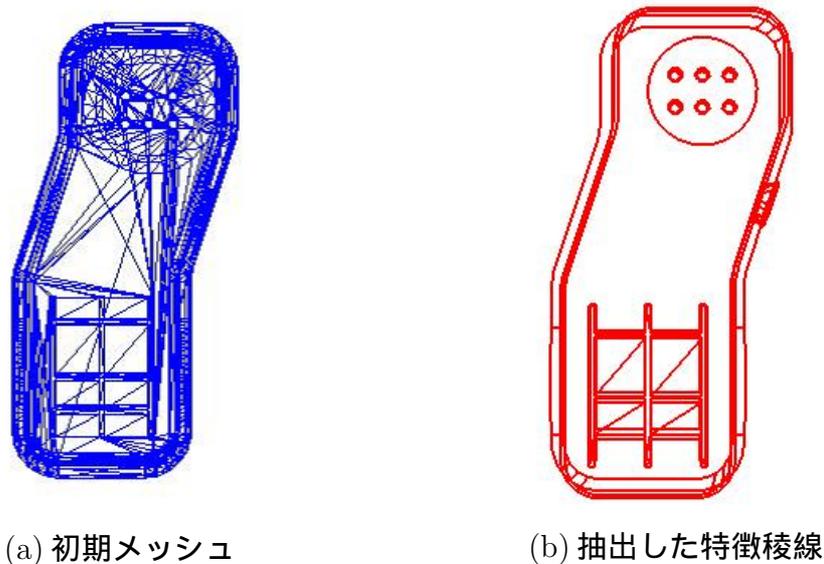


図 3.1: 特徴稜線の抽出

3.3 特徴稜線を反映したメッシュ最適化

不規則点群から再構成した初期メッシュであるポリゴンモデルは，密なメッシュにより構成されており，そのままでは形状の編集に適さない．そのため，メッシュの最適化を施しメッシュ数の削減を行ってより編集しやすいメッシュにより構成されたメッシュにする必要がある．本節では最適化の手法である QEM(Quadratic Error Metrics) メッシュ簡略化手法 [14][15][16] についての詳細と特徴稜線を反映したメッシュ簡略化手法について述べる．

3.3.1 QEMメッシュ簡略化

GarlandらはQEMを用いたメッシュ簡略化手法を提案している。この手法は、QEM評価関数を用いて、3角形メッシュの各稜線でコストを計算し、コストの小さい稜線から順番にエッジコラプス (Edge Collapse) という位相操作を繰り返すことで実現することができる。ここでいう稜線のコストとは、稜線削除後の頂点と、元の稜線との座標の差異のことである。コストが小さいほど形状の変形が少なくなる。図3.2にエッジコラプス操作を示す。エッジコラプス操作は稜線の両端点 v_1, v_2 を新しい頂点 v' に統合する事で一つの稜線を消去する操作の事である。エッジコラプス操作により、2つの稜線と2つの面、1つの頂点を消去することができる。

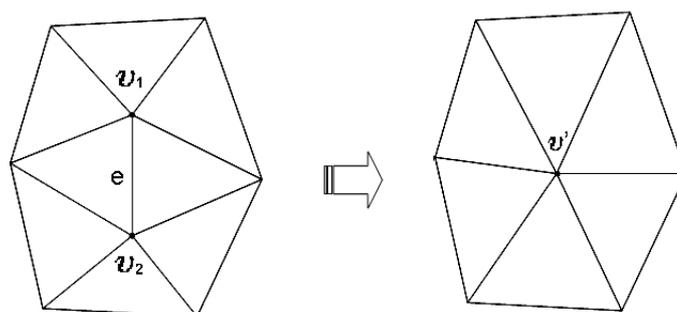


図3.2: エッジコラプス

QEMの定義

3角形メッシュ M の各面 f に対して、頂点 v から平面 f までの自乗距離を面 f に対する誤差評価関数 $Q^f(v)$ として定義する。ここで n は面 f の法線ベクトルを表しており、 d は原点から面 f を含む平面までの距離を表す符号付スカラーである。図3.3は面の方程式を表す。

$$Q^f(v) = (\mathbf{n}^\top \mathbf{v} + d)^2 = \mathbf{v}^\top (\mathbf{n}\mathbf{n}^\top) \mathbf{v} + 2d\mathbf{n}^\top \mathbf{v} + d^2 \quad (3.6)$$

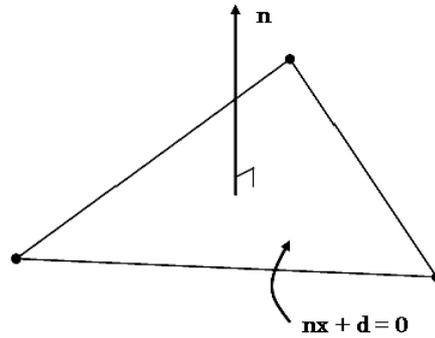


図 3.3: 面の方程式

次に3角形メッシュ M の各頂点に対して, その頂点に接続している面の $Q^f(x)$ の面積重み付け和を, 頂点に対する誤差評価関数 $Q^v(v)$ として定義する. 式 (3.7) において, A は 3×3 の対称行列, \mathbf{b} は列ベクトル, c はスカラーである. $area(f)$ は面 f の面積を表す.

$$Q^v(v) = \sum_{f \in v} area(f) \cdot Q^f(v) = \mathbf{v}^\top \mathbf{A} \mathbf{v} + 2\mathbf{b}^\top \mathbf{v} + c \quad (3.7)$$

これにより, 式 (3.8) に示すように, 各頂点 v には複数の実数値を保存する.

$$Q^v = (\mathbf{A}, \mathbf{b}, c) = ((\mathbf{nn}^\top), (d\mathbf{n}), d^2) \quad (3.8)$$

エッジコラプス操作後の新頂点を V_{min} とおくと, V_{min} は Q^v の勾配 ∇Q^v が 0 になる座標であると考えると, 次の線形方程式によって求めることができる.

$$\mathbf{A} \mathbf{v}_{min} = -\mathbf{b} \quad (3.9)$$

QEM 簡略化アルゴリズム

QEM 簡略化は以下のステップによって実現する.

1. 初期メッシュの全ての頂点 v に対し $Q^v = (\mathbf{A}, \mathbf{b}, c)$ を計算する.

2. 初期メッシュの全ての稜線に対し，稜線 $e(v_1, v_2)$ をエッジコラプス操作によって削除した後の新しい頂点の最適座標値 v' を計算する．誤差関数 $v'^T(Q^v(v_1) + Q^v(v_2))v'$ が稜線 e のコストとなる．
3. 全稜線の最小コストが先頭となるヒープを構築し，全ての稜線を昇順に格納する．
4. 最小コストの稜線からエッジコラプス操作を施し， $Q^{v'} = Q_1 + Q_2$ とする．このとき v' に接続する全稜線の QEM を更新する．
5. 終了条件になるまで，3~4 の操作を繰り返し行う．

以上の操作により，メッシュの最適化を行うことができる．一度全稜線に対しコスト計算を行った後は，消去した稜線に接続している稜線のコストのみを再計算すればよいため非常に高速なメッシュ削減を行うことができる．

3.3.2 特徴稜線を反映した最適化

従来の手法による最適化では，コスト計算により大まかな特徴を反映した最適化をすることができるが，特徴稜線を反映した最適化を行うことができない．そのため最適化の際に特徴稜線が消えてしまうことがおきる．特徴線をモデルに反映する手法としては Lee ら [17] の手法がある．Lee らの手法は特徴線になる稜線列をメッシュ簡略化のリストから削除することで特徴線群を保存するというものである．しかし本手法においては特徴稜線そのものを保存することはできるが，周りの稜線を最適化によって削除した際に特徴稜線が影響を受けてしまい，特徴稜線で無くなるなどの問題が発生してしまう．そこで本研究では Lee らの手法を改良し，エッジコラプス計算の際に「特徴稜線，及び2本以上の特徴稜線に接続している稜線を最適化対象から除外」という条件を加えた．これにより，最適化によって特徴稜線の消失などの変更処理が起きてしまうことをある程度抑制する．具体的には QEM 簡略化アルゴリズムのステップにおいて，特徴稜線の際にステップ 2

の計算を省略し，ステップ3のヒープ構築から除外するといった処理を施す．もちろん特徴稜線部をある程度保存する簡略化になるため，簡略化の度合いは特徴稜線を考慮しない場合と比較すると弱くなるが，特徴稜線を反映した最適化をある程度実現することができる．

3.4 メッシュペアリング

曲面モデルを生成する際に，より滑らかな曲面を内挿するためにメッシュの四角形化を行う．四角形化は滑らかな曲面の内挿だけでなくメッシュ数とデータサイズの削減においても有効となる．また計算負荷の面でも，双3次 Gregory パッチにより三角形曲面を内挿する場合，3つのパッチによって四角形面に分割する必要があるため，四角形面と比較しても3倍の計算負荷が必要となる．四角形化は次の方法により実現する．

簡略化メッシュにおいて稜線を順次参照し，その稜線を挟んだ二つの三角形面が構成する四角形面が長方形に近い場合，その稜線を削除し，四角形化を行う．このとき，四角形面が長方形に近いか否かを評価する関数を用い，閾値を用いて判定を行う．このとき用いる評価関数を以下に示す．

$$|F(P_0, P_1, P_2)| + |F(P_0, P_2, P_3)| < S_1 \quad (3.10)$$

$$|F(P_0, P_1, P_2)| + |F(P_0, P_2, P_3)| - |F(P_1, P_0, P_2)| + |F(P_0, P_3, P_2)| < S_2 \quad (3.11)$$

ただし， $F(P_i, P_j, P_k)$ は三角メッシュ内ベクトルの内積で，稜線の対頂角を表し，次式によって求めることができる．

$$F(P_i, P_j, P_k) = \frac{P_i - P_k}{|P_i - P_k|} \cdot \frac{P_j - P_k}{|P_j - P_k|}$$

