

3次元多重解像度解析に基づく階層構造の獲得

守田 了 川嶋 稔夫 青木 由直

北海道大学工学部

本稿では3次元自由曲面を階層的に取り扱うために, scale-space の手法を3次元に拡張し, 曲率解析に基づく記号要素を用いて記述する. 離散化された自由曲面に対して畳込みのかわりに拡散方程式を差分方程式で近似する手法を提案した. 本手法は, 平均曲率とガウシアン曲率のゼロ交差をもとに形状の階層構造を抽出する手法である. フィルタリングを形状の連続的な変形を伴うものと捉え, 連続的に変形する輪郭のトポロジカルな変化を記述する. これらの記述から, 領域要素の定性的変化を解釈し照合に利用するモデルデータベースの構築や照合の効率の面から, 3次元形状が階層的にかつ記号的に捉えられる現手法は有効であることが示された.

Generation of Hierarchical Structure based on 3-D Multiresolution Analysis.

Satoru MORITA Toshio KAWASHIMA Yoshinao AOKI

Faculty of Engineering, Hokkaido University

This paper introduces a hierarchical description of smooth surfaces with scale-space analysis. We extend to scale-space method which is used in signal analysis to 3-D surface, using difference equation. First, We describe topological changes of zero-crossing line of mean curvature and gaussian curvature as we compare filtered image in local scale. Comparing in local scale enables to purchases topological contour changes readily in top-down analysis. Next, We add the description to change of number and distribution of region suited for shape matching. This description contain information about the surface at varying levels of detail. Moreover, in matching we transfer tree to this description. Two shapes is matched efficiently, using features both of coarser levels and finer levels. And We constructed tree structure and matched from data of hands and face derived from range finder.

1 はじめに

近年、レンジファインダーなどの3次元情報入力技術の進展に伴い、距離データを基に、3次元の情報を獲得する研究が盛んに行われている。これらの情報から3次元形状の照合を考える場合、膨大な3次元観測点を直接照合するのは困難なため、照合に適した記述方式に変換する必要がある。

距離情報を用いた曲面形状の認識では、一般的にはデータをパッチに分割し、面の法線ベクトルの分布などから形状を解釈している。しかし、複雑な形状を十分細かく測定できない場合などには、パッチへの分割や法線の測定がうまくゆかないなどの問題点が残る。

従来、微分幾何学の観点から曲率によって表面形状を局所的に特徴づけるセグメンテーション処理による解析 [4] [5] が提案されているが、現実の距離画像では、雑音が加わっていない微細な凹凸の存在する場合には、曲率を正しく求めることは難しく、そのため特徴を誤ってとらえるなどの問題点がある。

これらの問題に対するひとつの解決方法は形状の記述を階層的に行なうことである。D. Marr は、形状をいろいろに尺度を変えて、巨視的レベルから微視的レベルにわたって分析することの重要性について述べている [1]。Lifchitz らはこの観点から濃淡画像について、多重解像度で分析することの重要性を示している [7]。また輪郭線のような一次元波形に対して1次元を変えて観測する手法の代表的なものとして、A. Witkin はさまざまなばかされた波形集合の零交差の連結性に着目し、階層的に波形を捉える scale-space filtering を提案した [2]。しかしながら、3次元形状の場合、表面の幾何学的要素や特徴的な線の階層構造を解析する研究 [9] がなされているものの、多重解像度の観点に基づいて大局的形状の照合から微視的構造にわたる階層的構造の解析を行う方法は確立していなかった。

我々はこれまで輪郭線形状を scale-space filtering を用いて階層的に記述照合する手法を提案してきた [10]。また、3次元距離画像に対して scale-space filtering を適用する試みも行なってきた [11]。本論文ではこれらの過程で明らかになった知見をもとに、3次元自由曲面の照合を目的とした階層的記述の生成について述べる。

3次元形状の階層構造を多重解像度に基づいて取り扱う場合、次の点を明らかにしなければならない。

- 3次元離散観測点群に対するフィルタリングの手法をどう実現するのか。
- 3次元形状の階層的分割のための基準となる特徴に何を選ぶか。
- 領域階層を安定して追跡する手法をどう実現するのか。
- 形状照合に適した領域の単位に何を選ぶか。

