

2006年度 卒業論文

3D スキャナーを用いた
モデリングデータの再構成手法

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 ゲームサイエンス
学籍番号 M0103485
佐藤 和弥

2006年度 卒業論文概要

論文題目

3D スキャナーを用いた
モデリングデータの再構成手法

メディア学部

学籍番号：M0103485

氏名

佐藤 和弥

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

3D スキャナー、3次元再構成、特徴稜線、曲面フィッティング

現在、新しい3DCGモデリング方法として、3D スキャナーから形状を測定し、測定した点群データから3次元ポリゴンモデルを生成する方法がある。数分で形状を測定し3次元ポリゴンモデルに出来、3D スキャナーの操作も容易なことから形状生成の効率化が望める。だが、測定する頂点数が多く、ポリゴンモデルが密で細かなメッシュ状態となっているため、形状編集に不向きである。この問題を解決したものとして、大久保の手法がある。大久保は形状を表す重要な要素であるキャラクターラインを重要視し、これを近似させた特徴稜線を定義している。これを再構成した3次元ポリゴンモデルに対し反映することによって、形状の特徴部を考慮した形状編集の容易な曲面モデルの構築が可能になった。しかし、曲面化において直線、鋭角部が多い3次元モデルと、曲線、曲面が多い3次元モデルの2種類にしか最適な再構成が出来ない。本研究では、特徴稜線の抽出と曲面化の拡張を行い、より柔軟な曲面モデル構築を行うことを目的とする。特徴稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線と、曲線、曲面を表す特徴稜線をパラメータ操作によって分類する。そして、直線、鋭角部を表す特徴稜線のみを反映させた曲面化を行うことで、より柔軟な曲面モデルへの構築が可能になった。また、本手法を用いて作成したツールにより、その検証実験を行った。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景・目的	1
1.2	論文内の表記	5
第2章	特徴稜線を用いた3次元モデル再構成手法	7
2.1	再構成の流れ	8
2.2	特徴稜線の定義	8
2.2.1	キャラクターライン	8
2.2.2	特徴稜線	10
2.3	特徴稜線抽出	10
2.4	再構成結果	13
2.5	問題点と曲面フィッティングの拡張	15
第3章	分類した特徴稜線を保持した曲面フィッティング	18
3.1	特徴稜線の種類分け	18
3.2	特徴稜線を分類した再構成	20
第4章	再構成結果	22
4.1	再構成手法の適用実験	22
4.2	考察	24
第5章	おわりに	26
	謝辞	28
	参考文献	29

目 次

1.1	3D スキャナーで取得した顔の 3 次元モデル	2
2.1	自動車のキャラクターライン	9
2.2	自動車の 3 次元モデル	9
2.3	曲線、曲面を多用したモデルに対する再構成結果	14
2.4	直線、鋭角部を多用したモデルに対する再構成結果	15
2.5	初期メッシュに対し抽出した特徴稜線	16
2.6	特徴稜線を保持しない曲面フィッティング	16
2.7	特徴稜線を保持した曲面フィッティング	16
3.1	角度抽出の関係図	19
4.1	大久保の特徴稜線を保持した曲面フィッティング	23
4.2	本手法での曲面フィッティング	23
4.3	大久保の手法を適応したモデルの拡大図	23
4.4	本研究の手法を適応したモデルの拡大図	23
4.5	初期メッシュ	24
4.6	本研究の手法を適応した曲面モデル	24

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景・目的

近年の 3DCG 技術の向上によって、様々な業界が 3DCG を活用している。以前からゲーム業界では 3DCG を頻繁に利用し、現在は 3DCG を多く利用してゲームを制作するのが一般的になっている。また、映画やテレビ業界等でも近年 3DCG の需要は増している。背景の一部、または全てを 3DCG で表現し、合成用ソフトで俳優の演技シーンと合成させたり、複雑で難しいアクションを俳優の代わりに 3 次元モデルでアニメーションさせる等し、実写のみでは不可能な表現が可能になった。本研究では 3DCG のモデリングについて着目している。一般的にモデリングは Maya、3dsMax といった主要のモデリングソフトを用いるが、平面やカーブ、正方形や球などの基本図形から 3 次元モデルを作成しなくてはならない。単純な形状のモデルならこの手法でも良いが、複雑な形状や巨大なモデルを制作するには膨大な制作時間がかかってしまう。また、モデリングにはモデルが 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出来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ってモデルがどのような動きをするかを直感的に理解できる能力などが必要になってくる。これらの能力やモデリング制作の経験は個人差があるため、出来上がる 3 次元モデルは制作者の能力に依存する形になってしまう。よってモデリングには制作に時間、手間がかかると同時に、初心者には敷居が高く、制作者のセンス、経験が問われてしまう。以上のことが

ら、モデリングソフトを用いた3DCGモデリング手法はある程度のスキルが必要で、精密なモデルを制作する場合膨大な時間がかかってしまう。

近年では新しいモデリング手法として、3Dスキャナーにより取得した物体の表面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ータ化する手法が注目されつつある。この手法は以前からあり、主に自動車業界で利用されていたが、3Dスキャナーが高価で他の業界ではなかなか購入できずにいたため、広く普及することは難しかった。しかし、近年の3Dスキャナーの小型化、低価格化により、その他の業界でも利用することが可能になってきた。これによって、幅広く利用可能になった3Dスキャナーを用いたモデリング手法が注目されつつある。