式(3.10)は，稜線 e を挟んだ面の対頂角について，それぞれが直角に近いか否かを判定する関数であり， S_1 を実数の閾値として0に近づくほど直角に近いため精度を高めることができる．図3.4はメッシュペアリングにおける稜線 e と頂点 p

の関係を表す．式 (3.11) は稜線 e の両端における角度の和の差を判定する関数であり， S_2 を実数の閾値として 0 に近づくほど差が小さくなり，より長方形に近くなるため精度を高めることができる．以上の二つの関数を用いることで長方形に近い四角形を判定することが可能となる．脇田ら [18] によると， S_1, S_2 それぞれが 1.0 以下であれば滑らかな双 3 次 Gregory パッチを内挿することが可能となる．

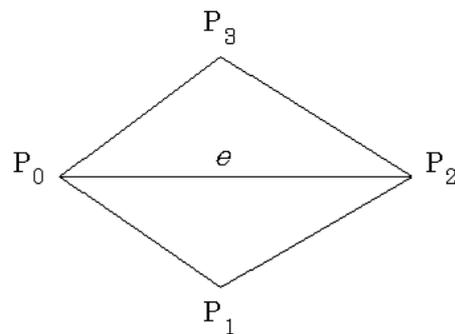


図 3.4: 三角形メッシュのペアリング

3.5 特徴稜線を反映した曲面フィッティング

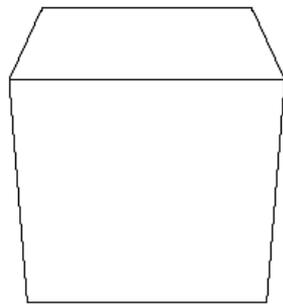
本項では，特徴稜線を反映した曲面フィッティング手法について解説する．特徴稜線を反映した最適化とメッシュペアリングにより，特徴稜線を考慮した最適化ポリゴンメッシュを生成した．本研究では，最適化ポリゴンメッシュに対し，細分割曲面と丸め操作を用いた脇田らの曲面化手法 [18] を用いて曲面フィッティングを行った．脇田らの手法では，曲面形状の位相情報がポリゴンメッシュと同一となるため，形状編集などが容易になるという特徴がある．また，滑らかな曲面形状の生成の際に形状が元ポリゴンモデルと大差の無い曲面化が行えるため，デザインにおいても有効となる．

以降に細分割曲面と曲面表現である双 3 次 Gregory パッチ及びそれらを用いた曲面フィッティングについて，その詳細を記述する．

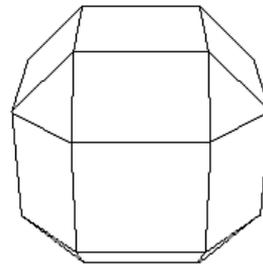
3.5.1 細分割曲面

細分割曲面 (Subdivision Surface) とは, 単純な多面体モデルに対し, 分割操作を繰り返し適用することで, 滑らかな曲面を生成する手法のことで, 複雑な多面体形状に対しても滑らかな曲面を簡単に生成することができる. 細分割曲面は一般に, 初期メッシュに対しメッシュの分割操作を極限まで適用した極限曲面 (Limit Surface) として定義する. 一般に用いる場合には極限まで適用せずとも数回の細分割によって十分に滑らかな曲面を得ることができる. 細分割化の主な手法に Loop[19] らの Loop 細分割手法と Doo,Sabin[20] による Doo-Sabin 細分割手法がある. Loop 細分割手法は任意の三角形メッシュに適用することができる近似細分割手法で, 3次元 Box-Spline 曲面を一般化したものである. Doo-Sabin 細分割手法は初期メッシュを任意位相のメッシュに対し適用でき, 極限曲面は双 2 次 B-Spline 曲面を近似する. 本研究の曲面生成手法では, Doo-Sabin 細分割手法を用いて曲面計算を行った.

Doo-Sabin 細分割曲面は, 任意位相の初期メッシュに細分割処理を繰り返し適用することで, 滑らかな双 2 次 B-Spline 曲面を近似する極限曲面を生成する手法である. Doo-Sabin 細分割によって生成するメッシュの各頂点の価数 (接続する稜線の数) は必ず 4 となる. 図 3.5 は初期メッシュに対し Doo-Sabin 細分割を一度適用した結果である. 図 3.5(a) は初期メッシュを表し, 図 3.5(b) は細分割結果を表す.



(a) 初期メッシュ



(b) Doo-Sabin 細分割

図 3.5: Doo-Sabin 細分割ステップ

図 3.6は Doo-Sabin 細分割によって生成する面の分類を表す．図 3.6(a) は生成した F-face , 図 3.6(b) は生成した E-face , 図 3.6(c) は生成した V-face をそれぞれ表している．図 3.6に示すように , Doo-Sabin 細分割によって生成する面は , 初期メッシュとの関係により F-face, E-face, V-face の 3 種類の面として分類できる．F-face, E-face, V-face はそれぞれ初期メッシュの面 , エッジ , 頂点に対応する面となる．ここで初期メッシュの面を構成する稜線の中点を edgepoint , 面の重心を G , 各頂点を P_i , P_i に対応した F-face, E-face, V-face を形成する新しい頂点を P'_i とすると , P'_i を求めるステップは次のようになる．

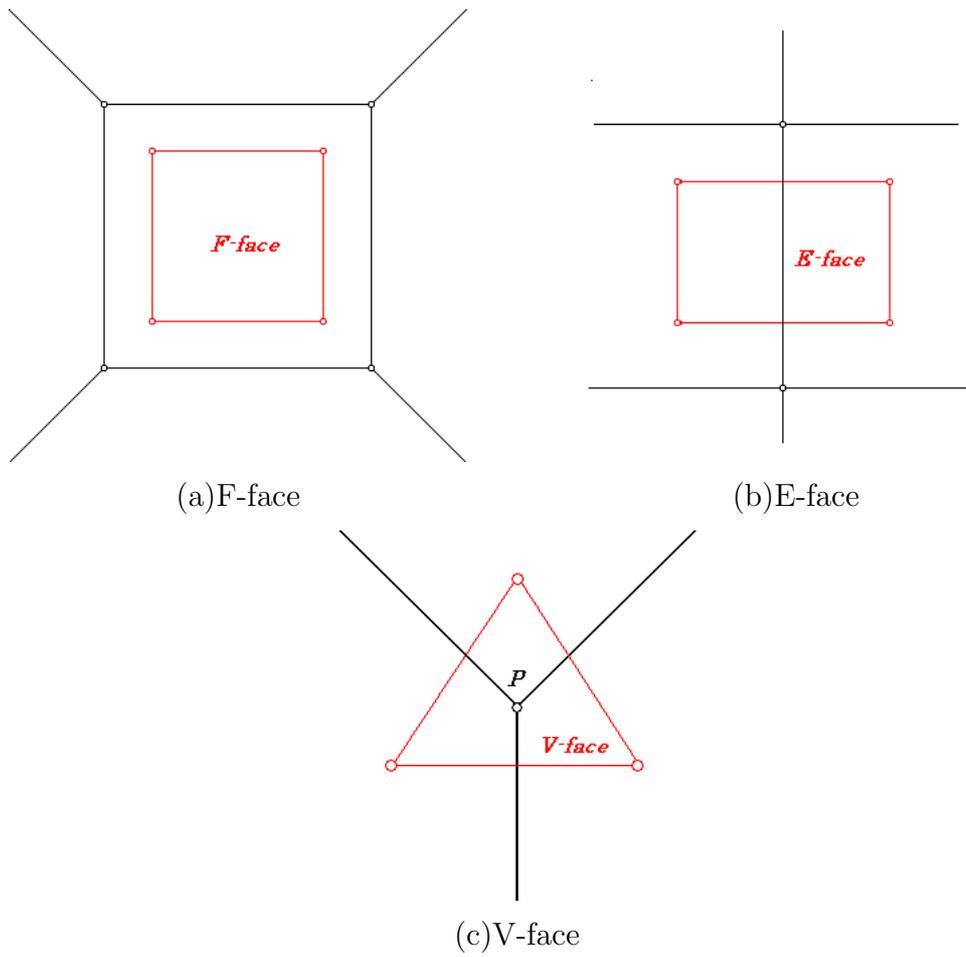


図 3.6: Doo-Sabin 細分割生成面

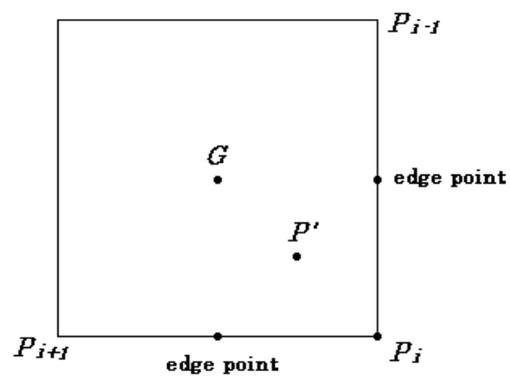


図 3.7: P'_i 計算ステップ

図 3.7は P'_i の計算ステップである．図 3.7に示すように， P'_i は， P_i と P_i に接続する稜線の中点である 2 つの edge point, 面の重心である G の各点の平均となる． P_i に接続する稜線の反対側の頂点をそれぞれ P_{i-1}, P_{i+1} とすると， P'_i は次の式によって求めることができる．

$$P'_i = \frac{1}{4}g + \frac{1}{8}P_{i-1} + \frac{1}{2}P_i + \frac{1}{8}P_{i+1} \quad (3.12)$$

3.5.2 双 3 次 Gregory パッチ

本研究における自由曲面表現は双 3 次 Gregory パッチを用いて行った．図 3.8に Gregory パッチの制御点の関係を示す．双 3 次 Gregory パッチは，Coons[21] の一般 Coons 曲面のツイストベクトルを境界曲線の横断ベクトルとして表した Gregory による拡張 [22] を双 3 次 Bézier 曲面 [23] に適用したものである．また，Gregory パッチは両立性条件という， u, v 方向どちらにおける接続をも保証する両立性補正を施した曲面表現であり， u, v 方向にそれぞれ独立した 20 個の制御点 $P_{ijk}(i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3, k = 0, 1)$ により実現されている．

