

物体表面の運動解析を用いた 階層的領域分割における階層数の評価法

河村翔太^{†1} 森田伊織^{†2} 坂本博康^{†3}

本報告は、物体表面の運動解析法を用いて、その形状の単純さを定量的に評価し、階層的な領域分割法における階層の深さを決定する手法を提案する。領域分割には Katz 等の測地線距離に基づいた特徴点とコア要素の抽出による手法を用いる。この手法は姿勢に対して不変な領域分割が可能となるが、分割を繰り返す階層の深さについてはユーザーに依存している。そこで、領域分割の階層を1段階進める際に、前処理として物体表面を Pottmann 等の手法により運動解析し、物体がどの程度単純な形状を持つ部分まで領域分割されたかを定量的に評価する。この評価に基づいた数値実験において適切な階層までの分割が行われ、提案手法の有効性を示すことができた。

Estimation levels of the hierarchy in hierarchical segmentations using Equiform Kinematics

SHOTA KAWAMURA^{†1}, IORI MORITA^{†2} and HIROYASU SAKAMOTO^{†3}

In this report, we propose a method for evaluating simplicity of fitted 3D-model and for determining hierarchical level of 3D-object segmentation by analyzing equiform kinematics of the object surface. We adopt Katz's segmentation method which uses feature point and core extraction based on geodesic distances. This algorithm is invariant to the pose of the model, but number of hierarchical levels in segmentation depends on user decision. Then, before promoting the levels of hierarchy in segmentation, we use Pottmann's equiform kinematics method on the model's surface and evaluate fitness and simplicity of the model. Numerical experiments show that the proposed method effectively segments a 3D-object with appropriate levels of hierarchy.

1. はじめに

3次元(3D)物体の幾何学的形状の解析は、3DCGのモデリングやCADにおけるリバースエンジニアリングなどの様々な分野において重要な技術であり、従来から活発に研究されてきた。近年特に、高精度のレーザスキャナなどによって得られた3D形状のメッシュデータから、その物体形状の幾何学的特徴に適合した部分メッシュ領域への分割や再メッシュ化の研究が進められている[1][2]。

メッシュの領域分割に関する多くの研究では、クラスタリング手法のうち領域成長、反復的クラスタリング、スペクトラルクラスタリングなどを利用している[3][4]。実際には多くの物体モデルにおいて、大まかに粗く分けられた部分から、更にそれが細かい部分に分割されるように、階層的な構造を持つ場合があり、これを抽出できれば、その物体の製造や描画などの際にこの構造を効果的に利用することが可能になる。階層的なメッシュ領域分割法として、形状の目立つ特徴点と形状全体の大域的な核部分、および物体表面の局所的な凹部分を利用する方法が提案され、良好な結果が報告されている[5]。しかしこの方法では、ある階層まで分割された各部分について、更にどの階層まで再分

割を進めれば、各部分間のバランス良い分割が可能になるかについて、定量的な評価基準は示されておらず、主観的な判断に頼る必要があると考えられる。

本報告では、最終的な形状分割が幾何学的な3Dプリミティブ形状(回転体や平面)などで良好に近似される状態という前提の下に、階層的な領域分割における階層数の評価法を新たに提案する。そのためここでは、Pottmann等による線分要素の運動解析に基づく物体表面の表現方法[6]を利用した尺度を採用し、3Dプリミティブ形状など比較的広範囲の基本的形状との近似の程度を定量的に評価する。

以下、本報告の2章では線分要素の運動解析に基づく物体表面の表現方法について説明し、3章ではKatzらの階層的なメッシュ領域分割法を紹介する。4章において本研究の階層の評価法を提案し、5章で数値実験結果とその考察を述べ、6章でまとめる。

2. 物体表面の表現方法

本提案手法では、Pottmann等による直線の数式化に関する研究[6]において提唱されたLine Element Geometry(以下では線要素幾何学と呼ぶ)を用い、運動解析を通した物体の表面形状解析を行う。線要素幾何学ではPlücker座標を拡張した線分の表現が可能になっている。

^{†1} 九州大学大学院芸術工学府
Graduate school of design, Kyushu University.