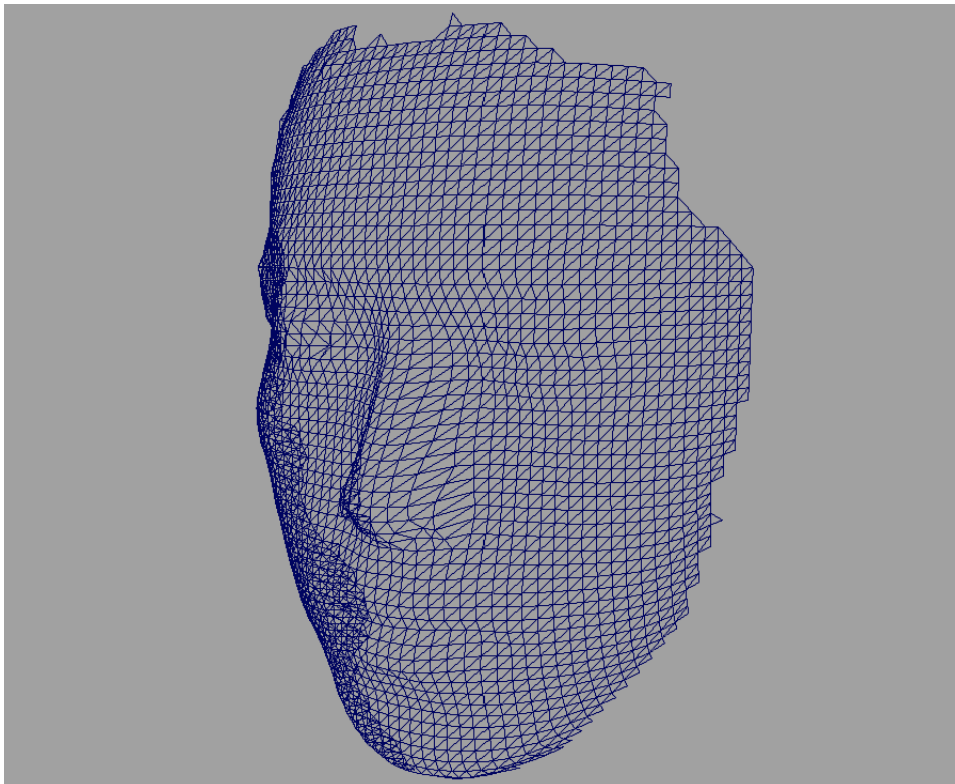


図 1.1: 3D スキャナーで取得した顔の 3 次元モデル

図 1.1 は 3D スキャナーを用いたモデリング手法で再構成された顔の 3 次元モデルである。3D スキャナーを用いると、対象物の撮影に数秒、撮影した対象物の表

面座標値から点群データにし、3次元モデルを再構成してデータ化するのに数分かかる。つまり、大抵の形状のモデリングデータを、ほんの数分で作成することが可能になる。これは、既存のモデリングソフトを利用した場合に比べ、制作時間の削減ができることが明らかである。また、現状だと作者のセンス、経験によって完成する3次元モデルに差が生じ、モデリングは熟練のCGデザイナーが作成することが多い。だが、3Dスキャナーでは専門的なスキル、知識がなくとも簡単に3次元モデルを生成することができる。さらに、3Dスキャナーの操作も容易なため、誰でも3次元モデルを作成することが可能である。以上のことから、3Dスキャナーを用いた手法はモデリングソフトを用いた手法に比べ、効率性を向上させることが出来る。3Dスキャナーを用いたモデリング手法は自動車業界だけではなく、ゲーム業界でも利用されている。まず、キャラクターの例となる人物を3Dスキャナーで撮影し、モデリングデータ化していく。その際、モデリングデータはあくまでモデルの寸法の参照としてしか使われておらず、ゲームで表示されるモデリングデータとしては利用されていない。なぜなら、3Dスキャナーで取得した点群データは、測定した頂点数が多いため、再構成した場合均一でかつ密なメッシュ状態で3次元モデルが再構成されるからである。この状態ではモデルの形状の特徴を考慮した曲面を生成できない場合が多く、再構成モデルをモデリングソフトでアニメーションさせるには扱づらい。そのためモデルを修正が容易な形状にする必要がある。これには、頂点数が多いため修正に時間がかかってしまい、モデリングソフトを用いてモデリングした場合と制作時間に大した差がない。そのため、点群データから再構成した3次元モデルをそのまま形状編集を行うのは非効率的である。ここでいう形状編集とは、頂点や曲線の制御点を操作し形状を動かすことである。すなわち、形状編集のしやすい3次元モデルとは、メッシュが密でなく、少ない頂点、曲線で形状の特徴を表している3次元モデルのことである。3Dスキャナーで測定する点群データは不規則点群というものに属する。不規則点群とは、規則性を持たないランダムな点群座標値のデータ集合である。この不規則点群から3次元モデルを再構成する手法 [1][2][3][4][5][6] は幾つか提案され

ている。これらの手法によって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出来るが、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、形状の特徴は考慮されていない。この問題を解決した手法として、大久保 [7] の手法がある。大久保は形状を表現するのに重要なアウトラインや特徴的な部位を表すキャラクターラインを重要視した。キャラクターラインを大久保が定義した特徴稜線に近似させ、それを反映させた綺麗なメッシュモデルを構築することで形状編集のしやすい曲面モデルを再構成した。また、従来の曲面モデル構築では、直線、鋭角部の箇所が曲面化され、モデルの特徴が消失する恐れがあった。大久保は曲面化にも特徴稜線を反映させることで、直線、鋭角部の箇所を保持し、形状の特徴を保った曲面モデル構築も可能にした。この手法により 3D スキャナーを用いた点群データから編集の容易な曲面モデルを生成することが可能になった。再構成されたモデルは、頂点数が少なく、大きなメッシュで形状を表現している。さらに、特徴稜線によって特徴部がきちんと残されており、特徴部の残った形状編集のしやすい曲面モデルとなっている。曲面モデル構築においては特徴稜線を保持するかしないかの 2 種類の曲面化がある。直線、鋭角を多用したモデルに特徴稜線を保持した曲面化を行うことで、直線、鋭角部を保った曲面モデルを構成し、曲線、曲面を多用したモデルには特徴稜線を保持しないことで、滑らかな曲面接続を行うことが出来る。しかし、両方が混合したモデルに対しては、直線、鋭角部を保つが曲面が滑らかに接続出来ないか、滑らかな曲面接続を行うえるが直線、鋭角部が消失するかのどちらかを妥協しなくてはならず、最適な曲面モデル構築が出来ない。そこで本研究では、特徴稜線抽出、曲面化の拡張を行い、より柔軟な曲面モデルの構築を行うことを目的とする。大久保が定義した特徴稜線をパラメータ操作で直線、鋭角部を表す特徴稜線と曲線、曲面を表す特徴稜線の 2 つに分類する。そして、曲面モデルを構築する際に前者の特徴稜線のみを反映し、アウトラインや特徴的な部位を残し形状編集のしやすい綺麗な曲面モデルを構築する。大久保の手法の詳細については次の章で述べる。

