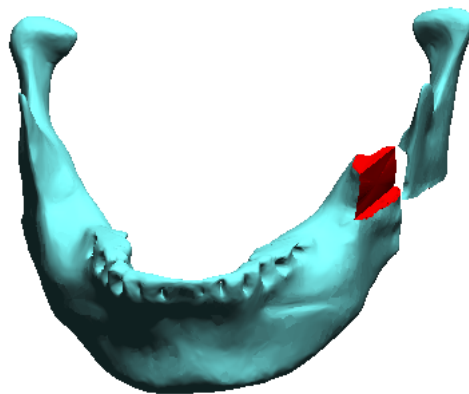


# タブレットインターフェイスを用いた ラティス構造のモデリング

## MODELING LATTICE WITH TABLET INTERFACE



2002年 1月 15日

武部 佳文

YOSHIFUMI TAKEBE

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

GRADUATE SCHOOL OF MEDIA AND GOVERNANCE

KEIO UNIVERSITY

タブレットインターフェイスを用いた  
ラティス構造のモデリング

---

現在、Web3D と呼ばれる、インターネット上で 3 次元コンピュータグラフィクスを表示する技術が注目されている。Web3D を用いることにより、ブラウザ上で 3 次元形状を自由な視点で閲覧することが可能である。Web3D は娯楽のみならず、Web 上での商取引、教材用コンテンツなどにも利用されている。

3 次元 CG を表現するために、通常 3 角形ポリゴンメッシュが使われる。3 角形ポリゴンメッシュはデータが単純であるために扱いやすく、レンダリングも高速に行うことが可能である。しかし、精密な 3 次元形状を表現する場合、多数の 3 角形ポリゴンが必要となるためデータサイズが大きくなるという欠点がある。そのため、Web3D で利用する際には多重解像度表現やラティス構造などの自由曲面表現へ変換するのが一般的である。これらの変換手法の多くは自動的にパラメータ化を行うため、ユーザの意図した位相を生成することが困難である。そのため、アニメーションやテクスチャマッピングのように、領域間の輪郭線が操作に大きく関係する処理においては、これらのモデルを直接利用することができないのが現状である。

そこで、本論文ではタブレットインターフェイスを用いたラティス構造のモデリング手法を提案する。本手法ではタブレットインターフェイスを用いて 3 角形ポリゴンメッシュに特徴を入力し、その結果を反映したラティス構造をモデリングする。これにより、ユーザは目的に応じたパッチネットワークと制御格子の構築が可能になる。本研究では以上の操作を計算機上の実装し、その有効性を検討した。

---

キーワード

1. タブレットインターフェイス	2. 特徴入力
3. Web3D	4. 自由曲面
5. ラティス構造	

慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科

武部 佳文

---

**Modeling Lattice  
with Tablet Interface**

---

Now, the technology which is called Web3D and which displays 3-dimensional computer graphics on the Internet attracts attention. By using Web3D, it is possible to peruse 3-dimensional model with a free viewpoint on a browser. Web3D is used not only for amusement but for the commercial transaction on Web, the contents for teaching materials, etc.

In order to express 3-dimensional CG, triangle polygon mesh is usually used. It is possible to be easy to treat since triangle polygon mesh has simple data, and to also perform a rendering at high speed. However, when expressing precise 3-dimensional model, since many triangle polygons are needed, there is a fault that data size becomes large. Therefore, in case it uses by Web3D, it is common to change into multi-resolution representation or free form surface of lattice structure etc. Since many of these conversion techniques to perform parameterization automatically, it is difficult to generate the topology which the user meant. Therefore, the outline between domains cannot use these models directly in processing important for operation.

This paper presents method of Modeling Lattice with tablet interface. By this technique, the feature is inputted into triangle polygon mesh with tablet interface. And the modeling of the lattice reflecting the result is carried out. Thereby, users can build the patch network and control lattice according to the purpose. We implement this operation on computer and discuss its availability.

---

Key Words

1. Tablet Interface	2. Input Character
3. Web3D	4. Free Form Surface
5. Lattice Structure	

Keio University Graduate School of Media and Governance

Yoshifumi Takebe

---

# 目次

1. はじめに	1
1.1 Web3D	2
1.2 3次元形状の自由曲面化と問題点	2
1.3 タブレットインターフェイスを用いたラティス構造のモデリング	3
1.4 論文の構成	4
2. 関連研究	5
2.1 ラティス構造	6
2.1.1 輪郭線	6
2.1.2 双3次 Gregory パッチの内挿	8
2.2 3角形ポリゴンメッシュのラティス化	10
2.2.1 稜線除去	10
2.2.2 QEMに基づくモデルの簡略化	10
2.2.3 QEMに基づく曲面フィッティング手法	11
2.3 曲面上の局所変形	14
3. 特徴入力とラティス構造の生成手法	15
3.1 特徴線決定	16
3.1.1 取得した面に属する稜線列	16
3.1.2 入力線列の近傍の稜線列	17
3.1.3 近傍の稜線列を利用した特徴線決定	18
3.1.4 特徴領域を元に面分割して生成された稜線列	20
3.2 特徴線によるモデルの切断	24
3.3 ラティス化	25
3.3.1 特徴線の指定による重み付き QEM	25
3.3.2 4角形化	27
3.3.3 特徴線を保存した4角形化	30
4. 評価と考察	31
4.1 編集を考慮したラティス化	32
4.2 医用モデルのラティス化	34
4.2.1 頭部モデルのラティス化	34

4.2.2	下顎骨モデルのラティス化と切断 . . . . .	37
5.	結論と今後の展望 . . . . .	42
5.1	結論 . . . . .	43
5.2	今後の展望 . . . . .	43

## 目次

2.1	Doo と Sabin の細分割操作	6
2.2	$P'$ の求め方の例	7
2.3	輪郭線の制御線の求め方の例	8
2.4	双 3 次 Gregory パッチの内挿	9
2.5	稜線除去	10
2.6	頂点 $V$ 近傍の参照点の抽出	12
2.7	オリジナルモデル (上) と生成された曲面モデル (下)	13
2.8	局所的に変形した曲面	14
3.1	稜線列の移動	17
3.2	稜線列の移動	18
3.3	接続されていない頂点同士の連結	19
3.4	面分割による特徴線生成と面分割	21
3.5	面分割	23
3.6	モデルの切断	24
3.7	特徴線指定による重み付き QEM	26
3.8	3 角形面の内挿と 4 角形面の内挿	27
3.9	3 角形同士のペアリング	28
3.10	1 つの評価関数だけでは検知できない 3 角形のペア	29
3.11	特徴線を保存した 4 角形化	30
4.1	オリジナルモデル	32
4.2	特徴線生成	32
4.3	ラティスの特徴線編集	33
4.4	CT データを元に生成した頭部モデル	35
4.5	特徴入力をせずにラティス化したモデル	35
4.6	特徴入力をしてラティス化したモデル (非 4 角形化)	36
4.7	特徴入力をしてラティス化したモデル (4 角形化)	36
4.8	下顎骨切断	37
4.9	オリジナルの下顎骨モデル	38
4.10	切断せずにラティス化した下顎骨モデル	38
4.11	ラティス化後に切断した下顎骨モデル (非四角形化)	39
4.12	ラティス化後に切断した下顎骨モデル (四角形化)	39

# 第 1 章

## はじめに

## 1.1 Web3D

1960年代に登場した3次元コンピュータグラフィックス(3次元CG)を扱う技術は、ハードウェア、ソフトウェアの急激な進歩とともに大きな発展を見せている。3次元CGは娯楽、工業、医療、教育など様々な分野で活用されている。また、高速なPCが一般に普及し、ブロードバンドの時代を目前とした現在、インターネット上で3次元CGを扱う技術であるWeb3Dが注目されている。1995年に登場したVRML(Virtual Reality Modeling Language)は、表示品質の低さ、膨大なデータサイズなどにより普及しなかった。しかし、近年のインタラクティブグラフィックスの技術革新により、形状表現やレンダリングの品質が格段に向上した[39]。このような流れを受け、Web3Dの標準化団体であるWeb3DConsortium[30]は次世代のWeb3D標準言語としてX3D(eXtensible 3D)の仕様決定を進めている。

Web3Dは、人々の関心を集めるメディアとしての大きな可能性を持っており、多くの企業がその技術の利用を検討している。既にWeb3D技術を用いたEコマースを行っている企業もあり、自社製品を3次元CGによって実写のように表現したり、あるいはインタラクティブに変化させるなど、積極的に広告活動に利用している。また、多くの研究者がWeb3Dの技術開発を行っている[5][11][25][31]。既に高い完成度を持ち、実際に使われている技術や、研究段階だが魅力あるアイデアで将来性を期待される技術など様々有り、今後どの技術、規格が生き残っていくか注目されている。

医療分野でもWeb3D技術を用いたコンテンツが多く公開されるようになった。これまでもWeb上での医療コンテンツは存在したが、膨大なデータを用いたコンテンツは公開が困難であった。CTやMRIのデータから生成された人体の3次元モデル[10][22]は、精密な形状を3角形ポリゴンメッシュによって表現するため、莫大なデータ量を必要としたことなどが原因である。しかし、データの圧縮技術やブロードバンドの普及などにより、膨大なデータサイズの医療コンテンツのWeb上で利用可能になった。その結果、精密な人体の3次元モデルなどもWeb上での公開が可能となり、医学の教育分野でも実測データを元に作成された3次元モデルの利用が容易になった。また、医療コンテンツ作成のための研究も多く発表されている[29][24][34][37]。

## 1.2 3次元形状の自由曲面化と問題点

通常3次元CGを表現するために、3角形ポリゴンメッシュが使われる。3角形ポリゴンメッシュはデータが単純であるために扱いやすく、レンダリングも高速に行うことが可能である。しかし、精密な3次元形状を表現する場合、多数の3角形ポリゴンが必要となるためデータサイズが大きくなるという欠点がある。3角形ポリゴンメッシュ表現に基づ



く形状データを Web3D で利用する際は、データサイズを削減するために多重解像度表現 [2][6][14][19][21][23] や自由曲面表現 [1][3][13][36] へ変換するのが一般的である [7][26][37]。精密な 3 次元形状を小さいデータサイズで表現するために、ラティス構造 [28][38] などの自由曲面を用いる形式が提案されている。自由曲面は少ないパラメータで滑らかな曲面形状を表現することが可能である。また、クライアント側のマシンのスペックに合わせて解像度を変更することも容易である。ラティス構造では精度の粗いポリゴンモデルから滑らかな曲面形状を表現することが可能である。そのため、小さいデータサイズで精度の高いモデルを表現することが可能である。

3 角形ポリゴンで構成されたモデルをラティス構造に変換するための手法を林ら [37] が提案している。林らは元の 3 角形ポリゴンメッシュを QEM[9] により簡略化する。その際、定義される曲面形状を元のモデルに近似するために、最適な頂点座標を計算する。また、バウンディングボックスを用いた領域指定により、局所的に精度を調整することも可能である。しかし、簡略化後のモデルの面は全て 3 角形となるため、Gregory パッチを内挿する際に全ての面を 4 角形に分割する必要がある。そのため余分な曲面化計算が必要になるという問題がある。また、簡略化後の制御格子の形状の予想が困難なため、生成されるモデルに対する形状編集に適さない。

また、領域指定の方法にも問題がある。林らは領域指定にバウンディングボックスを用いるため、細かい領域指定が困難である。一方、Krishnamurthy ら [17] は 3 次元モデル上に領域指定をして自由曲面に変換する手法を提案した。しかし、この手法では自由曲面の 1 つ 1 つをピックして形状を定義する必要があり、モデルを完成させるまでのユーザの負担が大きくなる。

これらの理由により、モデルに対して容易に特徴を入力し、ユーザの期待する位相構造を持つモデルを生成する技術が重要となる。また、特徴を入力した部位の精度を調整することにより、重要な特徴を保持しながら無駄なデータを削減する手法が重要となる。

### 1.3 タブレットインターフェイスを用いたラティス構造のモデリング

そこで本論文ではタブレットインターフェイスを用いて局所的に精度を調整したラティス構造を生成する手法を提案する。

本手法の手順は以下の通りである。まず、タブレットインターフェイスを用いてモデル上に特徴として高い精度を保ちたい部位を指定する。次に入力された情報を元に簡略化によって消失させたくない稜線を指定する。この稜線を本論文では特徴線と呼ぶ。次に林らの手法を用い、3 角形ポリゴンモデルをラティス構造に変換する。本論文では、3 角形ポリゴ

