

NAIST-IS-MT9451021

修士論文

領域浸食モデルによる距離画像の領域分割

岡田 啓一

1996年2月16日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

岡田 啓一

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

領域浸食モデルによる距離画像の領域分割*

岡田 啓一

内容梗概

距離画像の認識・理解では、シーン中の物体の構造を記述するための前段階として、画像からのセグメンテーションが重要な課題となる。距離画像を領域分割する場合、各領域は均一にまとまった曲面形状を表し、物体はその領域の接続構造で表現される。しかし、複雑な形状の物体では分割される領域数が増加するため、領域の接続構造が複雑となり物体同士の照合が困難となる。この場合、視野を巨視レベルから微視レベルに渡って変化させることにより、階層的な構造記述を生成し、各階層で照合をとることで物体の照合を行なう。この時に重要になるのが、同じ物体で同じ階層構造を安定して得ることである。しかし、物体の向きの違いやノイズなどの影響で階層構造が変わってしまう場合がある。

本論文では、階層的な領域統合を行なう際、隣接する領域間との類似によっては一つの領域を複数の領域が浸食することを許す領域浸食モデルを提案し、領域浸食モデルを用いた距離画像の領域分割の手法について述べる。また、提案手法の基本特性を検証するために行なった実験についてその結果を示し、考察を行なう。

キーワード

距離画像解析, 3次元物体, 領域分割, 領域浸食モデル, 階層構造記述

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9451021, 1996年2月16日.

Range Image Segmantation Using a Region Eroding Model*

Keiichi Okada

Abstract

Segmentation, which extracts features from images, is one of the most important problems in range image recognition and understanding. In range image segmentation, each region represents a uniform surface shape and an object is described by a structure of connections between regions. However, connections between regions of complex objects are complicated and it is difficult to match descriptions of objects, because of increases of segmented regions. In such a case, it is useful to generate hierarchical structure descriptions by changing a field of view from global to local scales, and to match hierarchical structures of descriptions. It is important to obtain similar hierarchical structures for similar objects stably. However, owing to the change of attitude of objects and noise in image, hierarchical structure descriptions often may change.

This paper proposes a region eroding model which allows plural regions to merge one region at the same time, when merging regions hierarchically. The proposed method has been experimented with both synthetic and real range images.

Keywords:

range image analysis, 3D object, image segmentation, region eroding model, hierarchical structure description

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9451021, February 16, 1996.

目次

1. はじめに	1
2. 距離画像の領域分割	3
2.1 距離画像について	3
2.2 距離画像のセグメンテーション	5
2.3 物体表面の特徴記述	7
2.4 階層的な領域分割の必要性	9
3. 領域浸食モデルを用いた距離画像の領域分割手法	12
3.1 領域浸食モデル	12
3.2 角度を用いた曲面分類	13
3.3 浸食の進め方	16
3.4 領域の類似度の定義	16
3.5 浸食スピード	18
3.6 提案手法による領域分割手順	18
3.6.1 前処理部	19
3.6.2 浸食部	19
3.6.3 領域の階層構造生成	22
4. 実験	24
4.1 実験概要	24
4.2 人工画像による動作確認実験	26
4.3 実画像による実験	29
4.3.1 実験1	29
4.3.2 実験2	32
4.3.3 実験3	32
4.3.4 実験4	38
4.4 考察	43

5. むすび	45
謝辞	47
参考文献	48

目 次

1	距離画像	4
2	距離画像のエッジ	4
3	距離画像の認識・理解の枠組	5
4	曲率符号による曲面分類 [15]	8
5	凸放物点における最大・最小主曲率	8
6	単純な形状の対応づけ	9
7	領域の階層構造	10
8	領域の階層構造の違い	11
9	領域浸食モデル	13
10	曲面における最大・最小主曲率	13
11	主曲率を角度に置き換え	14
12	角度の計算	14
13	(k_1, k_2) 空間での曲面の存在範囲	16
14	曲面の類似度	17
15	浸食スピードの意味	18
16	処理手順の概要	20
17	階層記述の例	23
18	レンジファインダ Cubist	25
19	入力距離画像 (円錐円柱相貫体)	27
20	人工画像を用いた実験の結果 : ラベル画像	28
21	人工画像を用いた実験の結果 : 分割過程	28
22	人工画像を用いた実験の結果 : 階層構造記述	28
23	実験 1 の入力画像 (円錐円柱相貫体)	29
24	実画像を用いた実験 1 の結果 : ラベル画像	30
25	実画像を用いた実験 1 の結果 : 分割過程	31
26	実画像を用いた実験 1 の結果 : 階層構造記述	31
27	実験 2 の入力画像 (角錐角柱相貫体)	33
28	実画像を用いた実験 2 の結果 : ラベル画像	34

29	実画像を用いた実験 2 の結果 :分割過程	35
30	実画像を用いた実験 2 の結果 :階層構造記述	35
31	実験 3 の入力画像 (めアイ像)	36
32	実画像を用いた実験 3 の結果 :ラベル画像	37
33	実画像を用いた実験 3 の結果 :分割過程	37
34	実験 4 の入力画像	39
35	実験 4 の結果 :type 1 のラベル画像	40
36	実験 4 の結果 :type 1 の分割過程	40
37	実験 4 の結果 :type 2 のラベル画像	41
38	実験 4 の結果 :type 2 の分割過程	41
39	実験 4 の結果 :type 3 のラベル画像	42
40	実験 4 の結果 :type 3 の分割過程	42
41	実験 4 の結果 :type1,2,3 の階層構造記述	43

1. はじめに

画像の認識・理解の研究は、人間が視覚を用いて行なっている環境認識能力を機械に持たせることを目的としている [17]. 人間はその五感の情報から環境を理解するが、その五感の中で視覚から得られる情報は最も複雑でそして最も有効なデータであり、現在人間が行なっている様々な作業の自動化などに必要不可欠であるといえる.

近年、レンジファインダなどの3次元入力装置の発達、普及にともない、距離画像を用いた物体認識の研究が盛んに行なわれている [1][2][3][6][8]. 距離画像は従来の2次元画像と異なり、空間の奥行き方向の情報を持つことから対象物体の3次元構造を直接扱うことのできる画像である. 従来の2次元画像を用いた物体の認識・理解では、対象は多面体のような形状を扱ったものが多く、曲面物体を扱うことは困難であったが、距離画像は物体表面までの正確な距離情報を持つため、物体の形状に関する幾何学的情報を直接利用できるという利点がある [26].

画像の認識・理解における初期段階で重要なのは画像から意味のある特徴を抽出するセグメンテーション処理である [11]. セグメンテーションによりエッジや領域を抽出し、その接続関係を記述していくことで物体の3次元構造を記述することができる. しかしながら、複雑な形状の物体になると抽出される領域の数が増加し、その3次元構造を一意に記述または照合を行なうことは困難となる. この問題に対しては、視野を巨視レベルから微視レベルに渡って変化させることによって階層的に構造を記述し、階層ごとに照合を行なうことが有効である [17]. しかし、物体の向きやノイズなどの影響により同じ物体であっても同じ階層構造が得られるとは限らないという問題があった.

本論文では、物体照合に利用可能な形状の階層構造を得ることを目的として、画像の領域統合において1つの領域が複数から統合されることを許す、**領域浸食モデル**による距離画像の領域分割手法を提案する. 具体的には、隣接する領域間の類似度がある閾値に入っていれば、その面積の大小関係にしたがって浸食関係を決定し、その関係が複数存在するなら、ある領域は周りの複数の領域に浸食される. その一連の浸食過程を階層構造として記述する.

まず第2章では本論文で扱う距離画像について説明し、距離画像の階層的な領

域分割の重要性について述べ、本研究の位置づけを明らかにする。第3章では、提案手法の大要についてのべ、第4章では実験結果を示し、考察を行なう。第5章は結論であって本研究の総括および今後の課題について述べる。

2. 距離画像の領域分割

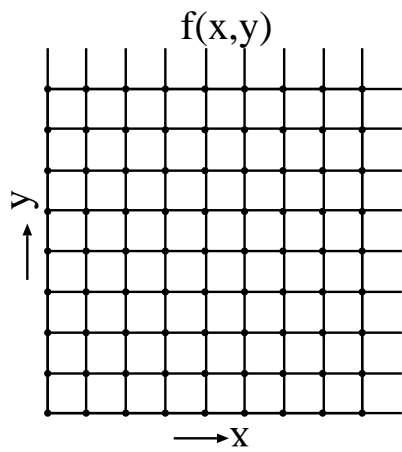
画像の認識・理解といった問題では画像の領域分割が重要な問題となる。距離画像を用いて3次元物体を認識する場合、物体表面の形状特徴が領域分割の段階で用いられる。

本章では、まず本論文で扱う距離画像と、距離画像の領域分割について説明する。次に、領域分割で用いられる物体表面の形状特徴の記述法について述べる。最後に階層的な領域分割の必要性について述べ、本研究の位置付けを明らかにする。

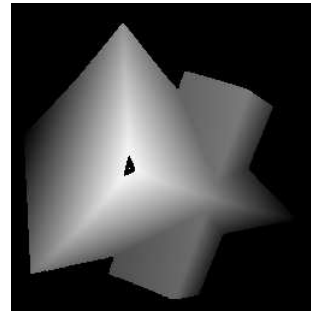
2.1 距離画像について

一般にデジタル化された画像データは、カメラの結像面に映る映像を図1(a)のように細かく格子状に分割し、その格子点における映像の一部を標本化し量子化した2次元格子データである[26]。その各標本点を画素あるいはピクセルと呼ぶ。各画素に輝度値を持つ画像が濃淡画像、色値を持つ画像がカラー画像と呼ばれる。これらは空間の奥行き方向の情報を持たないため3次元物体を扱うのに適した画像ではない。そこで、各画素に空間の奥行き情報を持たせると、各画素は物体表面の各点 (x, y, z) の座標を表すことができ、3次元物体を扱うのに非常に適した形式になる。このように、各画素に空間の奥行き情報として物体表面までの距離を持たせた画像が距離画像である。図1(b)は距離画像の距離値を濃淡値として表示させた例である。

ここで、距離画像におけるエッジについて説明しておく。濃淡画像においてエッジは、明暗値の変化率が不連続な画素を指すが、距離画像の画素は物体表面の3次元座標を示しているため、その不連続な画素は対象の3次元構造を反映したものとなる。図2は距離画像の断面で、距離画像のエッジとなるジャンプエッジとルーフエッジの例である。ジャンプエッジは視点からの距離が不連続な部分を指す。この不連続な部分はその視点からは見えない物体の隠蔽部分の境界が存在する部分であるといえる。ジャンプエッジは従来の濃淡画像に用いられるエッジ検出手法を用いて検出することができる[26]。一方、ルーフエッジは視点からの距離の屈折点を指す。傾きの異なる平面の接続部分に見られるエッジで、物体表面



(a) 2次元格子



(b) 距離画像の濃淡表示

図1 距離画像

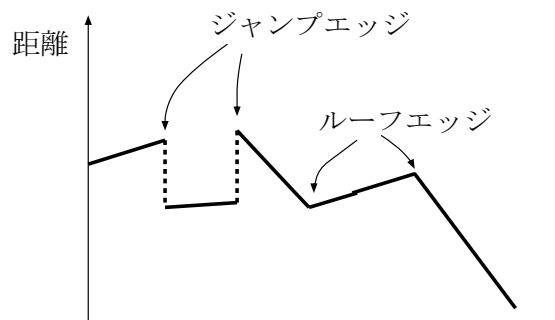


図2 距離画像のエッジ

の分割に用いられる。ルーフエッジは曲面の法線ベクトルの変化が大きくなる部分を求めることによって検出することができる [15]。

2.2 距離画像のセグメンテーション

距離画像の認識・理解といった問題を考えると、距離画像は対象表面の多数の点の3次元座標値の集まりという大量のデータであるため、そのままでは対象認識のために直接利用することは難しい。そこで、まず距離情報から対象表面の形状特徴を抽出する処理が必要となる。この処理はセグメンテーション (segmentation) と呼ばれる。

距離画像の認識・理解の枠組は図3のようにとらえることができる [26]。まず、単なる画素の集合から何らかの特徴を見い出してセグメンテーションを行ない、領域とエッジを抽出する。次に領域とエッジの接続関係の記述を生成し、その記述を基に画像の理解が行なわれる。つまり、画像のセグメンテーションの仕方如何によって、距離画像の理解・認識の結果が大きく左右されることになる。したがって、セグメンテーションは非常に重要な問題であるといえる。

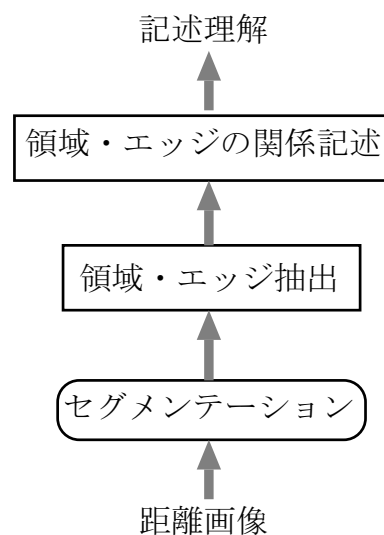


図3 距離画像の認識・理解の枠組

距離画像における従来のセグメンテーション手法は、エッジ検出によるものと領域分割によるものに大別される [26].