検証実験として、大久保の手法で最適な曲面構築が出来なかった直線や鋭角部

を表すキャラクターラインと曲線や曲面の流れを表すキャラクターラインが混合した3次元モデルに対して本手法を適用した。結果として、再構成したメッシュモデルから曲面モデルへと構築する際に、曲線や曲面を表す特徴稜線を反映せずに滑らかな曲面を形成することが出来た。直線や鋭角部の部分は特徴稜線が保持しているため、特徴稜線を曲面化せず、直線部、鋭角部を完全に保存することが出来、形状の特徴を残すことが可能になった。また、特徴稜線の分類は特徴稜線に接続する面の角度から分類を行った。この角度はパラメータ操作によって指定することが出来るため、柔軟な特徴稜線の分類が可能となっている。3D スキャナーを用いたモデリングデータに対し、本手法を適用することによって大久保の手法よりも柔軟な曲面構築が可能になった。モデリングソフトを用いた手法に比べ、3次元モデルの制作時間を短縮し、モデリング制作の効率向上が出来るだろう。

1.2 論文内の表記

本論文における数式表現は、基本的には Spanier の著書 [8] に準ずるものとする。

- 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 $a \cdot b$ のように表す。
- 座標値 p_i を持つ頂点位相を $\{i\}$ と表す。
- $|\overrightarrow{p_i p_j}|$ をベクトル $\overrightarrow{p_i p_j}$ のノルムとする。
- 複体 K は頂点集合 $v = \{i\} \subset K$ 、稜線集合 $e = \{i, j\} \subset K$ 、三角形面集合 $f = \{i, j, k\} \subset K$ 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。
- $\{i, j\} \subset K$ 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。

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

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

すなわち、 $norm(f)$ は三角形面 $\{i, j, k\}$ の法線ベクトルである。

第 2 章

特徴稜線を用いた 3 次元モデル再構成 手法

3D スキャナーで取得した点群データから曲面モデルへと再構成する手法として、大久保 [7] の再構成手法がある。点群データからポリゴン数削減をし再構成した 3 次元モデルから、形状編集の容易な曲面モデルの構築を行うものである。点群データから 3 次元モデルを再構成する研究は多くなされており、それらの研究によって点群データから 3 次元モデルを生成することが出来た。しかし、これらの研究では再構成した 3 次元モデルが密で細かいメッシュ状態となっているため、形状編集が難しく、形状の特徴も考慮されていなかった。また大半が 3 次元ポリゴンモデルへの再構成を目的としており、その後のポリゴンモデルから曲面モデルへと構築する過程についての研究はあまりなされていなかった。大久保は、特徴稜線と呼ばれるキャラクターラインに近似させたものを点群データから 3 次元モデルへと再構成するのに反映させた。これによりキャラクターラインを反映させた綺麗なメッシュモデルの構築が出来、編集の容易な曲面モデルを構築することが可能になる。特徴稜線の定義に関しては 2.3 で述べる。

2.1 再構成の流れ

再構成は大きく2つのステップに分かれる。まず最初のステップとして、点群データから再構成した密な3次元ポリゴンモデル(以下初期メッシュ)からキャラクターラインを特徴稜線として抽出する。次のステップで抽出した特徴稜線を反映させた曲面モデルへの構築を行う。2つ目のステップの具体的な手順は次のとおりである。特徴稜線を反映させたメッシュ最適化を初期メッシュに施し、メッシュ数を削減すると同時に編集しやすい面を再構成する [9][10][11][12]。次にメッシュペアリングと呼ばれる四角形メッシュの三角形メッシュ化を行う。これによってメッシュ数を半分に削減し、さらに編集しやすい面を構築する。最後に曲面フィッティングを行い、形状編集のしやすい曲面モデルへと構築する [13][14][15]。本研究では特徴稜線の分類を行うため、特徴稜線抽出については詳しく述べる。2つ目の曲面モデル構築のステップについては参考文献を参照してほしい。

2.2 特徴稜線の定義

大久保は形状を表現する重要な要素としてキャラクターラインに着目した。初期メッシュに対しキャラクターラインに近似させた特徴稜線を幾何学的に抽出して再構成するモデルに反映させれば、形状を保ったままの再構成が可能になると考えた。本章では、キャラクターラインと大久保が定義した特徴稜線の詳細を述べ、それらの定義を述べる。

2.2.1 キャラクターライン

キャラクターラインは一般的にデザイナー用語として使われており、2つの意味がある。1つは物体の形状の特徴を表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、車体の特徴部を表す曲線を指してキャラクターラインと呼ぶ。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。もう1つは、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表す曲線の意味で用いる。モデリングの際に、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、細部における特徴部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。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、大久保の定義したキャラクターラインを以下に示す。