ンメッシュからラティス構造への変換をラティス化と呼ぶ。この際、特徴線として指定された稜線に高い制約をかけてラティス化を行うことにより、ユーザの意図した特徴を保持したままラティス化が可能となる。最後に高い精度を必要としない3角形同士をペアリングして4角形面を生成する。

本手法により、ユーザが意図したラティス構造のモデリングが可能となる。これによりユーザは対話的に3角形ポリゴンメッシュに特徴を入力し、その特徴を損なわずに形状の簡略化が可能となる。また、3角形同士を結合して4角形にすることにより曲面化による計算負荷が軽減される。本論文で提案する手法を計算機上の実装し、その有効性を確認した。

## 1.4 論文の構成

本論分の構成は以下のとおりである。第2章では本研究の元となる研究背景について述べる。第3章ではタブレットインターフェイスを用いた特徴入力と、特徴に基づいたラティス構造の生成手法について述べる。第4章では実行例を示しながら本手法を考察し評価する。最後に、第5章では結論と今後の展望について述べる。

## 第 2 章

### 関連研究

本章では、本研究の主要な関連研究として、ラティス構造、3角形ポリゴンメッシュのラティス化、曲面形状の局所変形の解説を行う。

## 2.1 ラティス構造

本節ではラティス構造による曲面形状の生成手法について解説する。

ラティス構造では、曲面形状はラティスと呼ばれる制御格子によって定義される。曲面形状の表現には千代倉らが提案した Gregory パッチを用いる。ラティスに自由曲面を内挿するために、まず、全ての曲面の輪郭線を抽出する。次に隣り合う曲面同士が滑らかに接続するように Gregory パッチのパラメータを決定する。

以下にそれぞれの手順について詳細を述べる。

### 2.1.1 輪郭線

まず、Doo と Sabin[6] の手法により 3次元形状の面を 1回細分割する。図 2.1 に細分割操作の例を示す。

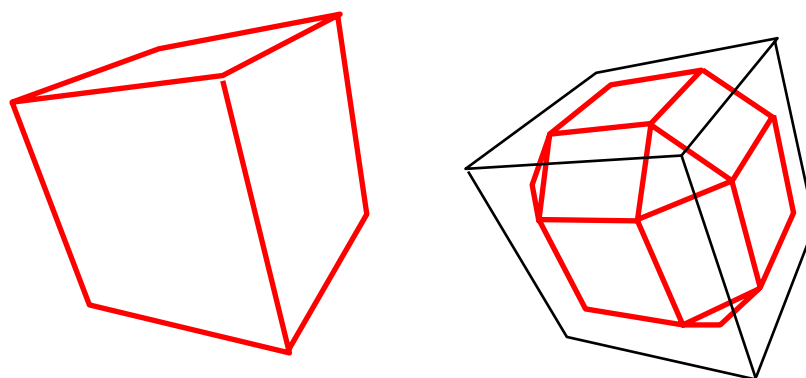


図 2.1: Doo と Sabin の細分割操作

次に生成された立体を元に自由曲面を生成するための輪郭線を3次のBézier曲線[1]として抽出する。抽出される輪郭線は元の3次元形状の稜線と1対1の対応関係を持つ。元のモデルの稜線の端点  $P$  に対応する輪郭線の端点  $P'$  は式(2.1)の通りである。

$$P' = \sum_{i \in Meshes} k_i V_i \quad (2.1)$$

$Meshes$  は  $P$  に接続する面を示す。 $V_i$  は  $P$  に接続する、ある面上に生成された頂点のうち、 $P$  に最も近い頂点である。 $k_i$  は  $V_i$  の属する面の面積と  $Meshes$  の面積の総和との比率を示す。図2.2に  $P'$  の求め方の例を示す。元のモデルの稜線の両端をそれぞれ  $P_0$ 、 $P_3$  とし、対応する輪郭線の両端をそれぞれ  $P'_0$ 、 $P'_3$  とする。 $P_0$  を含み対象となる稜線を含む2つの面の中心点を結んだ稜線の中点を  $Q$ 、 $P_3$  を含み対象となる稜線を含む2つの面の中心点を結んだ稜線の中点を  $R$  とする。輪郭線となる自由曲線の制御点  $P'_1, P'_2$  は式(2.2)の通りである。図2.3に輪郭線の制御線の求め方の例を示す。

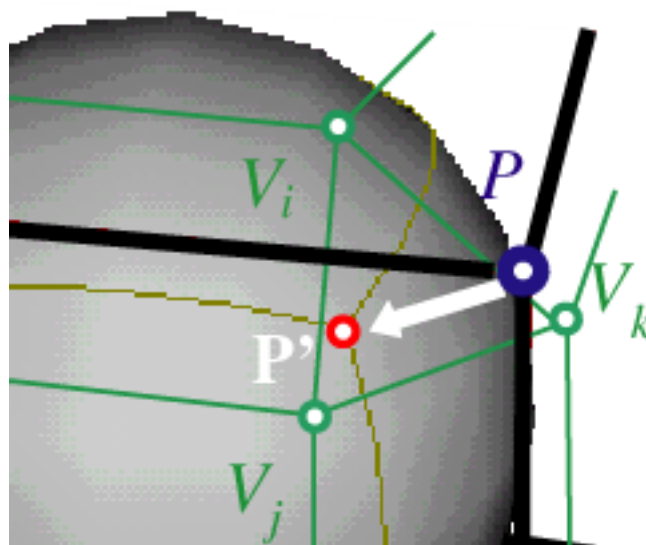


図 2.2:  $P'$  の求め方の例

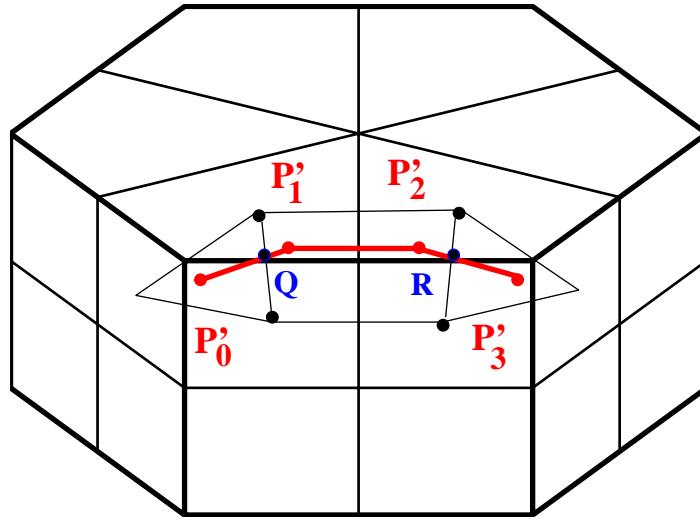


図 2.3: 輪郭線の制御線の求め方の例

$$P'_1 = \frac{4}{3}Q - P'_0, P'_2 = \frac{4}{3}R - P'_3 \quad (2.2)$$

輪郭線を  $P'_0, P'_1, P'_2, P'_3$  を制御点とする 3 次 Bézier 曲線 [1] とする

### 2.1.2 双 3 次 Gregory パッチの内挿

次に、抽出された輪郭線を基礎パッチ法 [35] を用いて自由曲面を内挿する。自由曲面には Bézier 曲面、NURBS [13] など様々なものが研究されている。いずれの自由曲面も、少数の制御ベクトルにより広域的かつなめらかな形状を表現することができる。しかし、これらの曲面は曲面間で  $G^1$  連続性を保つのが困難である。そこで、曲面間の連続性を容易に確保するために双 3 次 Gregory パッチを用いる。Gregory パッチは輪郭曲線ごとに流れベクトル関数 (Cross Boundary Derivative) を定義できるので、曲面間の連続性を容易に保つことができる。双 3 次 Gregory パッチは図 2.4 に示すように、20 個の制御点  $P_{ijk}$  ( $i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3; k = 0, 1$ ) により表現される。

双 3 次 Gregory パッチの曲面表現式は次のようになる。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) Q_{ij}(u, v) \quad (0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1) \quad (2.3)$$

ここで  $B_i^3(u)$  と  $B_j^3(v)$  は Bernstein 基底関数である。また、制御点  $P_{ijk}$  ( $i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3; k = 0, 1$ ) と  $Q_{ij}$  ( $i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3$ ) には次のような関係がある。

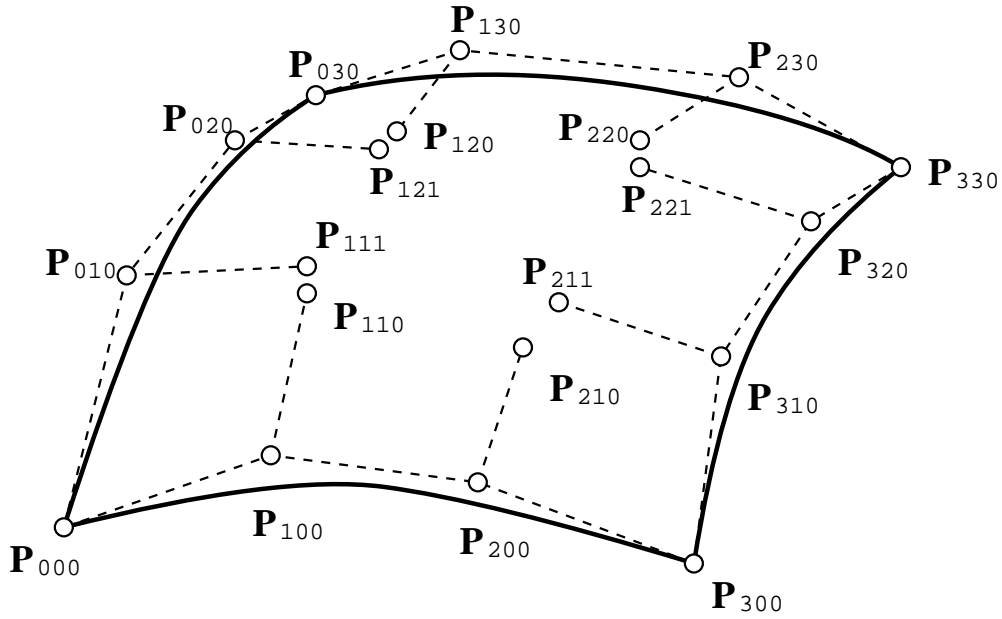


図 2.4: 双 3 次 Gregory パッチの内挿

$i \neq 1, 2$  または  $j \neq 1, 2$  の時

$$\mathbf{Q}_{ij}(u, v) = \mathbf{P}_{ij0} \quad (2.4)$$

$i = 1, 2$  または  $j = 1, 2$  の時

$$\mathbf{Q}_{11}(u, v) = \frac{u\mathbf{P}_{110} + v\mathbf{P}_{111}}{u + v}, \quad \mathbf{Q}_{12}(u, v) = \frac{u\mathbf{P}_{120} + (1-v)\mathbf{P}_{121}}{u + (1-v)},$$

$$\mathbf{Q}_{21}(u, v) = \frac{(1-u)\mathbf{P}_{210} + v\mathbf{P}_{211}}{(1-u) + v}, \quad \mathbf{Q}_{22}(u, v) = \frac{(1-u)\mathbf{P}_{220} + (1-v)\mathbf{P}_{221}}{(1-u) + (1-v)} \quad (2.5)$$

ただし  $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$  である。

## 2.2 3角形ポリゴンメッシュのラティス化

本節では、3角形ポリゴンメッシュをラティス化する手法について解説する。この手法は、林ら [37] の拡張した QEM(Quadratic Error Metrics) に基づいた簡略化手法によって稜線を除去する。QEM とは高密度な 3 角形ポリゴンメッシュと、稜線除去により簡略化した 3 角形ポリゴンメッシュとの形状の誤差に関するエネルギー最小問題を 2 次の評価関数を用いて高速に解く手法である。QEM を用いることにより、形状の精度を保ちながらデータサイズを小さくすることができる。

以下にそれぞれの手順について詳細を述べる。

### 2.2.1 稜線除去

一般にモデルの簡略化は稜線の除去の繰り返しを基本としている。図 2.5 に稜線除去の例を示す。任意の稜線  $e$  の除去する際、稜線の両端の頂点  $v_1, v_2$  を新しい頂点の位置に移動し、 $v_2$  に繋がっていた稜線と面を全て  $v_1$  に接続する。頂点  $v_1, v_2$  によって構成される稜線を  $\{v_1, v_2\}$ 、頂点  $v_1, v_2, v_3$  囲まれる面を  $\{v_1, v_2, v_3\}$  と表す。稜線  $e$  の除去で頂点  $v_2$ 、稜線  $\{v_2, v_3\}$ 、 $\{v_2, v_4\}$ 、面  $\{v_1, v_2, v_3\}$ 、 $\{v_1, v_2, v_4\}$  は除去される。