エッジ検出法は、物体の輪郭や稜線に対応する不連続点を抽出する方法で、通常、ジャンプエッジやルーフエッジの検出が行なわれる。しかし、対象物以外のノイズが存在する場合に、目的とする輪郭線が得られず、また、得られた線画から必ずしも物体形状を一意に決定できない。また、滑らかに変化する物体表面では本質的にエッジを検出できないという問題がある。

領域分割法は、画像のある特徴の均一性に注目し、均一な特徴でまとまった領域ごとに分割する手法である。通常、物体表面の形状を扱いやすい関数で近似できる表面領域に分割する。最も単純なものは1次多項式を用いるものであるが、基本的に多面体しか扱うことが出来ないため、一般に2次以上の多項式が用いられる [10][16]。他に、画像を小領域に分割して一つの領域から面近似による領域拡張を繰り返して面を抽出する手法や [8]、各画素の曲率などの特徴値をもとに面を抽出する手法 [6] などの、物体表面の局所的形状に基づいた分割手法が多く提案されている。さらに、各画素の曲率の他に領域の境界となるエッジ検出法を組み合わせることにより、両者の長所を活かした手法も提案されている [14].

しかし、これらは比較的単純な形状の物体に対しては有効であるが、複雑な物体になると適切な分割を行なうのは非常に困難で、対象物体をある程度限定したうえでしか有効な結果が得られないというのが現状である。

距離画像のセグメンテーションでは、エッジ検出法は抽出できる特徴の種類が限られ、それ自体では物体認識に有効な特徴抽出を行なうことは難しい。一方、領域分割法は平面並びに多様な曲面の領域に分割することが可能である。したがって、距離画像のセグメンテーションにおいてはエッジ検出法は主に画像中に複数物体が存在する場合における物体の切り出しに用いられ、また、領域分割法は一つの物体における特徴抽出に主に用いられている。

2.3 物体表面の特徴記述

前節で、距離画像の領域分割で用いられる物体形状の特徴には、通常、対象物体表面の形状特徴が用いられることを述べた。ここでは、3次元物体の表面形状を記述する方法について述べる。

表面形状の記述法は、局所的形状を用いるものと大局的形状を用いるものに大別される。

局所的形状を用いるもので代表的な方法は、微分幾何学における曲率を用いる方法である [4][5][25]。これは、物体表面の局所的曲面形状をガウス曲率 K 、平均曲率 H の符号の組み合わせで分類する方法で、 K, H の符号により全ての曲面は図4に示す8種類の曲面に分類される。 K, H は、 $z = z(x, y)$ とすると次式で定義される。

$$K = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2}{\left\{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right\}^2}$$

$$H = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 - 2 \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2}{2 \left\{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right\}^{3/2}}$$

また、曲面からは、主曲率と呼ばれる曲率の最大・最小値を求めることができる。ある点 P における主曲率とは、曲面の点 P における法線方向を含むある平面での断面の曲線の曲がり具合の最大と最小の値である。図5に凸放物点における主曲率を示す。主曲率をそれぞれ k_1, k_2 とすると ($k_1 \geq k_2$),

$$k_1 = H + \sqrt{H^2 + K}, \quad k_2 = H - \sqrt{H^2 - K}$$

で求まる。この主曲率の符号を用いて図4と同様に8種類の曲面分類を行なうことができる。

曲率は、曲面の回転、移動、拡大縮小に不変な量であるため3次元物体を記述するのに適しているといえる。しかし、上式の通り2次微分まで用いて計算されるためノイズに非常に敏感であるという問題がある。したがって、曲率を正しく求めるには距離画像のノイズ処理をうまく行なわなければならない。

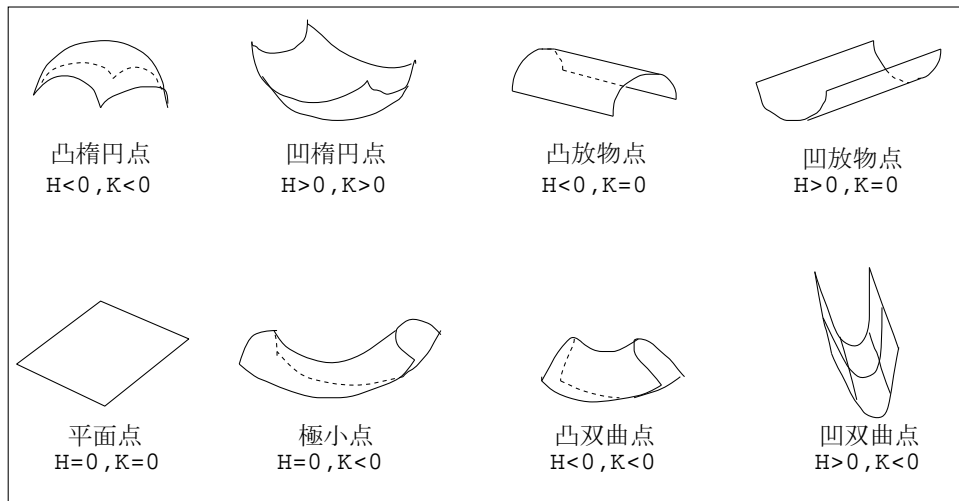


図 4 曲率符号による曲面分類 [15]

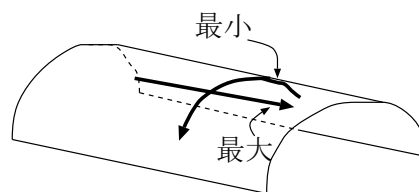


図 5 凸放物点における最大・最小主曲率

一方、大局的形状を用いる方法には、物体を多面体、円柱、球などのプリミティブの組合せによって記述する CSG 表現や [24], 少ないパラメータにより様々な形状に変形する一般化円筒 [24] や超 2 次曲面 [10][11] といったプリミティブを用いた手法が提案されている [9]. 前者の場合、用意したプリミティブ以外の形状の記述が出来ないため、対象物体の制限が大きいという問題がある. 後者は、プリミティブの組合せによりある程度複雑な形状も表現可能であるが、組み合わせるプリミティブの数が増えるとそれだけパラメータの数が増加するため、かえって物体の認識には向かなくなる場合が出てくる. また、パラメータから形状が一意に決まらないという問題もある.

このように、曲面を記述する場合、対象物体を限定しない時は局所的形状を用いた記述法を採用し、対象物体が単純なプリミティブで構成されている時は大局的形状を用いた記述法を用いるのが効率的であるといえる.

2.4 階層的な領域分割の必要性

距離画像から適切な特徴抽出を行ない、適切な領域分割が行なわれると、次は領域の対応づけによって物体の認識を行なうことができる. この場合対応をとるのは、画像中の物体どうし、あるいは物体認識システム内にあらかじめ定義された 3 次元モデルなどである. 図 6 のように単純な形状の物体であれば分割される領域数も少ないため比較的簡単に対応をとることができる.

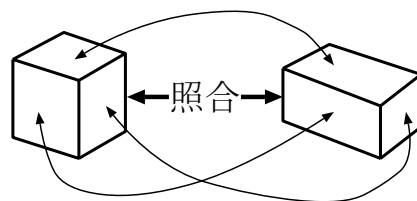


図 6 単純な形状の対応づけ

しかしながら、対象物体の形状が複雑になると、一般に適切な領域分割を行なうことは非常に困難となる. これは、複雑な形状では十分な精度で距離データが

測定されないため、局所的な形状が安定して計算できない場合があることと、また、複雑な形状になればそれだけ分割する領域数が増加するため領域の対応づけの組合せ数が膨大になり、安定した物体認識を行なうのが難しくなるためである。

このような問題の解決法としては、視野を巨視レベルから微視レベルに渡って変化させ、階層的に形状を分析するアプローチが提案されている [17]。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 [19]。また、Witkin は輪郭線のような 1 次元波形に対して尺度を変えて観測することで階層的に波形をとらえる **scale-space filtering** を提案した [18]。

距離画像では、守田らが **scale-space** の手法を 3 次元に拡張し、階層構造を木構造で記述する手法を提案している [1]。また、佐藤らは凸性を用いて形状を領域分割し、凸性からの逸脱度を用いた領域統合の様子を階層的な木構造で表現する手法を提案した [2]。図 7 に領域の階層構造の例を示す。図 7 は一番上の領域が物体全体を指す領域であり、そこからスケールを変えることによって領域が細分化されていく様子を示している。

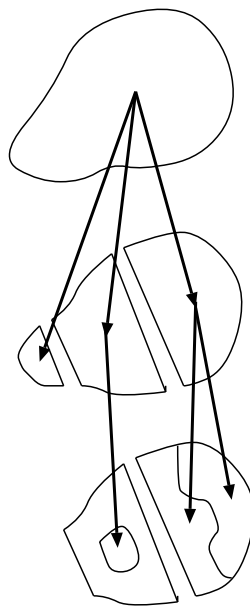


図 7 領域の階層構造

しかしながら、木構造で記述された3次元形状を比較することを考えた場合、物体の向きやノイズなどによってその生成された階層構造が大きく異なる恐れがあり、物体照合が困難になると考えられる。例えば図8は、ある階層において領域 A, B, C, D に分割された画像、領域 A', B', C', D' に分割された画像が次の階層では領域 B が A に統合され、領域 B' が C' に統合された場合の両者の木構造の差を示している。このように、階層構造を木構造で記述する場合、領域統合のミスがあるとその構造が大きく異なることになり、物体照合が正しく行なわれない場合が起こる。

本論文ではこの問題点に着目した。次章ではこの問題解決のため“領域浸食モデル”を用いた距離画像の領域分割手法について述べる。

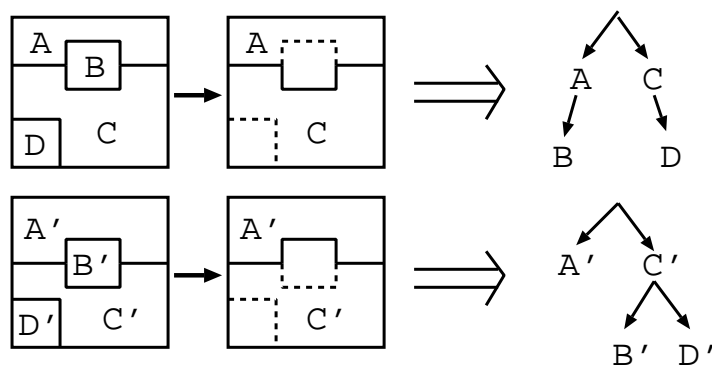


図8 領域の階層構造の違い

3. 領域浸食モデルを用いた距離画像の領域分割手法

前章では、距離画像の領域分割において、階層的記述の重要性と従来手法の問題点を指摘した。その問題点を踏まえ、本章では領域浸食モデルを提案し、浸食モデルを用いた距離画像の領域分割手法について述べる。

3.1 領域浸食モデル

前章の2.4節において、距離画像の階層構造の記述手法の問題点を指摘した。問題となる部分は、ある領域 A が統合される際、隣接する領域との類似度が最も高い領域に A 全てを統合する部分であると思われる。この場合、類似度が物体の向きやノイズなどの影響を受けた場合に正しい領域統合が行なわれない可能性がある。そこで、領域 A に隣接する領域の中である一定以上の類似度をもつ領域全てに A を統合させるようにすると、類似度が物体の向きやノイズなどに多少影響を受けても、少なくとも本来統合されるべき領域に統合される可能性が高くなると考えられる。

本論文では、このように一つの領域を複数の領域から統合することを許す領域統合手法を提案する。図9はその概念図で、領域 B は A と C の両方から統合されており、前章の図8の2つの階層構造をまとめる構造記述となっている。この領域統合の様子は B が A, C から浸食されているように見えることから、この領域統合モデルを**領域浸食モデル**と呼ぶことにする。