本稿では3次元形状を階層的に取り扱うために、まず scale-space の手法を3次元に拡張する手法を提案する。3次

元離散点群に対するフィルタリングの問題に対して、ガウスフィルタを畳み込みする操作の代わりに拡散方程式を差分方程式で近似することにより、等価な処理を実現している (2章)。

2次元の画像などにおいて階層構造が抽出できない原因は、ゼロ交差輪郭の非単調性である。[3]。本手法は、フィルタリングを一定の曲率に向かって形状を連続的に変形させるプロセスと捉え、フィルタリングの過程でおこる非単調性を例外的に扱うことで、階層構造を抽出できることを明らかにする。階層構造の抽出のための特徴量としては、観測方向に不変な微分幾何学的特徴であるガウシアン曲率と平均曲率のゼロ交差輪郭を用いる。

本手法では、安定して領域階層を追跡するために2段階に形状を記述する。まず基本的な記述は、原データから安定して記述を与えるために、局所的スケール変化により引き起こされる輪郭のトポロジカルな変化 (輪郭の生成と連結関係の変化) のみから生成し (3章)、その後、記述の比較時の高速化と安定性のために、輪郭の生成と連結関係の変化を記述したネットワーク構造に領域の個数と分布の変化の記述を加える。 (4章)。

さらに照合を効率的にするため、複数の領域を一まとまりととらえネットワーク記述を木に変換し、coarse-to-fine 追跡をする。レンジファインダーからえられた画像をもとに、安定した照合が可能になることを明らかにする。 (5章)

2 3次元自由曲面に対するフィルタリング

2.1 曲率の定義

本論文の議論をするために必要な曲面に対するいくつかの曲率を定義する。曲面上の点を $X(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ とおくと、 $X(u, v)$ の接平面の接線は $t(u, v) = duX_u(u, v) + dvX_v(u, v)$ となる。曲面の単位法線ベクトルを n とすると、 $\delta_1(du, dv)$, $\delta_2(du, dv)$ を次式で与える。

$$\delta_1(du, dv) = \begin{pmatrix} du & dv \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_u & X_v \\ X_v & X_u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix}$$

$$\delta_2(du, dv) = \begin{pmatrix} du & dv \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{uu}n & X_{uv}n \\ X_{uv}n & X_{vv}n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix}$$

$X(u, v)$ における (du, dv) 方向の曲率は次のように求まる。

$$\lambda(du, dv) = \frac{\delta_2(du, dv)}{\delta_1(du, dv)}$$

曲面上の一点 p で、曲面の法線ベクトルを含む平面で切った切り口の曲率 κ の値が最大または最小となる方向ベクトル (ζ_1, η_1) , (ζ_2, η_2) すると、それぞれ曲率は次のように定義できる。

- a) p 点に於ける極大曲率 $\kappa_1 = \lambda(\zeta_1, \eta_1)$
b) p 点に於ける極小曲率 $\kappa_2 = \lambda(\zeta_2, \eta_2)$
c) p 点に於ける平均曲率 $H = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}$
d) p 点に於けるガウシアン曲率 $K = \kappa_1 \kappa_2$
e) H0 輪郭線 $H = 0$ f) K0 輪郭線 $K = 0$

2.2 3次元自由曲面に対するフィルタリング

一次元波形の scale-space filtering による階層化を3次元自由曲面に拡張するための方法について説明する。scale-space は波形をさまざまな尺度でとらえた波形集合に拡張し、波形集合のゼロ交差を利用して波形を階層的に記述するものである。

2.2.1 3次元自由曲面に対するフィルタリング

$z = f(x, y)$ 型で記述されている濃淡画像に対してフィルタリングをかける手法 [6] が提案されているが、閉じた閉曲面に対しては直接適用できない。そこで、輪郭線形状に対して x, y 座標波形を別々にフィルタリングする手法 [8] を3次元に拡張することにする。

曲面上の点を $\phi(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ とおくと拡散方程式は次のように与えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial v^2} = \frac{1}{t} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \dots (1)$$