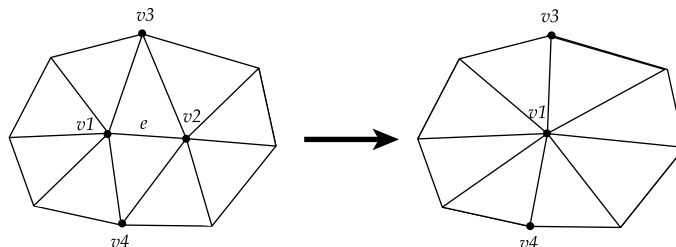


図 2.5: 稜線除去

### 2.2.2 QEM に基づくモデルの簡略化

モデルの簡略化は稜線の除去の繰り返しを基本としている。最適なモデルの簡略化を行うためには、除去しても全体への影響の少ない稜線を選んで稜線除去を行っていく必要がある。任意の稜線  $e$  を除去した場合のモデルに与える影響をコストという。Garland ら [9] は QEM と呼ばれる評価値を定め、稜線のコストを算出している。頂点  $v$  の持つ QEM は式 (2.6) のように求められる。 $v$  が属する面を  $f_j (j = 1 \dots k)$ 、面  $f$  の面積を  $area(f)$ 、面  $f$  の法



線ベクトルを  $n$  と表す。

$$\begin{aligned}
 F(v) &= \sum_{j=1}^k \text{area}(f_j) \cdot (n^T v + d)^2 \\
 &= v^T A v + 2b v^T + c
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$A$  は  $3 \times 3$  の対称行列、 $b$  は列ベクトル、 $c$  はスカラーである。これら 3 つの変数を構成する 10 個の浮動小数点が頂点  $v$  の QEM である。稜線  $e$  に対し、稜線除去を行った後の頂点  $v'$  の最適な座標を求める。最適な頂点座標  $v^{min}$  は、 $e$  の両端点  $v_1, v_2$  のコストの和を最小にする座標である。この  $v^{min}$  を式 (2.6) に代入した  $F(v^{min})$  が  $e$  のコストとなる。各頂点のコストを計算し、コストの小さいものから順に稜線除去を実行する。稜線除去を実行した後は、除去される頂点の QEM は残る頂点の QEM に足し、 $v'$  に隣接する頂点のコストを随時更新する。

### 2.2.3 QEM に基づく曲面フィッティング手法

竹内ら [26] は QEM に基づいた簡略化手法を拡張した。竹内らの手法では、簡略化後の形状がサブディビジョンサーフィスの制御格子になる。制御格子の収束曲面はオリジナルメッシュを高い精度で近似する。そのため、最適な頂点座標を求めるための評価関数を、オリジナルメッシュの頂点ではなく、オリジナルメッシュを細分割した後の頂点を評価するように定義する。また、金井 [32] による拡張では最適な頂点座標を求めるために、稜線にも QEM を持たせて近傍の頂点も評価し、得られる形状の精度を高めている。

林らは竹内らの手法を拡張したものである。林らは、簡略化後の形状がラティスになる。また、任意の領域に対する簡略化後の精度の調節が可能である。林らは、最適な頂点座標を計算するための評価関数を、稜線除去後のメッシュに対して丸め操作を行った後の曲面上の点を評価するように定義する。評価には、丸め操作後の頂点と曲面の輪郭線となる 3 次 Bézier 曲線の中点を用いる。ここで後の議論のために、稜線除去後に新しく生成される頂点  $V$  の近傍頂点と、丸め操作後の曲面上の頂点の ID 付けについて図 2.6 を用いて説明する。頂点  $V_j(1 \dots k)$  はオリジナルメッシュにおいて  $V$  に隣接する頂点である。頂点  $v_j(1 \dots k)$ ,  $p_j(1 \dots k)$  はそれぞれ、元のメッシュに対して Doo と Sabin らの手法を用いて 1 回細分割した時の頂点  $V, V_0$  に対応する頂点である。 $q_{j(1 \dots k)}$  は  $V$  と  $V_j$  に接続する 3 次 Bézier 曲線の中点である。 $V', V'_0$  はそれぞれ、 $V, V_0$  に対応する丸め操作後の曲線上の頂点である。 $t_0, t_1$  は  $V', V'_0$  に接続する 3 次 Bézier 曲線の第 2、第 3 制御点である。

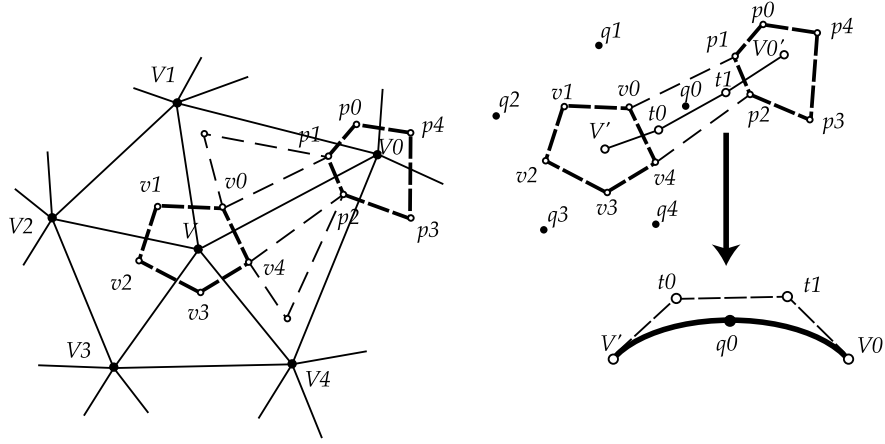


図 2.6: 頂点  $V$  近傍の参照点の抽出

林らの手法で定義される評価関数は式 (2.7) のような形式で表現される。

$$F(V) = F(V') + \sum_{j=1}^k F(q_j) \quad (2.7)$$

式 2.7 の右辺の第 1 項は、頂点  $V$  付近の形状を評価したものであり、 $V$  の持つ QEM が使用される。また第 2 項は  $V$  に隣接する稜線付近の形状を評価したものであり、稜線の持つ QEM が使用される。 $V'$ ,  $q_j$  は以下の式 (2.8)、(2.9) のように表すことができるため、これらを用いて式 (2.7) を展開し整理すると式 (2.10) のようにまとめることができる。

$$V' = \frac{7}{12}V + \frac{5}{12} \cdot \sum_{j=1}^k v_j \quad (2.8)$$

$$q_j = \frac{3}{8}V + \frac{1}{8}V_{j-1} + \frac{3}{8}V_j + \frac{1}{8}V_{j+1} \quad (2.9)$$

$$F(V) = V^T A V + 2bV^T + c \quad (2.10)$$

これは  $V$  に関する 2 次関数となる。 $F(V)$  を最小にする頂点の座標  $V^{min}$  は  $F(V) = 0$  を解くことで得られる。本手法では任意の領域に対する簡略化後の精度の調整が可能である。これは簡略化開始時に、任意領域内の QEM に適当な制約をかけることで実現する。制約の値を  $U$  とした時、任意の稜線  $e$  の QEM の値  $G^e$  は式 (2.11) で表される。

$$G^e + G^e \cdot U \quad (2.11)$$

図 2.7 に林らの手法によって生成された曲面モデルとオリジナルモデルを示す。

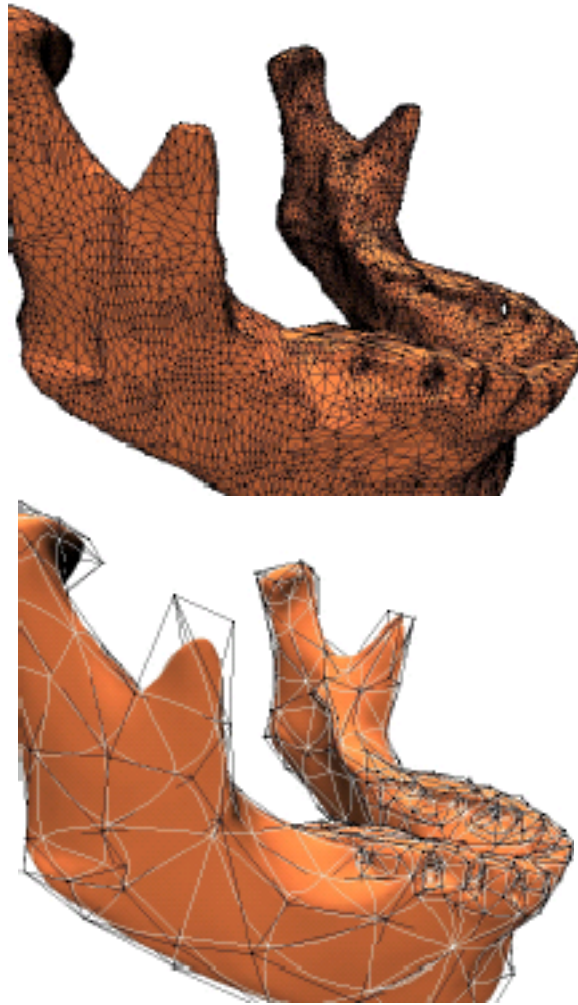


図 2.7: オリジナルモデル(上) と生成された曲面モデル(下)

## 2.3 曲面上の局所変形

本節では、曲面上に入力した線分を元に局所変形を行う手法について解説する。Khodakovsky ら [16] は、Loop[21] の細分割曲面手法によって表現される曲面を、入力した線分により再構築する手法を提案した。以下に手順について説明する。

まず、モデルの表面に線分を入力し、稜線との交点を求める。次に、入力した線分と求めた交点により、2次のスプライン曲線を定義する。最後に、定義したスプライン曲線からの距離や変形部位の形状を決定するパラメータをコントロールすることにより、局所的に曲面形状を変形することが可能となる。図 2.8 に Khodakovsky らの手法によって局所的に変形した曲面の例を示す。

この手法は曲面を自由曲線によって局所変形するため、変形部位が滑らかな形状を保つことが可能である。しかし、線によって定義される形状以外の変形が困難である。また、変形対象のモデルや生成されるモデルが3角形ポリゴンメッシュのみに限られる。

一方、本手法では面単位、稜線単位で特徴を指定できる。また、高い精度を必要としない3角形同士を結合して4角形化することにより、曲面を表示するために必要なポリゴン数を削減する。その結果、計算負荷の軽減が可能となる。

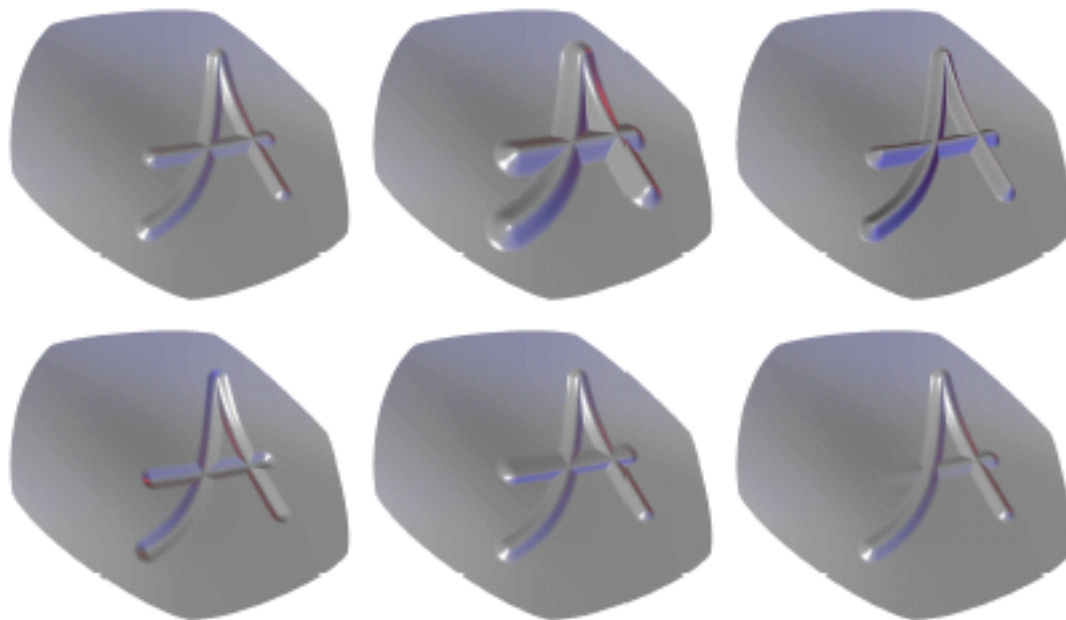


図 2.8: 局所的に変形した曲面

## 第 3 章

### 特徴入力とラティス構造の生成手法

本章では本手法によるラティス構造のモデリング手法について説明する。本手法では、まずタブレットインターフェイスを用いて特徴領域を入力する。次に、入力された特徴を保持しながら形状の簡略化を行う。簡略化の際に頂点位置を補正してラティスを生成する。最後に高い精度を必要としない3角形同士をペアリングする。