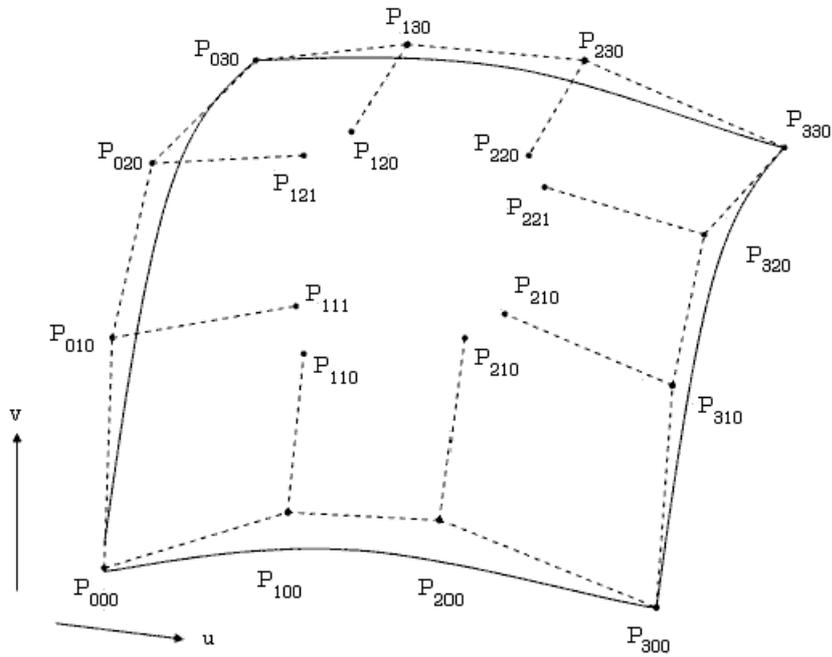


図 3.8: Gregory パッチ

双 3 次の Gregory パッチの曲面表現式は次のようになる .

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) Q_{ij}(u, v) \quad (3.13)$$

$$(0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1)$$

ただし, $B_i^3(u)$ と $B_j^3(v)$ は Bernstein 基底関数である . また, パッチの制御点 P_{ijk} と Q_{ij} には次のような関係がある .

- $i \neq 1, 2$ または $j \neq 1, 2$ のとき

$$Q_{ij}(u, v) = P_{ij0} \quad (3.14)$$

- $i = 1, 2$ かつ $j = 1, 2$ のとき

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_{11}(u, v) &= \frac{u\mathbf{P}_{110} + v\mathbf{P}_{111}}{u + v}, \\
 \mathbf{Q}_{12}(u, v) &= \frac{u\mathbf{P}_{120} + (1 - v)\mathbf{P}_{121}}{u + (1 - v)}, \\
 \mathbf{Q}_{21}(u, v) &= \frac{(1 - u)\mathbf{P}_{210} + v\mathbf{P}_{211}}{(1 - u) + v}, \\
 \mathbf{Q}_{22}(u, v) &= \frac{(1 - u)\mathbf{P}_{220} + (1 - v)\mathbf{P}_{221}}{(1 - u) + (1 - v)} \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

ただし, $0 \neq u, v \neq 1$ である.

この曲面表現式は, 以下のような特徴を持つ.

1. Gregory パッチの境界曲線はBézier曲線になる.
2. Bézier曲面と同様に, 曲面上の任意の点が, 曲面の制御点で囲まれた領域の内部に存在するという凸閉包性を持つ. 曲面間の干渉についてのチェックを高速に行うことが可能となる.
3. 双3次 Gregory パッチの特別な場合が, 双3次Bézier曲面となる. Gregory パッチの制御点 \mathbf{P}_{110} と \mathbf{P}_{111} , \mathbf{P}_{120} と \mathbf{P}_{121} , \mathbf{P}_{210} と \mathbf{P}_{211} , \mathbf{P}_{220} と \mathbf{P}_{221} がそれぞれ等しい場合に, Gregory パッチはBézier曲面と同等となる.
4. 流れベクトル関数を各境界曲線で独立に定義できる.

Gregory パッチは, 流れベクトル関数を u, v 方向で独立して定義できるため, Gregory パッチ同士の滑らかな接続の際に, 一つの方向のみを意識すればよいので, 曲面の接続が容易となる.

Gregory 曲面の接続手法

メッシュを内挿する際には, 境界曲線をはさんだ二つの曲面を滑らかに接続する必要がある. 二つの曲面 S^1, S^2 が G^1 連続となるためには, 境界曲線上の微分ベクトルが以下の条件を満たすことが必要となる. 図 3.9 に Gregory 曲面の G^1 連続条

件を示す．ここで境界曲線を横切る微分ベクトルを u, v 方向でそれぞれ S_u, S_v と表す．

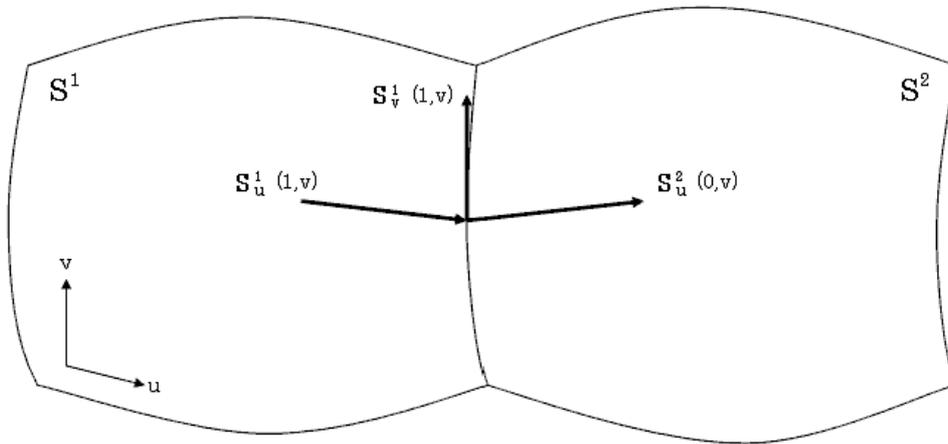


図 3.9: G^1 連続の条件

このとき，次の式が境界曲線上の全ての点で成り立てば，曲面間が G^1 連続となる．

$$S_u^2(0, v) = k(v)S_u^1(1, v) + h(v)S_v^1(1, v) \quad (3.16)$$

ただし， $k(v), h(v)$ は v のスカラー関数であり，この式は曲線上の全ての点で，三つの微分ベクトル $S_u^1(1, v), S_v^1(1, v), S_u^2(0, v)$ が同一平面上にあることを示している．図 3.10は接続する Gregory パッチ $S^1(u, v), S^2(u, v)$ と，制御点間ベクトル $\mathbf{a}_i (i = 0, \dots, 3), \mathbf{b}_i (i = 0, \dots, 3), \mathbf{c}_i (i = 0, 1, 2)$ を表す．

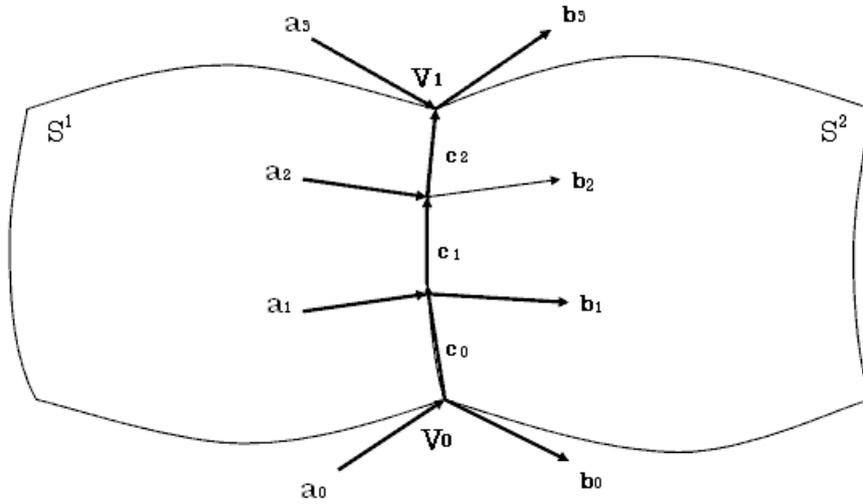


図 3.10: Gregory パッチの接続

ここで，制御点間ベクトル $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_i$ を用いて式 (3.16) を表すと次のようになる．

$$\sum_{i=0}^3 B_i^3(v) \mathbf{b}_i = k(v) \sum_{i=0}^3 B_i^3(v) \mathbf{a}_i + h(v) \sum_{i=0}^2 B_i^2(v) \mathbf{c}_i \quad (3.17)$$

パッチが G^1 連続に接続していることは，頂点 V_0, V_1 に接続しているベクトル $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_i$ がそれぞれ同一平面上にある必要がある．次式は同一平面条件を表す式である．

$$\mathbf{b}_0 = k_0 \mathbf{a}_0 + h_0 \mathbf{c}_0, \quad \mathbf{b}_3 = k_1 \mathbf{a}_3 + h_1 \mathbf{c}_2 \quad (3.18)$$

ただし， k_0, k_1, h_0, h_1 は実数である．式 (3.18) を満たすために v に関するスカラー関数 $k(v), h(v)$ を一次式と仮定する．

$$\begin{aligned} k(v) &= k_0(1-v) + k_1 v \\ h(v) &= h_0(1-v) + h_1 v \end{aligned} \quad (3.19)$$

制御点 P_i からなる関数を次のように表現すると，

$$\sum_{i=0}^n B_i^n(t)P_i = \{P_0, P_1, \dots, P_n\}$$

次の式が成り立つ .

$$\begin{aligned} t\{P_0, P_1, \dots, P_n\} &= 0, \frac{P_0}{n+1}, \frac{2P_1}{n+1}, \dots, P_n \\ (1-t)\{P_0, P_1, \dots, P_n\} &= P_0, \frac{nP_1}{n+1}, \frac{(n-1)P_2}{n+1}, \dots, \frac{P_n}{n+1}, 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