(1) 式を差分方程式で置き換える。

$$\begin{aligned} \phi(u, v, t + \Delta t) &= \phi(u, v, t) \\ &+ \Delta t \frac{\phi(u - \Delta u, v, t) - 2\phi(u, v, t) + \phi(u + \Delta u, v, t)}{\Delta u^2} \\ &+ \Delta t \frac{\phi(u, v - \Delta v, t) - 2\phi(u, v, t) + \phi(u, v + \Delta v, t)}{\Delta v^2} \end{aligned} \quad \dots (2)$$

3次元自由曲面のデータをセンサなどから観測する場合、隣接するサンプル点の個数が変わったり、隣接する点の向きが一定でなかったり、サンプル点間の距離が変わってしまい(2)式の計算が困難なため、隣接するサンプル点の計算で近似する。

$$\phi_{i0}(t + \Delta t) = \phi_{i0}(t) + \frac{\Delta t}{n} \sum_{k=0}^n \frac{1}{l_{ik}^2} (\phi_{ik}(t) - \phi_{i0}(t)) \quad \dots (3)$$

但し i 番目のサンプル点 ($\phi_{i0} = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0})$) とし、隣接する点 ($i1 \dots in$ は $i0$ を中心とする隣接点) の個数を n とする。 l_{ik} は $i0, ik$ 間の距離を表している。

(3) 式で表されるフィルタは拡散方程式を近似しており、スケール t を大きくすると、 x 方向、 y 方向、 z 方向の曲率が一定値に近づくように拡散される。

2.3 解析の方針

このフィルターを曲面にかけるとスケール t をあげるにしたがって、 x 方向、 y 方向、 z 方向の曲率が一定値に近づくように拡散されるため、凹凸領域が減少する。

そのため、3次元形状の凹凸を分類するために、観測方向に不変な微分幾何学的特徴であるガウシアン曲率 K と平均曲率 H に注目する。K0 輪郭は形状の凹凸と鞍型を分類し、H0 輪郭は山型と谷型を分類する。そこで、両者を用いた階層的形状照合手法を提案する。本フィルタリングを曲面に施すと曲面が連続的に変形し、輪郭の連続的な変形をひきおこす。スケール空間での輪郭変化のイメージを図1に示す。

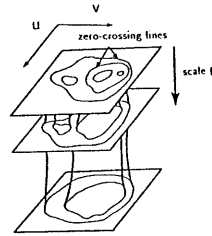


fig.1: Scale-space image for 3D surface.

3 スケール変化に伴う輪郭のトポロジカルな変化

以下に3次元自由曲面に対するフィルタリング手法を用いて、形状を記述する手法を述べる。本研究では、少ない容量で、輪郭から得られる表面の状態を記述でき、かつ原データから安定して記述を得るために、局所的なスケール変化のみから生成できる記述を目標とする。そのため、局所的なスケール変化から引き起こされる輪郭のトポロジカルな変化(閉曲線の個数と連結点の関係の変化)を記述する。

3.1 輪郭線のトポロジカルな変化と階層化のための仮定

まず一般的に連続的に変形する閉曲線を考える。この場合、トポロジカルな変化は、局所的には輪郭の生成と連結、交差、消滅ですべてである。それぞれの変化の局所的な状態を図2a1, a2に示す。図2(A)は輪郭線を生成する変化、(B)は輪郭線が自分自身と内接する変化、(C)は輪郭線が他の輪郭と外接する変化、(D)は輪郭線が他の輪郭と内接する変化、(G)は輪郭線が他の輪郭と交差する変化、(H)は輪郭線が消滅する変化をそれぞれ表している。

階層構造を生成する条件として、変化に方向性(スケール)を考えた場合、スケールが小さくなるにつれて領域が単調に増加する必要がある。そのため輪郭の消滅がおきる場合は階層構造にはならない。そこで、階層構造を抽出するために、次の仮定1, 2をもうける。すなわち、階層化を妨げる消

減、交差、接合の変化(図 2[a2] の変化)について次のように解釈をする。

仮定 1 輪郭の消滅が起きても、輪郭の痕跡を保存する。

仮定 2 2 つ以上の輪郭の接合が起きたあと輪郭が離れても、連結の履歴を保存する。

この仮定をもうけると、解釈の上で輪郭が消滅することがなくなり、輪郭のトポロジカルな変化は、生成と連結のみを考えればよい。輪郭の生成は階層構造に対応し、連結は空間的な関係を表すので、連続的に変形する輪郭から階層構造を抽出することができる。すなわち仮定を適応後は図 2[a2](G) の変化 m は、箱棹 m' のように解釈を行なう。