以下にそれぞれの手順について詳細を述べる。

### 3.1 特徴線決定

本手法では、3角形ポリゴンメッシュからラティスを生成する際に高い精度を保ちたい部位の稜線を確保する。タブレットインターフェイスを用いて入力した点のウィンドウ座標を3次元に変換した点と視点を結ぶ直線と、交わる面を取得する。その中から最も視点に近い面との交点を取得する。取得した面や交点同士を接続した線分などの入力情報を元に、それを元に特徴線を決定する。

本論文で提案する手法では、以下の稜線列を特徴線とする。

1. 取得した面に属する稜線列
2. 入力線列の近傍の稜線列
3. 入力線列にフィットさせた近傍の稜線列
4. 入力線列を元に面分割して生成された稜線列

これらの手法を用途に合わせて使い分ける。以下にそれぞれの手法について説明する。

#### 3.1.1 取得した面に属する稜線列

この手法では、ペンで塗りつぶすように領域を選択し、領域に含まれる全ての面を構成する稜線を特徴線として取得する。以下にその手順について述べる。

まず、タブレットインターフェイスによって入力した2次元の点列のウィンドウ座標と重なる位置にある面の中で、最も手前にあるものを取得する。次に、該当する全ての面に属する全ての稜線を取得する。最後に重複した稜線は削除し、残りの稜線を特徴線とする。

### 3.1.2 入力線列の近傍の稜線列

この手法では、接続し合う稜線列を特徴線として取得する。図 3.1 に入力線列の近傍の稜線列の取得の例を示す。

まず、タブレットインターフェイスによって入力した 2 次元の点列のウィンドウ座標をスクリーン座標に変換する。次に、視点からスクリーン座標へ伸びる半直線とモデルの交点を求める。その中で最も視点に近い交点を連結し、入力した 2 次元の点列を 3 次元に変換する (図 3.1a)。次に、連続する 2 つの点の属する面が異なる場合、境界となる稜線上に 2 つの点からの距離の和が最小となる座標値を求める。それらの座標値と、最初と最後に入力した点の座標値を新しい入力点列とする。次に、それぞれの入力点列に一番近い頂点を求める (図 3.1b)。最後に求めた頂点列を順番に接続する稜線列を特徴線とする (図 3.1c)。連続する頂点同士が隣接していない場合は、接続可能になるまで隣接する頂点から接続ルートを追跡する。Lanthier[18]、金井ら [15] などのメッシュ上の 2 点間の最短経路を求める手法があるが、本手法では対象となる 2 点はすぐそばにある場合に限定されるため、計算を簡略化して接続ルートを決定する。追跡中に特徴線が自己干渉を起こす場合は、追跡中に選択した稜線の特徴線から除き追跡を終了する。

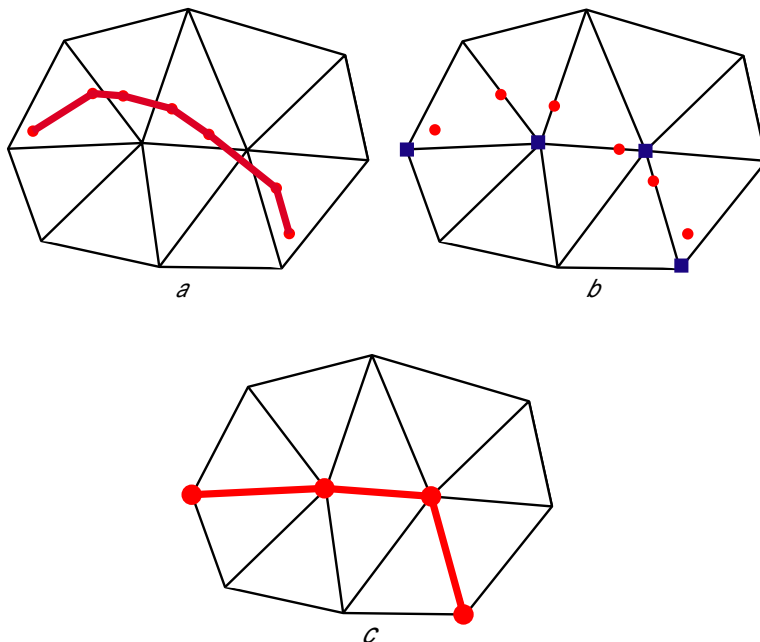


図 3.1: 稜線列の移動

### 3.1.3 近傍の稜線列を利用した特徴線決定

入力線列近傍の稜線列を移動させて、それを特徴線とする手法について説明する。この手法は元のモデルのグラフ構造を変えずに、既存の稜線列を入力線列に近似させる。図 3.2 に入力線列に近傍の稜線列を近似させる過程を示す。

まず、タブレットインターフェイスによって入力された点列を 3 次元座標値に変換する。(3.2a)。次に、連続する 2 つの点の属する面が異なる場合、境界となる稜線上に 2 つの点からの距離の和が最小となる座標値を求める。これらの座標値と最初と最後に入力した座標値を新しい入力点列とする (3.2b)。次に、それぞれの入力点に最も近い頂点を移動させる。この時、1 つの頂点に対して移動先の候補となる座標値が複数ある場合は、その平均値を移動先の座標値とする。最後に移動した頂点列を順番に接続する稜線列を特徴線とする (3.2c)。

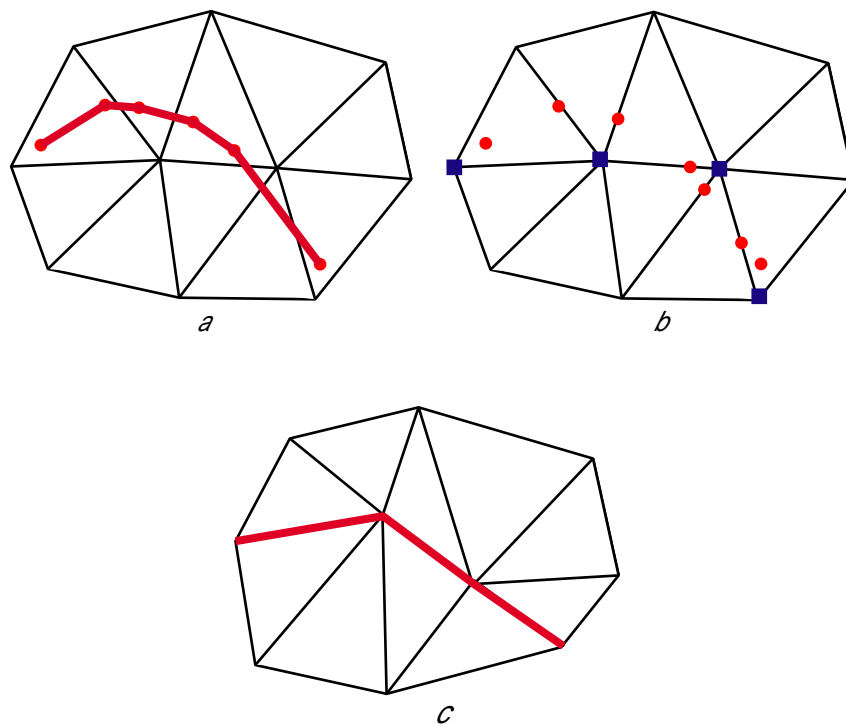


図 3.2: 稜線列の移動



接続すべき頂点同士が隣接しない場合は、接続可能になるまで隣接する頂点を移動させながら接続ルートを追跡する (図 3.3)。

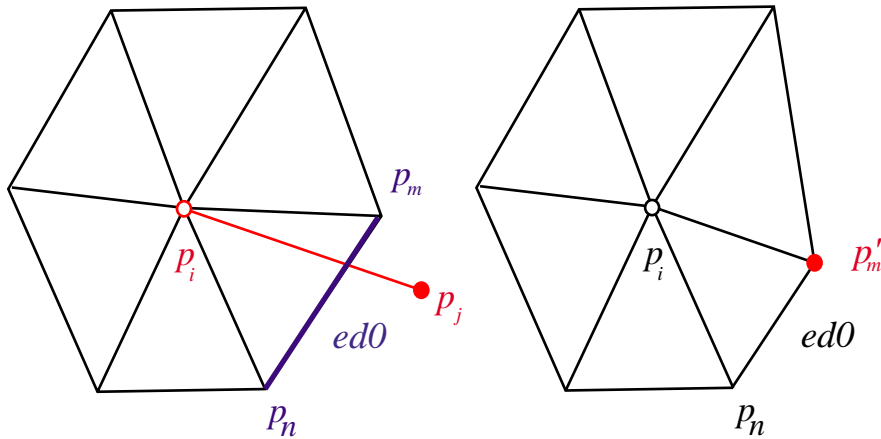


図 3.3: 接続されていない頂点同士の連結

頂点  $p_i$  と頂点  $p_j$  を補間する頂点を、 $p_i$  に隣接する頂点から選ぶ。まず、候補となる頂点のうち、最も線分  $p_i p_j$  に近い頂点  $p_m$  を求める。また、 $p_m$  を含む 2 つの稜線のうち、線分  $p_i p_j$  に近い方の稜線  $ed0$  と稜線を構成するもう一方の頂点  $p_n$  を求める。最後に  $ed0$  上で最も  $p_j$  に近い座標値  $p'_m$  を求め、 $p_m$  をその座標値に移動させる。 $p'_m$  の座標値は式 3.12 のように求まる。

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{\overrightarrow{p_m p_n} \cdot \overrightarrow{p_m p_j}}{\|\overrightarrow{p_m p_n}\|^2} \\
 t &= \begin{cases} 0 (t' < 0) \\ t' (0 \leq t' \leq 1) \\ 1 (1 < t') \end{cases} \\
 p'_m &= p_m + t \overrightarrow{p_m p_n}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

#### 3.1.4 特徴領域を元に面分割して生成された稜線列

入力した線分を元に新しく生成された稜線の特徴線とする手法の説明をする。図 3.4 に稜線生成のための位相操作の例を示す。

まず、タブレットインターフェイスによって入力された点列を 3 次元座標値に変換する。(図 3.4a)。次に、連続する 2 つの点の属する面が異なる場合、境界となる稜線上に 2 つの点からの距離の和が最小となる座標値に新たな頂点を生成する (図 3.4b)。次に入力点列の最初と最後の点によって、属する面を分割する。分割は入力点と面に属する全ての頂点の接続によって行う (図 3.4c)。次に生成された頂点を順に接続するように稜線を生成する (図 3.4d)。ただし、接続すべき頂点同士が同一の面を持たない場合は後で処理を行う。次に生成された頂点や稜線によって生じた 3 角形以外の面を全て 3 角形になるように分割する (図 3.4e)。次に接続できなかった頂点同士を繋ぐ稜線列を生成し、もう 1 度全ての面を 3 角形に分割する (図 3.4f)。最後に該当する頂点列を順番に接続する稜線列を特徴線とする (図 3.4g)。