式 (3.20) を用いて , 境界線上の微分ベクトルを表現すると次のようになる .

$$S_u^1(1, v) = 3\{\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3\}$$

$$S_u^2(0, v) = 3\{\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3\}$$

$$S_v^1(1, v) = 3\{\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2\}$$

上式を式 (3.17) に代入する . 代入すると左辺の次数が 4 次の式となるので , Bézier 関数 S_u^1 が 2 次という条件を与え , 微分ベクトル a を表す Bézier 関数の次数を 1 次下げ , 次式を得る .

$$\begin{aligned} 3\{\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3\} &= 3\{\mathbf{a}_0, q, \mathbf{a}_3\} \\ (q &= \frac{3\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_0}{2} = \frac{3\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3}{2}) \end{aligned}$$

これにより接続の条件式は次のようになる .

$$\{\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3\} = \{(1-v)k_0 + vk_1\}\{\mathbf{a}_0, q, \mathbf{a}_3\} + \{(1-v)h_0 + vh_1\}\{\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2\} \quad (3.21)$$

このとき , 制御点間ベクトル $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ を

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= \frac{2\mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_3}{3} \\ \mathbf{a}_2 &= \frac{\mathbf{a}_0 + 2\mathbf{a}_3}{3} \end{aligned}$$

と仮定し , 式 (3.20) を用いて式 (3.21) を解くと , 連続条件を満たす曲面の制御点間ベクトル $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ は次式により求めることができる .

$$\mathbf{b}_1 = \frac{(k_1 - k_0)\mathbf{a}_0}{3} + k_0\mathbf{a}_1 + \frac{2h_0\mathbf{c}_1}{3} + \frac{h_1\mathbf{c}_0}{3} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{b}_2 = k_1\mathbf{a}_2 - \frac{(k_1 - k_0)\mathbf{a}_3}{3} + \frac{h_0\mathbf{c}_2}{3} + \frac{2h_1\mathbf{c}_1}{3} \quad (3.23)$$

以上の手法により，2枚のパッチが G^1 連続を保つ曲面の内部制御点を求めることができる．

Gregory 三角パッチ

メッシュペアリングによって四角形化されずに残った三角メッシュ部には，Gregory 三角パッチを内挿する．図3.11はGregory 三角パッチ内挿ステップを表す．図3.11(a)は境界線から求めた内部制御点，図3.11(b)は分割した微分ベクトル，図3.11(c)は制御点 Q ，図3.11(d)は最終的に求めた内部制御点をそれぞれ表している．図3.11(a)に示すように，三角メッシュの各境界線に対し接続式から内部制御点を求める．三つの内部曲線を生成し，三角形面を三つの四角形パッチに分割してGregory パッチを内挿する．以下にそのステップについて詳細を記す．

ステップ1

図3.11(b)に示すように，三つの境界曲線をパラメータ $t=0.5$ の位置で分割し，境界曲線を横切る微分ベクトルを分割する．

ステップ2

ステップ1において内部曲線の端点 P_3 と端点での微分方向を定める制御点 P_2 が既知となっているため，内部曲線を2次のBézier曲線と仮定して，端点以外の制御点 Q_1 は次のように求める．

$$Q_1 = \frac{3P_2 - P_3}{2}$$

ここで各 $Q_1^i (i = 0, 1, 2)$ の平均を内部制御点の端点 P_0 とすると，図3.11(c)に示すように P_0, Q_1, P_3 の3点から内部曲線である2次のBézier曲線を生成する．

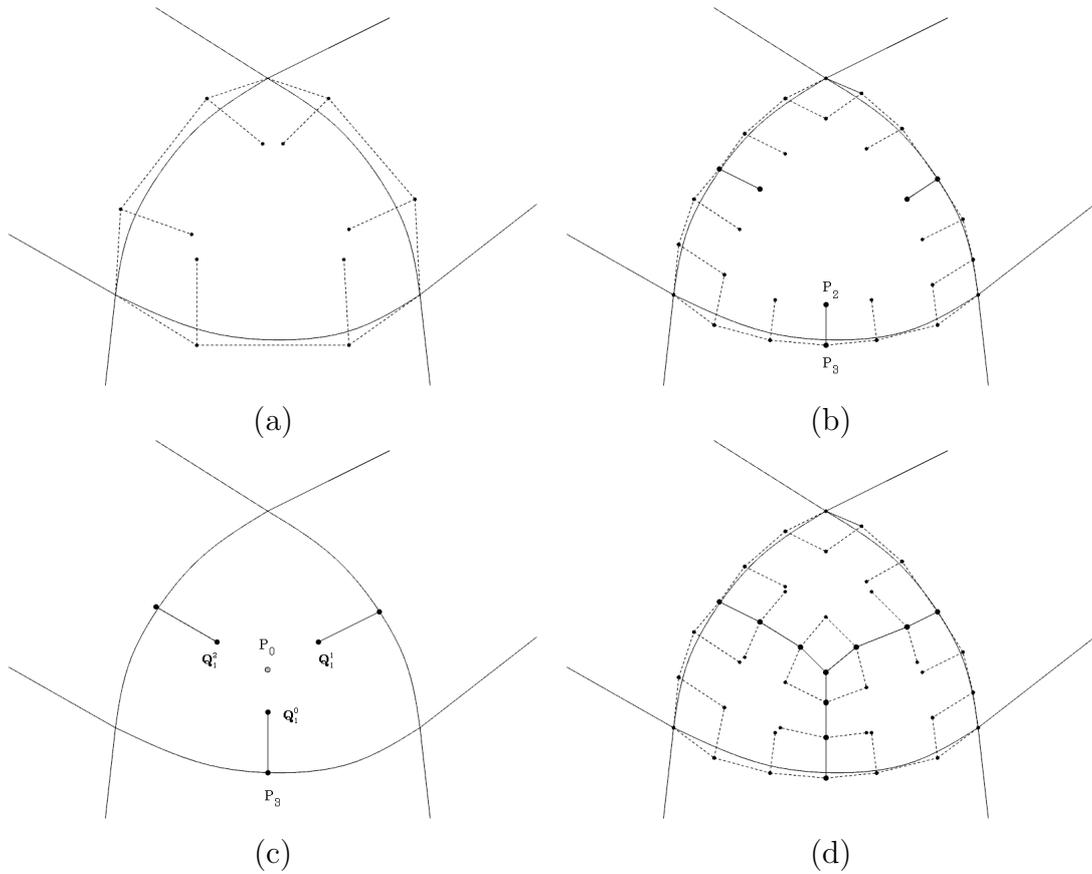


図 3.11: 三角パッチの内挿

ステップ 3

図 3.11(d) に示すように，内部曲線から内部制御点を生成する．図 3.12 は各制御点ベクトルを表し，このとき端点では $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0, \mathbf{c}_0$ が同一平面上にあり，かつ $\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$ は同一直線上にあるため，式 (3.19) の $h_0 = 0$ となり，

$$\mathbf{b}_0 = k_0 \mathbf{a}_0$$

が成り立つ．

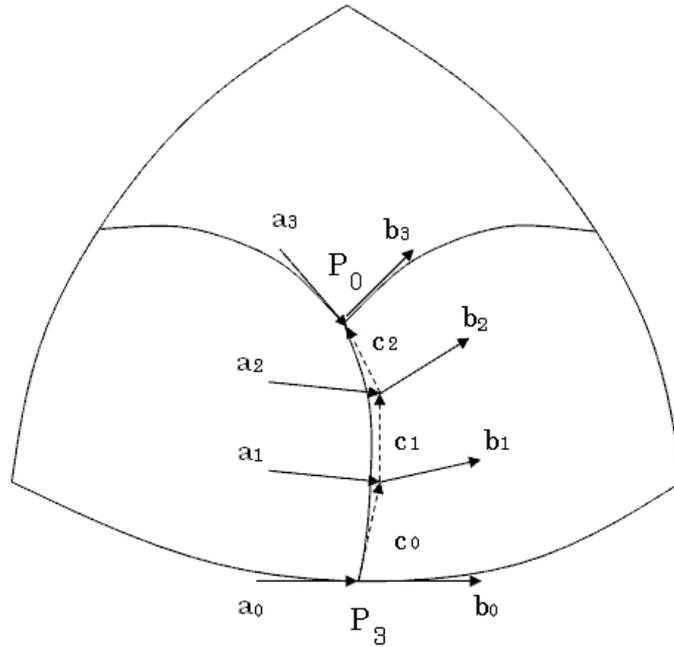


図 3.12: 制御点間ベクトル

同様に , a_3, b_3, c_2 も同一平面上にあるため ,

$$b_3 = k_1 a_3 + h_1 c_2$$

を満たす k_1, h_1 も存在する . ここで b_0, a_0 は一本の曲線をパラメータ $t=0.5$ で分割したもののなので , $k_0 = 1$ となる . また , 端点 P_0 は , Q_1^i の平均値であるため , $k_1 = h_1 = 1$ となる . よって式 (3.22), (3.23) より内部制御点 b_1, b_2 は次式により求めることができる .

$$b_1 = a_1 + \frac{c_0}{3} \tag{3.24}$$

$$b_2 = a_2 + \frac{2c_1}{3} \tag{3.25}$$

3.5.3 曲面フィッティング

本研究では，初期メッシュに Doo-Sabin 細分割化を施した細分割メッシュに対し，丸め操作 (Rounding Operation)[24][25][26] を改良した脇田らの手法 [18] を用いて曲面フィッティングを行った．丸め操作とは，単純なポリゴン形状を入力として滑らかな曲面形状を生成する手法のことである．脇田らの丸め操作による曲面化の特徴は，初期メッシュと曲面モデルの位相要素が同一となることにある．ここでいう位相要素とは，頂点，稜線，面のことを指す．位相要素を同一に関連付けることにより，初期ポリゴンデータの位相要素をもとに曲面形状を構築し，用途に応じて逆の操作（逆丸め操作）を行い，ポリゴンデータを操作することによって曲面形状の制御を行うといった柔軟な形状変形操作が可能となり，デザインにおける形状編集においても有効となる．また，曲面表現には双 3 次 Gregory パッチを用いており， G^1 連続を保持した曲面の内挿及び形状の変形を容易に行うことができる．