本手法では、各領域はそれぞれ同じ曲面形状を持つものとする。まず、各画素についてその局所的形状を基に分類を行ない、同じ形状に分類され且つ連結した画素の集合を初期の領域とする。そこから、隣接する領域との類似度と領域の面積の大小関係から浸食関係を決定し領域の浸食を行なっていく。最後に残った領域が物体全体を指す領域となり、その領域を出発点としてこれまで浸食してきた過程を階層構造として記述する。

以下では、曲面分類、浸食の進め方、領域の類似度および浸食スピードについてそれぞれ説明した後、提案する領域分割手法のアルゴリズムについて詳細を述べる。

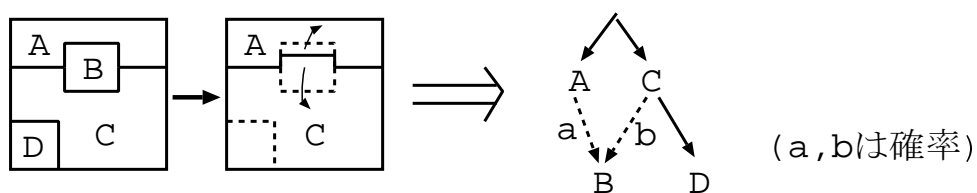


図9 領域浸食モデル

3.2 角度を用いた曲面分類

本手法では一つの領域を構成する画素はそれぞれ同じ曲面形状を持つため、物体形状に制限をおかない場合、各画素はその局所的形状で分類するのが適切である。本手法では、角度を用いた曲面分類を行なう。

前章の2.3節で局所的形状による曲面分類手法として曲率を用いた曲面分類について説明し、最大主曲率と最小主曲率の符号を用いた曲面分類について触れた。最大・最小主曲率とは、曲面をその注目点における法線方向のある平面で切った断面における曲線の曲率が最大値を取る断面と最小値をとる断面の曲率を指す。図10に凸放物点および凹放物点における最大・最小主曲率を示す。

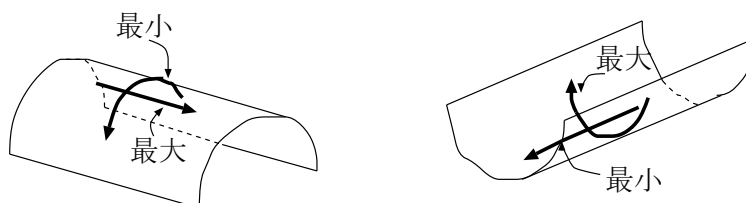


図10 曲面における最大・最小主曲率

本手法ではこの2つの主曲率を図11のような角度に置き換える。これは、曲率が2次微分までの計算を行なうため値の変化に敏感であり、図13のような空間で2つの曲面の類似度を求めることを考えた場合、2つの曲面のごく僅かの差が2次微分によって大きな差になる可能性があるためである。そこで微分を用いず僅かの差がそのままの差で得られる角度を用いることにした。

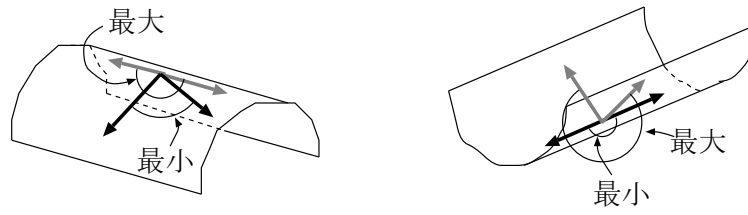


図 11 主曲率を角度に置き換え

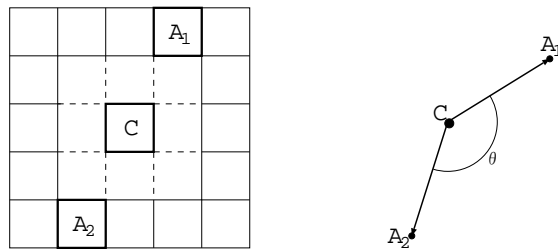


図 12 角度の計算

まず、各画素について 5×5 の窓で 8 方向の断面を考える (図 12)。1 つの断面は、窓の中心の画素 C と外側の画素 $A1$ および $A1$ について C との対称的な位置にある画素 $A2$ の 3 点を 3 次元空間で結んだ折れ線とし、 C でなす角度 θ を求める。 θ は C から $A1$ へのベクトルを v_1 , C から $A2$ へのベクトルを v_2 とすると、

$$\theta = \arccos\left(\frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1||v_2|}\right)$$

で求まる。この θ ($-\pi < \theta < \pi$) を 8 方向の断面で求める。

この 8 方向の角度の最大・最小値をそれぞれ k_1, k_2 とすると、曲率を用いた曲面分類と同様に k_1, k_2 の符号の組合せで次のように 8 種類の曲面に分類することができる。 ($k_1 \geq k_2$, E はノイズを考慮した誤差)

1. 凸楕円点 : $k_1 < -E, k_2 < -E$
2. 凹楕円点 : $k_1 > E, k_2 > E$
3. 凸放物点 : $-E \leq k_1 \leq E, k_2 \leq -E$
4. 凹放物点 : $k_1 \geq E, -E \leq k_2 \leq E$
5. 平面点 : $-E < k_1 < E, -E < k_2 < E$
6. 極小点 : $k_1 \geq -k_2 - E/2, k_1 \leq -k_2 + E/2$
7. 凸双曲点 : $k_1 > E, k_2 < -3/2E$ ($|k_1| < |k_2|$)
8. 凹双曲点 : $k_1 > 3/2E, k_2 < -E$ ($|k_1| > |k_2|$)

図 13 は上記の 8 種類の曲面の (k_1, k_2) 空間での存在範囲を示している。

この角度を用いた曲面分類法は断面を 8 方向に限定しているため、曲率に比べて精度的な優位性はないが、1 画素における局所的形状を求めることに限定すれば曲率とほぼ同等の結果が得られると考えられる。また、簡単な計算で求まるため非常に高速に曲面分類を行なうことができる。

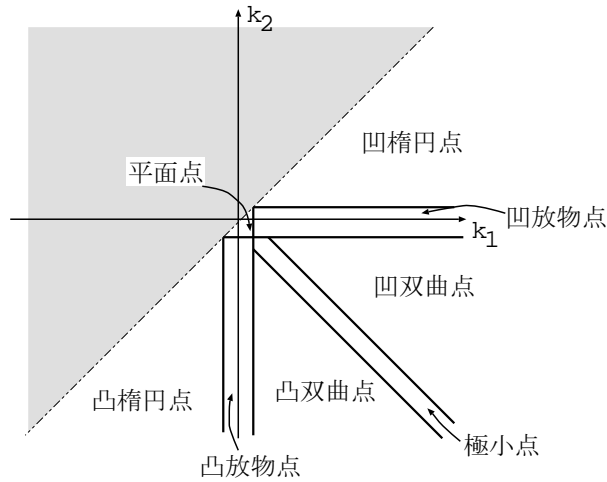


図 13 (k_1, k_2) 空間での曲面の存在範囲

3.3 浸食の進め方

各画素の曲面分類を行ない、同じ曲面に分類され且つ連結した画素の集合を一つの領域とし領域分割を行なうが、この初期分割ではノイズなどの影響により多数の微小領域が存在する。また、領域の浸食過程を階層構造とみなすことを考えると、小領域を上の方層まで残すのは安定した階層構造を得る上で障害となると考えられる。したがって、まず面積の小さい領域を浸食対象にする。また、全領域の中で比較的面積の大きい領域は階層構造を生成する上で重要な領域になると考えられるので微小領域が無くなるまで浸食を受けないものとする。

3.4 領域の類似度の定義

領域の浸食関係決定は面積だけでなく、領域の類似度も同時に評価して行なう必要がある。ここで、2つの領域の類似度は分類された曲面での類似度とする。ある2つの曲面の類似度は図 13に示すように、角度 k_1, k_2 の空間におけるユークリッド距離の大きさとみなすことができ、この距離が近ければ近いほど、その2つの曲面は似た形状であるということが出来る。しかしながら、実際には凸双曲

面や凹双曲面のような形状は凸形状から凹形状の間の境界の場合が多く、そのような形状に対し k_1, k_2 空間での距離が近いということだけで境界を無視した領域の浸食を行なうのは、人間の直観的な見方に反すると考えられる。そこで、凸双曲面と凹双曲面は凹凸形状の境界とし、この2つ以外の曲面との k_1, k_2 空間での距離には重み付けすることにより、境界を無視した浸食が起こりにくくする。

また、浸食過程では凸領域はまず凸領域どうしと、凹領域はまず凹領域どうしと統合されるのが妥当であるが、図14のように、点 A, C は同じ凸領域でも k_1, k_2 空間では凹領域の点 B と距離が近くなる場合がある。そのため、同じ凹凸極性の領域どうしの類似度の計算では重み付けを減らし、極性の同じものが統合されやすいようにするのが適当であると考えられる。以上の考察に基づき、領域 A, B の類似度 $L(A, B)$ を次のように定義する。

$$L(A, B) = \sqrt{(k_{1,A} - k_{1,B})^2 + (k_{2,A} - k_{2,B})^2} \times \text{重み付け}(A, B)$$

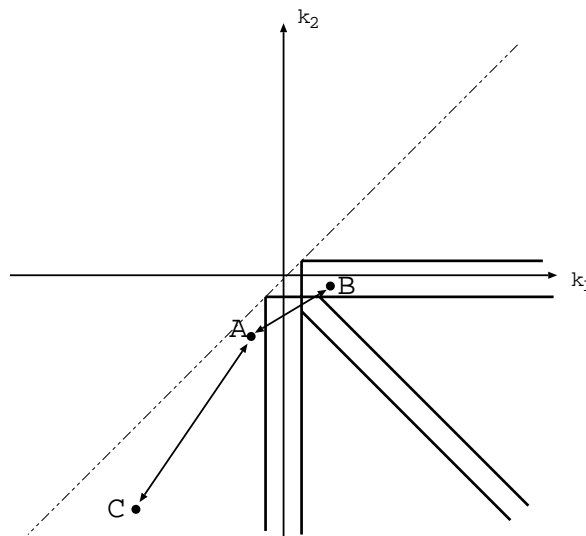


図 14 曲面の類似度

3.5 浸食スピード

従来の領域統合手法では領域の類似度で統合するかしないかを判断している。ここでは従来手法の統合結果をある程度反映させるために浸食スピードを考える。つまり、ある領域が複数の領域から浸食される場合、最も類似度の高い領域が最も多く領域を浸食するようにする。例えば、図15で領域 D が統合される領域として、領域 A, B, C との類似度がどれもある程度高い場合、従来手法では A, B, C のうち最も類似の高い領域に D を統合する。本手法では類似度がある程度高ければ一つの領域を複数の領域が統合することを許しているため、この場合領域 D は A, B, C から浸食されるが、浸食スピードを考えない場合、従来手法の結果と大きく異なることになる。そこで浸食スピードを導入することにより、最も類似の高い領域 A が最も多く D を統合するため、従来手法の結果に近い結果が得られる。

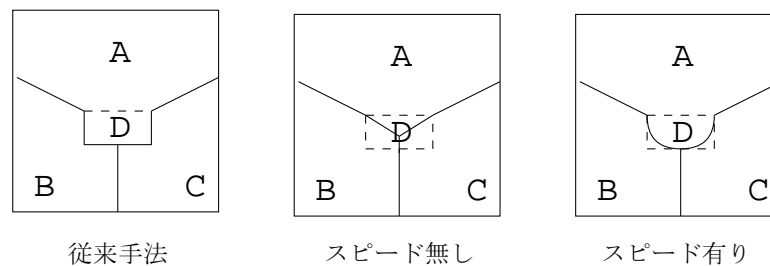


図 15 浸食スピードの意味

3.6 提案手法による領域分割手順

領域浸食モデルを用いた領域分割の手順を説明する。アルゴリズムは前処理部と浸食部に分かれており、前処理では「距離データの平滑化」「曲面分類のための角度計算」「曲面分類」「初期領域分割」、浸食部では「領域データ生成」「隣接関係リストアップ」「浸食関係決定」「浸食スピード決定」「浸食」、を行なう。概略図を図16に示す。