- 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

本研究でも上記のようにキャラクターラインを定義する。

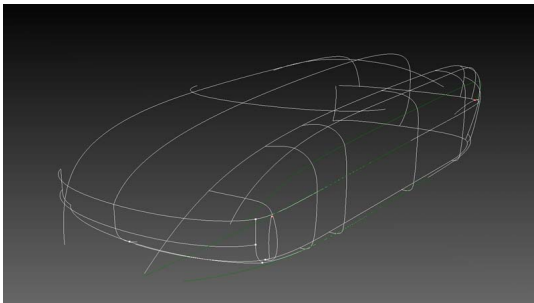


図 2.1: 自動車のキャラクターライン

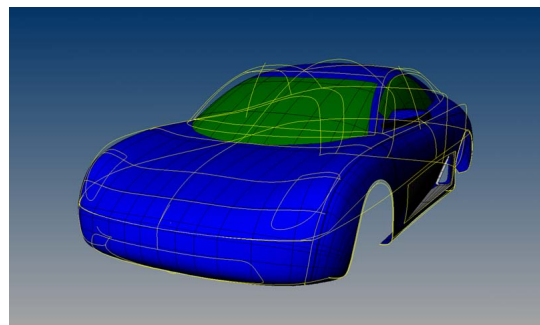


図 2.2: 自動車の3次元モデル

図 2.1 は自動車のキャラクターライン、図 2.2 はキャラクターラインからモデリングした自動車の3次元モデルである。自動車の特徴であるフォルムやボディーの曲面の流れがキャラクターラインとなっており、それを基にモデリングをしていることが分かる。

2.2.2 特徴稜線

形状の特徴を表す稜線を指す。大久保は特徴稜線をキャラクターラインと近似して表現させ、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した。初期メッシュからキャラクターラインを抽出出来れば、これを反映させることによって形状の特徴が残った形状編集のしやすい曲面モデルを生成することが出来ると考えた。キャラクターラインが表す形状の特徴は主に曲率が大きくなっている部分、つまり鋭角な部位に表れる傾向がある。曲率は数学的に求めることが出来るため、キャラクターラインを数学的に近似して求めることも可能である。以下に大久保の定義した特徴稜線を述べる。

- 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
- 形状の意匠的特徴部とそれ以外の境界を表す稜線

大久保は初期メッシュから上記定義によって抽出した特徴稜線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た。これによって、形状の特徴部を考慮した曲面モデルが生成される。本研究でも上記のように定義する。

2.3 特徴稜線抽出

特徴稜線抽出方法は、渡辺ら [16] の手法を改良している。大久保はキャラクターラインを近似するために局所的な特徴抽出が重要なため、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、局所的な特徴部がよりの確に抽出できる。評価関数として、頂点連続性、近似ガウス曲率、隣接面角度を用い、これらの評価関数それぞれに重み付けの実数パラメータを与え、さらにユー

ザ一側で直接特徴稜線を指定できるようにし、特徴稜線を抽出している。以下に評価関数の詳細について述べる。

$$E(e, W) = w_v E_v(e) + w_{gauss} E_{gauss}(e) + w_{poly} E_{poly}(e) + E_{select}(e) \quad (2.1)$$

式(2.1)において、 E_v 、 E_{gauss} 、 E_{poly} 、 E_{select} は稜線の評価関数を得る関数であり、 $W = \{w_v, w_{gauss}, w_{poly}\}$ 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 $E_v(e)$ は式(2.2)のようにして求める。

$$E_v(e) = 2 + \min_k \frac{\overrightarrow{p_i p_j} \cdot \overrightarrow{p_i p_k}}{|\overrightarrow{p_i p_j}| \cdot |\overrightarrow{p_i p_k}|} + \max_l \frac{\overrightarrow{p_j p_i} \cdot \overrightarrow{p_j p_l}}{|\overrightarrow{p_j p_i}| \cdot |\overrightarrow{p_j p_l}|} \quad (2.2)$$

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 G1 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形状の特徴を持つ部位を判別することが出来る。

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 $E_{gauss}(e)$ は式(2.3)のように求める。

$$E_{gauss}(e) = \frac{a_0}{S_0} + \frac{a_1}{S_1} \quad (2.3)$$

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

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特徴部を判別する。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、 $E_{poly}(e)$ は式 (2.4) のようにして求める。

$$E_{poly}(e) = 1 + norm(i, j, k_0) \cdot norm(j, i, k_1) \quad (2.4)$$

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。

$$E_{select}(e) = \begin{cases} 1 & \text{if selected} \\ 0 & \text{not selected} \end{cases} \quad (2.5)$$

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、ユーザーの求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、ユーザーがツール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、ユーザ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。モデル、ユーザーにより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。

2.4 再構成結果

曲線や曲面の流れによるキャラクターラインが表れた3次元モデルと、直線や鋭角を多用したキャラクターラインが表れた3次元モデルの2種類の3次元モデルに対して大久保の手法を適用した。以下に実験結果を示す。