曲面形状は次のステップにより生成する．

1. 初期メッシュに対し Doo-Sabin 細分割を一回施した細分割形状を求める．
2. 細分割形状より曲線メッシュ構造の頂点を求める．
3. 計算した頂点より 3 次 Bézier 曲線の制御点を求め，曲線メッシュ構造を構築する．
4. 曲線メッシュ構造の内部に双 3 次 Gregory 曲面をフィッティングする．

以下に曲面形状の生成手法の詳細について述べる．

曲線メッシュ構造の頂点計算

図 3.13 に曲線メッシュ構造の頂点計算ステップを示す．図 3.13(a) は初期メッシュ，図 3.13(b) は細分割形状，図 3.13(c) は求めた曲線の制御点をそれぞれ表している．このとき図 3.13(a) に示すように初期メッシュ M^0 の各頂点を $v_i (i = 0, \dots, n)$ とす

る．次に M^0 に Doo-Sabin 細分割を 1 回施し，図 3.13(b) に示す細分割形状 M^1 を得る． M^1 を構成する頂点 p_j^i は， M^0 の各頂点 v_i を親を持つ．これらの頂点の重心 $v'_i (i = 0, \dots, n)$ は細分割曲面の極限曲面上に乗る点であり，図 3.13(c) に示すように曲線メッシュ構造における 3 次 Bézier 曲線の制御点となる． v_i と v'_i は親子関係をもっているため， M^0 と M^1 の位相は等しくなる．

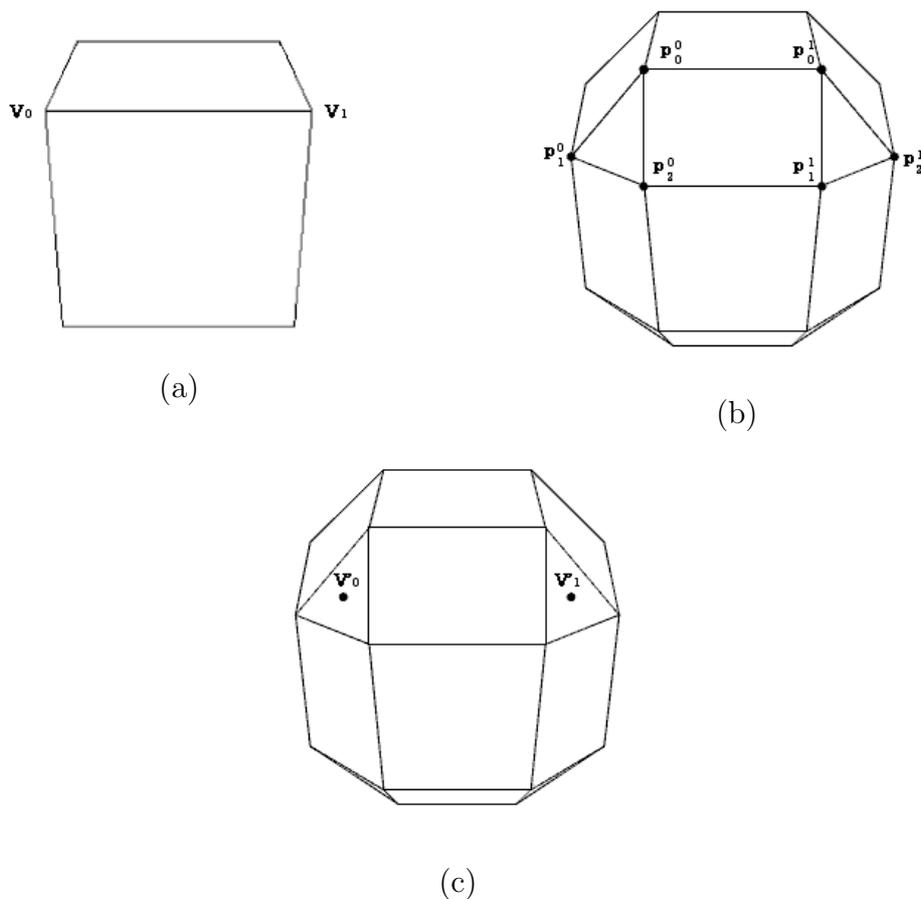


図 3.13: 曲線メッシュ構造の頂点計算

曲線メッシュ構造の曲線生成

曲線メッシュ構造の自由曲線には 3 次 Bézier 曲線を用いる．前ステップで求めた頂点から 3 次 Bézier 曲線の制御点を求め，曲線メッシュ構造を構築する．3 次 Bézier 曲線は 4 つの制御点により構成され，始点と終点はそれぞれ前ステップにおいて

算出した新頂点となり，曲線を構築するには残りの内部の制御点 2 つを求めればよい．図 3.14 に曲線メッシュ構造の曲線計算ステップを示す．図 3.14(a) は Bézier 曲線の制御点，図 3.14(b) は Bézier 曲線の始点における接線ベクトル，図 3.14(c) は Bézier 曲線における最凸点をそれぞれ表す．図 3.14(a) において，始点と終点をそれぞれ c_0, c_3 とすると，内部制御点 c_1, c_2 を求めることになる．まず，図 3.14(b) に示すように c_0 と細分割後の稜線の中点 q から $q - c_0$ を定義する．このベクトルを 3 次 Bézier 曲線の始点における接線ベクトルとする．同様に終点における接線ベクトルを r と c_3 によって定義する．内部制御点 c_1, c_2 は次の式を満たす値として定義する．

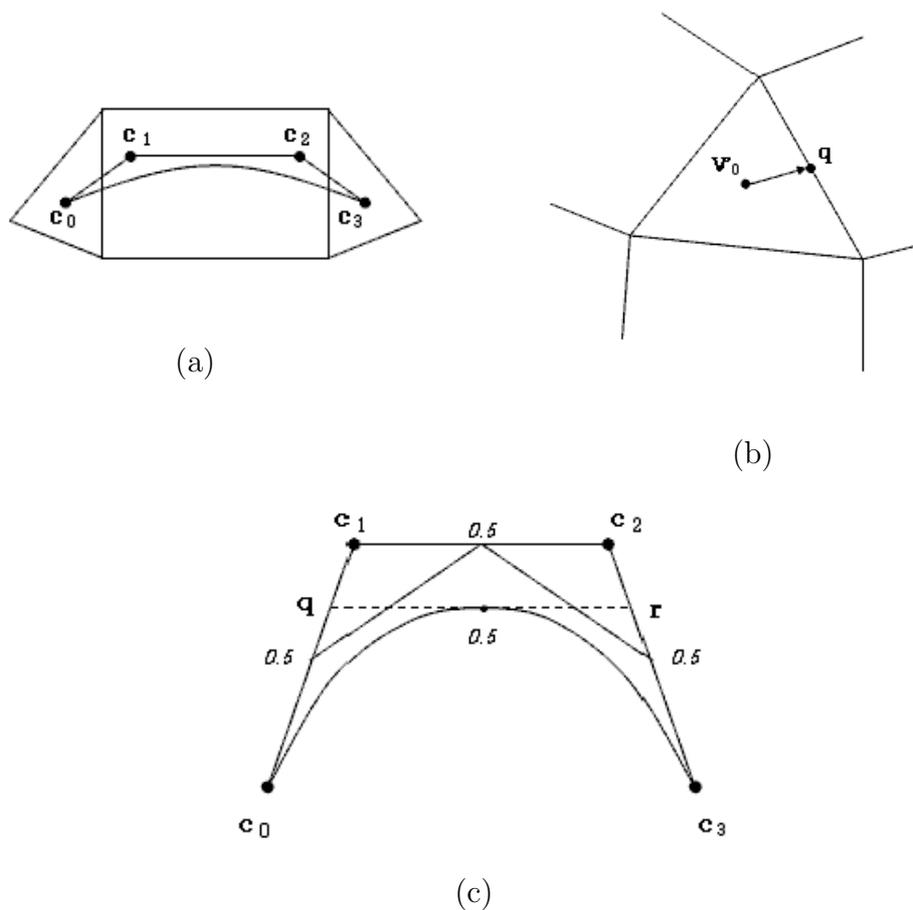


図 3.14: 曲線メッシュ構造の曲線計算

$$|c_1 - c_0| = \frac{4}{3} |q - c_0|, \quad |c_2 - c_3| = \frac{4}{3} |r - c_3| \quad (3.26)$$

ここで， $c_1 - c_0$ を $q - c_0$ の $4/3$ 倍のベクトルとして定義するのは，曲面形状が初期メッシュの内部に収まるようにするためである．3次Bézier曲線が左右対称であると仮定すると，制御点も左右対称となる．このとき図 3.14(c) に示すように 3次Bézier曲線の最凸点はパラメータ $t = 0.5$ における点となるため，パラメータ $t = 0.5$ における点で細分割後のメッシュと隣接するような 3次Bézier曲線の制御点を逆算することで求めることができる．このことから細分割後のメッシュに 3次Bézier曲線が隣接する，つまり細分割メッシュが曲線の最小の凸包となるような 3次Bézier曲線の制御点 c_1, c_2 は， $c_1 - c_0 = \frac{4}{3}(q - c_0)$ となり， $4/3$ 倍のベクトルとして定義するのが望ましいことが分かる．

特徴稜線の考慮

丸め手法を用いて初期メッシュから曲線構造を生成すると，特徴稜線部も丸め操作により滑らかに丸まってしまう．比較的滑らかな曲面により構成されたモデルにおいては特に問題はないが，工業部品等，鋭角部や直線が形状の特徴となっている場合に特徴の消失という問題が発生する．そこで本手法では丸め操作において，特徴稜線の座標値を固定できるようにすることで，特徴稜線の明確な保持を可能とする改良を施した．これにより，より特徴稜線を考慮した曲面化が可能となる．初期メッシュに鋭角部や直線が多用されているか否かによりこれらを使い分けることで，柔軟な曲面モデルの再構成を可能とする．