各領域の浸食関係は、曲面の類似度と面積の大きさに決定される。類似度と面積の値に閾値を設定し、隣接する領域の中にその閾値を満たす領域は全て浸食関

係となる．最終的に浸食モデルは全ての領域を一つの領域が統合するという形になり，その統合の過程を階層構造として記述する．

3.6.1 前処理部

前処理部では，距離画像の各画素を曲面に分類し初期の領域分割を行なう．

- 入力

入力は距離画像である．画像中には物体は一つだけ存在するものとする．この距離画像に対し 5×5 のメディアンフィルタをかけ平滑化を行なう．

- 曲面分類のための角度計算

各画素について 3.2 節で説明した角度を求める．

- 曲面分類

各画素について 8 方向の角度の最大値 k_1 ，最小値 k_2 を求め，その値を 3.2 節で述べた分類規則により画素の分類を行なう．

- 初期領域分割

同じ曲面に分類された画素を隣接 4 近傍で探索して，それらを一つの領域とする．

3.6.2 浸食部

浸食部では，各領域データから領域間の浸食関係を決定し，浸食処理を行なう．

- 領域データ生成

各領域について，その表面積，重心座標，曲面の曲がり具合の代表値を求める．

- 表面積 S

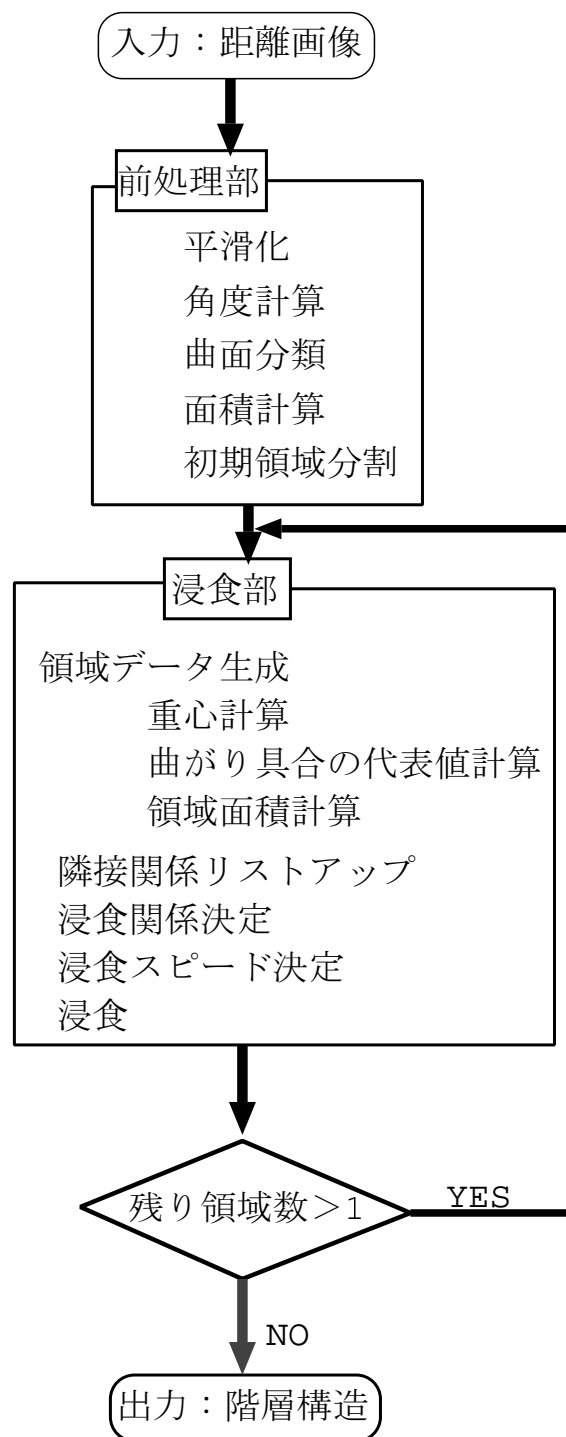


図 16 処理手順の概要

各画素が、 $z = f(x, y)$ で表されるとすると、ある画素 P の面積 $R(P)$ は、

$$R(P) = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2}$$

で求めることができる。領域を構成する全ての画素の面積の総和がその領域の表面積となる。

$$S = \sum_P R(P)$$

– 重心座標

各領域について隣接する領域との境界となる画素の座標の平均値を求める。

– 曲面の曲がり具合の代表値

領域を構成する各画素について、8方向の角度の最大値 k_1 、最小値 k_2 の平均をとる。各画素の面積でその画素の k_1, k_2 に重み付けし、 k_1, k_2 の総和を領域の面積で割った値を平均とする。

● 隣接関係

各領域について、隣接する領域を全てリストアップする。この時、ジャンプエッジを介して隣接している場合は隣接していないとみなす。ただし、領域が複数存在するが隣接関係が生じない場合は、ジャンプエッジを介した領域どうしを隣接させる。

● 浸食関係

浸食する領域、および浸食される領域の関係を以下に示す手順で決定する。

1. まず領域の面積が小さなものから統合していくようにするため、領域の表面積の最小値を求め、その値の A_{limit} 倍以下の面積 S_{min} の領域全てに“浸食可能フラグ”を立てる。
2. ある領域 A について、隣接する領域の中に“浸食可能フラグ”の立った領域 B があり、領域 A が領域 B より面積が大きく、かつ、その A と B の類似度が閾値 P 以下であれば、 A は B を浸食する関係とする。

3. 上で浸食関係を生じる領域が存在しない場合、閾値を変化させる。ここでは領域の類似度優先させ、まず“浸食可能フラグ”を立てる面積の値 S_{min} を増加させる変数 A_{limit} を増加させる。 S_{min} が領域の面積の最大値になっても浸食関係を生じる領域がない場合は、 S_{min} を初期値に戻し、領域の類似度の閾値 P を増加させる。

- 浸食スピード

複数の領域が1つの領域を浸食する場合、3.5節で述べた浸食スピードを設定する。ここでは、その類似度に応じて5段階のスピードを設定する。

- 浸食

これまでの処理で浸食される領域が存在すれば、その領域を浸食する。浸食は浸食する領域と浸食される領域の境界で隣接する画素間の類似度が最も高い画素から浸食スピードに応じて浸食していく。曲面の類似度と同様に、隣接する画素間の類似度は k_1, k_2 空間におけるユークリッド距離を用いる。浸食される領域の画素がなくなると浸食を終了し、浸食を行なった領域は浸食した領域を自分の浸食リストに加える。浸食リストとは、各領域が浸食した領域のリストで、これを元にして階層構造を生成する。

3.6.3 領域の階層構造生成

浸食処理が終ると、最後に残った領域の浸食リストから領域の階層構造を木構造で生成する。

例えば、最後に残った領域 A の浸食リストには領域 B, C, D, E があり、また、領域 B の浸食リストには領域 E, F があつたとすると、その階層構造は図 17 のように記述される。この場合、領域 E は A, B の両方から浸食されたことになる。

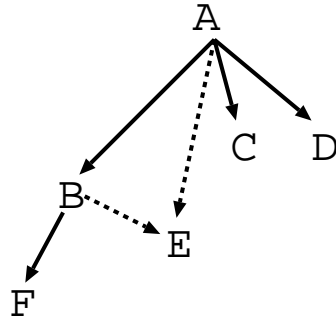


図 17 階層記述の例

以上の手順で提案手法による距離画像の領域分割を行なう。

次章では提案手法の動作の確認及び有効性を検証するために行なった実験について述べる。

4. 実験

前章で提案した領域浸食モデルによる距離画像の領域分割手法の動作の確認及び基本特性の検証のため実験を行なった。まず人工画像を用い動作の確認を行ない、それから実画像を用いた実験を行なった。また、同じ物体を異なる方向から計測した距離画像を用いた場合の階層構造の変化について検証を行なった。本章ではその実験結果を示し、結果について考察する。

4.1 実験概要

- 実験環境

提案手法の入力となる距離画像取得には、(株)クボタ製のレーザレンジファイнда “Cubist” を用いた。図 18 にその概観を示す。この Cubist の測定テーブルに対象物体を載せ、テーブルを動かしながら固定されたカメラヘッドから照射されるレーザが物体表面を走査し距離データを計測する。測定範囲は、幅、奥行き、高さがそれぞれ、250, 200, 200(mm) の範囲で、上一方向からの計測を行なうことができる。Cubist から得られる距離画像は 512×512 画素の大きさであり、1 画素の距離データは 16 ビットで距離データの分解能は $0.2mm$ である。

また、提案手法のプログラミングには UNIX ワークステーション上で C 言語を用いた。

- 提示する結果の内容

各実験で提示する結果は次の 3 種類である。

- 各画素が属する曲面の種類に色分けしたラベル画像。

領域分割のため各画素を 8 種類の曲面に分類し初期の領域分割を行なう。初期分割では各画素を曲面の種類で色分けすることにより各画素がどの曲面に属しているかを示す。また、浸食の過程では、浸食される側の画素を浸食する側の色に変えていくことによって領域が浸食を進んでいく様子を示す。したがって、浸食過程における各画素の色分け

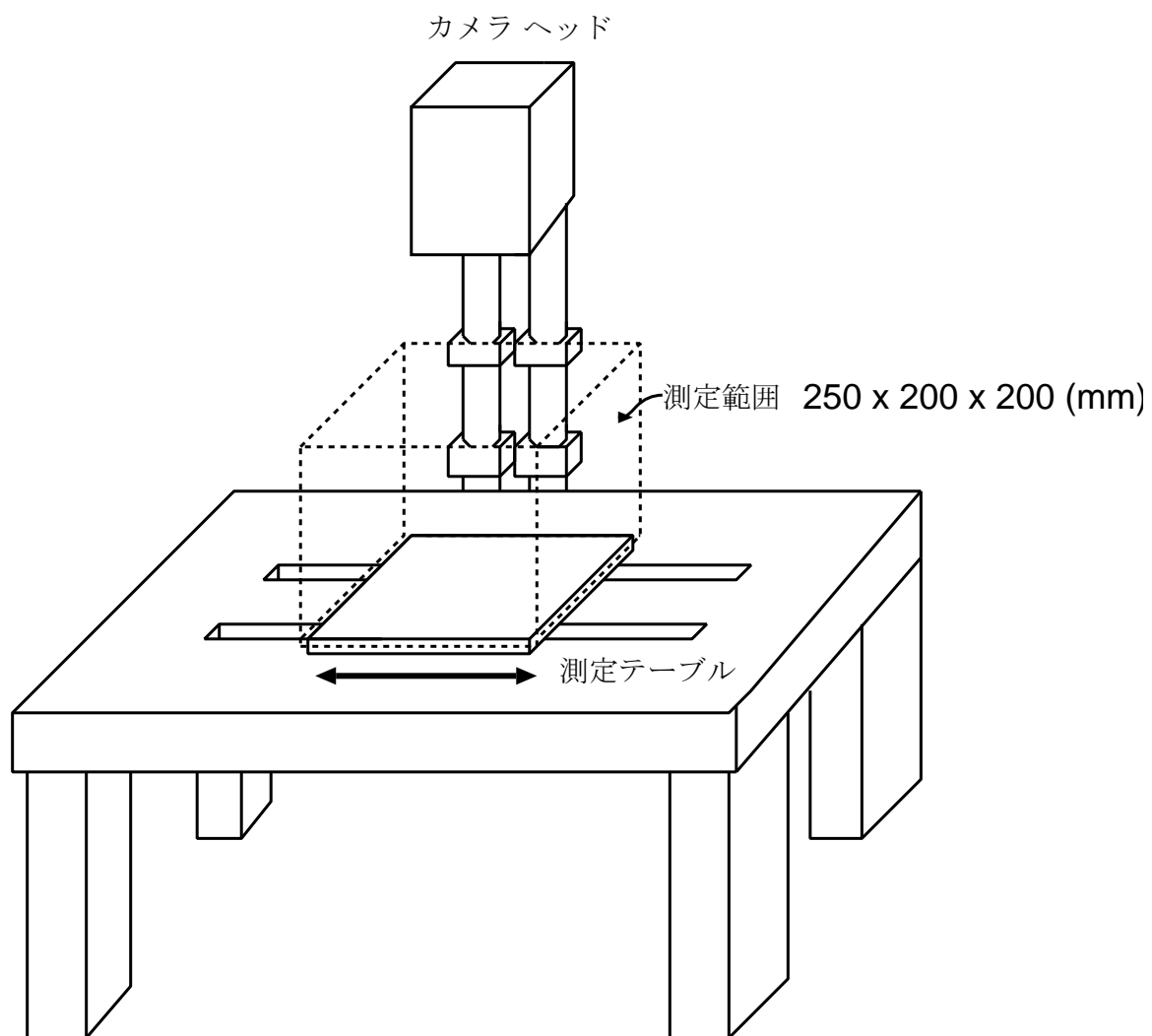


図 18 レンジファインダ Cubist

はその画素の曲面の属性を反映したものではない。各画素の色分けは次の通りである。距離がゼロの画素は物体面ではないため背景とする。

1. 白 : 凸楕円点
2. 赤 : 凹楕円点
3. 黄 : 凸放物点
4. 紫 : 凹放物点
5. 緑 : 平面点
6. シアン : 極小点
7. 青 : 凸双曲点
8. グレー : 凹双曲点
9. 黒 : 距離値がゼロの点)