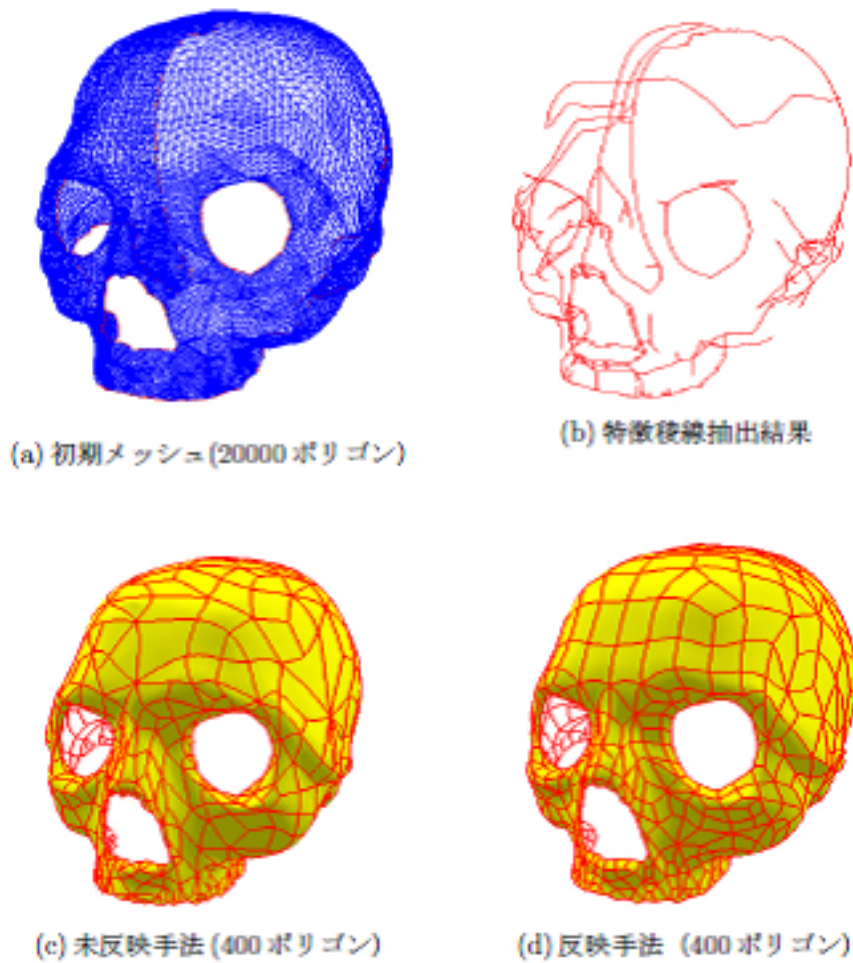


図 2.3: 曲線、曲面を多用したモデルに対する再構成結果

図 2.3 は頭蓋骨の 3 次元モデルに対して適用した結果である。(a) は初期メッシュ、(b) は抽出した特徴稜線、(c) は特徴稜線を反映しない再構成結果、(d) は特徴稜線を反映させた再構成結果である。抽出した特徴稜線によって、形状のアウトラインや特徴を考慮した形状編集のしやすい曲面モデルが再構成されたことが分かる。



図 2.4: 直線、鋭角部を多用したモデルに対する再構成結果

図 2.4 は直線や鋭角部を多用した 3 次元モデルに対し、左図は特徴稜線を保持しない曲面フィッティングを行った 3 次元モデル、右図は特徴稜線を保持した曲面フィッティングを行った 3 次元モデルである。左図では、曲面フィッティングにより直線や鋭角部も曲面化されその特徴が失われている。一方、右図では直線や鋭角部は特徴稜線として抽出され、それを保持し座標値を固定したため、特徴を失わず適切な曲面化が行われている。

2.5 問題点と曲面フィッティングの拡張

大久保の手法により、点群データから形状編集のしやすい曲面モデルを再構成することが可能になり、形状の特徴もある程度保持することが出来た。しかし、この手法には改善すべき点がある。そのうちの 1 つとして、曲面フィッティングの柔軟な対応がある。先に挙げたとおり、大久保の手法では特徴稜線を保持するかしないかの 2 種類の曲面フィッティングがある。しかし、この曲面フィッティングでは直線、鋭角を多用した 3 次元モデル、曲線や曲面を多用した 3 次元モデルにしか適応できず、両方が混合した 3 次元モデルに対しては適切な曲面フィッティングが行えない。