^{†2} (株)ペンシル
Pencil Inc.

^{†3} 九州大学大学院芸術工学府
Faculty of design, Kyushu University.

2.1 Plücker 座標

図 1 (a)に示すような 3D 空間内の直線 L を表す Plücker 座標は, $(\mathbf{l}, \bar{\mathbf{l}})$ のような 6D ベクトルである. ここで, \mathbf{l} は

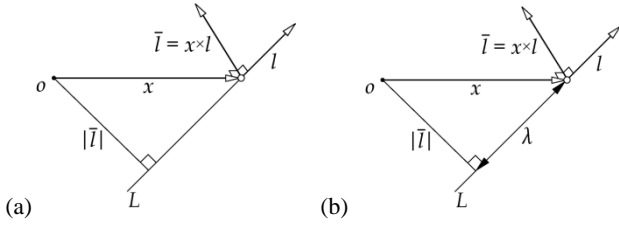


図 1 (a) Plücker 座標, (b) 線要素幾何学の 7D ベクトル.
Figure 1 (a) Plücker coordinates, (b) a 7D vector of line element geometry.

直線 L の 3D 方向ベクトル, $\bar{\mathbf{l}}$ は L 上の任意の点 \mathbf{x} と \mathbf{l} の外積 $\bar{\mathbf{l}} = \mathbf{x} \times \mathbf{l}$ である. \mathbf{l} と $\bar{\mathbf{l}}$ は直交するので, その内積 $\mathbf{l} \cdot \bar{\mathbf{l}} = 0$ となる. また, $(\mathbf{l}, \bar{\mathbf{l}})$ は斉次ベクトルなので自由度は 5 であるが, さらに $\|\mathbf{l}\| = 1$ の単位ベクトルとなるように正規化されるものとする. よって Plücker 座標は, その自由度 4 の多様体となる.

2.2 線要素幾何学

ここでは直線 L 上に点 \mathbf{x} を位置付けるために, 上述の Plücker 座標はスカラー値 $\lambda = \mathbf{x} \cdot \mathbf{l}$ を付加して拡張され 7 ベクトル $(\mathbf{l}, \bar{\mathbf{l}}, \lambda)$ となる. これは線要素 (L, \mathbf{x}) の Plücker 座標による表現であり, L 上の点 \mathbf{x} は, 図 1 (b)に示すように次式で表される.

$$\mathbf{x} = \mathbf{l} \times \bar{\mathbf{l}} + \lambda \mathbf{l}. \quad (1)$$

この斉次 7 ベクトル $(\mathbf{l}, \bar{\mathbf{l}}, \lambda)$ は, 前節の Plücker 座標と同様に $\|\mathbf{l}\| = 1$ と正規化され, $\mathbf{l} \cdot \bar{\mathbf{l}} = 0$ を保つ, 自由度 5 の多様体となる.

次節では, この線要素幾何学の表現に基づいた, equiform transformation [6] (本文では, 等形変換と呼ぶ) による運動解析を利用した面の表現法について述べる.

2.3 物体表面の表現

2.3.1 等形変換による運動

ある点 \mathbf{x} に対する時間パラメータ t による滑らかな運動として, 拡大縮小, 回転, 平行移動を考え, これらを先ずそれぞれスカラー $\alpha(t)$, 3×3 正規直交行列 $\mathbf{A}(t)$, 3×1 ベクトル $\mathbf{a}(t)$ を用いて表せば, 時刻 t における位置は,

$$\mathbf{y}(t) = \alpha(t)\mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{a}(t). \quad (2)$$