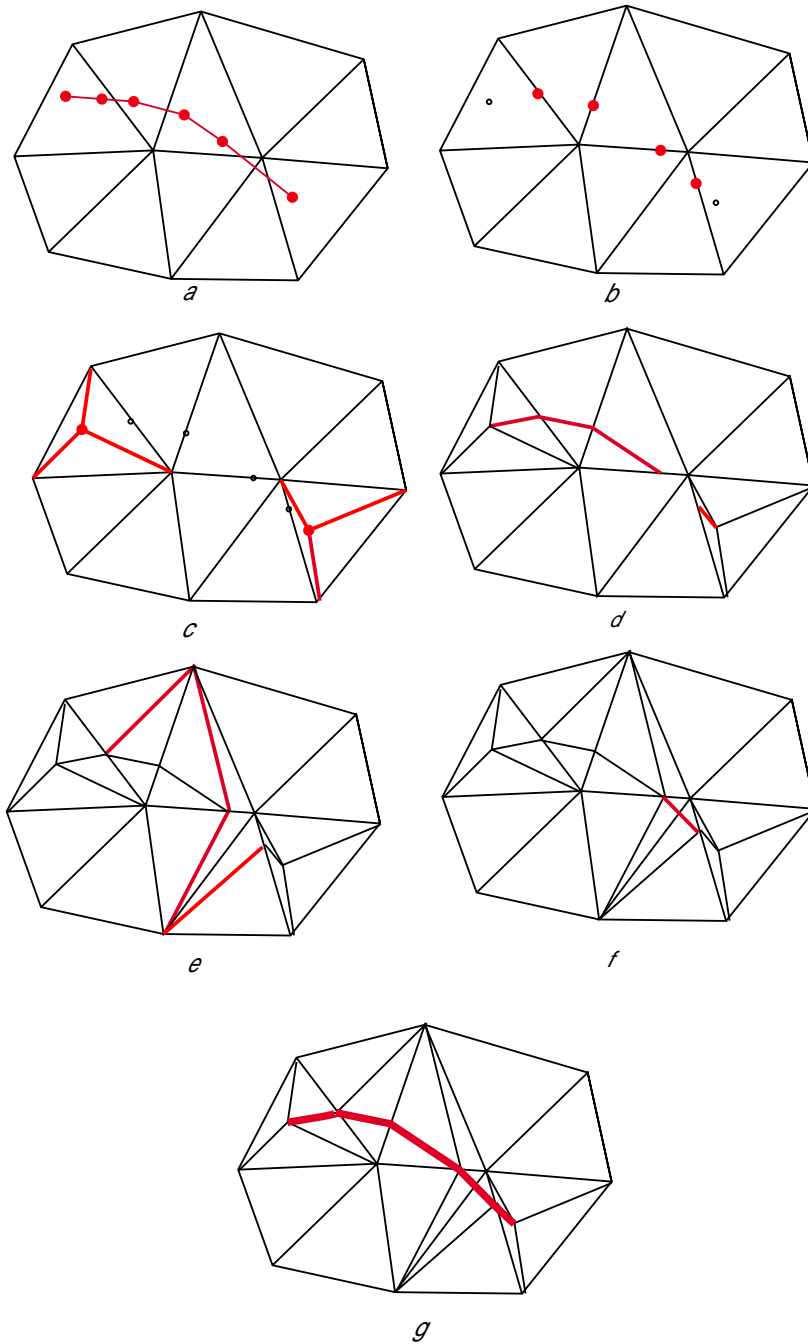


図 3.4: 面分割による特徴線生成と面分割

隣り合わない2点の接続の接続例を図3.5に示す。以下に隣接していない頂点  $p_i, p_j$  を接続する手順について詳細を述べる。

$p_i$  に隣接する全ての頂点同士で構成されている全ての稜線の中から最も  $p_j$  に近い稜線を選択する (図3.5a)。図3.5bのように頂点  $s_i, e_i$  で構成される稜線  $ed_i$  と頂点  $p_j$  との距離  $dist_i$  の求め方について説明する。 $ed_i$  上にある点  $h_i$  は、 $p_j$  から  $ed_i$  におろした垂線の足である。 $h_i$  の座標値と  $dist_i$  は以下のように求める。

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{\overrightarrow{s_i e_i} \cdot \overrightarrow{s_i p_j}}{\|\overrightarrow{s_i e_i}\|^2} \\
 t &= \begin{cases} 0 (t' < 0) \\ t' (0 \leq t' \leq 1) \\ 1 (1 < t') \end{cases} & (3.13) \\
 h_i &= s_i + t \overrightarrow{s_i e_i} \\
 dist_i &= \|\overrightarrow{h_i p_j}\|
 \end{aligned}$$

次に  $p_j$  に最も近い稜線  $ed_0$  上に新しく頂点  $p'$  を生成する。 $p'$  の座標値は式3.13で求めた垂線の足の座標値を用いる (図3.5c)。最後に、 $p'$  生成の際に生じた3角形以外の面を3角形に分割する (図3.5c)。 $p'$  と  $p_j$  が隣接していない場合、上記の操作を繰り返す。

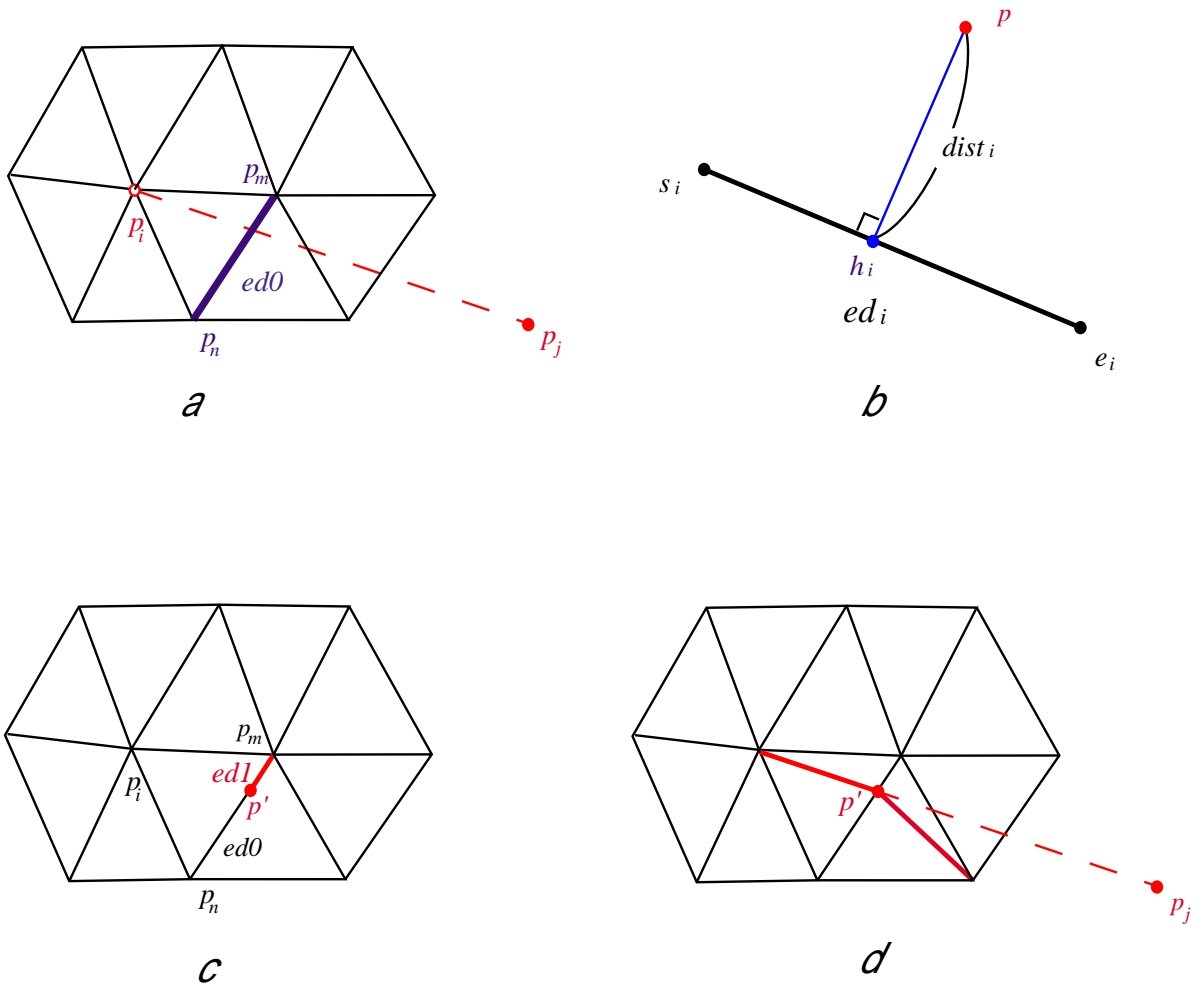


图 3.5: 面分割

### 3.2 特徴線によるモデルの切断

閉じた状態の特徴線によって切断されたラティスの生成手法について説明する。まず、3角形ポリゴンメッシュの切断したい部位の境界線の特徴線として指定する。次にその特徴線の形状を保存しながら簡略化してラティスを生成する。最後に境界線によってラティスを切断する。以下に、閉じた状態の特徴線によってモデルを切断する手法について説明する(図 3.6)。

まず、分断する領域の境界線として、閉じた特徴線を入力する(図 3.6a)。次に、入力した特徴線を構成する全ての頂点から1つの頂点と稜線を生成する(図 3.6b1)。この時生成される稜線は実際には長さを持たず、また、生成された頂点は元の頂点と同じ座標値を持つ。次に、生成された頂点同士を接続し、境界となる特徴線と同じ座標値を持つ稜線列を生成する(図 3.6b2)。最後に、分断する領域同士を接続している全ての稜線を削除する(図 3.6b3)。以上の手順によりモデルを特徴線によって切断する(図 3.6c)。

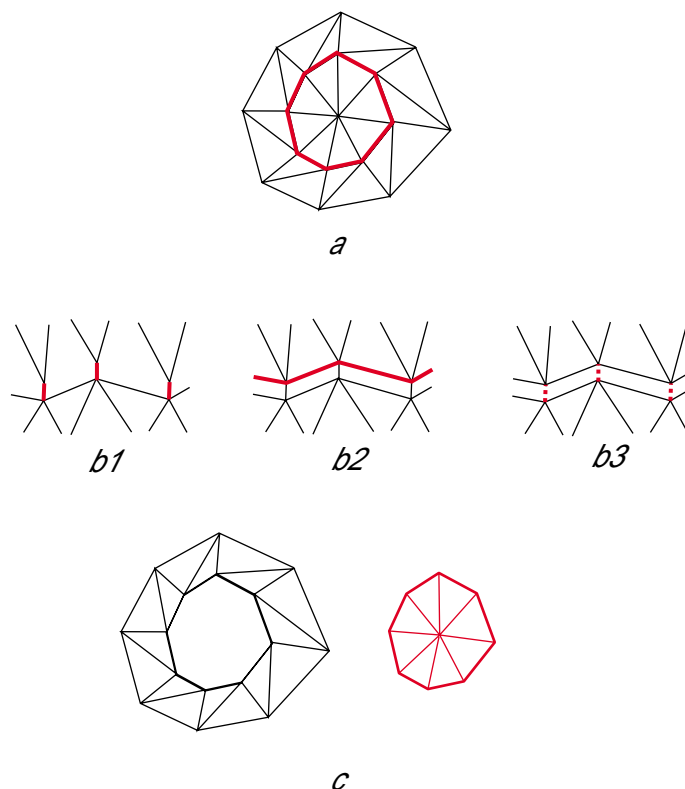


図 3.6: モデルの切断

### 3.3 ラティス化

#### 3.3.1 特徴線の指定による重み付き QEM

QEM に基づく簡略化 [9] においては、稜線に付加されたコストが大きいほど、その稜線が削除された際の形状の変化が大きい。このことは、コストが大きい稜線はモデルの特徴的領域に位置していることを示している。我々はこの特徴に注目し、QEM の値を故意に変化させることで、ユーザが特徴領域だと意図する部位をコントロールすることを可能にしている。具体的には、タブレットにより特徴線として入力された稜線集合の各稜線が保持している  $QEM(G^e)$  に制約値  $k$  を掛け合わせる。

$$G^e = k \cdot G^e \quad (3.14)$$

この際の制約値  $k$  は実数であり、値が大きいほど特徴線が高い精度で保存される。重み付けを行った後、評価式 (3.14) に基づいてメッシュ削減を行うことで、ラティス格子が作成される。制約付けを行った稜線には最も高い QEM が割り当てられているため、メッシュ削減後にも削除されることなく保存される。結果として、入力した特徴線がラティスの稜線として残ることになり、パッチの輪郭に反映されることになる。大幅なメッシュ数の削減を行った場合は、制約付けがされている稜線が削除の対象になりうるため、入力した特長を位相として保存することはできない。しかし、大幅なメッシュ削減を行った場合は、元の入力メッシュを高い精度で近似すること自体ができなくなるために、この場合を考慮する必要はない。また、特徴稜線として扱う稜線集合をメッシュ削減の QEM ヒープから除外することで、入力した特徴線の完全な保存が可能になる。

重み付き QEM による簡略化を行う際、特徴として残したい稜線のほかに、その稜線に隣接する稜線に対しても高い制約値を指定する必要がある。図 3.7 に、3 種類の制約値の設定を用いた簡略化の例を示す。