双 3 次 Gregory パッチの内挿

前ステップで構築した 3次Bézier曲線メッシュ構造に双 3 次 Gregory パッチを内挿して曲面形状を生成する．双 3 次 Gregory パッチの 20 個の制御点のうち，前ステップまでに 12 個の制御点は既知となっている．まだ未知の内部の 8 つの制御点については，千代倉らの基礎パッチ法 [27] を用いて求めていく．滑らかなメッシュ

を内挿する際には、境界曲線をはさんだ二つの曲面が連続な接続をしている必要があるが、3.5.3節にて述べた通常の接続手法だと式に用いる値が未知となるため内部制御点を求めることができない。基礎パッチ法とは、曲面 S^1, S^2 の境界上に仮想的なパッチを想定し、そのパッチと2つの曲面をそれぞれ接続する手法である。仮想的なパッチを用いることで未知となっている値を求め、内部制御点を求めていく。以下に基礎パッチ法による曲面の連続な内挿方法について述べる。

図3.15は双3次 Gregory パッチの接続図を表しており、このように2枚の双3次 Gregory パッチ S^1, S^2 が接しているとする。

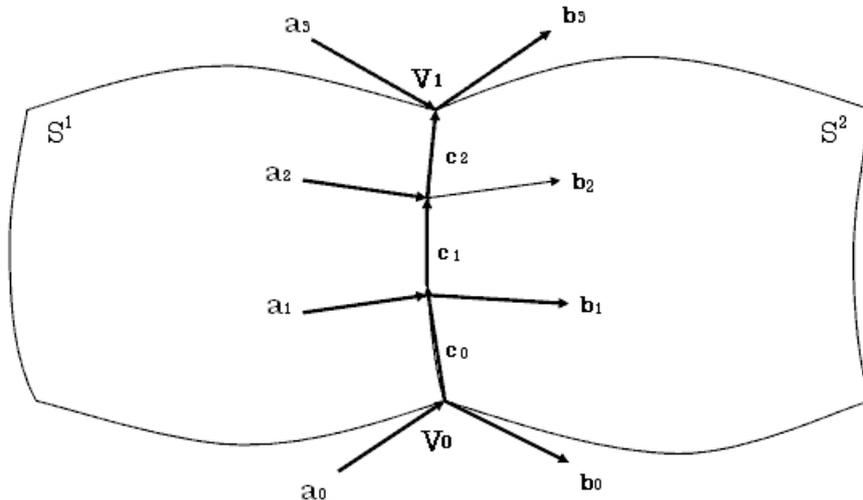


図3.15: 双3次 Gregory パッチの接続

制御点間ベクトルを $a_i (i = 0, \dots, 3)$, $b_i (i = 0, \dots, 3)$, $c_i (i = 0, 1, 2)$ とすると、2つの曲面 S^1, S^2 が G^1 連続となるためには、境界曲線上の微分ベクトルが以下の条件を満たすことが必要となる。

$$S_u^2(0, v) = k(v)S_u^1(1, v) + h(v)S_v^1(1, v) \quad (3.27)$$

ここで、式(3.23)を満たすために v に関するスカラー関数 $k(v), h(v)$ を1次式と

仮定する .

$$\begin{aligned}
 k(v) &= k_0(1-v) + k_1(v) \\
 h(v) &= h_0(1-v) + h_1(v)
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

式 (3.23) は曲線上の全ての点で , 三つの微分ベクトル $S_u^1(1, v), S_v^1(1, v), S_u^2(0, v)$, が同一平面上にあることを示している . 制御点間ベクトル $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, \mathbf{c}_i$ を用いて式 (3.27) を表すと次のようになる .

$$\sum_{i=0}^3 B_i^3(v) \mathbf{b}_i = k(v) \sum_{i=0}^3 B_i^3(v) \mathbf{a}_i + h(v) \sum_{i=0}^2 B_i^2(v) \mathbf{c}_i
 \tag{3.29}$$

ここで , $B_i^n(v)$ は Bernstein 基底関数である . この式において $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ が未知の値となっており , $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ を求めることができれば $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ を求めることができる .

基礎パッチ法では境界曲線上の流れベクトル関数を表す仮想的なパッチを想定することで $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ を既知数とした . 図 3.16 に基礎パッチ法における G^1 連続の条件図を表す . ここで境界曲線の端点 V_0, V_1 における制御点間ベクトルをそれぞれ $\mathbf{p}_0, \mathbf{q}_0, \mathbf{r}_0, \mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1, \mathbf{r}_1$ とする . これらのベクトルは境界曲線の接ベクトルであり , 2 つの曲面が G^1 連続な接続となるためには $\mathbf{p}_0, \mathbf{q}_0, \mathbf{r}_0$ と $\mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1, \mathbf{r}_1$ がそれぞれ同一平面上にある必要がある .

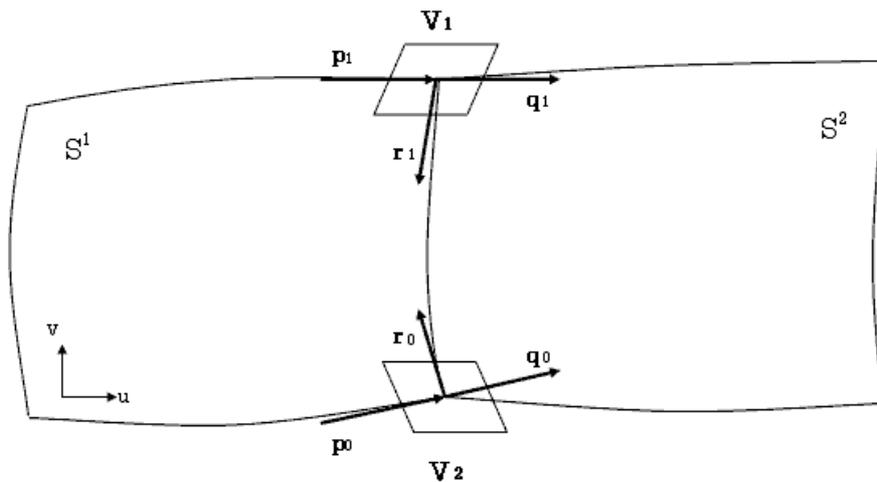


図 3.16: 基礎パッチ法における G^1 連続の条件

このとき，基礎パッチ法による曲面の内挿図を表す図 3.17における流れベクトル関数の要素 $d_i (i = 0, 1, 2)$ は以下ようになる．

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{p_0 + q_0}{|p_0 + q_0|} \\ d_2 &= \frac{p_1 + q_1}{|p_1 + q_1|} \\ d_1 &= \frac{d_0 + d_2}{2} \end{aligned} \tag{3.30}$$

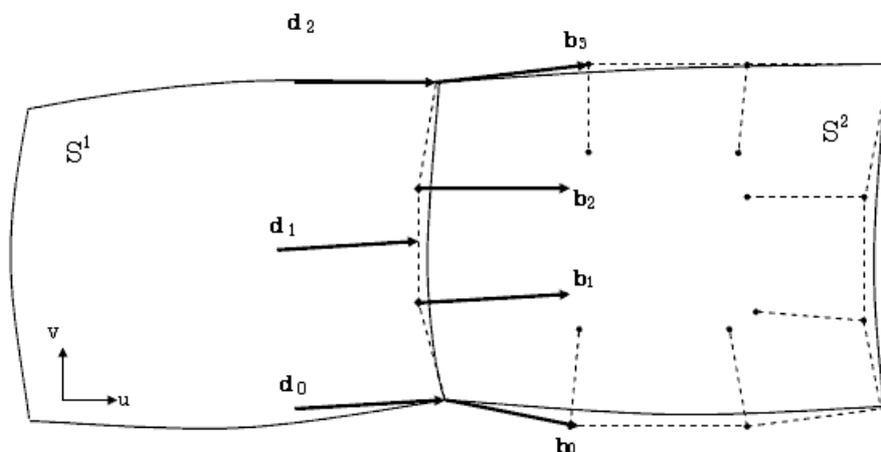


図 3.17: 基礎パッチ法による曲面の内挿

このように流れベクトル関数の端点の要素 d_0, d_2 は境界曲線の端点における制御点ベクトルから定義することができ， d_1 は d_0, d_2 の補間により定義することができる．

以上の結果により，曲面の内部制御点 b_1, b_2 は以下の式により求めることができる．

$$b_1 = \frac{2k_0}{3}d_1 + \frac{k_1}{3}d_0 + \frac{2h_0}{3}c_1 + \frac{h_1}{3}c_0 \tag{3.31}$$

$$b_2 = \frac{k_0}{3}d_2 + \frac{2k_1}{3}d_1 + \frac{h_0}{3}c_2 + \frac{2h_1}{3}c_1 \tag{3.32}$$

以上の手法により， G^1 連続を保つ双 3 次 Gregory パッチの内挿が実現できる．メッシュペアリングによって四角形化しきれなかった三角メッシュ部については

3.5.2項で解説した Gregory 三角パッチを用いて同様に双3次 Gregory パッチを内挿する。

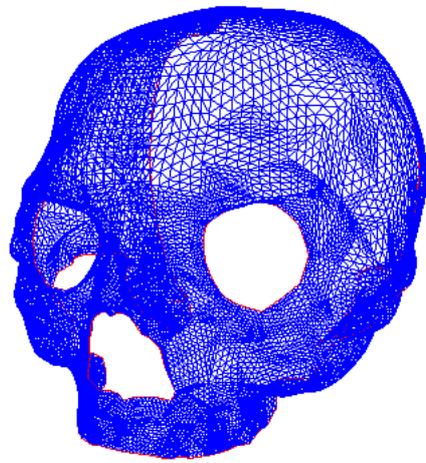
第 4 章

再構成結果

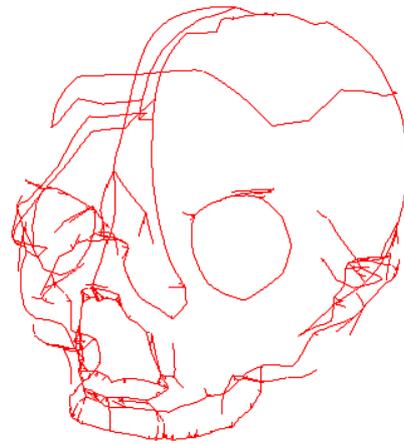
本章では、前章で提案した意匠設計を考慮した3次元モデルの再構成手法について、アプリケーションを実装して得られた結果を示す。幾つかのポリゴンデータを、曲面モデルとして再構成した結果データを示し、その結果について考察する。実装においてC++言語を用い、グラフィックスライブラリにはOpenGLの上位ライブラリである渡辺らのFKシステム [28] を用いてアプリケーションを作成した。