しかし、スケール変化に伴う局所的な輪郭のトポロジカル変化のみを追跡すると、新たな輪郭の生成を見落とすことがある。例えば、輪郭の連結の複合のみで新たな輪郭が生成される場合がある。上の変化では、輪郭の複合による新たな輪郭の生成を、領域が増加するトポロジカルな変化ととらえていない。しかし、これらのトポロジカルな変化も階層の生成に加えなければいけない。そこで、このような変化を図 2b(E)(F) に示す。但し、3 本以上の輪郭線が一度に消滅、生成、連結、分離する変化は、2 本の輪郭線の段階的変化の一種とみなす。

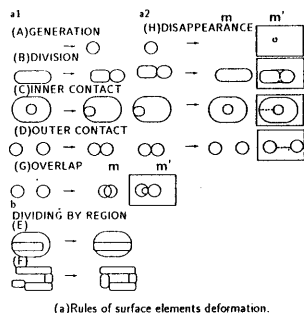


fig.2: Topological changes of contour.

3.2 輪郭の選択

輪郭変化の解釈に履歴痕跡の仮定を加えると階層的構造の抽出に役立つことがわかった。そこで本フィルタリングを行なう過程で得られる輪郭をもとに階層構造を抽出する。

本フィルタリングが形状の凹凸を減少させる性質をもつため、基準となる輪郭には観察方向に不変な微分幾何学的特徴量である平均曲率とガウシアン曲率を用いる。K0 輪郭は形状の凹凸と鞍型を分類し、H0 輪郭は山型と谷型を分類する。そこで、両者の利点を組み合わせて用いる。

前節で述べたフィルタリングを曲面に施すと K0/H0 輪郭の連続的な変形をひきおこし、フィルタリングするにつれて、自由曲面の曲率が一定に近づく。しかし、形状の凹凸が増えることがある。この問題に対して仮定 1,2 を設けることによ

り、これらの例外的な変化を履歴痕跡と捉え階層構造を抽出する。K0 輪郭は形状の凹凸と鞍型を分類し、H0 輪郭は山型と谷型を分類する。このフィルタリングの性質からフィルタリングをかける過程で形状の凹凸が減少するために、仮定の適応は例外的であり、この解釈を加えても極端に解析が遅くなったり、実際の形状からかけ離れた形状と認識することはない。そこで、スケール変化に伴う H0 輪郭、K0 輪郭を前節の輪郭として扱い、形状の凹凸特徴の階層構造を抽出する。

3.3 K0, H0 輪郭線のトポロジカルな変化

ここで局所的なスケールの減少に伴って、K0 輪郭線、H0 輪郭線、連結点の個数が、増加する場合の変化をまとめてみる。ただし、K0 と H0 輪郭は違う指標のパラメータであり、両者の関係は必ず内包の関係にあるため、K0 と H0 輪郭の間の連結の関係までは記述しない。K0 輪郭の定性的変化(図 3) と H0 輪郭の定性的変化(図 4) を 3.1 節にあてはめて考えてみると、(A) 生成による定性的変化、(B) 自己輪郭との内接による定性的変化、(C) 他の輪郭との内接による定性的変化、(D) 他の輪郭との外接による定性的変化に分けられる。しかし、これらの変化の中で、K0 輪郭が他の K0 輪郭と H0 輪郭を介さないで内接することはなく、領域の隣接関係から実際には起こらないものもある。(図 3(c)).

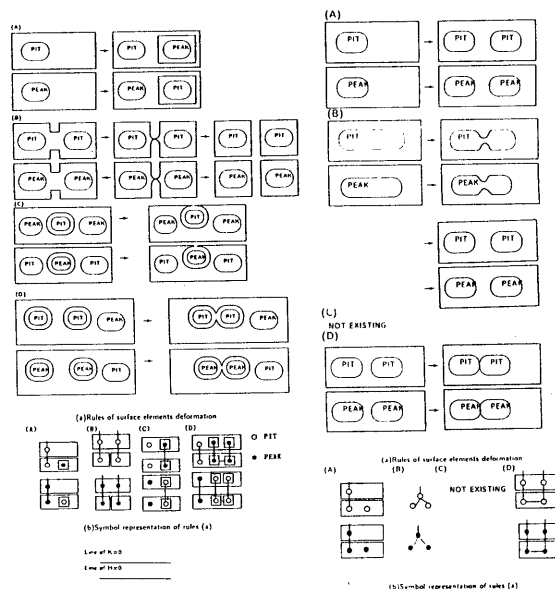


fig.3: Topological changes of H0 contour(right).

fig.4: Topological changes of K0 contour(left).