オリジナルのモデルに対し、図 3.7a のように特徴を指定する。図 3.7b は制約値の変更を一切行わずに簡略化したモデルである。図 3.7c は特徴として残したい稜線にのみ高い制約値を設定して簡略化したモデルである。図 3.7d は特徴として残したい稜線とそれに隣接する稜線に対して高い制約値を設定して簡略化したモデルである。b のモデルは特徴となる稜線がまったく残っていない。c のモデルは特徴となる稜線は削除されないが、周囲の稜線が削除される時の頂点移動によって特徴を損なう。d のモデルは特徴を残したまま簡略化されていることがわかる。

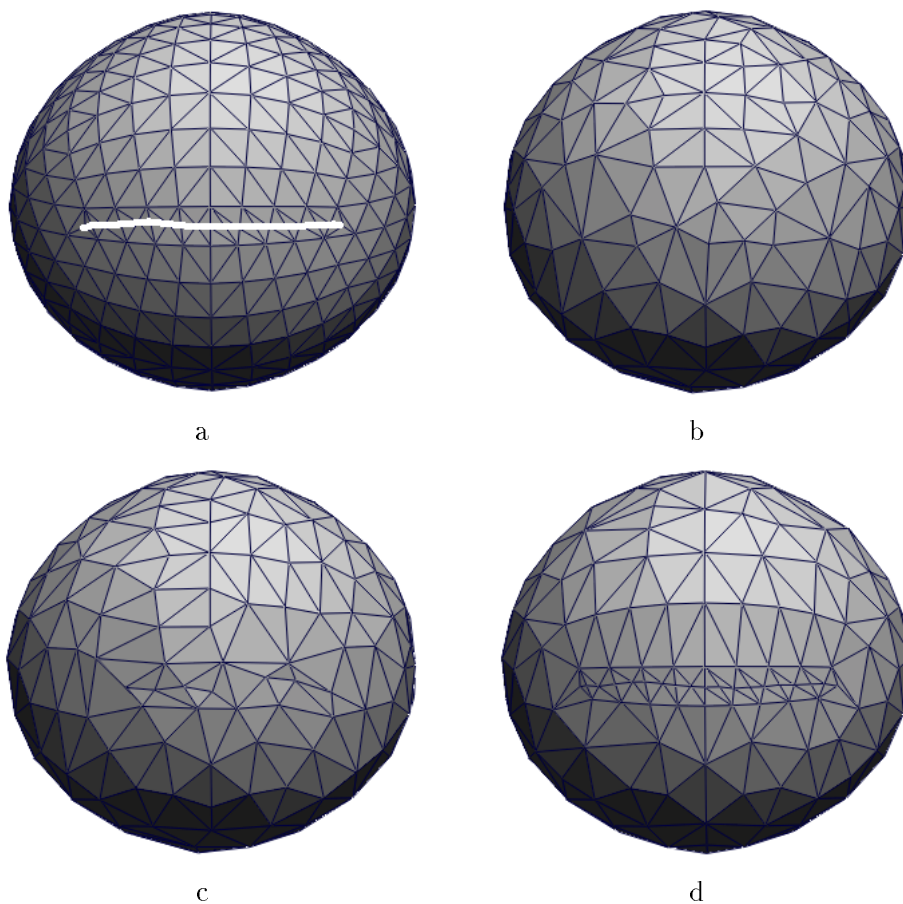


図 3.7: 特徴線指定による重み付き QEM



### 3.3.2 4角形化

拡張QEMに基づくメッシュ削減後に、不要領域の4角形化を行う。4角形化は以下の理由により行われる。ラティスの3角形面のは3つの Gregory パッチにより内挿されるため、形状の表示に必要なポリゴンの数が多くなる(図 3.8 右)。それに対して4角形面は1つの Gregory パッチにより内挿されるため少ないポリゴン数で形状を表示するため計算コストが軽減される(図 3.8 左)。曲面モデルのパッチ数を少なくし計算負荷を軽減するためには、精度が不要な領域の4角形化が有効である。

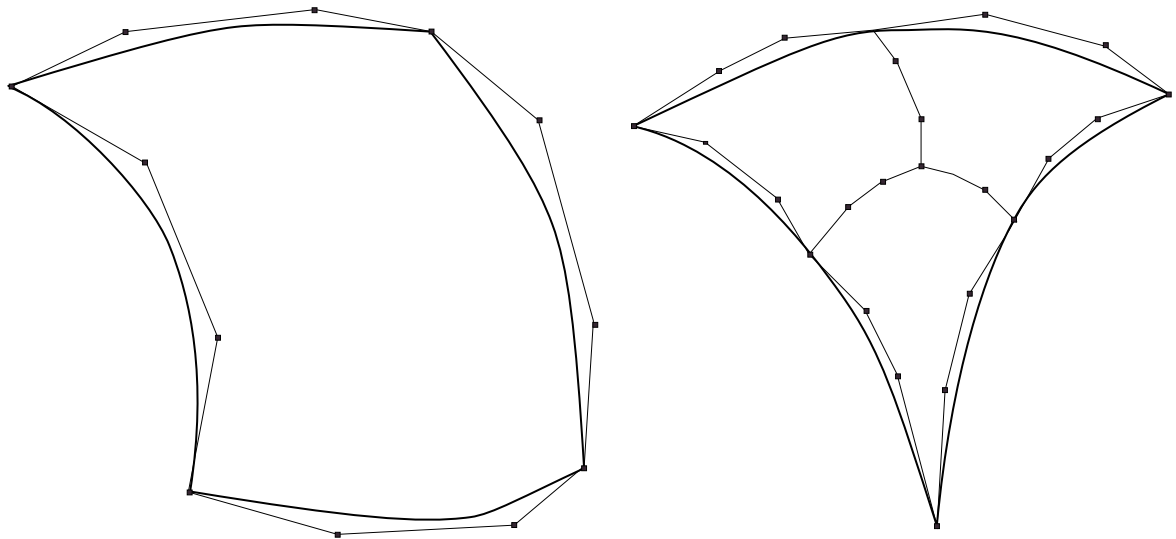


図 3.8: 3 角形面の内挿と 4 角形面の内挿

図 3.9 に 4 角形化の例を示す。任意の稜線  $ed0$  について、その両端の 3 角形面がそれぞれ頂点  $p0, p1, p2$  と、 $p0, p2, p3$  により構成されているとする。2 つの 3 角形面が以下の 2 つの条件を満たす場合、 $ed0$  が削除されて 4 角形面になる。

1. 生成される 4 角形は正方形に近い
2. 対角稜線の削除が形状に与える変化が小さい

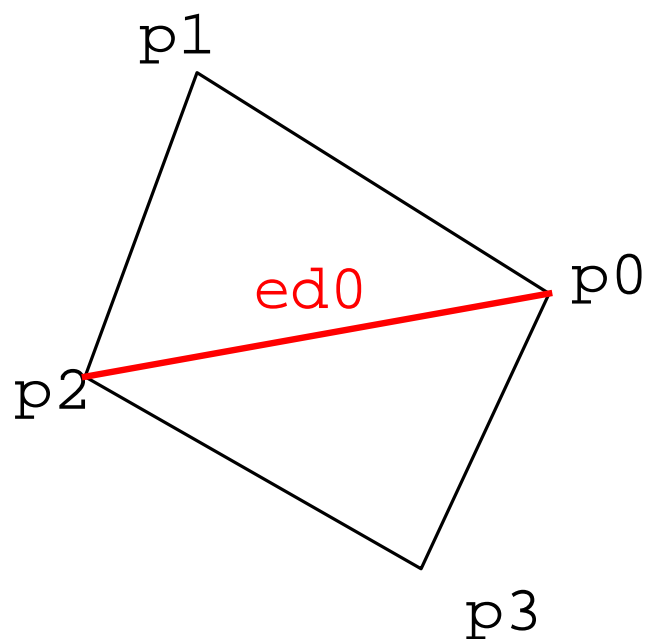


図 3.9: 3 角形同士のペアリング

条件 1 は、鋭角部を保持する 4 角形面に滑らかな Gregory パッチを内挿するのが困難であることに起因する。内挿対象となる 4 角形面が正方形に近ければ、均整の取れたパッチネットワークが構築される。また、その後の編集操作も容易になる。条件 1 を満たすために、以下の評価関数を適用する。

$$\|F(p_0, p_1, p_2)\| + \|F(p_0, p_2, p_3)\| < S_1 \quad (3.15)$$

$$\|F(p_0, p_1, p_2) + F(p_0, p_2, p_3)\| - \|F(p_1, p_0, p_2) + F(p_0, p_3, p_2)\| < S_2 \quad (3.16)$$

ただし

$$F(p_i, p_j, p_k) = \frac{p_i - p_k}{\|p_i - p_k\|} \cdot \frac{p_j - p_k}{\|p_j - p_k\|} \quad (3.17)$$

式 3.16 は  $ed0$  と対角稜線として向かい合う 2 つの角について、それぞれの角度が直角に近いものになることを保証する。 $S_1$  は実数であり 0 に近づくほど精度が高くなる。式 3.17 は  $ed0$  の両端において、それぞれの端点に接続する角度の和を求め、それらの差が最小になることを保証する。式 3.16 を満たすだけでは図 3.10 に示すように、 $ed0$  に対して向き合う角度はほぼ直角であるが鋭角部が残る可能性が残る。この状態を回避するために式 3.17 が必要である。 $S_1$  は実数であり 0 に近づくほど精度が高くなり、長方形に近い形の 4 角形面が生成される。

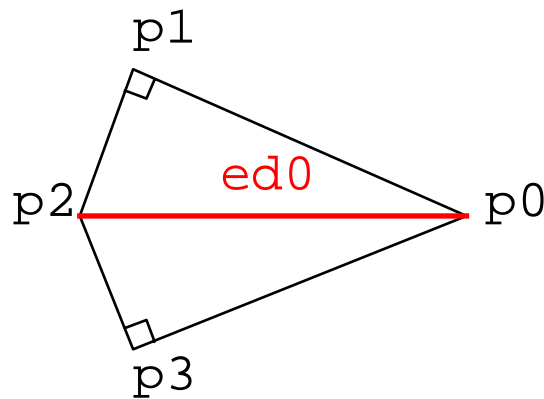


図 3.10: 1 つの評価関数だけでは検知できない 3 角形のペア

### 3.3.3 特徴線を保存した4角形化

図 3.11 に特徴線を保存した4角形化の例を示す。

特徴線以外の稜線集合  $E_n$  について、それぞれのQEMのヒープを構築し、コストがもっとも小さい稜線の両端に接続する3角形同士をペアリングする。この際にペアリングされた2つの3角形に属する稜線をヒープから除外し、残りの稜線について同様の処理を行う。

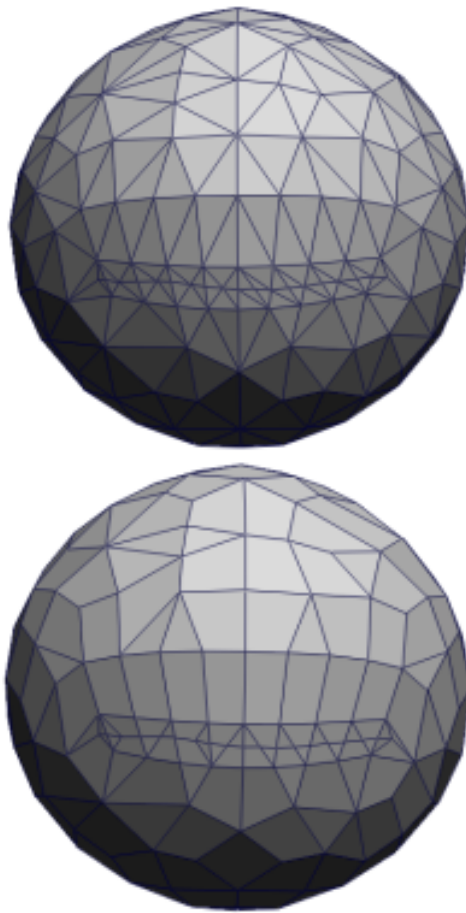


図 3.11: 特徴線を保存した4角形化

## 第 4 章

### 評価と考察

本章では、まず本論文で提案する手法の適用例を示す。また、それぞれの実行例を評価し考察を行う。

#### 4.1 編集を考慮したラティス化

図 4.1、4.2、4.3 に編集作業を考慮したラティス化の例を示す。オリジナルモデルの図 4.1 に対し図 4.2 のように特徴線となる稜線を生成し、ラティスを生成する。図 4.3 は生成されたラティスを、特徴線を元に編集したモデルである。