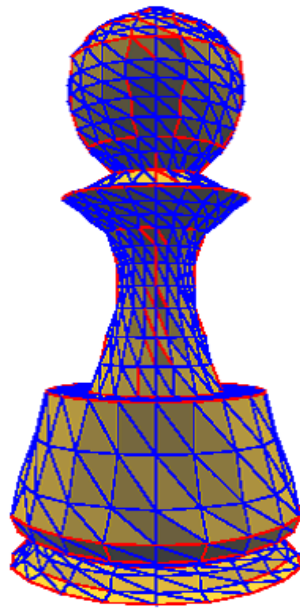


図 2.5: 初期メッシュに対し抽出した特徴稜線

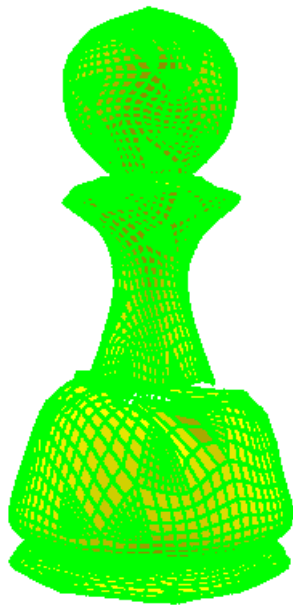


図 2.6: 特徴稜線を保持しない曲面フィッティング

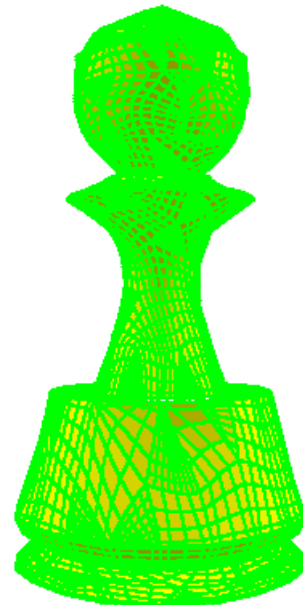


図 2.7: 特徴稜線を保持した曲面フィッティング

図 2.5 は直線、曲線が混合したチェスの駒の 3 次元モデルに対して特徴稜線抽出

を行ったもの、図 2.6 は特徴稜線を反映させ再構成を施し、特徴稜線を保持しない曲面フィッティングを行った曲面モデル、図 2.7 は特徴稜線を保持した曲面フィッティングを行った曲面モデルである。図 2.5 で赤くなっている稜線が特徴稜線として抽出したものである。抽出した稜線の箇所は、下部の鋭角部分と上部の曲面の一部である。この特徴稜線を反映させ再構成し曲面化したものが図 2.6 と図 2.7 である。図 2.6 は特徴稜線を保持せず曲面フィッティングを行った。上部の球体部分は滑らかな曲面を形成している。しかし、下部の鋭角部を多用した箇所は特徴稜線も曲面フィッティングによって曲面化されているため、鋭角部が消失している。一方、図 2.7 は特徴稜線の座標値を固定して曲面フィッティングを行ったため、下部の鋭角部はその特徴を残したまま曲面化されている。だが、上部の球は一部の稜線が特徴稜線として固定されているため、箇所によっては滑らかな曲面の接続が出来ていない。このように直線、曲線が混合した 3 次元モデルに対しては曲面フィッティングで鋭角部を残すか滑らかな曲面接続をするかのどちらかを妥協しなくてはならず、適切な曲面フィッティングが行えない。そこで本研究では、特徴稜線抽出と曲面フィッティングを拡張し、再構成した 3 次元モデルに対してより柔軟な曲面フィッティングを行えるようにする。詳細は次の章で述べる。

第 3 章

分類した特徴稜線を保持した曲面 フィッティング

大久保 [7] の曲面フィッティングは、特徴稜線を保持するかしないかの 2 種類しかなかった。これでは、直線、鋭角部を多用した 3 次元モデルか、曲線、曲面を多用した 3 次元モデルだけにしか適切な曲面フィッティングが行えない。そこで、本研究では大久保の特徴稜線抽出と曲面フィッティングを拡張していく。特徴稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線と曲線、曲面を表す特徴稜線に分類し、曲面フィッティングで直線、鋭角部を表す特徴稜線のみを反映させた曲面フィッティングを施す。これにより、曲線、曲面部位は滑らかな曲面を形成し、直線、鋭角部はその特徴を残した曲面モデルへと構築させることが出来る。

3.1 特徴稜線の種類分け

大久保は抽出した特徴稜線に対し、直線、鋭角部、曲線などの特徴稜線を特に分類せず、全て同一の特徴稜線としていた。メッシュ最適化やメッシュペアリングの工程では特に問題は無いが、曲面フィッティングでは問題が生じてしまう。曲面フィッティングの際に保持したい特徴稜線は、直線、鋭角部を表した特徴稜線であることは前章で明らかである。本研究では特徴稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線と曲線、曲面を表す特徴稜線と分類する。そして直線、鋭角部を表す特徴稜線

のみを曲面フィッティングに反映させる。これにより、直線、鋭角部は残しつつ、曲線、曲面の部位が滑らかな曲面を形成出来るようになる。直線、鋭角部を表す特徴稜線の傾向として、その稜線に接続する面の角度が小さい傾向にある。そこで分類する方法として、特徴稜線に接続する左右の面の接続角度の値を求め、角度の小さい稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線として分類する。角度を求める流れは以下のとおりである。

1. 抽出した特徴稜線を参照する。
2. 特徴稜線に接続する2つの面を参照する。
3. 2つの面のそれぞれの法線ベクトルを参照する。
4. 法線ベクトルの内積を求める。
5. 求めた法線ベクトルの内積から特徴稜線の接続角度を求める。

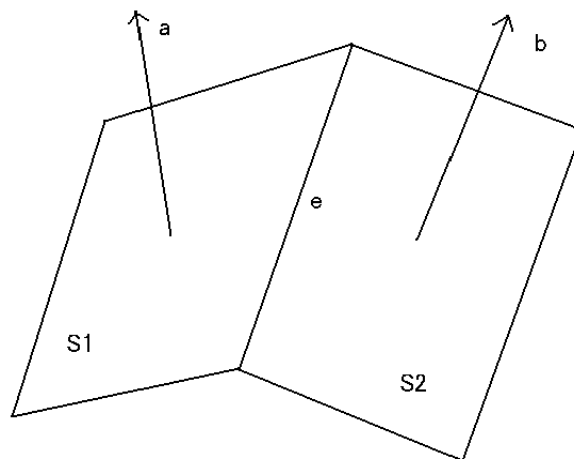


図 3.1: 角度抽出の関係図

図 3.1 は特徴稜線とそれに接続する面の関係図である。特徴稜線 e に接続する2つの面 $S1$ 、 $S2$ がある。これらの法線ベクトル a 、 b の内積を求め、求めた法線ベ

クトルの内積から特徴稜線の接続角度を得る。法線ベクトルの内積角度を求める式は次のようになる。

$$\theta = \arccos(\vec{a} \cdot \vec{b}) \quad (3.1)$$

得た法線ベクトルの内積に対し、 \cos の逆関数である \arccos を用いて内積角度をラジアンで求めた。法線ベクトルの内積角度が大きいと、特徴稜線の面接続角度は小さい傾向にある。法線ベクトルの内積角度にしきい値を設け、その値より大きい内積角度をもつ特徴稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線、小さい内積角度をもつ特徴稜線を曲線、鋭角部を表す特徴稜線として分類した。また、モデルによって特徴稜線を分類する面接続角度の値が異なることがある。そこで、法線ベクトルの内積角度のしきい値をパラメータによってユーザーが設定するようにし、どのような3次元モデルに対しても柔軟な特徴稜線分類が施せるようにした。

3.2 特徴稜線を分類した再構成

本研究での再構成の流れは大久保の再構成の流れを元に行う。

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) 特徴稜線の分類
 - (d) 直線、鋭角部の特徴稜線を反映した曲面フィッティング

まず、最初のステップで初期メッシュからキャラクターラインに近似した特徴稜線を抽出する。評価関数のしきい値により、柔軟な特徴稜線を抽出出来るため、どのような3次元モデルにも適切な抽出が行える。以降のステップで抽出した特

