

エッジベース測地距離を用いた 頭蓋顎顔面骨モデルのメッシュ変形処理

新谷 幹夫^{†1} 白石 路雄^{†1}
林 明照^{†2} 丸山 優^{†3}

骨格や臓器の3次元形状の統計モデルは、基礎および臨床医学において大きな期待を集めているが、形成再生外科領域で重要である頭蓋顎顔面骨は、形状の複雑さなどから着手が遅れている。本論文では、頭蓋顎顔面骨データベース構築を目的として、複雑な形状の安定かつ効率的なメッシュ変形手法を提案する。この手法を用いてテンプレートメッシュを変形し、サンプルの計測点の間で密な対応付けを行う。提案手法は、エッジベースの測地距離およびVoronoi分割に基づきメッシュの変形を行う。これにより、位相的に複雑な形状への適用を可能とし、他の操作上の要求も満足させる。CT画像を用いて実験を行ったところ、提案手法の実用可能性が示された。

Mesh Deformation for Cranio-maxillo-facial Bone Models Using Edge-based Geodesic Distance

MIKIO SHINYA,^{†1} MICHIO SHIRAISHI,^{†1} AKITERU HAYASHI^{†2}
and YU MARUYAMA^{†3}

Three-dimensional statistical database of cranio-maxillo-facial bones is expected to become a new powerful resource for simulation surgery in the plastic and reconstructive surgery area. Unfortunately, however, there has been very little research on this subject mainly because of the complexity of the bone shapes. This paper describes a novel mesh deformation method using edge-based geodesic distance and Voronoi decomposition. This method is robust for topologically complex objects and is able to establish dense registration among sample bone shapes. Experiments confirmed the feasibility of the method in the database construction application.

1. はじめに

3次元形状処理技術、3次元計測技術の発展により、人体各部位の3次元データベース構築の研究が進められ、様々な分野に応用されている。たとえば、顔や手、人体全体の形状を計測し、主値分析などにより統計モデルを構築することが活発に研究されている^{1)–3)}。医学応用に関しても、肝臓、脳、心臓など位相的構造が単純な部位に関しては、統計モデル構築の検討が進められ^{4)–6)}、手術ナビゲーション、術前計画などへの応

用が期待されている。

これらのデータベース構築には、サンプルの計測点の間で密な対応付けが必要である。このため、サンプルデータ上にいくつかの特徴点を指定し、これに基づいてテンプレートとなるメッシュモデルを変形させることが一般的に行われている。顔や肝臓などの比較的単純な形状では、矩形や円盤上でのパラメータ化により、変形処理を行うことができる^{1),4)}。一方、人体全体などのより複雑な形状では、計測データとの距離や変形量などを用いたエネルギーを用いて、非線形の最小化問題として定式化されることが多い^{3),7)}。しかし、1つの特徴点が大域的に影響しうる、収束が遅く計算量が非常に大きい、などの問題点をかかえている。

筆者らは、形成外科領域における臨床応用を目指し、頭蓋顎顔面骨の3次元形状データベースを作成している⁸⁾。このためには、頭蓋骨CTデータの密な形状対

†1 東邦大学理学部情報科学科
Department of Information Science, Toho University

†2 東邦大学医療センター佐倉病院形成外科
Toho University Sakura Hospital

†3 東邦大学形成外科
Toho University Hospital

応付けが必要であり、これに適した変形技法が求められる。変形技法において勘案すべきこととしては、

- 位相的・幾何的に複雑な形状である、
- 特徴点は解剖学的見地から定められるが、顔面部に偏在している、
- 特徴点の影響は、ユークリッド距離ではなく骨に沿った距離（測地距離）に基づく、
- 特徴点の影響範囲を限定する、
- 特徴点数などは動的に変化可能である、
- 変形場は特徴点では指定値に一致し、連続である、
- 対話処理に耐えられる処理時間である、

などがあげられる。残念ながら、上述の変形手法ではこれらの要求を満たすことができない。さらに、自由変形手法（FFD⁹⁾、メッシュ簡素化手法¹⁰⁾などの一般的なメッシュ変形手法でも、要求を満たすことが困難である。