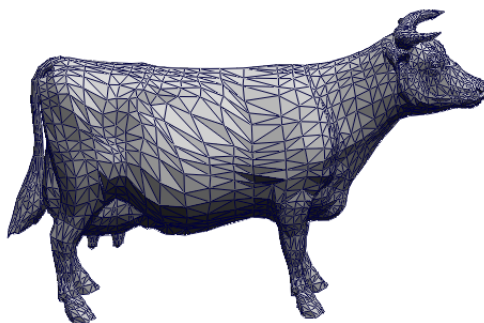


図 4.1: オリジナルモデル

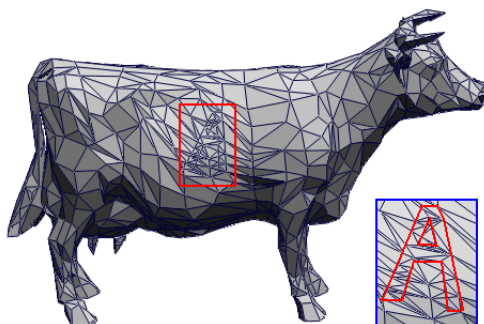


図 4.2: 特徴線生成

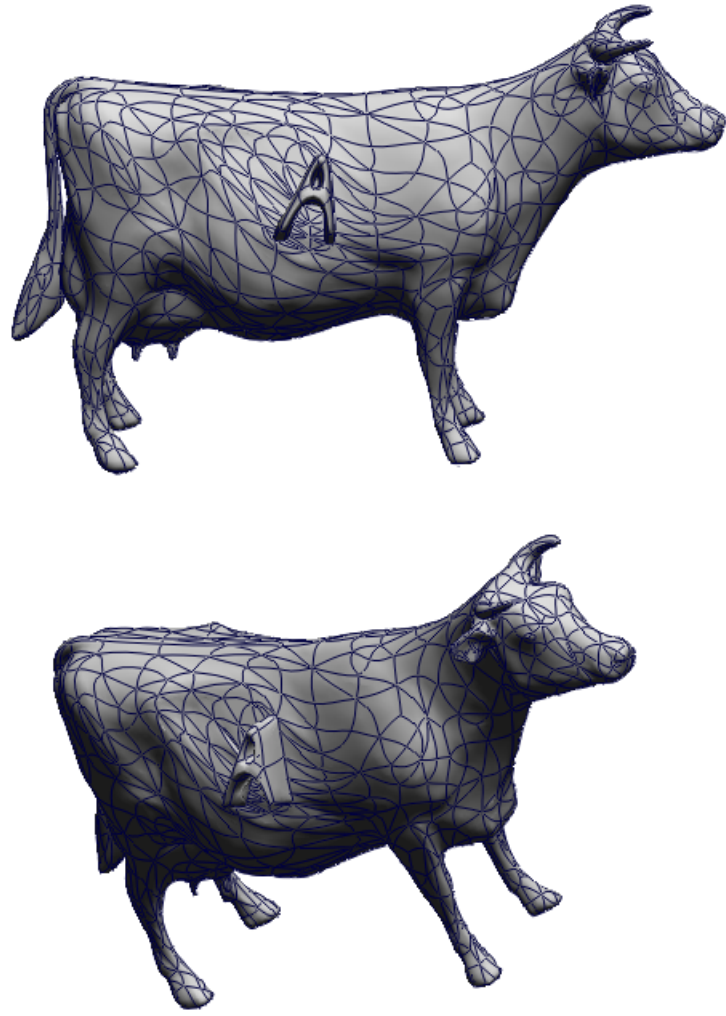


図 4.3: ラティスの特徴線編集

## 4.2 医用モデルのラティス化

本節では、医用目的のために生成された3角形ポリゴンメッシュをラティス化した例を示す。

形成外科では患部の形状を可視化する目的から、患部の三次元モデルを作成する研究が盛んに行われている。3角形ポリゴンメッシュによって患部の曲面形状を表現する場合、データサイズが膨大になるという問題がある。そのため、小さいデータサイズで患部の形状を表現する手法が重要となる。

本節では3角形ポリゴンメッシュによって表現される患部モデルと、患部モデルから生成したラティス曲面を比較する。比較対象は、最大誤差、平均誤差、平均二乗誤差とする。誤差はバウンディングボックスの対角線の長さとの比率(%)で表す。

オリジナルの3角形ポリゴンメッシュとラティス曲面との比較はMetro<sup>TM</sup>を用いて行う。MetroとはCignoniら[8]の手法を元に作られた、2つの3角形ポリゴンメッシュの形状の誤差を計算するアプリケーションである。Metroによってオリジナルモデルと比較されるラティス曲面は、誤差が小さい部位ほど青く、誤差が大きいほど赤く表示される。

### 4.2.1 頭部モデルのラティス化

図4.4はCTデータを元に生成した頭部モデルである。このモデルを特徴線を指定せずにラティス化したモデルと、特徴線を指定してラティス化したモデルを比較する。オリジナルのモデルの頂点数は6001、ラティスの頂点数はいずれも2000である。

図4.5は特徴線を指定せずにラティス化したモデルである。図4.6は特徴線を指定してラティス化したモデルである。図4.6のモデルは形状の複雑な目、鼻、口、耳の精度を保ちながらラティス化したモデルである。図4.7は図4.6のモデルの、精度を必要としない部位の稜線を削除して4角形化したモデルである。



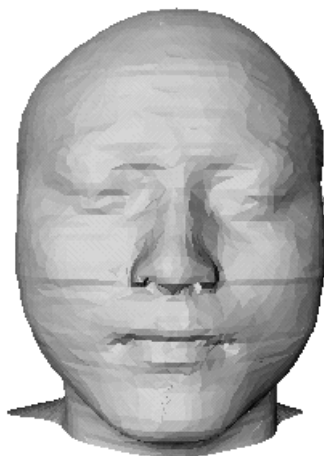


図 4.4: CT データを元に生成した頭部モデル

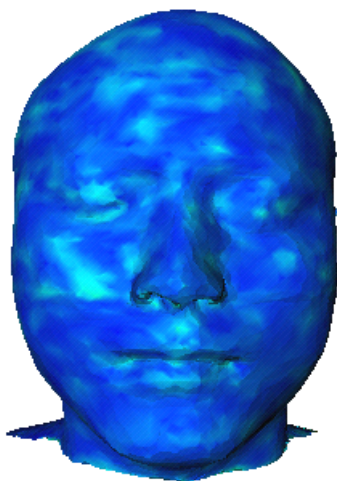


図 4.5: 特徴入力をせずにラティス化したモデル

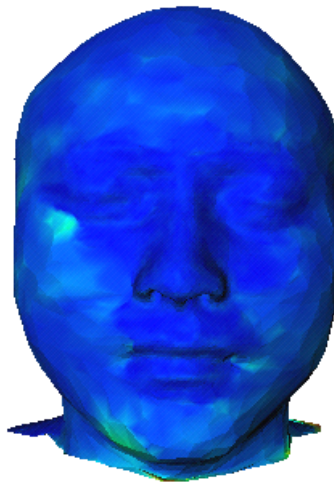


図 4.6: 特徴入力をしてラティス化したモデル (非 4 角形化)

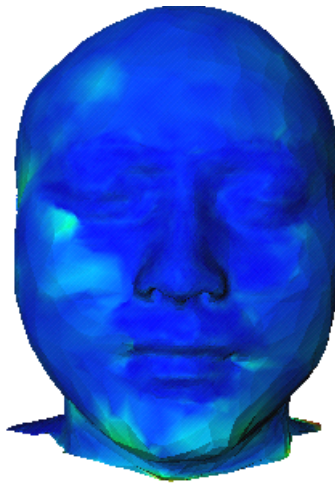


図 4.7: 特徴入力をしてラティス化したモデル (4 角形化)

#### 4.2.2 下顎骨モデルのラティス化と切断

左右対称でない下顎骨の一部を切断し、適正な位置に移動する形成外科手術がある。この手術では下顎骨の一部を切り離し、適正な位置に移動させて固定する。これにより正常な運動が可能となる。この手術は、神経を傷付けないように複雑な切断作業が必要となる。そのため事前に切断個所を十分に検討する必要がある。そこで本手法により下顎骨の実測データをラティス化し、それを切断することにより手術計画を支援を試みる。図 4.8 のように切断した下顎骨モデルを従来手法と本手法でラティス化して比較する。

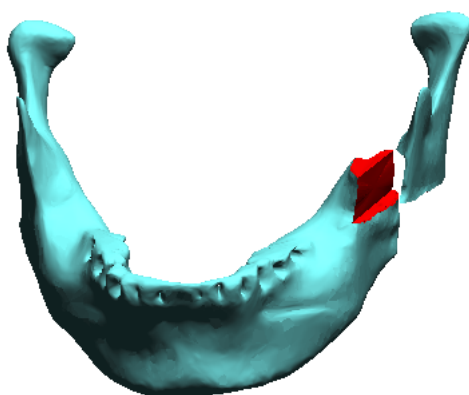


図 4.8: 下顎骨切断

図 4.9 は下顎骨の実測データを元に生成した3角形ポリゴンメッシュである。図 4.10 の切断操作をせずに生成したラティスと、切断操作を行った図 4.11、図 4.12 のモデルを比較する。これらのラティス化した下顎骨モデルは、慶應義塾大学看護医療学部教授の小林正弘助教授の協力を得て作成した。

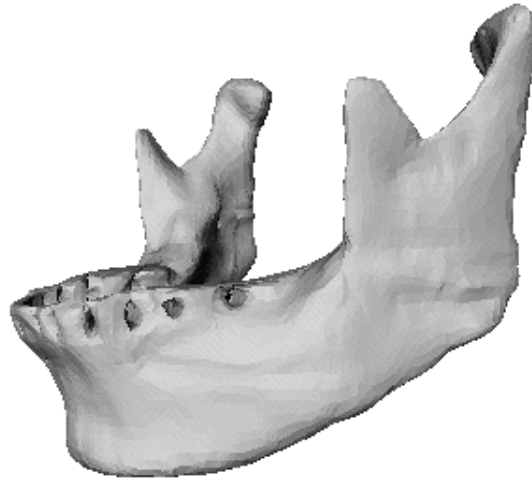


図 4.9: オリジナルの下顎骨モデル

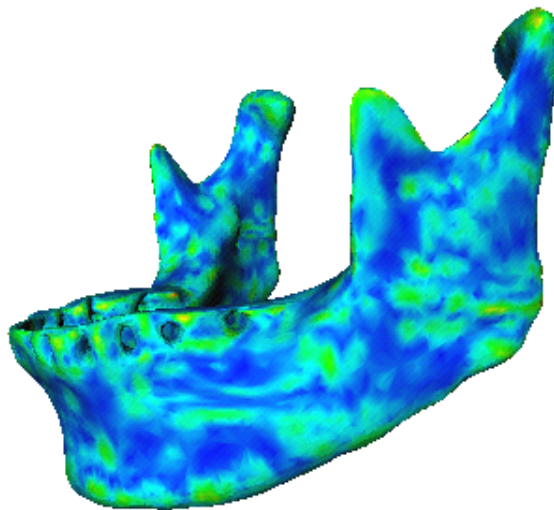


図 4.10: 切断せずにラティス化した下顎骨モデル

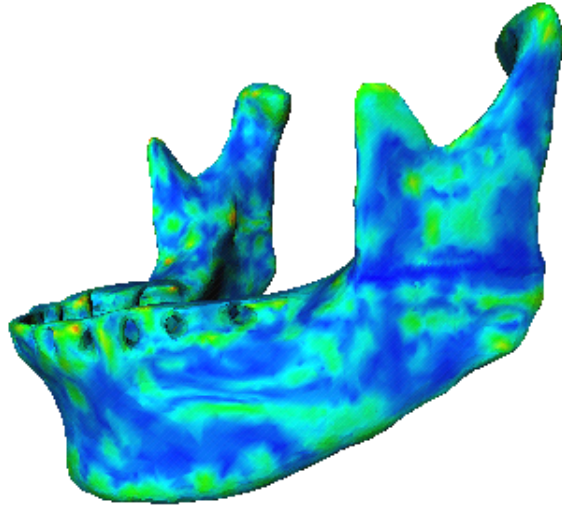


図 4.11: ラティス化後に切断した下顎骨モデル (非四角形化)