– 領域の境界の浸食過程における変化

浸食過程における各領域の境界を2値画像で表示する。この画像により、色分けの画像だけでは表現できない領域の境界を示す。

– 領域の階層構造の図

最後に残る一つの領域から浸食過程を逆にたどることで得られる領域の階層構造を示す。

浸食処理の初期段階では多数の微小領域が存在するため、浸食過程を示す画像は浸食を開始する直前および直後の数画像と、浸食が終る直前の数画像のみを示す。特に終る直前の数画像には領域の階層構造を示すため、各領域に数字を割り当てている。

4.2 人工画像による動作確認実験

まず、人工的に作成した距離画像を用いて提案手法の動作の確認を行なった。作成した画像を濃淡値で表示したものを図19に示す。図19の図形は円錐に円柱が真横から貫通した円錐円柱相貫体を人工的に作成したものである。ここでは本手法の角度を用いた曲面分類法を検証するため、画像にノイズは入れていない。

図 20(a) が初期領域分類のラベル画像である。円錐，円柱の部分が黄色すなわち凸放物点に適切に分類されており，円錐，円柱の相貫部分ではグレーすなわち凹双曲点に分類されている。したがって，本手法で用いた角度による曲面分類法は曲率と同様に適切な曲面分類を行なっているといえる。

また，図 21 の分割過程は当初から最も面積の大きい領域 1 が最終的に残った。この領域 1 から浸食過程を逆にたどったものが図 22 で，ここでは領域 3 が領域 1 と 2 の両方から浸食され，また，領域 5 が領域 1 と 4 の両方から浸食されている。この構造は領域 1 だけが全ての領域を統合した場合と，領域 2 が領域 3 を統合した場合および領域 4 が領域 5 を統合した場合のそれぞれの階層構造を持っている。

このように，人工画像を用いた実験において仕様通りの動作が確認された。次節では実画像を用いた実験結果について述べる。

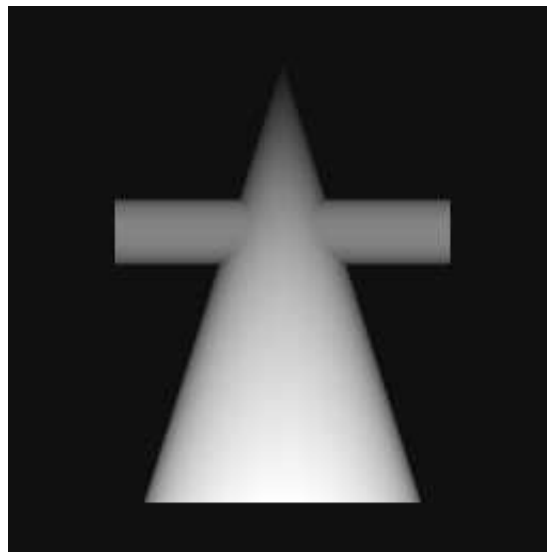


図 19 入力距離画像 (円錐円柱相貫体)

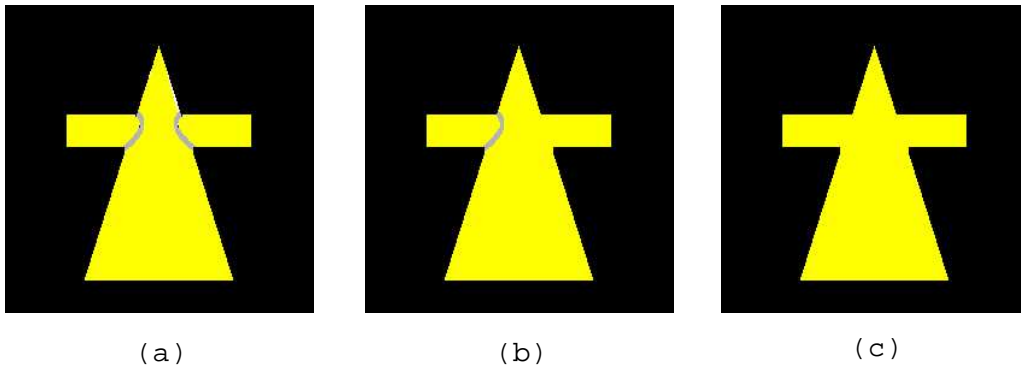


図 20 人工画像を用いた実験の結果 :ラベル画像

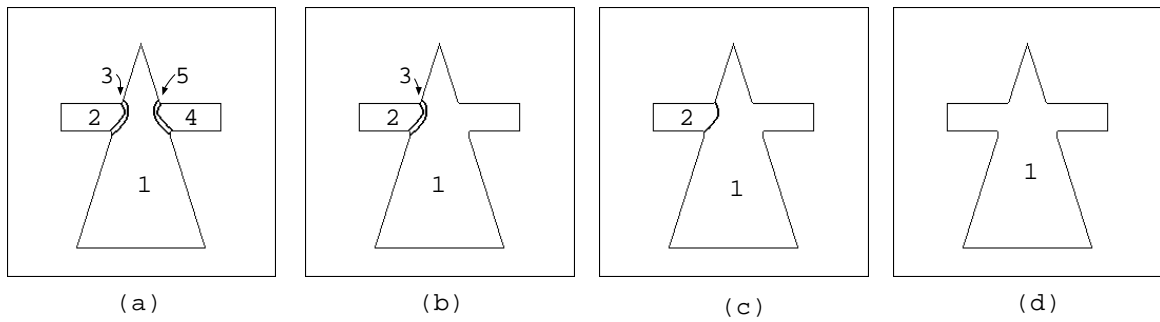


図 21 人工画像を用いた実験の結果 :分割過程

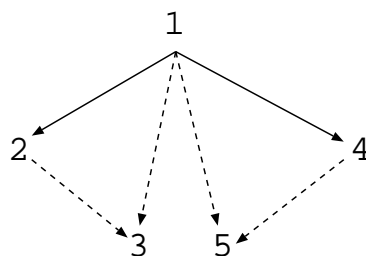


図 22 人工画像を用いた実験の結果 :階層構造記述

4.3 実画像による実験

4.3.1 実験 1

まず，曲面で構成された物体での実験を行うため，図 23 に示す円錐円柱相貫体をレンジファインダで計測した距離画像を入力とした．これは前節の人工画像と同じ形状の物体である．

図 24(a) が初期のラベル画像である．ノイズの影響による多数の微小領域と，平滑化の影響による平面点（緑の画素）が存在している．そこから浸食処理を進めていくと，図 25 のように前節での人工画像と同様の分割結果が得られた．しかし，人工画像とは違い，その階層構造では複数領域による同時浸食は 1 つしか見られなかった．これは，図 25(d) の領域 3 は (b) に見られる微小領域を浸食しているため，人工画像の場合と同様な領域の類似度にはならず，浸食関係が変化したためであると考えられる．

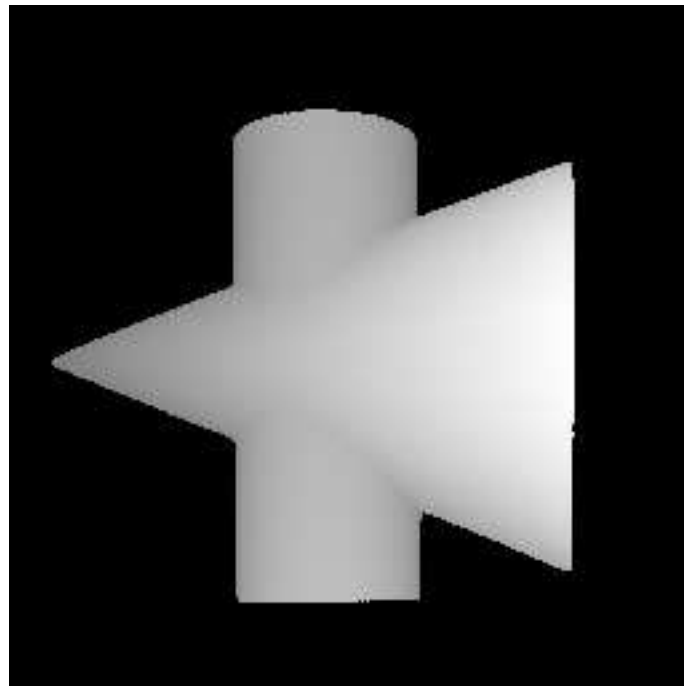


図 23 実験 1 の入力画像（円錐円柱相貫体）

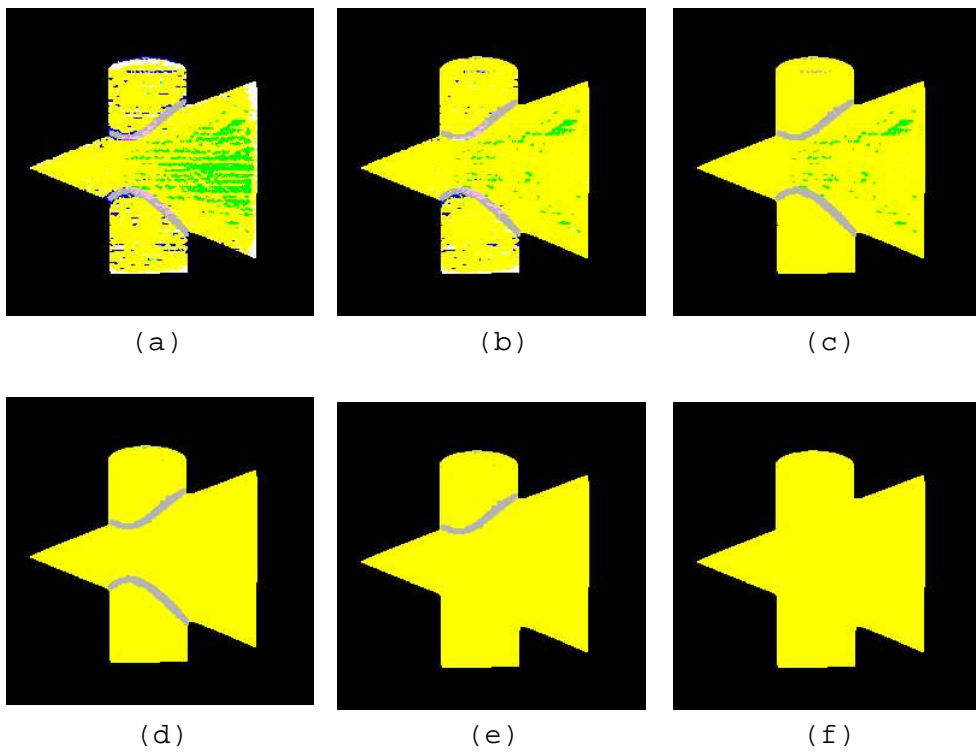


図 24 実画像を用いた実験 1 の結果 : ラベル画像

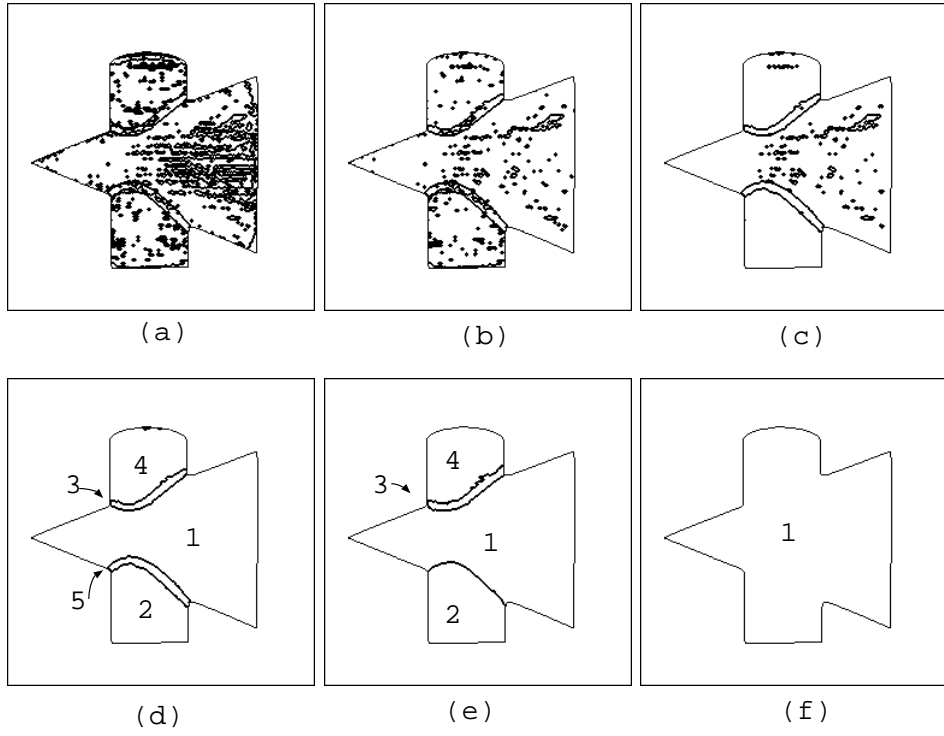


図 25 実画像を用いた実験 1 の結果 : 分割過程

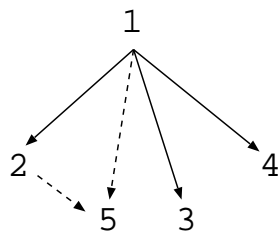


図 26 実画像を用いた実験 1 の結果 : 階層構造記述

4.3.2 実験2

前節では曲面物体を対象としたが，ここでは多面体物体を対象に実験を行なう．図 27が入力とした角錐角柱相貫体の距離画像を濃淡値表示した図である．

まず図 28のラベル画像では緑の平面点の集合がそれぞれ一つの平面領域を分割している．本手法ではルーフエッジの検出を行なっていないため，領域の浸食は各平面を境界を考慮せずに進行する．図 28では平面が順次統合されていく様子が分かる．図 28(g)に残る境界線はその部分にジャンプエッジを検出しているため，最後になって統合されている．