速度ベクトル $\dot{\mathbf{y}}(t)$ をその位置 $\mathbf{y}(t)$ で表せば次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{y}}(t) &= \dot{\mathbf{A}}\mathbf{A}^T\mathbf{y}(t) + \frac{\dot{\alpha}}{\alpha}\mathbf{y}(t) - \dot{\mathbf{A}}\mathbf{A}^T\mathbf{a} - \frac{\dot{\alpha}}{\alpha}\mathbf{a} + \dot{\mathbf{a}}, \\ &= \mathbf{c} \times \mathbf{y}(t) + \gamma\mathbf{y}(t) + \bar{\mathbf{c}}. \end{aligned} \quad (3)$$

上式で, 行列 $\dot{\mathbf{A}}\mathbf{A}^T$ は外積を表す反対称行列となるから,

その 3 要素から作った 3×1 ベクトル \mathbf{c} は回転成分より構成され, $\gamma = \dot{\alpha}/\alpha$ は拡大縮小成分, $\bar{\mathbf{c}} = -\dot{\mathbf{A}}\mathbf{A}^T\mathbf{a} - \dot{\alpha}/\alpha\mathbf{a} + \dot{\mathbf{a}}$ は前の 2 成分を含む平行移動成分を表している.

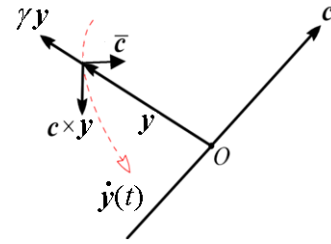


図 2 $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}, \gamma)$ による運動の速度ベクトル.
Figure 2 Velocity vector by $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}, \gamma)$.

図 2 には上の 7D ベクトル $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}, \gamma)$ による運動を図示している. ある点集合のこのような運動の軌跡が物体表面を形成すると仮定する場合, その運動モデルを表面のデータに適用して $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}, \gamma)$ を求めることにより, その物体の形状を解析・近似することができる.

2.3.2 運動解析による局所的 3D 形状の近似

レーザスキャナ等の出力データから $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}, \gamma)$ を次のように求めることができる. ここでの 3D 物体の形状データとして構造化されていない三角形メッシュを想定し, メッシュの各頂点の 3D 座標 $\{\mathbf{x}_i\}$ とその連結情報, 及び各頂点での単位法線ベクトル $\{\mathbf{n}_i\}$ が与えられているとする. ここで, 各法線ベクトルの Plücker 座標表現を $(\mathbf{n}_i, \bar{\mathbf{n}}_i, \delta_i)$ とすれば, $\bar{\mathbf{n}}_i = \mathbf{x}_i \times \mathbf{n}_i$, $\delta_i = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{n}_i$ である.

さて, 各頂点における運動の速度ベクトル,

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{c} \times \mathbf{x}_i + \gamma\mathbf{x}_i + \bar{\mathbf{c}} \quad (4)$$

とその点における法線ベクトルは直交するので, その近傍における k 個の頂点に対する運動パラメータの適合度 f は次式で評価できる.

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\mathbf{v}(\mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{n}_i)^2 \\ &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \{(\mathbf{c} \times \mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{n}_i + \gamma\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{n}_i + \bar{\mathbf{c}} \cdot \mathbf{n}_i\}^2 \\ &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \{(\mathbf{c} \cdot \bar{\mathbf{n}}_i + \gamma\delta_i + \bar{\mathbf{c}} \cdot \mathbf{n}_i)\}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

但し, 上の最後の変形ではスカラー 3 重積の公式から得る,

$$(\mathbf{c} \times \mathbf{x}_i) \cdot \mathbf{n}_i = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{x}_i \times \mathbf{n}_i) = \mathbf{c} \cdot \bar{\mathbf{n}}_i \quad (6)$$

を用いている.