4.1 再構成手法の適用実験

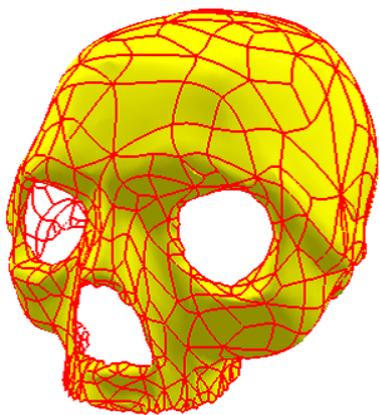
本研究の再構成手法を検証するため、デザインに用いるモデルを想定して2種類の曲面モデルを作成した。曲線や曲面の流れによるキャラクターラインが表れたモデルと直線や鋭角部を多用したキャラクターラインが表れた2種類のポリゴンモデルに対して本手法を適用した。以下に実行結果を示す。ここでは、双3次Gregoryパッチの分割数は2としている。



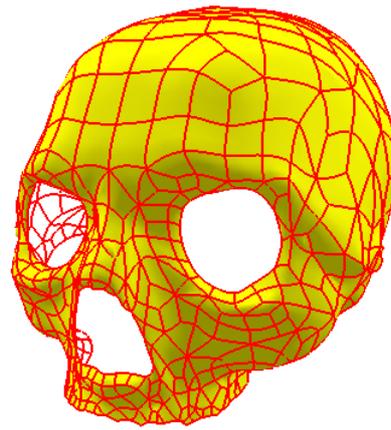
(a) 初期メッシュ(20000 ポリゴン)



(b) 特徴稜線抽出結果



(c) 未反映手法 (400 ポリゴン)



(d) 反映手法 (400 ポリゴン)

図 4.1: 生体部品に対する本手法の適用

図 4.1は、生体部品（頭蓋）モデルに対して本手法を適用した結果である。図 4.1(a) は初期メッシュを表し、図 4.1(b) は抽出した特徴稜線を表す。初期メッシュから図 4.1(b) に示すようにキャラクターラインを特徴稜線として抽出し、特徴稜線を反映した曲面モデルを再構成した。図 4.1(c) は特徴稜線を反映せずに再構成

した結果を示し，図 4.1(d) は特徴稜線を反映した再構成した結果を示す．形状のアウトラインや特徴部が曲面の流れから抽出することが実現できている．また，抽出した特徴稜線を考慮した最適化と曲面化を施すことで，編集の容易な意匠設計を考慮した曲面が生成されていることがわかる．

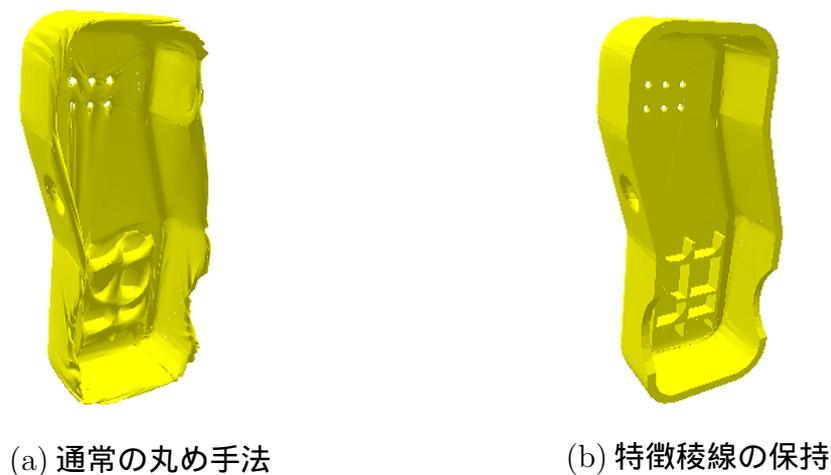


図 4.2: 特徴稜線を保持した曲面化

図 4.2は，多くの直線や鋭角部により構成されたモデルに対し，特徴稜線を保持した曲面化を施した結果である．図 4.2(a) は特徴稜線を保持しない結果を表し，図 4.2(b) は特徴稜線を保持した結果を表す．図 4.2(a) では，丸め操作により直線や鋭角部が消失しているが，図 4.2(b) に示すような特徴稜線を考慮した丸め操作では，直線や鋭角部を保持することができおり，特徴が失われていないことがわかる．また，このモデルは最適化により位相関係が適切ではないため，図 4.2(a) では計算エラーが発生しており適切な曲面化が行われていない．しかし，図 4.2(b) では特徴稜線を保持するための座標値の固定により，適切な曲面化が行われていることがわかる．

4.2 考察

本手法により、初期メッシュからキャラクターラインを特徴稜線として抽出し、キャラクターラインを反映させた3次元曲面モデルを再構成することは可能であり、細部における意匠的特徴を保った最適化により、ある程度意匠設計を考慮した編集の容易な曲面が生成できた。特徴稜線を適用することにより、特徴を保ったまま形状を表現している頂点数を削減することにより、メッシュの面積が大きくなり編集が容易になったといえる。しかし、現在の手法には課題が存在する。特徴稜線を保った曲面化は最適化の度合いに限界がある。図4.3に最適化による変形と特徴稜線の消失の例を示す。現在の初期メッシュに対して最適化を施し、編集しやすい曲面を生成する方法では、特徴稜線を完全に保存することが難しい。最適化の精度を上げて密でない面を生成しようとするすると、特徴稜線がエッジコラプス操作によって変形するといった副作用が発生する。それにより評価値が変化し、特徴稜線では無くなる場合もある。逆に特徴稜線に対する変更を完全に防ぐと、最適化の精度が低くなり、密なメッシュがより多く残ってしまい、編集しやすい面であるとは言い難くなる。この課題を解決するために、キャラクターラインの内部に直接曲面フィッティングを行う手法が考えることができる。初期メッシュに対して最適化等の変更を施して綺麗な曲面を生成するのではなく、抽出したキャラクターラインの内部に面積に応じて曲面を均等にフィッティングし、綺麗な曲面を生成することでより意匠設計を考慮した3次元モデルを再構成できると考えることができる。

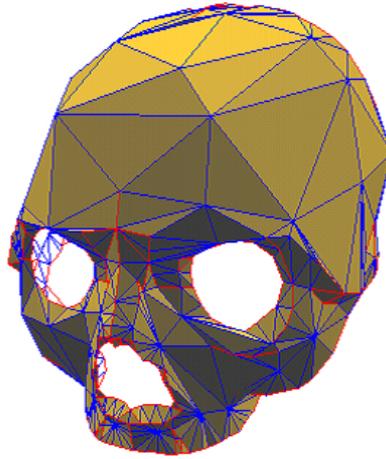


図 4.3: 最適化による変形と特徴稜線の消失

特徴稜線を保持した曲面化では、最適化されたモデルに対しても本手法を適用することを可能とし、特徴部を明確に保存した曲面モデルを再構成することができた。しかし、現在は特徴稜線を保持するか否かの2通りの曲面化しか行うことができず、直線や鋭角部が多用されたモデルか否かの2通りのモデルの再構成にしか対応することができない。この問題は、特徴稜線に対して保持するか否かの情報を持たせるか、曲面化の際に反映度をパラメータ化することで解決できると考えることができる。またそれにより、より柔軟な曲面モデルの再構成が可能となるだろう。

今回、検証実験としてデザインの場面を想定し、キャラクターラインが曲面の流れによって表現されたモデルと直線など鋭角部によって表現されたモデルにたいして検証を行った。しかし、今回の実験においては厳密にモデルの復元度、つまり曲面形状の精度を厳密には検証していない。用途によっては、精度や誤差は切実な問題となるため、対応が望まれる。また、両モデルに対して有効な再構成結果は得られたが、実際のデザインプロセスにおける実証実験が必要である。各種業界のデザインプロセスにおいて、本手法が実際に詳細デザインの効率を向上

することができるかを検証する必要があるだろう。

第 5 章

おわりに

本論文では、従来考慮されていなかった意匠設計を考慮した不規則点群からの3次元曲面モデル再構成手法を提案した。従来の手法ではポリゴンモデルを再構成する過程を重視しており、後の形状編集や特徴が明確に表れた曲面モデルの生成といった意匠的デザインは考慮されていなかった。既存の手法によって生成された3次元モデルは細かい密なメッシュとなり、形状の特徴部位などがわかりにくく、デザイナーがモデルを編集するのが困難で課題となっていた。本研究は、不規則点群から再構成したモデル等、密で細かいメッシュにより構成されたポリゴンモデルからの、デザイナーによる形状編集が容易な曲面モデルの生成を実現することでデザインにおけるスキャニングを用いた手法をより実用的なものとするを目的とした。形状の意匠的特徴を現すキャラクターラインに着目し、本研究で提案した特徴稜線により近似して表現した。特徴稜線は評価関数のパラメータを操作することにより、デザインの分野によって異なるキャラクターラインを柔軟に抽出することができる特徴を持っている。特徴稜線を点群から再構成したポリゴンモデルから抽出することで、意匠的特徴を考慮した編集の容易な曲面モデルの生成を実現した。