図 29の分割過程では平面部分がルーフエッジと考えられる領域で分割されているのがわかる．図 (c),(d),(e) までで角錐部分と角柱部分の3領域に大きく分かれる．最後には角錐の領域である領域1が全ての領域を統合する．この実験では角錐と角柱の境界部分の領域が凹領域であり，周りの凸領域との類似度の差が大きいため最後まで残ることになった．そのため，階層構造は各平面の構造を反映したものにはならなかった．そこで，多面体を対象とする場合は，ルーフエッジの領域を平面領域の境界とみなす処理を加えることによって，安定した分割が期待できると考えられる．

4.3.3 実験3

前節までは比較的単純な形状のものを対象にしたが，本節では自由曲面物体として図 31に示す木彫りのモアイ像を用いて実験を行なった．

図 32では，(a) から (d) まで頭部と胴体に大きく分かれるような動作であるが，(e) で両者を一つの領域がつかぐ．また，目の部分（凹領域）が最後まで残っているのは目の周りの形状が一様に凸であるため，類似度の差が大きいためであると考えられる．

本手法では領域の浸食関係を隣接する領域とだけで決定しているため，全体として協調するような浸食動作ができない．そのため，領域全体から見て面積の小さい領域から浸食されるようにしているが，複雑な物体になるとそれだけでは不十分であった．複雑な物体を扱うためには，領域全体との関係について評価を行なう必要がある．

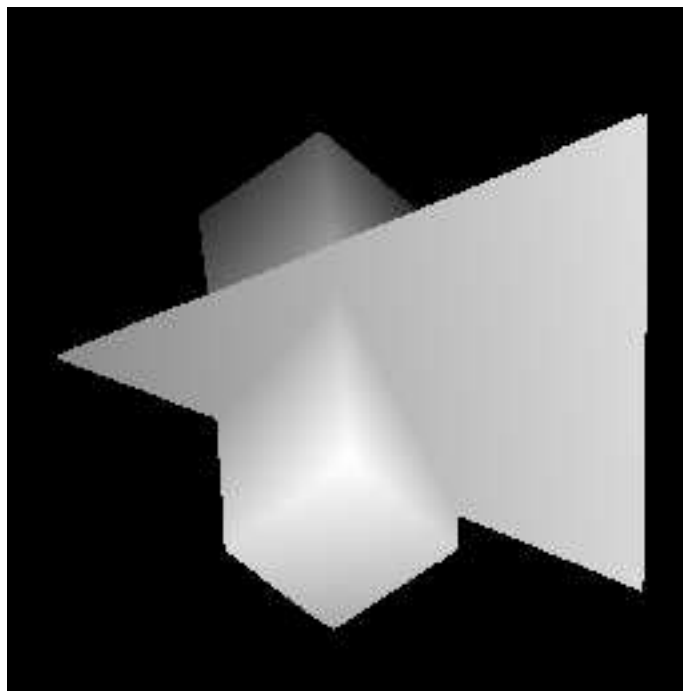


図 27 実験 2 の入力画像 (角錐角柱相貫体)

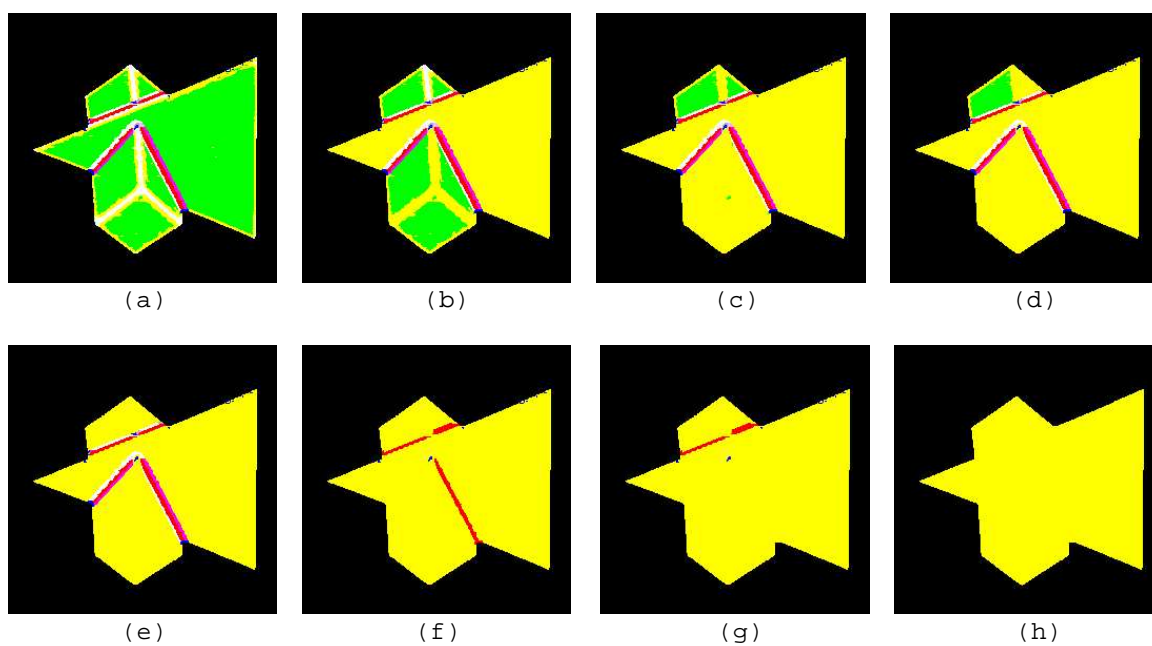


図 28 実画像を用いた実験 2 の結果 : ラベル画像

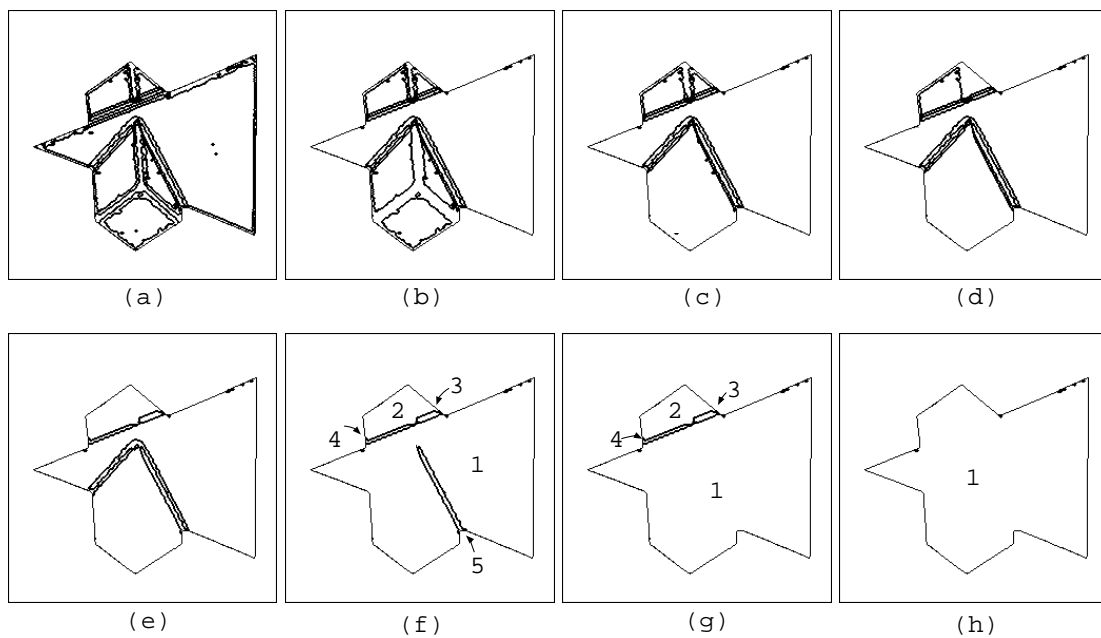


図 29 実画像を用いた実験 2 の結果 : 分割過程

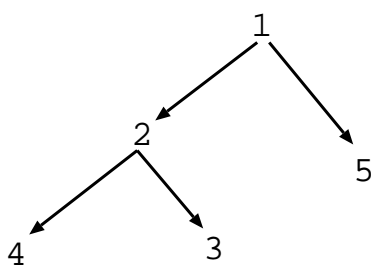


図 30 実画像を用いた実験 2 の結果 : 階層構造記述

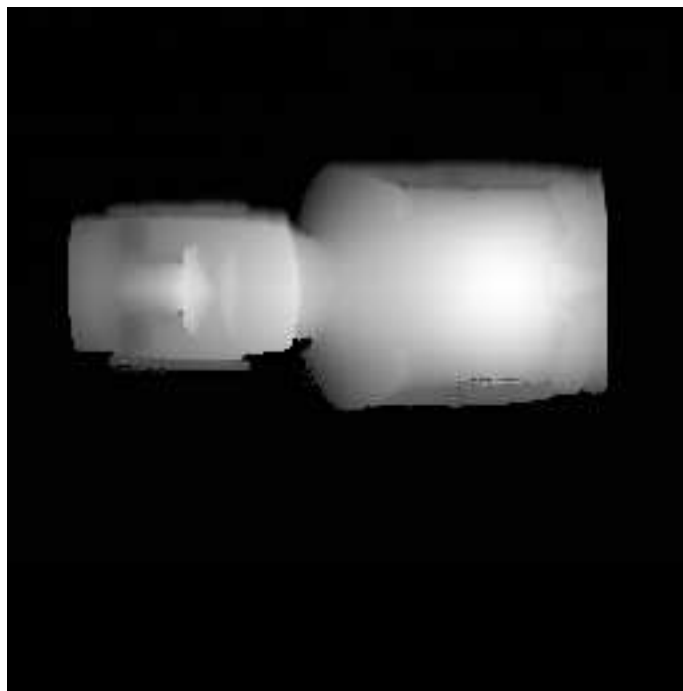


図 31 実験 3 の入力画像 (左アイ像)