本研究では、頭蓋骨データベース構築を目指し、簡便な測地距離に基づいた変形処理を提案する。距離に基づく領域分割としては、Voronoi 分割およびその双対である Delaunay 分割が代表的である。Delaunay 分割では、特徴点を結ぶ測地線で領域を分割する。穴があるなど位相構造が複雑な場合には、測地線の分岐などが発生し、複雑な処理が必要とされる。そこで、提案手法では、位相構造によらず安定に抽出できる Voronoi 領域を領域の隣接関係により分割する。特徴点の影響範囲を Voronoi 領域により制限することで、影響を局在化するとともに、特徴点の偏在にも対応する。また、位相的・幾何的に複雑な形状も頑強に処理され、特徴点の変更や追加にも柔軟に対応できる。距離尺度としては、メッシュ頂点間の測地距離を最短エッジ列の長さの和、すなわちエッジベース測地距離で定義する。これにより、測地距離の算出は、グラフの最短経路探索で実現される。この探索は、Dijkstra 法などで効率的に求めることができるので、処理時間を合理的範囲内に収めることが可能となる。提案手法を頭蓋骨に適用し変形処理を行ったところ、データベース作成への応用が可能であることが判明した。

2. 頭蓋骨データベース

提案手法の直接のターゲットとなる頭蓋骨データベース作成⁸⁾を簡単に述べる。本研究では、顔面や手、足などの表面形状データベースと同様に、測定形状（CT データ）上の特徴点を指定し、特徴点の位置が一致するように標準テンプレートメッシュモデルを変形させる。テンプレートモデルとしては頂点数 4,764、三角形数 9,464 からなるメッシュモデルを使用した。

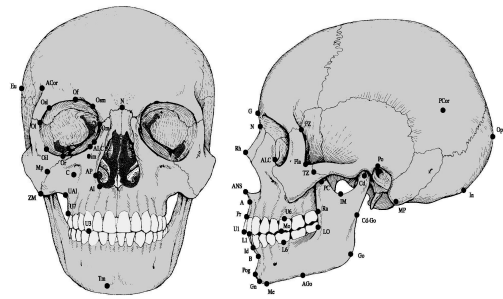


図 1 頭蓋骨顔面骨の特徴点

Fig. 1 The feature points of the skull template model.

変形したテンプレートをデータベースに登録し、主値分析などの統計処理を行う。なお、眼窩内の骨データは今回の頭蓋骨データベース構築とは別に扱うこととし、精度の評価対象からは除外した。

特徴点としては、解剖学的見地に、指定の容易さや幾何学的な必要性を加味し、図 1 に示す 74 点を対話的に指定することとした。また、これ以外に頭部など比較的単純な形状でランダムな特徴に乏しい部位の頂点は、高さや周囲長などによりパラメータ化して対応付けを自動的にを行う。これらの頂点も変形処理において特徴点として取り扱うこととしている。

図から分かるように、1) 顔面部分に特徴点が集中している、2) 鼻骨縫合や大後頭孔、頬骨など穴やトラス状の部位があり位相構造が複雑である、などの特徴がある。また、変形場の補間における特徴点の影響（重み関数）はユークリッド距離ではなく骨表面に沿った距離（測地距離）に依存するのが解剖学的に自然である。さらに、特徴点の影響（重み関数のサポート）は隣接特徴点の周辺程度までに局在化されていることが望ましい。そこで本研究では、測地距離による Voronoi 分割をベースとした、簡潔なメッシュ変形法を開発した。

3. 提案手法

3.1 エッジベース測地距離と Voronoi 分割

測地距離は 2 点間を結ぶ曲面上の曲線の長さの最小値として定義される。この正確な算出は曲面が多面体であっても、容易ではない。そこで、「測地線」をメッシュのエッジ上に限定し、2 頂点間の測地距離を、2 点を結ぶエッジ列のエッジ長の和の最小値と定義する。このエッジベースの測地距離の計算は、グラフ最短経路探索と見なすことができ、Dijkstra 法で効率良く計算することができる¹¹⁾。

各頂点において、各特徴点からの測地距離を計算し、最短の特徴点を求める。同一の特徴点を最短特徴点と

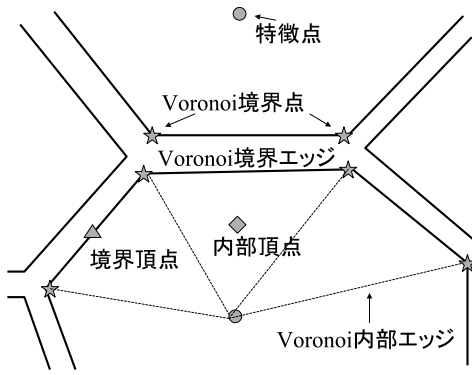


図2 補間処理における頂点の分類。丸印が特徴点，星印がVoronoi境界点，三角が境界頂点，四角が内部頂点を表す
 Fig.2 Classification of vertices in the interpolation process. A circle, star-shape, triangle, and rectangle indicates a feature point, Voronoi boundary point, boundary vertex, and inner vertex, respectively.