式(5)を変形して 2 次形式を導けば, 次式を得る.

$$f = [\mathbf{c}^T, \bar{\mathbf{c}}^T, \gamma] \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \bar{\mathbf{n}}_i \\ \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i^T & \bar{\mathbf{n}}_i^T & \delta_i \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \mathbf{c} \\ \bar{\mathbf{c}} \\ \gamma \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{C}^T \mathbf{N} \mathbf{C} \quad (7)$$

この式を最小化する運動パラメータ $\mathbf{C} = [\mathbf{c}^T, \bar{\mathbf{c}}^T, \gamma]^T$ を求める問題は、拘束条件 $\|\mathbf{C}\|^2 = 1$ の下での f の最小化問題、つまり \mathbf{N} の固有値問題となる。

$$\mathbf{N} \mathbf{C}_i = \mu_i \mathbf{C}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (8)$$

このとき、求められた非負固有値の値が小さいほど良いパラメータが近似できていることになるため、小さい固有値の個数とその値を尺度として、局所的な物体形状の近似の状態を測ることができる。次節では、零固有値の個数と形状との関係について述べる。

2.4 零固有値の個数と形状

固有方程式 (8) の行列 \mathbf{N} は、回転、平行移動、拡大縮小の成分としてそれぞれ 3, 3, 1 列 (または行) の情報を有しているため、これらの成分に対してそれぞれ最大 3, 3, 1 個の零固有値をとり得る。従って、例えば平面は、その法線を軸とする回転、平面内の 2 方向の平行移動、平面内の同心円のような拡大縮小、に対応する全部で 4 個の零固有値を持つことになる。

表 1 には、零固有値の 1 個から 4 個までの個数に対して物体の種類をまとめている。また、図 3 ではいくつかの物体における運動の種類と回転軸、移動方向などを図示している。

実際の物体に対する数値計算においては、計測誤差や形状の加工段階の誤差の影響はもとより、もともと粗い近似のときなど、さまざまな場合においてどの程度までを零固有値と見なすか、適応的に判断することが必要である。

表 1 零固有値の個数と物体の種類。

Table 1 Numbers of zero eigenvalues and corresponding objects.

零固有値の個数	物体の種類
1	一般の回転体, 角柱
2	円錐, 円柱, 角錐
3	球
4	平面

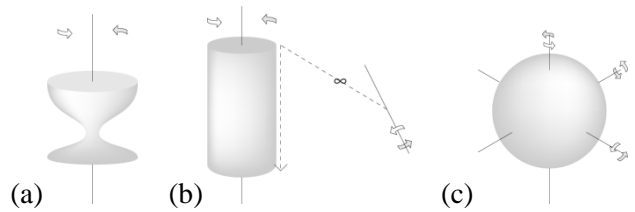


図 3 零固有値の個数による物体形状の例とその運動, (a) 一般の回転体(1個), (b) 円柱(2個), (c) 球(3個).

Figure 3 Examples of object shapes and their kinematics with respect to the numbers of zero eigenvalues,

(a) general solid of revolution(1), (b) cylinder(2), sphere(3).

3. 測地線距離に基づく領域分割

本報告では 3D メッシュの領域分割方法に Katz 等の階層的な領域分割の手法[5]を用いている。Katz 等の手法は測地線距離に基づいて算出された特徴点とコア要素を用いることにより、モデルの姿勢の影響を受けにくい領域分割法を提案している。

3.1 姿勢に不変な表現

この手法では、姿勢に依存しない 3 次元形状の表現のために、分割の対象となる形状モデルに対して多次元尺度法 (MDS) を用い、湾曲の少ない形状への変換処理を行っている。MDS は、データの相似度 (または相違度) 情報を任意次元の空間での距離として表すことにより、データ間の幾何学的な構造を明らかにするものである。

ここでは、形状の曲り具合による影響が少ない測地線距離を、メッシュの頂点間の相違度情報として用いる。頂点 i, j 間の測地線距離を δ_{ij} 、それらの頂点間の非計量 MDS 空間内におけるユークリッド距離を d_{ij} として、次のストレス関数 F_S を定義する。

$$F_S = \frac{\sum_{i < j} (f(\delta_{ij}) - d_{ij})^2}{\sum_{i < j} d_{ij}^2} \quad (9)$$