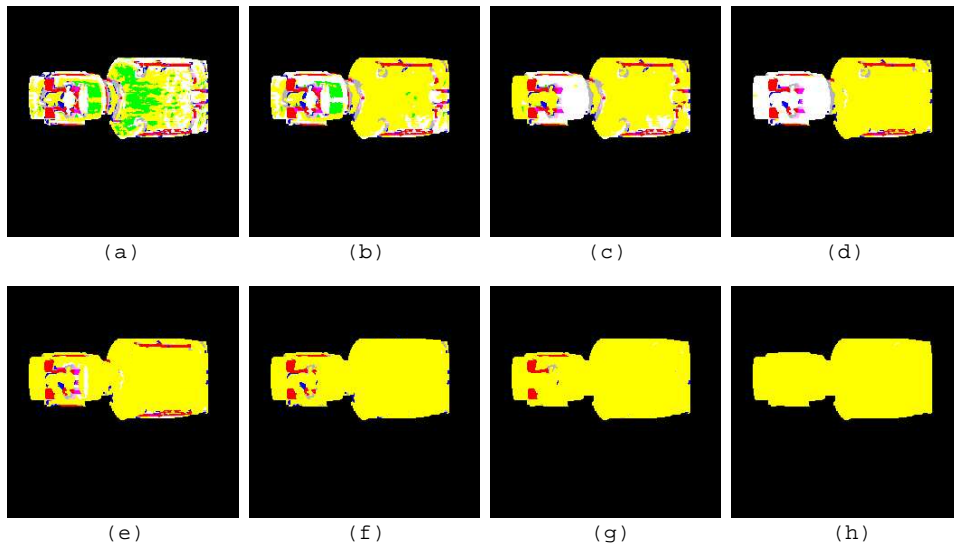


図 32 実画像を用いた実験 3 の結果 : ラベル画像

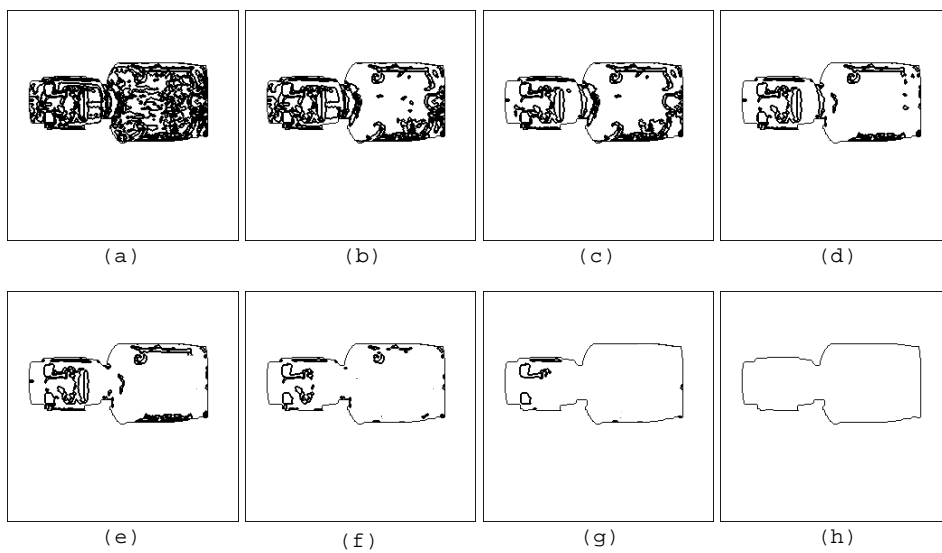


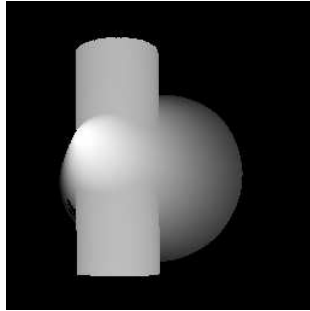
図 33 実画像を用いた実験 3 の結果 : 分割過程

4.3.4 実験4

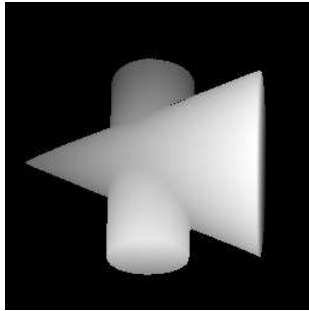
前節までは物体それぞれ一方向からの距離画像による結果を示したが、ここでは同じ物体を異なる方向から計測した複数の距離画像を用いて、それぞれの画像から得られる階層構造記述について検証を試みる。

この実験では、実験1で用いた円錐円柱相貫体を3つの異なる方向から計測した距離画像を用いた。実験1で撮影したものよりも上方から撮影した画像を type 1、横方向から円錐の平面部分が見える方向から撮影した画像を type 2、円錐部分から出ている円柱部分の片方がかなり隠蔽されるように撮影した画像を type 3 とする。各入力画像を図 34 に示す。

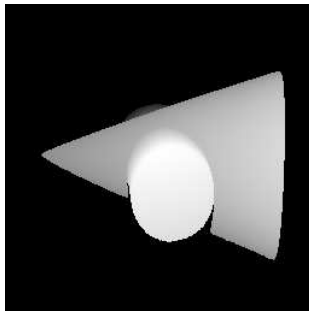
type 1,2,3 のラベル画像をそれぞれ図 35, 図 37, 図 39 に示す。type 1,2 に関しては実験1の結果と大差ないが、type 3 に関してはかなり隠蔽された円柱部分の領域が非常に小さくなっている。次に、type 1,2,3 の領域の分割過程をそれぞれ図 36, 図 38, 図 40 に示す。type 1,2 に関しては実験1と同様の分割過程を経ているのが確認できる。しかし、type 3 ではかなり隠蔽された円柱部分が type 1,2 より早い段階で浸食されている。これは隠蔽部分が多いため領域の表面積が小さくなったためである。これらの結果から得られるそれぞれの階層構造記述を図 41 に示す。type 1 の階層構造は実験1 (図 26) と、type 2 の階層構造は人工画像による実験 (図 22) と全く同じ結果が得られた。このことから、多少物体を計測する方向が変わった場合でも、安定した階層構造が得られているといえる。しかし、type 3 の階層構造は他の2つと異なる結果となった。円柱部分の大部分の領域が隠蔽されているため、分割される領域数も変わっており、また、その部分が早い段階で浸食されているため、階層構造記述同士を階層ごとに照合する場合にも支障が出てくると考えられる。