徴稜線を反映させた曲面モデルへの構築を行う。まず、特徴稜線を反映させたメッシュ最適化を初期メッシュに対して行う。初期メッシュは密で細かなメッシュ状態であるため、形状編集が困難であり、メッシュ数の膨大な多さによって、曲面数も多くなっている。そこで、メッシュ最適化を施しメッシュ数を削減して、同時に編集しやすい面を構築する。次にメッシュペアリングを行い、メッシュ数を約半分にするとともに、さらに編集しやすい面にしていく。最後に曲面フィッティングを行うが、本手法ではその前に特徴稜線の分類を行う。最初のステップで抽出した特徴稜線に対し、接続する面の角度から直線、鋭角部を表す特徴稜線、曲線、曲面を表す特徴稜線と2つに分類する。そして直線、鋭角部を表す特徴稜線のみを反映させた曲面フィッティングを行う。

第 4 章

再構成結果

本章では、前章で提案した特徴稜線抽出、曲面化の拡張を行った再構成手法をツールで実装し得た結果を示す。2種類のキャラクターラインを持つ3次元ポリゴンモデルに再構成を施し、その結果について考察する。実装においては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[17]を用いてツールを作成した。

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、大久保の手法で最適な再構成が出来なかった直線、鋭角部を表すキャラクターラインと曲線、曲面を表すキャラクターラインが混合した3次元ポリゴンモデルに対し、本手法を適用した。以下に実験結果を示す。

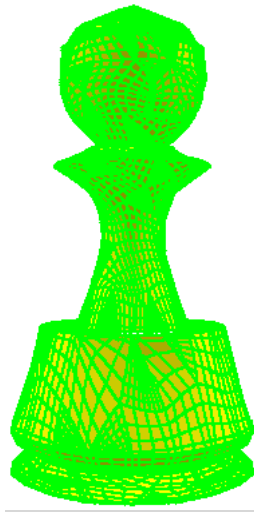


図 4.1: 大久保の特徴稜線を保持した曲面
フィッティング

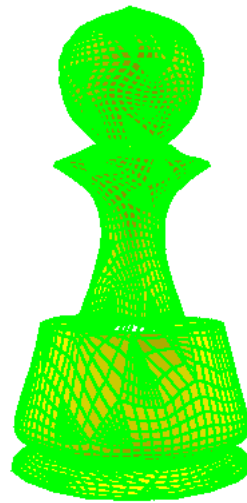


図 4.2: 本手法での曲面フィッティング

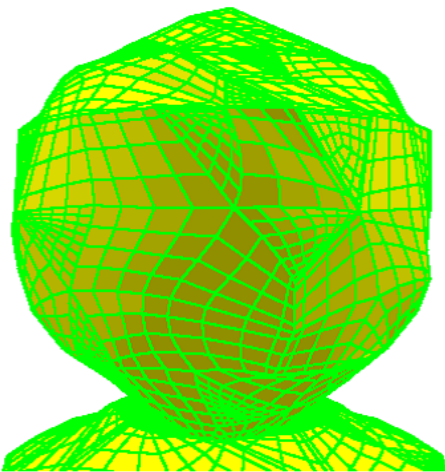


図 4.3: 大久保の手法を適応したモデルの
拡大図

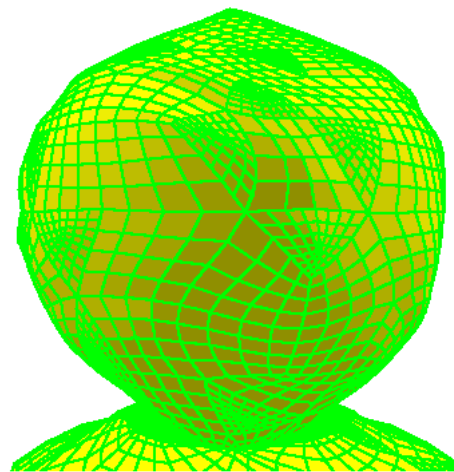


図 4.4: 本研究の手法を適応したモデルの
拡大図

図 4.1 は大久保の手法によって特徴稜線を保持した曲面フィッティングを行った曲面モデル、図 4.2 は本手法による直線、鋭角部の特徴稜線のみを反映させた曲面フィッティングを行った曲面モデル、図 4.3、4.4 はそれぞれの手法を適応した曲面

モデルの上部の球体の部分を拡大したものである。図 4.1 では、全ての特徴稜線を保持し曲面フィッティングを行ったため、下部の直線、鋭角部は綺麗に残っているものの、上部の球体の部分が滑らかな曲面の接続が出来てない。図 4.2 では、特徴稜線を分類し、直線、鋭角部を表す特徴稜線のみを保持して曲面フィッティングを行ったため、下部の特徴部を残しつつ、上部の球体は滑らかな曲面を形成している。

4.2 考察

本研究では、大久保の手法に対し特徴稜線抽出、曲面フィッティングの拡張を行い、大久保の手法よりもより柔軟な曲面モデルの構築が可能になった。しかしこの拡張にはまだ問題がある。本研究は特徴稜線に接続する面の接続角度の値から特徴稜線の分類を行った。これにより、直線、鋭角部の特徴を残し、曲線、曲面の部位は滑らかな曲面接続が可能になった。だが、面接続角度が大きい場合でも、その稜線が曲面フィッティングで保持したい特徴稜線の場合もある。簡単な例として以下のものがある。