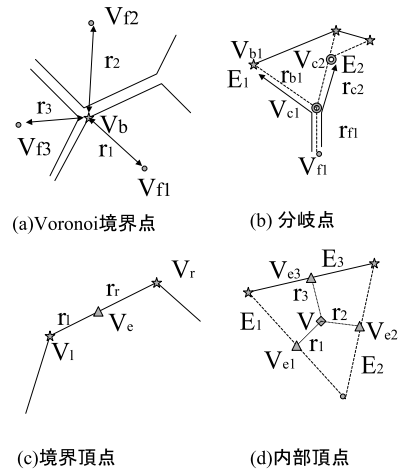


図3 頂点の補間処理
 Fig.3 Interpolation of vertices.

する頂点群を，その特徴点のVoronoi領域とすることが出来る．この処理をまとめると以下ようになる．
Voronoi 分割：各特徴点に対して以下の処理を行う．

- (1) Dijkstra 法により各頂点までの測地距離を求める．
- (2) 各頂点において，計算された距離が最小であれば，この特徴点と距離を保持する．

3.2 補間領域の作成

前節で得られた頂点群から補間領域を作成する．ある特徴点のVoronoi領域に含まれる頂点は，当然その特徴点の影響を受けるが，隣接するほかの特徴点の影響も受けなければ連続的な変形は得られない．そこでVoronoi領域を隣接特徴点によりさらに分割し，補間領域を作成する．

頂点は，すべての隣接頂点（エッジを共有する頂点）が同一Voronoi領域に属する場合には領域の内部にあり，それ以外の場合は領域の境界にある．前者の頂点を内部頂点，後者を境界頂点と呼ぶことにする．また，同一の特徴点と隣接する境界頂点を結ぶエッジ列をVoronoi境界エッジ，その両端点をVoronoi境界点，さらに，Voronoi境界点と特徴点を結ぶ測地線をVoronoi内部エッジと呼ぶことにする（図2）．境界エッジ，内部エッジで囲まれた3角形状の領域が補間処理の処理単位となる．

3.3 補間処理

図3に示すように，補間処理は以下の方針で行う．

- Voronoi境界点では，隣接する特徴点と属する領域の特徴点との測地距離により補間する．
- Voronoi境界エッジおよびVoronoi内部エッジ上の頂点では，両端のVoronoi境界点もしくは特徴

点との測地距離に基づき補間する．

- 内部頂点では，点を囲んでいるVoronoi内部エッジ，境界エッジとの測地距離に基づき補間する．

このような処理で，連続性と影響の局所性を実現することができる．しかし，エッジベースの測地線の問題点は，離散化の影響により縮退する場合があることである．たとえば，図3(b)のようにVoronoi内部エッジ E_1, E_2 が重なりあっているような場合を考える．分岐点においてエッジ E_1 による補間値とエッジ E_2 による補間値は異なるので，単純にエッジごとに補間するのでは，連続性が成り立たなかったり，処理の順番により値が異なったり，不合理な結果をもたらす．そこで本研究では，分岐点における補間は，依存関係を表す連立方程式を解くことで算出するようにした．分岐点以外の測地線上の頂点は，両側にある特徴点，Voronoi境界点もしくは分岐点の値から補間する．

以上の方針に従い，頂点 V の補間値 $F(V)$ を次のように計算する（図3）．

- (1) 特徴点

特徴点 V_f における値は指定された値 f_0 とする．

$$F(V_f) = f_0 \tag{1}$$

- (2) Voronoi境界点

Voronoi境界点 V_b の属する領域の特徴点および隣接Voronoi領域の特徴点を V_{f_i} とし， V_b との距離を r_i としたとき，

$$F(V_b) = \sum w(r_i)F(V_{f_i})/W \tag{2}$$

$$W = \sum w(r_i)$$

と求める．ただし， $w(r)$ は重み関数で，後述する．

(3) 分岐点

分岐点 V_{cj} に隣接している特徴点, 境界点, 分岐点を V_{fi}, V_{bi}, V_{ci} とし, V_{cj} との測地距離を r_{fi}, r_{bi}, r_{ci} とする. $F(V_{cj})$ をこれらの隣接値から補間するには,

$$\begin{aligned} F(V_{cj}) &= \sum w(r_{ci})F(V_{ci})/W \\ &= \sum w(r_{fi})F(V_{fi})/W + \sum w(r_{bi})F(V_{bi})/W \end{aligned} \quad (3)$$

とすればよい. ただし, W は重みの和である. 式 (3) は $F(V_{cj})$ に関する線形方程式となるので, これを解けば補間値が求められる. 方程式は Voronoi 領域の内部に閉じるので, 通常, 方程式のサイズは大きくはない.