検証実験として、デザインに用いるモデルを表現するため、曲線によるキャラクターラインが表れたモデルと、直線など鋭角部を多用したモデルの2種類用意して検証を行った。その結果、初期ポリゴンモデルから特徴稜線を用いて面の流れやアウトラインからなるキャラクターラインを抽出することが実現できた。また、キャラクターラインを反映した曲面を最適化により、特徴を保持したまま編集の容易なメッシュからなる曲面モデルを生成することが実現できた。本手法を適用することにより、デザインにおける点群からの再構成がより実用的になり、デザインの効率を向上することが可能となるといえる。

本手法の課題として、第一にキャラクターラインのよりよい抽出手法がある。現在の、特徴稜線を用いたキャラクターラインの近似で必ずしもデザイナーの求めるキャラクターラインが抽出できるわけではない。また、キャラクターラインの明確な定義を行う必要もあるだろう。次に特徴稜線の曲面モデルに対する柔軟な反

映がある．現在は曲線メッシュ構造を特徴稜線を保持するか否かの2パターンのみで構築している．この場合，直線を多用するモデルか否かによって使い分けを行うことができるが、両方が混在したモデルにおいては適切な曲面化を行うことができない場合がある．そこで特徴稜線の曲線メッシュ構造に対する反映度をパラメータ化することで，より柔軟な曲面モデルの生成を行うことが可能となるだろう．最後にキャラクターラインへの曲面フィッティングがある．現在は特徴稜線として抽出したキャラクターラインを初期メッシュに対し，反映して曲面フィッティングを行っている．現状の反映する際に用いている最適化では，特徴稜線を確実に保存することと最適化による綺麗な曲面の生成がトレードオフとなっている．特徴稜線に対する変更を防ぐためには，ある程度最適化の精度を落とさねばならず，密なメッシュが残る部分が存在してしまう．逆に綺麗な曲面を形成するために精度を高めると，特徴稜線に対する影響が発生してしまう．そのため特徴稜線で無くなるケースも発生してしまい，こうなると意匠設計を考慮しているとは言い難い．これを解決するために，初期メッシュに対して最適化を施してキャラクターラインを反映するのではなく，キャラクターライン内に直接曲面フィッティングを行った曲面モデルを生成することが考えることができる．均等に曲面をフィッティングすることで，完全に抽出したキャラクターラインを保存したまま，内部に綺麗な曲面をフィッティングすることが可能で，意匠設計を考慮した3次元曲面モデルを生成できると考えることができる．

なお，本研究は情報処理学会第65回全国大会における“三次元表示機能を持つ携帯電話におけるコンテンツ作成を支援するツールキットの開発に関する研究”，及び情報処理学会第66回全国大会における“意匠性を考慮した三次元モデル再構成”として発表したものを含む．

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工科大学メディア学部 渡辺大地専任講師には大変お世話になりました。日頃より適切な指導をして頂き、多くの適切な助言を頂きました。研究についての些細な疑問にも丁寧に相談に乗って頂き、多大なる助力を頂きました。ここに深く感謝致します。

前期中は主査をして頂き、様々な助言を頂きました東京工科大学メディア学部 故淵上季代絵教授に感謝致します。また、淵上教授の逝去にあたり、急遽主査を担当して頂くことになりました東京工科大学メディア学部 横井俊夫教授に感謝致します。

東京工科大学メディア学部 若林尚樹助教授には、副査として適切な助言を頂きました。ここに感謝致します。

東京工科大学メディア学部 宮岡伸一郎教授には、研究方針に関し多くの助言を頂きました。ここに感謝致します。

西井美甫氏には、研究内容に関して大変お世話になりました。デザイナーサイドの貴重な資料や意見を頂き、研究の方針に関しても丁寧に相談に乗って頂きました。ここに深く感謝致します。

また、研究を進めるにあたって貴重な助言をして下さり、学部及び修士過程を通じてお世話になりました和田篤氏に感謝致します。

最後に、メディア学研究科修士課程の学友諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 中野眞由美 and 西井美甫, *NIKKEI COMPUTER GRAPHICS:3D Industrial Design*, 日経コンピュータグラフィックス, 2000年2月号.
- [2] T. J. H.Hoppe, T.DeRose and W.Stuetzle, "Surface reconstruction from unorganized points," *SIGGRAPH Proceedings* , 1992.
- [3] M.Eck and H.Hoppe, "Automatic reconstruction of b-spline surfaces of arbitrary topological type," *SIGGRAPH Proceedings* , 1996.
- [4] J.D.Boissonnat, "Geometric structures for three-dimensional shape representation," *ACM Transactions on Graphics* , 1984.
- [5] H.Edelsbrunner and E.P.Mücke, "Three-dimensional alpha shapes," *Workshop on Volume Visualization* , 1992.
- [6] F. C.L.Bajaj and G.Xu, "Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3d scans," *SIGGRAPH Proceedings* , 1995.
- [7] M.Soucy and D.Laurendeau, "A general surface approach to the integration of a set of range views," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* , 1995.
- [8] G.Turk and M.Levoy, "Zipperd polygonal meshes from range images," *SIGGRAPH Proceedings* , 1994.
- [9] B.Curless and M.Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images," *SIGGRAPH Proceedings* , 1996.
- [10] 杉原厚吉, *グラフィックスの数理*, 共立出版株式会社, 1995.
- [11] 芹田陽一郎, "ポリューミング手法を用いた不規則点群からのデータからのポリゴンモデル自動再構成," 博士論文, 慶應義塾大学, 2001.
- [12] E.H.Spanier, "Algebraic topology," 1996.

- [13] 渡辺大地, “任意三角形メッシュからの特徴稜線抽出,” 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J83-D-II No.5, pp. 1344–1352, 2000年5月.
- [14] M. Garland, “Quadric-based polygonal surface simplification,” *PhD thesis, Carnegie Mellon University, School of Computer Science*, 1999.
- [15] M. Garland and P. S.Heckbart, “Surface simplification using quadric error metrics,” *SIGGRAPH 97*, pp. 209–216, 1997.
- [16] M. Garland and P. S.Heckbart, “Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics,” *Proc. IEEE Visualization’98*, pp. 264–270, 1998.
- [17] P. L. A.Lee, W.Sweldens and D.Dobkin, “Maps:multiresolution adaptive parameterization of surfaces,” *Computer Graphics(SIGGRAPH’98 Proceedings)*, pp. 95–104, 1998.
- [18] 脇田玲, “医用ラティス構造に基づく web3d モデリング,” 修士論文, 慶應義塾大学, 2001.
- [19] C.Loop, “Smooth subdivision surfaces based on triangles,” department of mathematics, University of Utah, 1987.
- [20] D.Doo and M.Sabin, “Behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points,” *Computer Aided Design*, p. 1978.
- [21] S.A.Coons, “Surfaces for computer-aided design of space figures,” *MIT*, 1964.
- [22] J.A.Gregory, “Smooth interpolation without twist constraints,” *Computer Aided Geometric Design*, 1974.
- [23] P.Bézier, “Definition numerique des courbes ed surfaces,” *Automatisme*, 1966.
- [24] H.Chiyokura, “An extended rounding operation for modeling solids with free-form surfaces,” *IEEE Computer Graphics and Application*, 1987.

- [25] H. T.Harada and H.Chiyokura, “An enhanced rounding operation between curved surfaces in solid modeling,” *CG International 90* , pp. 563–588, 1990.
- [26] C.Loop, “Smooth spline surfaces over irregular meshes,” *Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH 94)* , pp. 303–310, 1994.
- [27] 千代倉弘明, ソリッドモデリング, 工業調査会, 1985.
- [28] 渡辺大地, “Fk system.” <http://www.teu.ac.jp/aqua/earth/FK/>.

発表論文

大久保隆, 渡辺大地, “意匠設計を考慮した不規則点群からの三次元モデル再構成”, 情報処理学会第66回全国大会, 2004

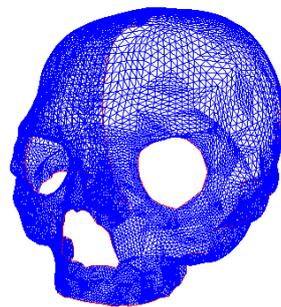
大久保隆, 渡辺大地, “3次元画像表示機能を持つ携帯電話におけるコンテンツ作成を支援するツールキットの構築に関する研究”, 情報処理学会第65回全国大会, 2003

付録

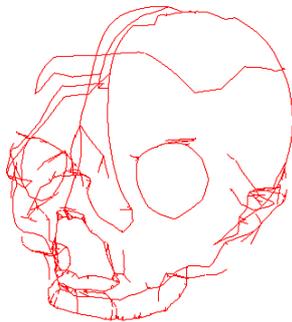
付録 A 再構成ステップの流れ図

再構成ステップ

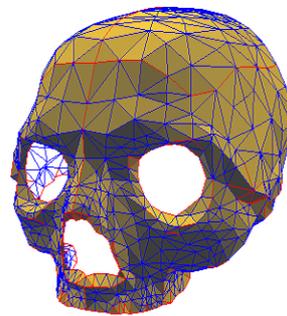
1. 初期メッシュからの特徴稜線抽出
2. 特徴稜線を反映したメッシュ最適化
3. メッシュペアリング
4. 特徴稜線を反映した曲面フィッティング



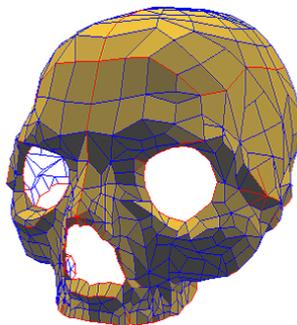
初期メッシュ



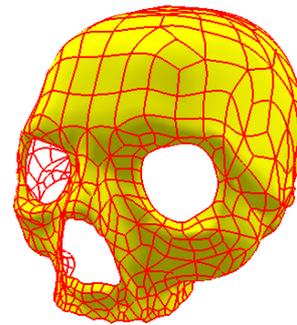
(1) 特徴稜線抽出



(2) メッシュ最適化



(3) メッシュペアリング



(4) 曲面フィッティング