この関数 $f()$ は単調な非線形関数であり、測地線距離の順序を保存しながら非計量 MDS におけるストレス関数 F_S の最小化を達成するため、最適化の過程でその形が同時に決定される。その結果、姿勢に不変な 3 次元形状の表現 (以下、MDS メッシュと呼ぶ) が得られる。Katz 等による、形状の曲り具合の影響が著しく除去された例を図 4 に示している。

この MDS アルゴリズムは、元の頂点を任意の m 次元のユークリッド空間へ張り直すことができる。しかし、物体の要素の形状を保ったまま、姿勢に依存しない形状へと変化させるためには、元と同じ次元 ($m = 3$) に張るのが適当である。例えば、2 次元への射影は情報の欠落を引き起こし、3 次元より大きい次元は頂点の凸包近傍への集中を招

くので一般的な形状を変えることになる。

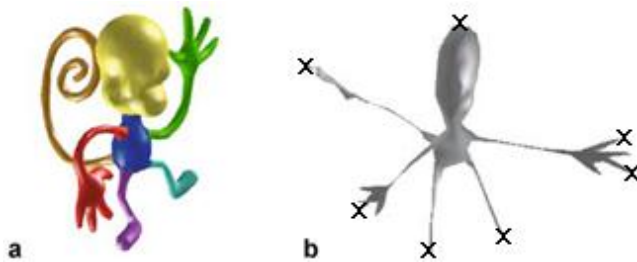


図4 (a)入力メッシュ, (b) 測地線距離を用いた姿勢に独立な MDS メッシュと顕著な特徴点 (X 印), 文献[5].

Figure 4 (a) Input mesh, and (b) pose independent MDS mesh by geodesic distance with prominent feature points (indicated by X), modified from reference [5].

3.2 特徴点とその抽出

前節で得られた MDS メッシュにおいて, 特に突き出した頂点を顕著な特徴点として抽出し, 物体形状の重要な特徴として利用する.

N_v を頂点 v の隣接頂点の集合とし, $GeodDist(v_i, v_j)$ をメッシュ S 上の頂点 (v_i, v_j) 間の測地線距離とする. なお, 本報告における隣接頂点の集合はリング数 1 の頂点としている. v が特徴点であるために満たすべき局所的な条件は, $\forall v_n \in N_v$ に対して次式が成り立つことである.

$$\sum_{v_i \in S} GeodDist(v, v_i) > \sum_{v_n \in S} GeodDist(v_n, v_i). \quad (10)$$

この条件は顕著な特徴点を抽出するが, 小さなノイズの影響で, 多くの顕著ではない特徴点も取り出してしまふ. そこで, MDS メッシュでは先端の頂点は特定の方向に広がっていく傾向を利用して, 特徴点は MDS メッシュの凸包上に存在するはずであるという大域的条件を付加し, ノイズの影響から誤って出現した特徴点を除去する.

図 4 (b)には, このようにして抽出された特徴点の位置が X の印で記入されている.

3.3 核領域とその抽出およびメッシュ分割

以下では, 前節で抽出された顕著な特徴点を 1 個または複数個含む領域を顕著な領域と呼び, 特徴点を 1 個も含まない領域を核領域と呼ぶ. 本節では物体のメッシュ全体をこの 2 種類の領域へ分割する方法を説明する. この手法の分割アルゴリズムは次の 3 ステップで構成される.

- (1) 球面に対する鏡像化の処理,
- (2) 核領域の抽出,
- (3) 顕著な領域の抽出.

3.3.1 球面に対する鏡像化の処理

前述のように, 顕著な特徴点は MDS メッシュ上で物体の中心から周辺方向の末端付近に位置する傾向があり, 他方, 核要素の頂点は MDS メッシュの中心にかたまる傾向がある. そこで, MDS メッシュをとり囲む最小の球面に対

して, もとの頂点を鏡像となる頂点の位置まで反転させた MDS メッシュを作成すれば, ここでの外側の頂点として, 核要素の抽出が容易になる.