(4) Voronoi 境界/内部エッジ上の点

Voronoi 境界エッジ・内部エッジ上の頂点 V_e の値は, エッジの左右で最短にある特徴点, 境界点, 分岐点, V_r, V_l から補間される. それぞれとの距離を r_r, r_l とおき,

$$F(V_e) = (w(r_l)F(V_l) + w(r_r)F(V_r))/W \quad (4)$$

とする.

(5) 内部頂点

内部頂点 V を取り囲む Voronoi 境界エッジもしくは内部エッジを E_i とし, それぞれのエッジ上で V に最短である頂点を V_{ei} とし, 距離を r_i としたとき,

$$F(V) = \sum w(r_i)F(V_{ei})/W \quad (5)$$

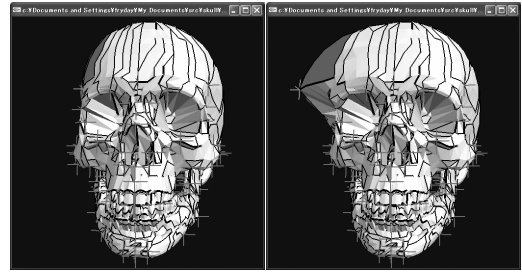
と求める.

重み関数としては, 倉立¹⁾と同様に, 距離の逆数 $w(r) = 1/r$ (6) を用いた. この関数は, 2点間の補間では通常の線形補間となり, 3点以上の場合は, その点上における補間値が点での指定値と一致する¹²⁾. すなわち, Voronoi 境界・内部エッジ上での連続性が保証される. また, 特徴点の影響は, 自身の Voronoi 領域および隣接する Voronoi 領域に一致することになる.

3.4 処理手順

前節までに述べた手法の手順は以下のようになる.

- (1) すべての特徴点に対して Voronoi 領域を求める.
- (2) Voronoi 境界エッジ, Voronoi 内部エッジ, Voronoi 境界点を抽出する.
- (3) 分岐点を抽出し, 連立方程式を作成する.
- (4) Voronoi 境界点の補間値を計算する.
- (5) 分岐点の補間値を計算する.
- (6) Voronoi 境界・内部エッジ上の頂点の補間値を計算する.
- (7) 内部頂点の補間値を計算する.



(a)変形前

(b)変形後

図 4 頭蓋顎顔面骨テンプレートの Voronoi 領域. Voronoi 境界線を黒線で, 特徴点は十字で示している. 赤で示す特徴点を移動したときの変形を示している

Fig. 4 The Voronoi regions of the skull template model. Cross lines indicate feature points. The skull was deformed by moving the red-marked feature point.

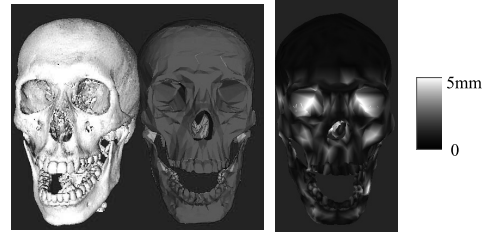


図 5 テンプレートの変形と誤差

Fig. 5 Deformed skull template.

4. 実験

提案手法を実装し, 頭蓋顎顔面骨テンプレート (4,764 頂点) に適用した. 図 4 (a) に Voronoi 境界エッジおよび内部エッジを示し図 4 (b) に特徴点 1 点を移動したときの変形を示す. 図のように, 影響が局在化していることが分かる. 図 5 に, ターゲットとなる CT データを変形したテンプレートを示す. CT データは濃度の閾値処理により骨格部分を抽出し, さらに勾配の絶対値に関する閾値処理により骨格表面を表すボクセル群として表現されている. フィッティングの良さを示すために, 変形テンプレートの各頂点と CT の骨格表面との間の最小距離を測定した. この距離を濃淡表示したものを同じく図 5 に示している. 今回の研究でデータベースの対象外とした眼窩部を除けば, 距離値は小さく, 平均距離は 1.5 mm であった. CT データのスライス間隔が 1 mm であることを考えると, 実用的な精度が得られているといえる. 処理時間は Windows PC (AMD Athlon 64 (2 GHz), 主記憶 2 GB) 上で 8.5 秒であった.