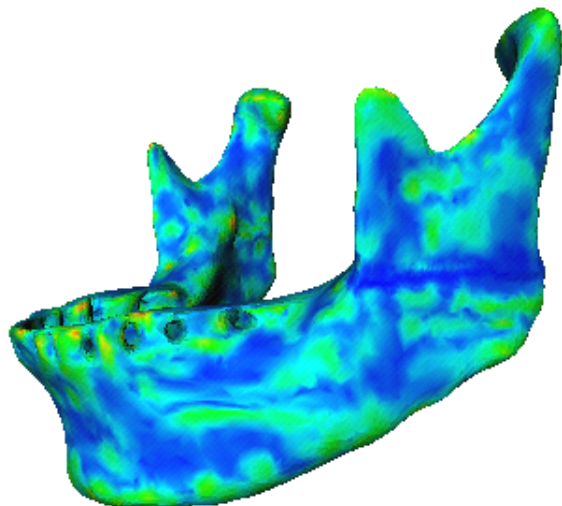


図 4.12: ラティス化後に切断した下顎骨モデル (四角形化)

## 考察

### 牛モデル

通常、3 角形ポリゴンメッシュを簡略化すると、生成される制御格子は不規則になるため形状の編集が困難である。しかし図 4.2 のように新しい位相構造を生成することにより、図 4.3 のような編集が容易になる。

### 頭部モデル

頭部モデルは、形状の目、鼻、口、耳などの複雑な部位と、頭頂部、後頭部などの単純な部位がある。しかし、全ての部位を同じように簡略化すると、複雑な形状の部位の情報を多く失う。一方、複雑な部位を特徴線としてラティス曲面を生成すると、顔の特徴を高い精度で表すことが可能となる。

表 1 にそれぞれの手法によって生成した、同じ頂点数のラティスに内挿される曲面の誤差を示す。特徴線を指定してラティス化したモデルは、特徴として指定した部位以外の部分で多くの稜線が削減される。しかし、稜線を削減される個所は単純な形状をしているため、少ない稜線でも近似が可能である。その結果、形状の複雑な部位の精度を高く保ちながら全体の精度も損なわずに曲面化できることがわかる。

表 1: ラティス曲面化された頭部モデルの誤差の比較

ラティス化の種類	Maximal Error	Mean Error	Mean Square Error	表示ポリゴン数
特徴線無し	1.0197%	0.05239%	0.07024%	24200
特徴線有り (4 角形化無し)	1.8905%	0.04825%	0.07776%	24226
特徴線有り (4 角形化有り)	1.8906%	0.04809%	0.07859%	23460

## 下顎骨モデル

1つのモデルから、2つの分離したラティスを生成した場合の切断部位の誤差を比較する。切断操作をせずにラティス化した図 4.10 のモデルと切断操作を行った図 4.11、図 4.12 を比較すると、切断部分の精度を高く保ちながら切断されていることがわかる。また、表 2 の誤差が示すように、モデル全体の精度も通常のラティス化とほとんど変わらないことがわかる。

表 2: ラティス曲面化された下顎骨モデルの誤差の比較

ラティス化の種類	Maximal Error	Mean Error	Mean Square Error	表示ポリゴン数
切断無し	0.2652%	0.05197%	0.06252%	36744
切断有り (4 角形化無し)	0.2824%	0.05065%	0.06222%	36778
切断有り (4 角形化有り)	0.3209%	0.06084%	0.07412%	30338

## 第 5 章

### 結論と今後の展望



本章では結論と今後の展望について述べる。

## 5.1 結論

本論文ではタブレットインターフェイスを用いて3角形ポリゴンメッシュに特徴を入力し、その結果を反映したラティス構造をモデリングする手法を提案した。

3角形ポリゴンメッシュはデータサイズが膨大であり、自由曲面へと変換する研究が盛んである。従来手法は、ユーザインプットが多い、局所的に精度を調整することが困難であるなどの問題があった。また、自由曲面に変換した後の制御格子が予想しにくいいため、変換後の形状編集が困難であった。本手法ではタブレットインターフェイスによる特徴入力によって、局所的な精度の調整やユーザの意図した位相を持つラティスの生成が可能となった。

本手法では3角形ポリゴンメッシュに対する特徴入力のデバイスとしてタブレットインターフェイスを採用した。これにより細かい特徴指定や位相操作が容易になった。また、特徴線を指定することにより、生成されるラティス曲面の精度を局所的に調整することが容易となった。

本研究では、これらの手法を実際に計算機上にアプリケーションを実装し、評価することで有用であることを確認した。

## 5.2 今後の展望

今後の展望として、以下の2点を挙げる。

第1点は、4角形化した際のラティス曲面の精度が低下する点の改良である。本手法で採用した簡略化手法は、3角形ポリゴンをベースとしたものである。そのためラティスの頂点補正は4角形化のための最適化がなされていない。この点を解決するには、3角形以外のポリゴンメッシュに対する簡略化手法の研究が重要となる。

第2点は、均一な面を持つラティスの生成である。3角形ポリゴンメッシュを簡略化すると3角形の形状や位相が均一性を失っていく。また、均一性を失うと4角形化できる3角形のペアが少なくなる。メッシュの均一再メッシュ化手法 [20][33] などを利用し均一な面を持つラティスの生成手法を検討したい。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、様々な方の御支援を賜りました。本論文を締めくくるにあたり、謝意を表したいと思います。

本研究の指導教授である本塾環境情報学部の千代倉弘明教授には、学部3年時より4年間もの長きにわたり御指導を賜りました。

本塾環境情報学部の武藤佳恭教授、金井崇専任講師には、本論文の副査を快くお引き受け頂きました。特に金井崇専任講師には大学院入学時より、研究を進める上で大変有益な御助言を頂きました。

本塾看護医療学部の小林正弘助教授には、本研究で提案する手法を実際の医療現場で活用するための貴重な御助言を頂きました。

本論文を執筆するにあたり、本塾政策・メディア研究科の脇田玲氏、澤田真吾氏、本塾環境情報学部齋藤満昭氏、林隆道氏、豊島周氏には、惜しみない御助言、御助力を頂きました。特に脇田氏には、本研究の理論、実装の上で幾度も議論して頂きました。ラティス・テクノロジー社の田中浩司氏にはプログラム実装における技術的なアドバイスを多数していただきました。

最後に、充実した学生生活を一緒に送ってくれたテコンドーサークル諸氏、藤柔会諸氏、今日に至るまでの学業を支えてくれた家族に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] P.Bézier, Definition numerique des courbes ed surfaces, *Automatisme*,1966.
- [2] E.Catmall, J.Clark, "Recursively Generated b-spline Surface on arbitrary Topological meshes", *Computer Aided Design*, Vol.10, No.6, pp.350-355, 1978.
- [3] S.Coons, "Surface for computer aided design", MIT, 1964.
- [4] H.Chiyokura, F.Kimura, "Design of Solids with Free-form Surfaces", SIGGRAPH'83, pp.289-298, 1983.
- [5] CYCORE. Inc, Cult3D, <http://www.cult3d.com/>
- [6] D.Doo, M.SABIN, "Analysis of the Behaviour of Recursive Division Surfaces near Extraordinary Points", *Computer Aided Design*, pp.356-360, 1978.
- [7] M. Eck, H. Hoppe. "Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type", SIGGRAPH'96, pp. 173-82, 1996.
- [8] P. Cignoni, C. Montani, R. Scopigno, "Metro: measuring error on simplified surfaces", *Computer Graphics Forum*, Blackwell Publishers, vol. 17(2), pp.167-174, 1998.
- [9] M.Garland, P.Heckbert, "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", SIGGRAPH'97, pp.209-216, 1997.
- [10] B.Geiger, "Three dimensional modeling of human and its application to diagnosis and surgicalplanning", Technical Report 2150, Institut National de Rechercheen Informatique et Automatique, 1993.
- [11] Cheyenne Cloud. Inc Genesis3D,<http://www.gesis3d.gom/>
- [12] J.A.Gregory, Smooth interpolation without twist constraints, *Computer Aided Geometric Design*,R.E.Barnhill and R.F.Riesenfeld, ed., Academic Press,1974.
- [13] W.J.Gordon and R.F.Riesenfeld, Bernstein-Bézier methods for the computer aided design of free-form curves and surfaces, *Journal of the ACM*,1974.
- [14] H.Hoppe, "Progressive Meshes", SIGGRAPH'96 Proceedings,1996., pp.99-108, 1996.

- [15] T. Kanai and H. Suzuki. Approximate shortest path on a poly-hedral surface based on selective refinement of the discrete graph and its applications. In Proc. Geometric Modeling and Processing 2000, pp.241-250. IEEE CS Press, Los Alamitos CA, Apr. 2000.
- [16] A. Khodakovsky and P. Schroder. Fine Level Feature Editing for Subdivision Surfaces, Proceedings of ACM Solid Modeling '99, 1999.
- [17] V.Krishnamurthy, Marc Lovoy, "Fitting Smooth Surfaces to Dense polygon Meshes", SIGGRAPH'96,1996.
- [18] M.Lanthier, A.Maheshwari, J.-R. Sach. "Approximating Weighted Shortest Paths on polyhedral Surfaces", Proceedings of 13th ACM Symposium on Computational Geometry, pp.274-283, 1997.
- [19] A.W.F.Lee, W.Sweldens, P.Schröer, L.Cowsar, D.Dobkin, "MAPS: Multiresolution adaptive parameterization", SIGGRAPH'98, pp. 95-104, 1998.
- [20] B. Lévy, J.L. Mallet, "Non-distorted texture mapping for sheared triangulated meshes", SIGGRAPH'98, pp. 343-52. 1998.
- [21] C.Loop, "Smooth spline surface based on triangeles", Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [22] W.E.Lorensen, H.E.Cline, "Marchig Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", ACM computer Graphics, 1987.
- [23] J.Popovic, H.Hoppe, "Progressive simplicial complexes", SIGGRAPH'97 Proceedings, pp.217-224,1997.
- [24] M.Saito, T.Hayashi, A.Wakita, H.Chiyokura, "Feature Preserving Refinement of Surfaces for Web-based Surgical Simulation", Medicine Meets Virtual Reality 2002, to appear.
- [25] Shout Interactive. Inc, Shout3D, <http://www.shout3d.com/>
- [26] S.Takeuchi, T.Kanai, Hi.Suzuki, K.Shimada, F.Kimura, "Subdivision Surface Fitting with QEM-based Mesh Simplification and Reconstruction of Approximated B-spline Surfaces", Pacific Graphics 2000, pp.202-212, 2000.

- [27] D.Tanaka, M.Kobayashi, M.Chiyokura, T.Nakajima, T.Fujino, "Web-based educational tool for cleft lip repair using XVL", Medicine Meets Virtual Reality 2001, 2001.
- [28] A.Wakita,M.Yajima,T.Harada, H.Toriya and H.Chiyokura, XVL : A Compact and Qualified 3D Representation With Lattice Mesh and Surface for the Internet, *Web3D|VRML2000*, pp.45-51, 2000.
- [29] Akira Wakita, Takamichi Hayashi, Takashi Kanai, Hiroaki Chiyokura, "Using Lattice for Web-based Medical Applications", Web3D 2001, ACM, SIGGRAPH, Paderborn, Germany, Feb.19-22, ACM-Press, 2001.
- [30] Web3D Consortium, <http://www.web3d.org/>
- [31] XVL Player,<http://www.xvl3d.com/>
- [32] 金井崇,「細分割曲面の連続的多重解像度表現」,グラフィックスとCAD研究会(情報処理学会研究報告, Vol.2000, No.78, 99-CG-100, pp. 19-24), 2000.
- [33] 金井 崇, 鈴木 宏正, "対話的なメッシュの均一再メッシュ化手法",グラフィックスとCAD / Visual Computing 合同シンポジウム, 札幌, 6月, 論文集 pp.91-96, 2001.
- [34] 齋藤満昭, 林隆道, 脇田玲, 千代倉弘明,「医用曲面モデル生成システムの構築」,第17回 Nicograph/Multimedia 論文コンテスト,2001.
- [35] 千代倉弘明,"ソリッドモデリング",工業調査会,1985
- [36] 鳥谷浩志, 千代倉弘明, "3次元CADの基礎と応用", 共立出版, 1991.
- [37] 林隆道, 齋藤満昭, 脇田玲, 金井崇, 千代倉弘,"CT,MRIデータからのラティス構造に基づく医用曲面モデル自動再構成",3次元画像コンファレンス2001,2001.
- [38] 脇田 玲, 矢島 誠, 原田毅士, 鳥谷浩志, 千代倉 弘明, "ラティス構造に基づく軽量で高品質な Web3D データ表現", 情報処理学会論文誌, 第42巻, 第5号別冊, 2001.
- [39] 脇田 玲, 千代倉 弘明, "Web3Dの現状と今後の動向", NICOGRAPH 論文コンテスト, pp. 199-204, 2001.