具体的には, C と R をそれぞれこの境界球面の中心座標と半径として, MDS メッシュのそれぞれの頂点 v を以下の式によって鏡像変換する.

$$v_{mirror} = v + 2(R - \|v - C\|) \frac{(v - C)}{\|v - C\|} \quad (11)$$

この処理により, 核の頂点の像は凸包付近に位置し, 一方, 顕著な特徴点は凸包の内側深くに位置することになる. 以上の様子を図 5 に示している.

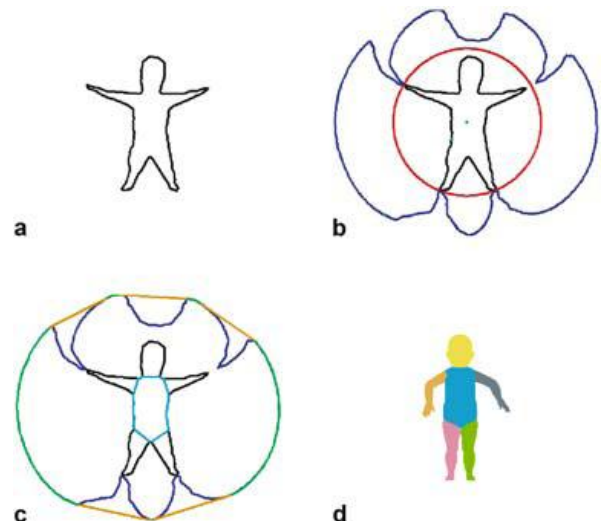


図5 (a) 入力メッシュ, (b) 球面による鏡像化処理, (c) 全体の凸包, (d) 核領域 (胴体部分) の抽出結果[5].

Figure 5 (a) Input mesh, (b) spherical mirroring,

(c) convex hull of entire mesh, (d) detected core region, [5].

3.3.2 核領域の抽出

球面鏡像化処理で反転された頂点と元の頂点の全体に対して凸包を計算し, その凸包上に位置する頂点を核領域の初期領域として抽出する. これがそれ以外の顕著な領域をすべて分離しているときは, この初期領域がそのまま核領域の結果となる. しかし, 初期の核領域がその他の顕著な領域を分離していないときは, 次の 2 条件のうち 1 方を満たすまで, 核領域に隣接するメッシュの面を核領域へ追加する処理を繰り返して拡張する.

条件 1 : その時点で, 核領域がすべての顕著な特徴点を分割し, つながりのない顕著な領域を作っている.

条件 2 : 核領域から最寄りの顕著な特徴点への最短距離が, 初期の核領域に対する距離の初期値の定数倍 (0.5) 以下になった.

後者は, 複数の顕著な特徴点がお互いに近い位置に在り, 従って核領域で分離できない (あるいは, すべきでない)

場合を意味している。

3.3.3 顕著な領域の抽出

上で求めた核領域の部分メッシュを全体のメッシュから差し引くことによって、その他の顕著なメッシュ領域の分割が抽出される。このとき、少なくとも1個の顕著な特徴点をもつ連結領域を顕著な領域の分割となり、特徴点を1個も含まない領域は核要素に加えらる。

4 階層の深さの評価法

ここまで述べた理論を用いて、本手法は以下のようなアルゴリズムで処理を行う。

1. 入力メッシュを、測地線距離に基づいたストレス関数を最小化することでMDSメッシュへと変換する。
2. MDSメッシュに対し凸包を計算し、条件を満たす凸包上の頂点を特徴点として抽出する。
3. MDSメッシュの境界球面での球面鏡像処理により初期核領域を抽出する。
4. 初期核領域と顕著な領域を分離しきれない場合、初期核領域の拡張処理を行う。
5. 分離された領域に対して形状の単純さの評価を行う。設定された条件を満たす場合、そこで分割処理を終了する。
6. 核領域から分離された5の条件を満たさない領域をそれぞれ新たな入力メッシュとして、すべての領域が5の条件を満たすまで1-6の処理を繰り返す。この繰り返しの際に階層のレベルを上げる。