5. まとめ

頭蓋骨データベース構築を目指し, 測地距離に基づ

いた領域分割法による変形処理を提案した。提案手法は、1) 複雑な位相構造でも安定に変形できる、2) 各特徴点の影響を局在化できる、3) 特徴点の偏在や変更・追加に柔軟に対応できる、などの特徴を持つ。手法を実装し、実データに適用したところ、実用可能であることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 倉立尚明: 顔形状データベースを用いた写真からの3次元表情推定と顔アニメーションへの応用, 画像電子学会誌, Vol.34, No.4, pp.344-355 (2005).
- 2) Kamojima, S., Miyata, N. and Ota, J.: Identification of Position and Orientation of Hand Bones from MR Images by Bone Model Registration, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2021-2027 (2004).
- 3) Allen, B., Curless, B. and Popvic, Z.: The Space of Human Body Shapes: Reconstruction and Parameterization from Range Scans, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.587-594 (2004).
- 4) Lamecker, H., Lange, T. and Seebaß, M.: Segmentation of the Liver using a 3D Statistical Shape Model, ZIB Preprint 04-09 (2004).
- 5) Rueckert, D., Frangi, A.F. and Schnabel, J.A.: Automatic Construction of 3-D statistical Deformation Models of the Brain using Nonrigid Registration, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.22, No.8, pp.1014-1025 (2003).
- 6) Frangi, A.F., Rueckert, D., Schnabel, J.A. and Niessen, W.J.: Automatic Construction of Multiple-object Three-dimensional Statistical Shape Models: Application to Cardiac Modeling, *IEEE Trans. Medical Imaging*, Vol.21, No.9, pp.1151-1166 (2002).
- 7) Shinya, M.: Unifying Measured Point Sequences of Deforming Objects, *3DPVT 2004*, pp.904-911 (2004).
- 8) 新谷幹夫, 白石路雄, 林 明照, 丸山 優ほか: 3次元頭蓋顎顔面骨データベース構築システムの基本構成, 日本シミュレーション外科学会誌, Vol.15, No.1, pp.15-20 (2007).
- 9) Sederberg, T. and Parry, S.: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, *SIGGRAPH'86*, pp.151-160 (1986).
- 10) Lee, A., Dobkin, D., Sweldens, W. and Schröder, P.: Multiresolution Mesh Morphing, *SIGGRAPH'99*, pp.343-350 (1999).
- 11) Hilaga, M., Shinagawa, Y., Kohmura, T. and Kunii, T.L.: Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes, *SIGGRAPH2001*, pp.203-212 (2001).
- 12) Beier, T. and Neely, S.: Feature-based image metamorphosis, *Computer Graphics*, Vol.26, No.3, pp.35-42 (1992).

(平成 19 年 8 月 2 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



新谷 幹夫 (正会員)

1979年早稲田大学理工学部応用物理学卒業。1981年同大学院理工学研究科物理および応用物理学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。視覚系の心理物理学的研究, 文字認識の研究, コンピュータグラフィックスの研究等に従事。2001年東邦大学理学部情報科学科教授。工学博士。シミュレーション外科学会, 画像電子学会, 電子情報通信学会, ACM各会員。



白石 路雄 (正会員)

1974年生。2003年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。博士(学術)。同年株式会社ガリレオ入社。現在東邦大学理学部情報科学科専任講師。コンピュータグラフィックス, 特にノンフォトリアリスティックレンダリングの研究に従事。画像電子学会, ACM, IEEE-CS各会員。



林 明照

1983年東邦大学医学部卒業。医学博士。東邦大学医療センター佐倉病院形成外科教授。主な所属学会および役職は, 日本形成外科学会, 日本マイクロサージャリー学会・評議員, 日本頭蓋顎顔面外科学会・評議員, 日本シミュレーション外科学会等。



丸山 優

1971年東邦大学医学部卒業。医学博士。東邦大学医学部形成外科学講座主任教授。主な所属学会・役職は、日本形成外科学会・理事，日本美容外科学会・理事，日本マイクロサージャリー学会・理事，日本シミュレーション外科学会・理事，PPSA (PAN-PACIFIC SURGICAL ASSN)・理事，日本頭蓋顎顔面外科学会理事長等。また，第1回形成外科内視鏡手術研究会会長(1996年)，第26回日本マイクロサージャリー学会会長(1999年)，第10回日本形成外科学会基礎学術集会会長(2001年)，第22回日本頭蓋顎顔面外科学会会長(2004年)，第4回国際シミュレーション外科学会会長(2004年)，第14回日本シミュレーション外科学会会長(2004年)等を歴任。