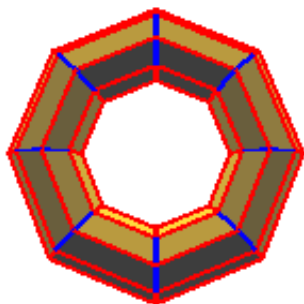


図 4.5: 初期メッシュ

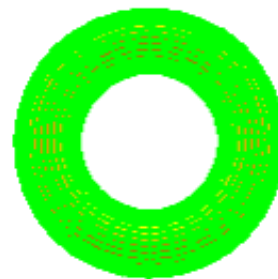


図 4.6: 本研究の手法を適応した曲面モデル

図 4.5 は正八角形の 3 次元モデルの初期メッシュ、図 4.6 はそれを本手法で曲面モデルへと再構成したモデルである。本手法では、面接続角度の値によって曲面

フィッティングで保持したい特徴稜線か否かを判断した。しかし、図 4.5 のように面接続角度が大きく、かつ曲面フィッティングで保持したい特徴稜線が存在する場合がある。そのような 3 次元モデルに対して本手法を適用すると、図 4.6 のようにその特徴稜線も曲面フィッティングによって曲面化されるため、形状の特徴が失われてしまっている。本手法によって、直線、鋭角部の形状の特徴のみを考慮した曲面フィッティングは可能になったが、面接続角度が大きくかつ曲面フィッティングで保持したい特徴稜線は曲面化されてしまうという課題がある。そのため、これをいかにして判別し、曲面フィッティングに反映させるかが、より形状の特徴を考慮し形状編集しやすい曲面モデルを生成するのに関わってくる。

第 5 章

おわりに

本論文では、大久保 [7] の再構成手法を拡張し、再構成した 3 次元ポリゴンモデルに対しより柔軟で適切な曲面モデルの構築を施せるようにした。大久保の手法は、3D スキャナーによって取得した点群データから再構成した 3 次元モデル、密で細かいメッシュによって構成されている 3 次元ポリゴンモデルに対し、形状編集が容易で形状の特徴を保った曲面モデルの生成を実現した。形状の特徴を表すキャラクターラインに着目し、これを特徴稜線に近似した。再構成でこれを反映させることにより、形状の特徴を考慮した編集の容易な曲面モデルを生成した。しかし、曲面フィッティングにおいて特徴稜線を保持するかしないかの 2 種類の曲面フィッティングしか行えず、直線、鋭角部を多用したキャラクターラインを持つモデルか、曲線、曲面を多用したキャラクターラインを持つモデルの 2 つにしか最適な曲面モデル構築が施せなかった。本研究は、大久保の手法の特徴稜線抽出、曲面フィッティングの拡張を行った。初期メッシュから抽出した特徴稜線に対し、その稜線に接続する面の接続角度を求めた。この接続角度が小さい稜線を直線、鋭角部を表す特徴稜線、大きい特徴稜線を曲線、曲面を表す特徴稜線として分類し、直線、鋭角部を表す特徴稜線のみを曲面フィッティングに反映した。これにより、どのような 3 次元ポリゴンモデルに対してもより柔軟な曲面モデル構築が可能になった。

検証実験として、直線、鋭角部を多用したキャラクターラインと曲線、曲面を多

用したキャラクターラインが混合した3次元モデルに対し本手法を適応した。その結果、直線、鋭角部の特徴は残され、曲線、曲面の部分が滑らかな曲面接続がされた曲面モデルを生成することが出来た。本手法を3Dスキャナーを用いたモデリングデータに適用することにより、特徴部を考慮し形状編集がしやすい曲面モデルへと構築が出来、形状編集が行える。

本手法の課題として、面接続角度が大きく、かつその3次元モデルの特徴部を表す特徴稜線をどのようにして保持するかがある。現状では、この特徴稜線は曲線、曲面を表す特徴稜線として分類してしまう。その結果、曲面フィッティングで保持されず曲面化されてしまい、形状の特徴が考慮されずにいる。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工科大学メディア学部 渡辺大地講師、山路和紀講師には、多大な助言とご指導を頂き、ここに深く感謝致します。

東京工科大学メディア学部 宮岡伸一郎教授には3D スキャナーを使わせて頂き、ここに感謝致します。

東京工科大学大学院メディアサイエンス専攻博士後期課程 竹内亮太氏には、研究やプログラムに対する助言を頂き、ここに感謝致します。

最後に励ましあい、研究の相談に乗って頂いた同研究室の学部生、院生の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] T.J.Hoppe, T.DeRose and W.Stuetzle, "Surface reconstruction from unorganized points", SIGGRAPH Proceedings, 1992.
- [2] M.Eck and H.Hoppe, "Automatic reconstruction of b-spline surfaces of arbitrary topological type", SIGGRAPH Proceedings, 1996.
- [3] J.D.Boissonnat, "Geometric structures for three-dimensional shape representation", ACM Transactions on Graphics, 1984.
- [4] F.C.L.Bajaj and G.Xu, "Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3d scans", SIGGRAPH Proceedings, 1995.
- [5] H.Edelsbrunner and E.P.Mucke, "Three-dimensional alpha shapes", Workshop on Volume Visualization, 1992.
- [6] 芹田陽一郎, "ボ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.
- [7] 大久保 隆, "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, 東京工科大学修士論文, 2005.
- [8] E.H.Spanier, "Algebraic topology", 1996.

- [9] M.Garland, Quadric-based polygonal surface simplification, PhD thesis, Carnegie Mellon University, School of Computer Science, 1999.
- [10] M.Garland and P.S.Heckbart, Surface simplification using quadric error metrics, SIGGRAPH'97, pp.209-216, 1997.
- [11] M.Garland and P.S.Heckbart, Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics, Proc.IEEE Visualization'98, pp.264-270, 1998.
- [12] P.L.A.Lee, W.Sweldens and D.Dobkin, Maps:multiresolution adaptive parameterization of surfaces, Computer Graphics, pp.95-104, 1998.
- [13] 脇田玲, 医用ラティス構造に基づく web3d モデリング, 慶應義塾大学修士論文, 2001.
- [14] D.Doo and M.Sabin, Behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points, Computer Aided Design, 1978.
- [15] 鳥谷浩志・千代倉弘明, 3次元 CAD の基礎と応用, 共立出版株式会社, pp72-86, 1991.
- [16] 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.
- [17] 渡辺大地, Fk system. <http://www.teu.ac.jp/aqua/earth/FK/>