本研究では上記のステップにおいて Pottmann 等の手法を用い、分割された要素の単純さを計算し、分割の階層の深さの評価を試みている。これにより、階層をユーザーが指定するような領域分割手法で起きうる過分割を防いでいる。

具体的には階層的に領域分割が繰り返されるたびに前処理として頂点と法線のデータから表面形状の運動解析を行い、固有値の値を用いて形状の単純さと近似の程度を測り、それが以下の2つの条件の両方を満たすと分割を終了するものとする。

条件 1:

全体の固有値の和と最小の固有値との比が閾値以下になる。

条件 2:

最小固有値とその次に小さい固有値の比が閾値以下になる。

条件 1 では、固有値の大きさは運動解析結果と対象の形状の誤差を表すので、全体の誤差と最小固有値のあらかず誤差の比率、つまり、全固有値の和で最小固有値を割った値を、対象の形状の単純さをはかる指標として用いている。しかし、領域分割の過程では、細部の形状と全体の形状との割合のために分割が進む中で形状が分割前より複雑になることもある。たとえば腕全体から手のひらのみへと分割されたとき、腕全体のほうが円柱のような単純な形に近い。

そこで条件 2 では、分割が進んだ単純な末端の要素は円柱や、円錐のような形状に近づくはずであり、分割が進みすぎた場合は回転体や、平面のような形状へと近づくはずであるという仮定の下、拘束条件を0固有値の数による形状の推定として加えている。言い換えると、0固有値の数が1つ(回転体)や、3つ以上(球、平面)ではなく、2つ(円柱、円錐)であるのが望ましいという条件となる。

5 結果

本稿では、スキャンされた高精細な人体の腕モデルに対して領域分割、および、分割された形状の単純さの評価を行った。使用したモデルの頂点数は151681個、面の数は151552個、エッジは303232本である。結果、領域分割は設定された閾値(条件 1: 0.001, 条件 2: 1.5)によって指を分割する階層で終了し、過剰な分割を防ぐ方法として有用であることを確認できた。モデルの分割結果を図6に、最小固有値の全固有値に対する比率と全固有値の和の数値データを図7にグラフで図示する。また、各固有値の値と全固有値の和の値、および最小固有値と全固有値の和の比率、0固有値の数を表2に、最小固有値と全固有値それぞれの比率を表3に示す。

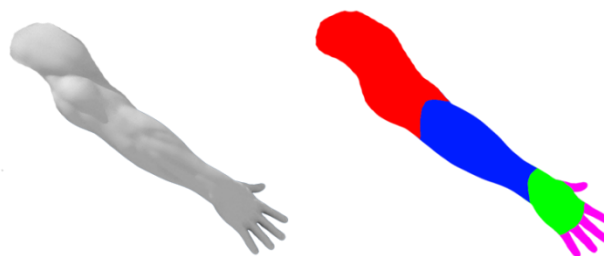


図6 入力メッシュ(左)と分割結果(右)

Figure 6 Input mesh(left) and segmentation result(right).

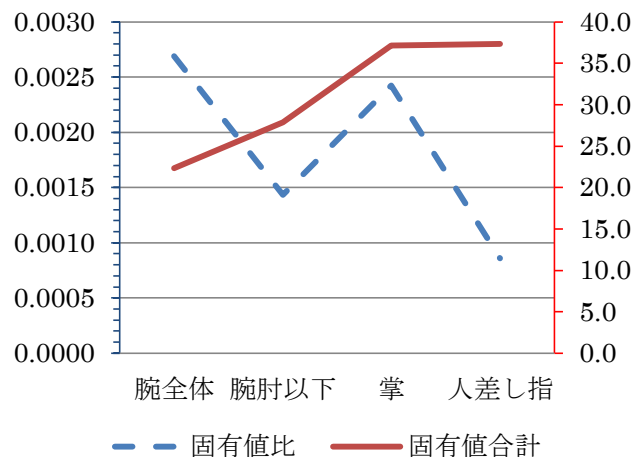


図7 最小固有値の比(左軸)と固有値の合計(右軸)のグラフ
 Figure 7 Minimum eigenvalue(left axis) and sum of eigenvalues(right axis)