type 1



type 2



type 3

図 34 実験 4 の入力画像

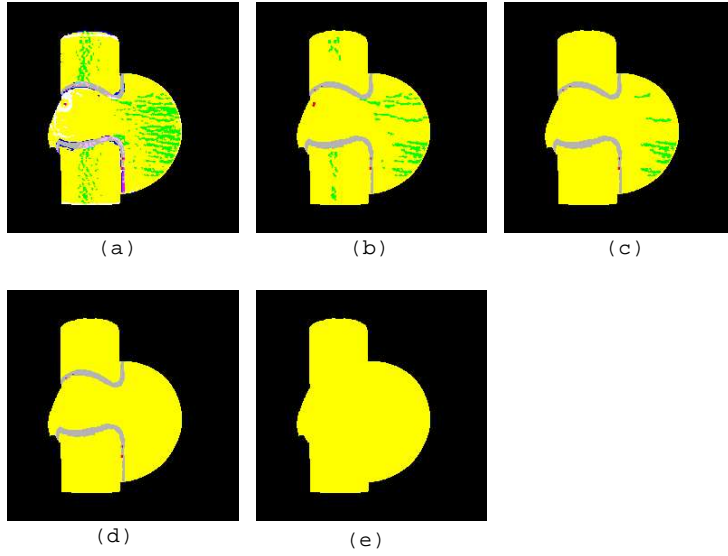


図 35 実験 4 の結果 :type 1 のラベル画像

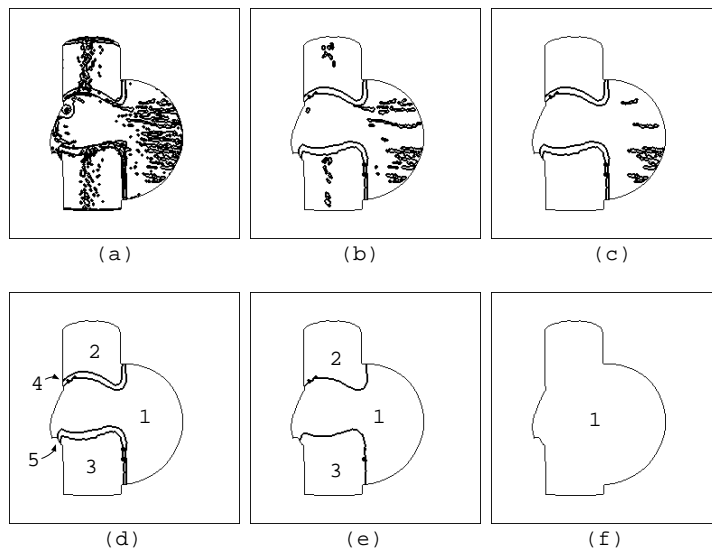


図 36 実験 4 の結果 :type 1 の分割過程

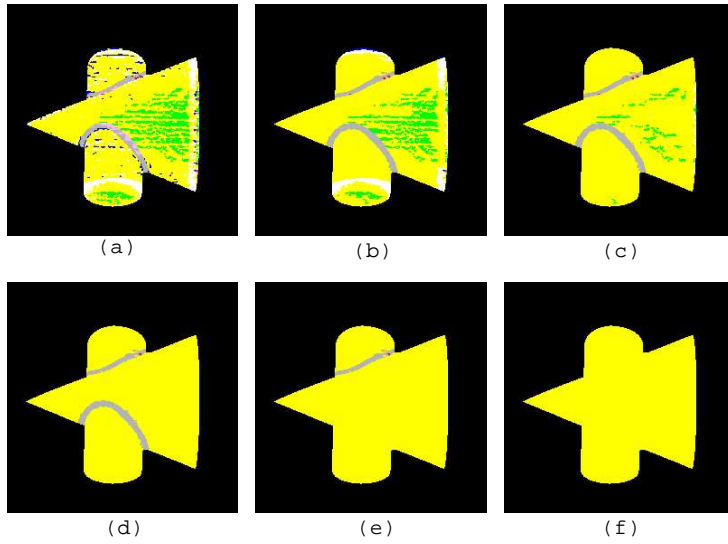


図 37 実験 4 の結果 :type 2 のラベル画像

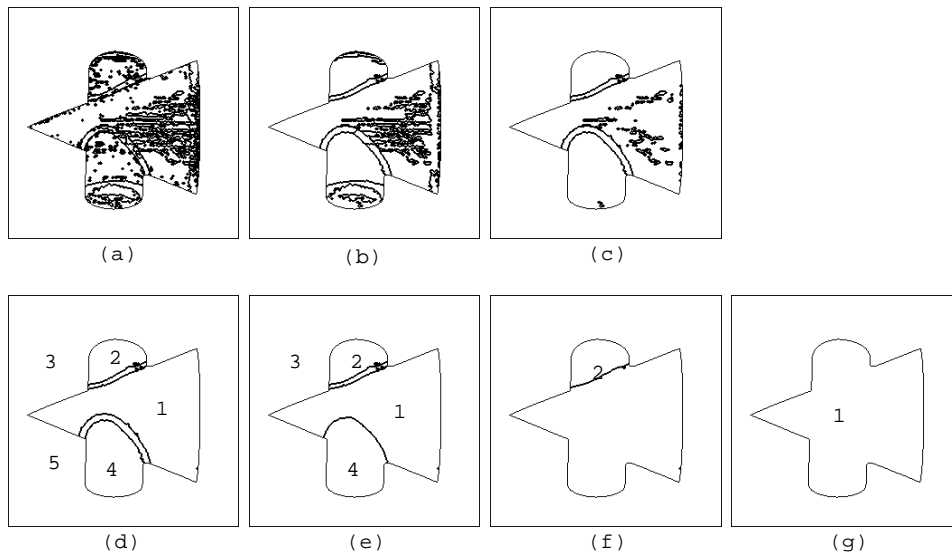


図 38 実験 4 の結果 :type 2 の分割過程

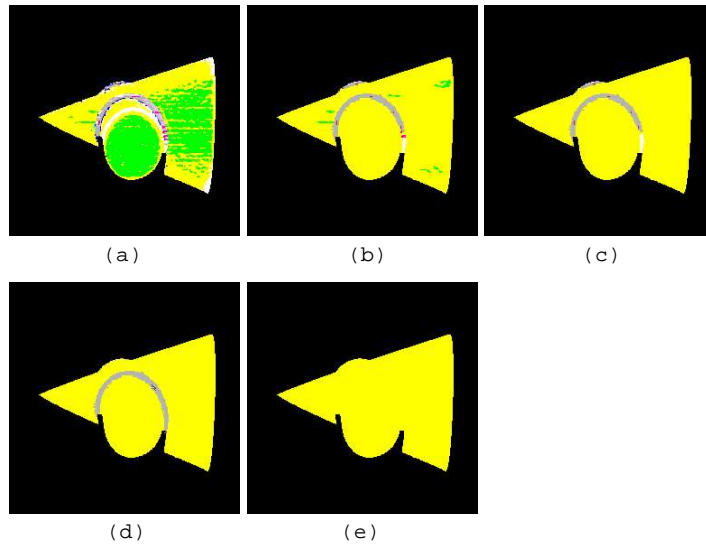


図 39 実験 4 の結果 :type 3 のラベル画像

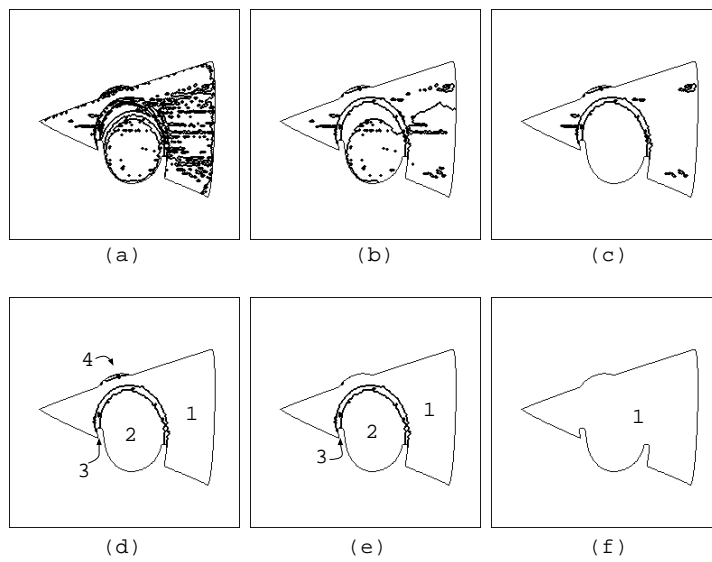


図 40 実験 4 の結果 :type 3 の分割過程

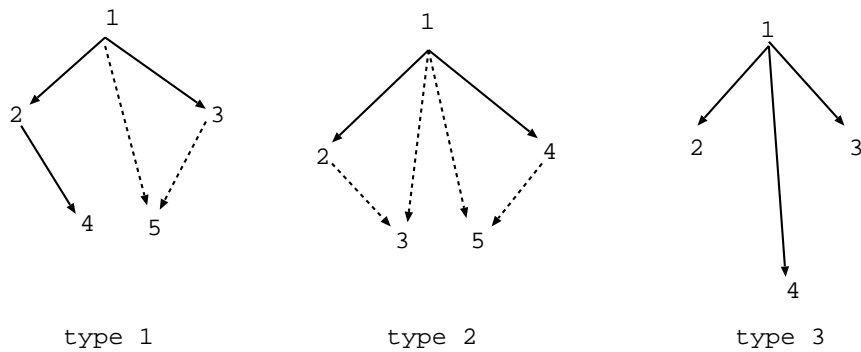


図 41 実験 4 の結果 :type1,2,3 の階層構造記述

4.4 考察

本手法の実験において考察したことを述べる.

- 角度による曲面分類について

人工画像を用いた実験では理想的な曲面分類を行なうことができ、また、実画像を用いた実験でもノイズなどによる影響はあるものの概ね正しい分類を行なうことができた. したがって、角度を用いることに関して問題はないと考えられる.

- 視点の変化に対する階層構造の変化について

視点の多少の変化に対しては安定した階層構造記述を得ることができた. しかし、視点の変化によって隠蔽部分が大きくなると、階層構造が変動してしまうことが確認された. これは、領域の浸食関係に領域の表面積を用いているため、隠蔽されて表面積が変わると浸食関係が変わってしまうためである.

- パラメータについて

本手法のパラメータは主に浸食関係を決定する部分での“領域の類似度の閾値”と“面積の閾値”である. この2つの初期値または増加率を変化させ

ることにより浸食の過程を変えることができる。今回はこの2つを試行錯誤によって設定しているが、この2つのパラメータには次のような性質があることを確認した。

1. 類似度の閾値：増加させるにあたって初期値を定数倍するパラメータである。この定数を小さくすると、全体で一度に浸食する領域数が減り、また、1つの領域が複数の領域に浸食されるケースも減る。逆に大きくすると、一度に浸食する領域は増えるが、本来統合すべきではない領域も浸食してしまう可能性が高くなる。
2. 面積の閾値：増加させるにあたって初期値を定数倍するパラメータである。この定数を大きくすると、比較的大きな領域も浸食対象になり、場合によっては微小領域が浸食過程の最後の方まで残ってしまうことがある。また、左右対称な物体でも左右で非常に異なる浸食過程になる場合がある。

- 処理時間について

今回の実験では計算機はSGI社製のONYXを使用した。ただし、使用するプロセッサは1つである。

提案手法の処理時間は平均で約30分であった。処理にかかる時間のほとんどが浸食処理によるものである。浸食処理ではループ回数が領域数となっており、初期領域の分割数によって処理時間が変動する。また、曲面の分類や面積の計算には数秒を要するだけであった。本手法は浸食関係を決定するにあたって隣接する領域のみを見ているため、処理の並列化を行なうことによって処理速度の向上が期待できる。

5. むすび

本論文では、距離画像の領域分割における階層構造の獲得を目的として、領域間の類似度によっては一つの領域が隣接する複数の領域から統合される領域浸食モデルを定義し、そのモデルを用いた距離画像の領域分割手法を提案した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

2章では、本研究で用いた距離画像について説明し、距離画像の領域分割について概説した。そして、画像の認識・理解といった立場から画像の領域分割の重要性について述べた。また、領域分割の際に用いられる形状特徴抽出の手法について説明した。さらに、複雑な物体形状を記述する場合における階層的な構造記述の必要性について指摘し、本研究の位置づけを明らかにした。

3章では、本論文で提案した領域浸食モデルによる距離画像の領域分割の手法について説明した。ある領域 A が統合される際、隣接する領域との類似度がある閾値内におさまっている領域全てに A を統合させるようにすると、類似度が物体の向きやノイズなどに多少影響を受けても、少なくとも本来統合されるべき領域に統合される可能性が高くなると考え、領域統合の際に複数の領域が一つ領域を浸食すること許す領域統合が本手法の特徴である。

4章では、提案手法の動作確認と実画像での基本的な特性を検証した。本手法は浸食の進め方としてまず面積が微小なものを浸食対象とするため、ノイズなどによる細かな微小領域の影響を受けにくいことが確認された。また、領域の浸食関係を隣接する領域との間だけで評価しているため、比較的複雑な形状の物体を対象にすると、全体としての領域の広がり方に支障が出ることを確認された。更に、視点を変えて計測した複数の画像を用いた実験では、多少の向きの変化に対しては安定した階層構造が得られることを確認したが、向きが変化し隠蔽部分が大きく変化した場合、本手法では階層構造の変化が避けられないことが判明した。

最後に、提案手法の問題点及び今後の課題について述べる。

問題点は、まず領域間の浸食関係に面積の大小関係を用いているため、物体の向きが変わりその視点から見えていた領域が見えなくなると領域の表面積が変わるため、物体の向きの変化次第で階層構造が変わってしまう点である。この問題に対しては見えている部分での部分的な階層構造の照合、あるいは隠蔽部分に隣

接する領域の面積を別に評価することを考える必要がある。

今後の課題としては、領域の浸食は隣接関係にある領域同士に限っているが、似た形状の領域が隣接していなくても近い位置にある場合、人間の直観としてはそれらの領域をひとつにまとめて認識するのが自然であると考えられる。そこで領域の浸食は隣接関係だけでなく、位置関係なども用いた浸食関係の決定を行なうことが考えられる。また、本手法で得られる階層構造を3次元物体認識手法に組み込むことによって本手法の階層構造がどれだけ安定したものとなっているかの検証を行なう必要がある。今後はこれらの問題点の改善が急務である。

謝辞

本研究の全過程を通じ、御懇篤なる御教示、御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授に対し、衷心より感謝の意を表す。

本研究の遂行にあたり、像情報処理学講座 千原 國宏教授、並びにソフトウェア基礎講座 竹村 治雄助教授 には日頃から終始熱心な御指導を賜った。ここに深く感謝申し上げる。

さらに、本研究を通じて、ソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手、並びに情報科学センター 片山 喜章助手には日頃から貴重な御助言、御指摘並びに多大なる支援を賜った。ここに深謝申し上げる。

最後に、ソフトウェア基礎講座の諸氏には種々の面でお世話になった。ここに記して感謝の意を表す次第である。

参考文献

- [1] 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”, 信学論 (D-II), J75, 8, pp.1353-1363(1992).
- [2] 佐藤嘉伸, 大谷淳, 石井健一郎: “距離画像からの3次元形状の階層的パーツ構造の復元”, 信学論 (D-II), J76, 8, pp.1624-1636(1993).
- [3] 森山真光, 佐藤嘉伸, 田村進一: “3次元カテゴリーモデル表現とその獲得: 階層的パーツ記述からの部分的共通構造の抽出と統合”, 信学技報, PRU95-42, pp.41-48(1995).
- [4] 鄭 文濤, 原島博: “不変特徴に基づく3次元曲面の表現”, 信学論 (D-II), J78, 2, pp.272-280(1995).
- [5] 池田正樹, 田中弘美: “3次元曲率の球面相関による顔認識”, 信学技報, PRU95-194, pp.29-36(1996).
- [6] 藤田武洋, 佐藤宏介, 井口征士: “局所曲面形状解析に基づくビンピッキングのためのビジョンシステム”, 信学論 (D-II), J73, 1, pp.46-53(1990).
- [7] 脇迫仁, 鎌田清一郎, 河口英二: “距離画像を用いた物体検出システム”, 信学技報, PRU92-124, pp.49-56(1993).
- [8] 脇迫仁, 鎌田清一郎, 河口英二: “距離画像処理による3次元物体検出システム”, 信学論 (D-II), J77, 7, pp.1282-1292(1994).
- [9] 渡辺 弥寿夫: “曲面体の記述 :サーベイ”, 信学技報, PRU90-80, pp.85-90(1990).
- [10] 堀越力, 浜野輝夫, 石井健一郎: “超2次関数による3次元形状インデクシング”, 信学論 (D-II), J76, 1, pp.30-39(1991).
- [11] 金田正久, 横矢直和, 山本和彦: “アニーリング法を用いた距離画像からの超2次曲面記述の抽出”, 情処研資, CV-65-6(1990).

- [12] 江浩, 鈴木秀智, 鳥脇純一郎: “濃淡画像のセグメンテーションのための領域生成および領域分割手法の比較評価について”, 信学技報,PRU92-9,pp.65-72(1992).
- [13] 横矢直和, 富田文明, 田村秀行: “画像処理アルゴリズムの概観 (5)-領域分割-”, 電総研彙報 44,7/8,pp.504-520(1981).
- [14] 横矢直和: “その他の重要な話題 第 III 部 領域分割”, 画像処理アルゴリズムの最新動向 (高木幹雄, 鳥脇純一郎, 田村秀行共著) 別冊 ・OplusE,(株) 新技術コミュニケーションズ,pp.227-235(1986).
- [15] 横矢直和, マーチン D. レビン: “微分幾何学特徴に基づく距離画像分割のためのハイブリッド手法”, 情処論,vol.30,No.8,pp.944-953(1989).
- [16] Oshima M. and Shirai Y.: “Object Recognition Using Tree-Dimensional Information”, IEEE Trans.,PAMI,vol.5,No.4,pp.353-361(1983).
- [17] Marr D., 乾敏郎, 安藤広志訳: “ビジョン-視覚の計算理論と脳内表現”, 産業図書 (1989).
- [18] Andrew A. Witkin: “Scale-space filtering”, Proceeding of International Joint Conference Artificial Intelligence, Karlsruhe, West Germany,pp.1019-1022(1983).
- [19] Lifshits L. M. and Pizer S. M.: “A Multiresolution Hierarchical Approach to Image Segmentation Based on Intensity Extrema”, IEEE Trans.,PAMI,vol.12,No.3,pp.529-538(1990).
- [20] Michael W. Hansen and William E. Higgins: “Watershed-Driven Relaxation Labeling for Image Segmentation”, IEEE Proc. ICIP-94,vol.III,pp.460-464(1994).
- [21] Jing Zhou, Xiang Fang and Bijoy K. Ghosh: “Image Segmentation based on Multiresolution Filtering”, IEEE Proc. ICIP-94,vol.III,pp.483-487(1994).

- [22] Mark Tabb and Narendra Ahuja: “Multiscale Image Segmentation Using a Recent Transform”, ARPA Proc. Image Understanding Workshop, vol.II, pp.1523-1530(1994).
- [23] 画像処理ハンドブック編集委員会編 (尾上守夫主編): 画像処理ハンドブック, 昭晃堂 (1981).
- [24] 谷内田正彦: コンピュータビジョン, 丸善 (1990).
- [25] 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何, 裳華房 (1986).
- [26] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).