3.4 多重解像度 KH-記述の生成手順

スケール変化に伴って変化する K0H0 輪郭のトポロジカルな変化を記述する。着目する輪郭が K0H0 輪郭であるため、領域を KH の正負から分類される領域に分ける。以下これにより分類された要素を KH-要素と呼ぶことにし、そのうちの一部の形状を図 9 に示した。以下では (ガウシアン曲率の正負, 極大曲率の正負, 極小曲率の正負) の 3 つの組で要素を表記し, (++) などの記号は曲面の要素を表すものとする。

あるスケールのゼロ交差輪郭の状態は、すべて輪郭の包含関係と連結関係で記述できる。そこでフィルターを連続的にかけ、粗いスケールから細かいスケールにわたって、局所的なスケール変化に伴う H0 輪郭と K0 輪郭のトポロジカルな変化を階層として記述する。この処理により得られた記述を KH-記述と呼ぶ。スケールごとの、(A)(B)(C)(D)(図 3(a)4(a)) のトポロジカルな変化を本稿では図 3(b)4(b) のように表記する。次にこの記述を生成する処理の流れを示す。

[step1] 各スケールごとに、フィルタリングを行う。

[step2] H0 輪郭と K0 輪郭をもとに領域に分割し peak, pit 領域をラベルづけする。

[step3] 前のスケールの画像と比較したトポロジカルな変化を記述に加える。

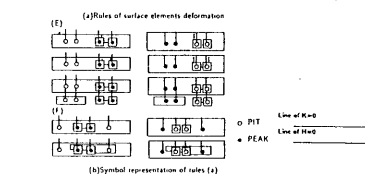
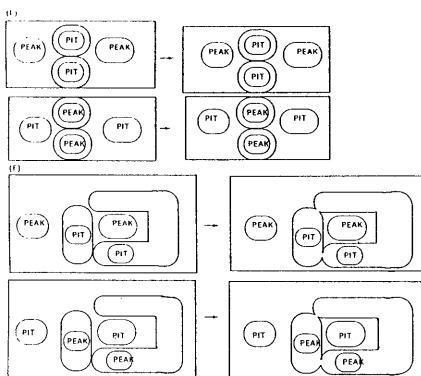


fig.5:Qualitative changes of region.

4 形状照合手法

ここでは KH-記述を用いて、効率的に形状を照合する手法について述べる。KH-記述は局所的なスケール変化から引き起こされる輪郭のトポロジカルな変化(閉曲線の個数と連

結点の関係の変化)を記述する。しかし、KH-記述から得られる局所的スケール変化に伴なう輪郭のトポロジカル変化のみを追跡すると、新たな領域の生成を見落とすことがある(図 2b(E)(F))。そこで KH-記述から領域の個数と分布の変化を記述したネットワーク構造に変換する。

さらに記述の比較を効率的にするため、ネットワーク構造を木に変換する。

4.1 閉じた連結領域の追跡

KH-記述には、輪郭のトポロジカルな変化のみが記述され、領域の定性的変化は記述されていない。領域に着目する際、問題となるのが複数の領域が連結して領域を分割する場合である。この閉じた連結領域は、特定のスケールの画像からはみつけないことができないため、KH-記述を探索して見つける。形状照合時には、KH-記述の連結領域をスケール空間で探索していき、領域の連結が閉ループになっている場合領域が分割されたと見なす。この分割がおこる変化をもとに、領域を分類し直し形状照合に利用する。これらの変化を、輪郭の接合の仕方を基準に大きく 2 つにわけて図示する。図 5(E) が内側の輪郭が外側の輪郭と結合して領域を分ける変化であり、図 5(F) が内側の輪郭同士が接合して、領域を分ける変化である。この探索を行い、KH-記述に領域の個数と分布の変化の記述を加える。

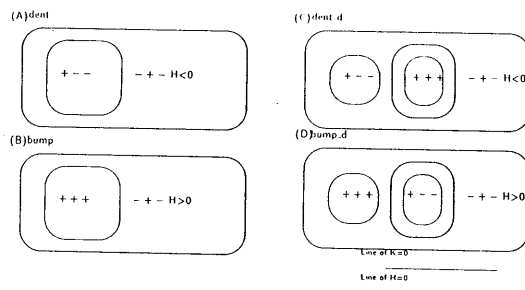


fig.6:Primitive Surface Elements.