表2 最小固有値と全固有値の和の比, 0固有値の数

	腕全体	腕肘以下	掌	人差し指
最7固有値	11.0000	13.5000	12.0000	15.7000
第6固有値	8.2000	10.5000	10.4000	13.8000
第5固有値	1.9000	2.6000	7.8000	6.7000
第4固有値	0.5000	0.7000	6.2000	0.6000
第3固有値	0.3400	0.3400	0.4700	0.4800
第2固有値	0.3000	0.2200	0.2000	0.0340
第1固有値	0.0600	0.0400	0.0900	0.0320
固有値合計	22.3000	27.9000	37.1600	37.3460
全固有値比	0.0027	0.0014	0.0024	0.0009
0固有値の数	1	1	1	2

表3 最小固有値と各固有値の比

	腕全体	腕肘以下	掌	人差し指
最7固有値比	183.33	337.50	133.33	490.63
第6固有値比	136.67	262.50	115.56	431.25
第5固有値比	31.67	65.00	86.67	209.38
第4固有値比	8.33	17.50	68.89	18.75
第3固有値比	5.67	8.50	5.22	15.00
第2固有値比	5.00	5.50	2.22	1.06
第1固有値比	1.00	1.00	1.00	1.00

6 まとめ

本手法では腕全体のモデルを上腕, 下腕, 掌, 指の要素に分割し, 必要以上の分割を行わずに処理を終了することができた. ここで, 手というものは直感的には指の関節の階層まで分割可能であるが, 実験に用いた形状データに指の関節の特徴はほとんど含まれておらず, 関節を分割するには, モデルが表すものへの予備知識が必要であったため, この階層での分割処理の終了が理想的であったと言える.

今後の課題として, まず, 現行では閾値の設定が場当たり的な決定方法になっているため, より多くの3次元形状モデルに対する処理を行い, ユーザーに頼らない閾値の算出方法を目指す. また, 腕の肘以下と掌の最小固有値の関係の様に, 分割処理が進む途中に一時的に複雑さが増すという現象もあり, 本手法の0固有値の数による形状の推定方法と合わせて, より確かな対処法となる拘束条件の確立も目指す. 最後に今後の発展としては, 本手法で分割した要素に対しての運動解析の情報から主方向を算出し, 再メッシュ化処理へと応用させていくことを考えている.

参考文献

- 1) Shamir, A. : A Survey on Mesh Segmentation Techniques, Computer graphics forum, Vol.27, No.6, pp.1539-1556 (2008).
- 2) Alliez, P., Ucelli, G., Gotsman, C. and Attene, M. : Recent Advances in Remeshing of Surfaces, in *Shape Analysis and Structuring*, Floriani, L.D. and Spagnuolo, M. ed., Springer-Verlag, Berlin (2008).
- 3) Rong, L., and Zhang, H. : Segmentation of 3D Meshes through Spectral Clustering, Proc. 12th Pacific Conf. Computer Graphics Applications (PG'04), pp.298-305 (2004).
- 4) Gelfand, N., and Guibas, L.J., : Shape Segmentation Using Local Slippage Analysis, Proc. 2004 Eurographics/ACMSIGGRAPH Sympo. Geometry Processing, pp.214-223 (2004).
- 5) Katz, S., Leifman, G. and Tal, A. : Mesh segmentation using feature point and core extraction, Visual Computer, Vol.21, No.8-10, pp.649-658 (2005)
- 6) Hofer, M., Odehnl, B., Pottmann, H., Steiner, T. and Wallner, J. : 3D shape recognition and reconstruction based on line element geometry. Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, Vol.2, pp. 1532-1538 (2005).
- 7)