4.2 領域分割

KH-記述は、根付き有効グラフの各要素が互いに関係をもつネットワーク構造で記述されている。記述の比較を効率的にするため、複数の領域を一まとまりととらえネットワーク構造を木に変換をする。

木で記述するためには、KH-記述における連結の関係を取り除けばよいが、要素の連結関係が取り除かれるので、かけはなれた形状が同じ構造になるため、形状照合には適さない。要素の連結が原因で、領域を 2 つ以上に分断される変化がおきる。そこで、この分断される変化だけを使って、連結関係を記述した木を生成する。領域内部に新しい領域が現われる変化(陰的階層 図 3(a)4(a)) は、後に領域が 2 つ以上に分断される変化(陽的階層 図 4(a)) に寄与する可能性が

あるため、領域のラベル変化としてまず捉えておく。スケールが小さくなって陽的階層の変化であるということが分かれば、さきにラベル変化としておいたものを陰的階層として記述する。このとき、連結関係をもつ領域を一つの領域から分割させ、連結の隣接の順番に応じて左から枝を生成することによって、木のなかに連結関係を記述できる。この記述には、陰的階層がおきる順番が欠落しているが、枝の属性に情報を加えればよい。

上の方針に基づいて、H0K0輪郭の両方による要素分けを階層の上からみていく手法が考えられる。しかし、この方法を用いると形状の複雑さの割に要素数が多くなり、微妙な変化で大局構造を異なったものに分類してしまう。そこで、H0輪郭を基に領域分割をし、K0輪郭を基に要素を分類をする。

H0輪郭で囲まれる領域が $H < 0$ (図6(A)(C)), $H > 0$ (図6(B)(D)) であるかで分類し、それぞれの領域内に $H=0$ 輪郭がある (図6(A)(B)) かない (図6(C)(D)) かで分類することによって、領域を4つに大分類する。以下これらを前節で示したKH-要素と区別して、基本領域要素 (PS-要素) とよぶ。それぞれの領域分布の一例を図6に示す。PS-要素部分を抜き出すにはH0輪郭で囲まれる領域を見つけなければならないが、複数の輪郭の連結により生成される場合も含むため、原データを領域分割した輪郭から直接求められず、KH-記述から探索しなければならない。この記述は木になり、階層照合に適している。

4.3 形状照合の流れ

KH-記述からPS-要素部分を抜き出し、PS-要素をもとにした記述をえる。しかし、細かい形状の記述を落としているため、PS-記述の比較を行なった後に、さらに詳細な照合が必要な場合は葉の部分のPS-要素に対応するKH-要素の変化を比較する必要がある。

階層的照合をする際の処理の流れを以下に示す。

[step1] KH-記述に領域の個数の分布の変化の記述を加える。

[step2] KH-記述からPS-要素を探索し、得られた木をもとに照合する。

[step3] さらに細かい照合が必要な場合は、それぞれのPS-要素に対応するKH-要素の変化を比較する。

5 解析例

5.1 例1 顔のデータ

階層化の流れに従って階層的記述を生成した例を紹介する。図7図8はレンジセンサにより取得した胸像から得た顔のデータに対して解析を施した例である。図7(a)の原データに対して各スケールごとに、フィルタリングを行なったものが図7(a)右である。図7(b)は、各スケールにおいてラベル付したKH-要素である。これから領域の個数と分布の変

化の記述を加えたKH-記述 (図8(b)) を生成する。木における [A] - [L] は図8(a)の各領域に対応している。この記述の黒丸は凸 (peak), 白丸は凹 (pit) を表わし、黒丸白丸をおおう箱枠はH0輪郭を表わしている。このKH-記述をみていくと、treeの最上位構造では、顔全体を表わす卵形の表面に口が現れ、treeを下にたどっていくことにより、髭、鼻、顎、はほのどばりの要素が現れ、さらに下にたどることにより、目のくぼみや顎髭のこまかいくぼみまでが明らかになっている。得られたKH-記述は対象のスケールに応じた形状を反映するものになっていることがわかる。さらに図6と比較してPS-要素をあてはめ、PS-要素間をノードでつなぐと木に置き換えられることがわかる。

5.2 例2 類似した2つの手

類似の形状に対して階層構造を求め比較を行なった。ここでは、2人の人物にプロトタイプの手の形状をまねるように指示し、その手の形状をレンジセンサにより取得したデータについて照合実験を行なった。その中の2種のデータ (左図にHAND-1, 右図にHAND-2) を図10(a)に示す。図10(b)は、HAND-1に対して各スケールにおいてラベル付したKH-要素である。両データにフィルタリングを施し、先の手順により木を生成した。

図11(a)図11(b)はそれぞれHAND-1 HAND-2のデータから得られたKH-記述である。図12(b)図11(a)図11(b)に示すA-Hは図12(a)に示す領域に対応している。

図11(a)(b)でつくられるKH-記述を比較すると、黒丸白丸による分布は、r1,r2部分が異なっている。しかし、PS-要素ではr1,r2は共通の要素分類であるため、図12(a)A-Iの構成部分が異なる特徴に分かれるまでの2つの木は一致している。図12(b)は2種の手のデータから得られた記述に共通の構造をPS-要素の基づいて示したものである。tree構造の各要素 dent,bump,dent_b,bump_d はPS-要素を表わしている、以下この木を、PS-木と呼ぶ。

共通構造のPS-木から、上位構造から各指の構造が生成されるまでの木は一致していることがわかる。このことから大局の構造を考慮した手や顔の構造の照合が可能である。照合実験から、雑音を含む3次元距離画像や、少しの視線方向の影響を受けた場合の照合なども可能であることがわかる。これらデータを含めたくつかの形状にたいして照合実験を行い、手法の妥当性を確認している。

今回は、論文の焦点が効率的な形状照合であるため、単調性の問題に対して、フィルタリングを一定の曲率に向かって形状を連続的に変形させるプロセスと捉え、フィルタリングの過程でおこる非単調性を例外的に扱うことで、階層構造を抽出できることを明らかにしている。また、このフィルタリングを閉曲面にかけると、球面に収束するため閉曲面形状の構造解析にも適し、その有効性も示している。

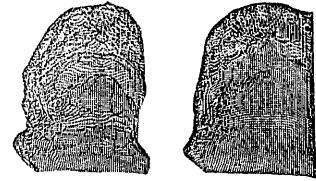
6 おわりに

本稿では3次元自由曲面を階層的に取り扱うために、scale-spaceの手法を3次元に拡張し、曲率解析に基づく記号要素を用いて記述する。離散化された自由曲面に対して畳込みのかわりに拡散方程式を差分方程式で近似する手法を提案した。

モデルデータベースの構築や照合の効率の面から、3次元形状が階層的にかつ記号的に捉えられる現手法は有効であることが示された。

参考文献

- [1] D. Marr, "Vision", W.H. Freeman, Sanfransisco (1982)
- [2] A.P. Witkin, "Scale-space filtering", Proceeding of International Joint Conference Artificial Intelligence, Karlsruhe, West Germany, pp.1019-1022, (1983)
- [3] A.L. Yuille and T. Poggio, "Scaling theorem for zero crossing", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 8, 1, pp.15-25, (1986)
- [4] R. Hoffman and A. Jain, "Segmentation and Classification of Range Images", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 9, 5, pp.608-620, (1987)
- [5] P.J. Besl and R.C. Jain, "Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 10, 2, pp.167-192, (1988)
- [6] T. Lindeberg, "Scale-Space for Discrete Signals", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 12, 3, pp.234-254, (1990)
- [7] L.M. Lifshitz and S.M. Pizer, "A Multiresolution Hierarchical Approach to Image Segmentation Based on Intensity Extrema", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 12, 3, pp.529-538, (1990)
- [8] F. Mokhtarian and A. Mackworth, "Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes", IEEE Trans. Pattern. Anal. & Mach. Intell., 8, pp.34-43, (1986)
- [9] H.T. Tanaka and D.T.L. Lee, "View-Invariant Surface Structure Descriptors - Toward a Smooth Surface Sketch", The Transactions of the IEICE-E 73, 3, pp.418-427, (1990)
- [10] 守田 了, 川嶋 稔夫, 青木 由直, "輪廓線形状の階層的記述によるマッチング", 信学論(D) J73-D2, 5, pp.717-727, (1990)
- [11] 守田 了, 川嶋 稔夫, 青木 由直, "3次元自由曲面に対する階層的記述の生成と照合", 信学技報, PRU90-25, pp.9-14, (1990)

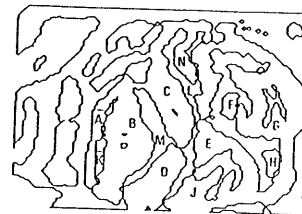


(a) A face image (left) derived from a range finder, and its filtered image (right).

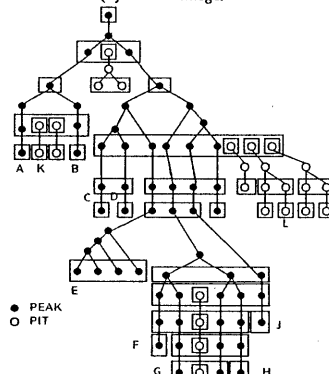


(b) Surface classification for different scales.

fig.7: Filtering and Surface Classification for a face data.



(a) Labeled image.



(b) Hierarchical description derived a face.

fig.8: Hierarchical structure derived from a face data. (KH-description)

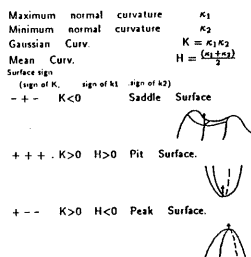
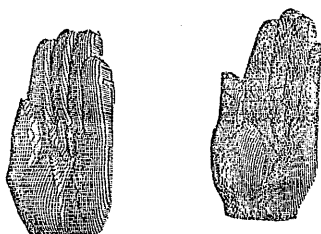
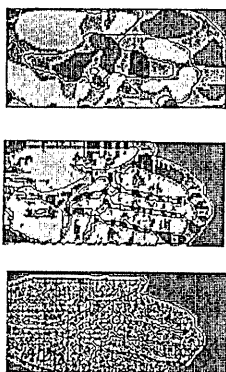


fig.9:Surface Classification.

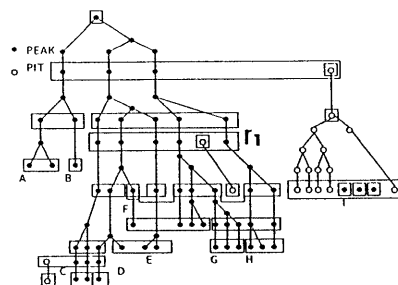


(a) HAND-1(left) and HAND-2(right) measured with a range finder

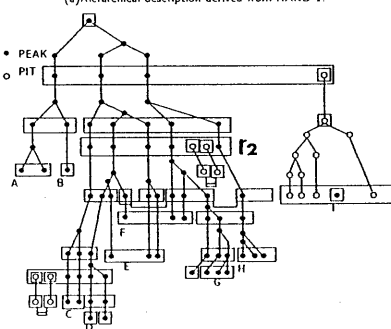


(b)Surface classification of HAND-1 at three different scales

fig.10:Filtering and Surface Classification for similar objects.

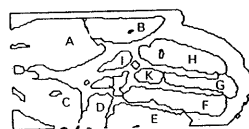


(a)Hierarchical description derived from HAND-1.

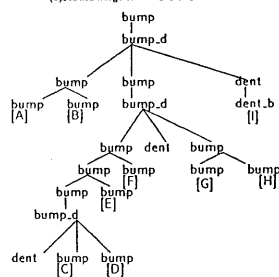


(b)Hierarchical description derived from HAND-2

fig.11:Hierarchical structure for similar objects. (KH-description)



(a)labeled image of HAND-1 of 2



(b)The common tree of HAND-1 and HAND-2.

fig.12:Common hierarchical structure for similar objects. (PS-tree)