

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†

横 矢 直 和^{††} マーチン D. レビン^{†††}

3次元物体のモデル化と認識を目的とした距離画像解析の初期段階において最も重要な処理はセグメンテーションである。本論文では、この問題に対して領域およびエッジに基づくハイブリッドな手法を提案する。距離画像のセグメンテーションを、観察方向に不変な微分幾何学特徴が一様でかつ、距離と法線ベクトルに関する不連続点を含まないような表面領域への分割と定義する。この分割を実現するために、まず最初に初期分割として、ガウス曲率と平均曲率の符号の組合わせに基づく、座標のとり方と観察方向に不変な画素分類（曲率符号マップ）を行い、同時に、距離の不連続点（ジャンプエッジマップ）と法線ベクトルの不連続点（ルーフエッジマップ）を抽出する。そして最後に、この3種類の初期分割マップを統合することによって最終的な分割を得る。本手法は、距離画像を物体の部分表面に対応した領域に分割するとともに、各面を物体認識の観点から重要な観察方向に不変な8つの基本曲面タイプに分類することができる。また、本手法は多面体と自由曲面物体が混在するような複雑なシーンに対しても有効である。これは人工データとレーザレンジファインダから得られた実データを用いた実験によって確かめられた。

1. ま え が き

コンピュータビジョン研究の1つの目的は人間と同じような3次元環境認識能力を機械に付与することである。近年、3次元（距離）情報入力技術¹⁾⁻⁵⁾の進展に伴い、距離画像解析の研究が盛んになってきた^{6), 7)}。距離画像を用いることの最大の利点は、通常の濃淡画像と違って物体の形状に関する幾何学的情報を直接利用できる点にある。特に、レンジファインダから得られる密な距離マップは多面体だけでなく、曲面物体の認識にも有効である。

画像解析の初期段階において最も重要なのは画像から意味のある画像特徴を抽出するセグメンテーション処理である。距離画像を対象としたセグメンテーション法は一般に、領域分割法とエッジ検出法とに分かれる。領域分割では、通常、シーン（距離画像）を扱いやすい関数で近似できる表面領域に分割する。最も簡単でよく用いられる関数は平面を表す1次多項式である⁸⁾。ただし、この場合には基本的に多面体しか扱うことができず、曲面物体には高次多項式が必要になる⁹⁾⁻¹⁰⁾。しかし、この種のアプローチでは、領域全体を特定の関数で近似するので、2次曲面が滑らかにつながっているような場合には正しく分割できない。最

近、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方法が提案されている¹¹⁾⁻¹⁵⁾。しかし、この方法も、区分的にしか滑らかでない現実の物体表面について曲率を正しく計算できないという問題を抱えている。

一方、エッジ検出では、物体の輪郭と稜線に対応した距離および法線の不連続点を抽出する。距離画像内でジャンプエッジとして現れる物体の輪郭は濃淡画像に対する従来のエッジ検出法で抽出できるが、ルーフエッジとして現れる稜線を検出するためには、法線ベクトル解析^{16), 17)}、主曲率解析^{13), 18)}などが必要である。エッジ検出法は一般に、物体の輪郭に対応した閉じた線を得るのが難しいのに加えて、(1) 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、(2) 幾何学的性質が滑らかに変化する部分を本質的に検出できない、といった欠点を持っている。これは曲面物体を対象としたときに特に問題となる。

本論文では、距離画像のセグメンテーションのために、領域分割とエッジ検出の長所を組み合わせたいブリッドな手法を提案する。ここでは、距離画像を、観察方向に不変な微分幾何学特徴が一様でかつ、距離と法線のいずれの不連続点も含まないような基本領域に分割する。本方法は、区分的に滑らかな3次元曲面の1次、2次偏微分の計算に基づいている。最初に、偏微分値から各点についてガウス曲率と平均曲率を計算し、曲率の符号に基づく分割を行う。次に距離値の差分によるジャンプエッジマップと法線ベクトルの差分によるルーフエッジマップを作成する。最後に、こ

† A Hybrid Approach to Range Image Segmentation Based on Differential Geometry by NAOKAZU YOKOYA (Machine Understanding Division, Electrotechnical Laboratory) and MARTIN D. LEVINE (McGill Research Centre for Intelligent Machines, McGill University).

†† 電子技術総合研究所知能情報部

††† マギル大学知能機械研究センター

れら3つの初期分割マップを統合する。本方法は、(1) 距離および法線の不連続点の近傍でも微分幾何学特徴が正しく計算される、(2) エッジを介して隣接して見えている同タイプの曲面を区別できるという特長を持っている。したがって、多面体と曲面物体の混在したシーンに対しても有効である。

2. 区分的に滑らかな曲面についての 微分幾何学特徴の抽出

距離画像を用いて自由曲面物体を認識するためには観察方向に依存しない局所特徴を求める必要がある。このために本論文では、微分幾何学^{19), 20)}における曲面の特徴量を導入する。以下では、まず、通常距離画像に対する法線ベクトル、ガウス曲率、平均曲率の定義を簡単に示し、次に、複数の物体が存在するシーンの距離画像についてこれらの特徴量を計算するための具体的な方法を提案する。

2.1 曲面の微分幾何学特徴

2.1.1 グラフ曲面についての法線ベクトル、 ガウス曲率および平均曲率

本論文では、単一の観察方向から得られた Orthogonal-Range 型⁷⁾の距離画像を対象とする。この場合、3次元曲面 S は次のようなパラメータ表現で表すことができるグラフ曲面である。

$$S = \{(x, y, z(x, y)) : (x, y) \in D \subseteq E^2\} \quad (1)$$

ただし、 $z(x, y)$ は距離画像内の点 (画素あるいは画素と呼ぶこともある) (x, y) における基準面からの距離を表している。

曲面 S 上の点 (x, y) における単位法線ベクトル $n(x, y)$ は次式で与えられる。

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}} \left(-\frac{\partial z}{\partial x}, -\frac{\partial z}{\partial y}, 1 \right) \quad (2)$$

また、注目点における最大主曲率と最小主曲率の積であるガウス曲率 K と2つの主曲率の平均である平均曲率 H は次式で与えられる。

$$K = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right]^2} \quad (3)$$

$$H = \left\{ \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 - 2 \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right\} / 2 \left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \right]^{3/2} \quad (4)$$

これらの量の導出および幾何学的な意味付けについては文献 (12), (19), (20), (21) に詳しい。

2.1.2 曲率の符号に基づく曲面の分類

ガウス曲率と平均曲率は、曲面上の各点について局所的に決まり、観察方向に対する不変な性質を備えている。すなわち、各点において、その点が見えている限り、物体の並行移動と回転に関して不変な量である。両曲率の符号のみから、曲面上の点を観察方向に依存しない次の8つの基本曲面タイプに分類することができる¹²⁾。

- (1) $K > 0$ かつ $H < 0$ …負楕円点
- (2) $K > 0$ かつ $H > 0$ …正楕円点
- (3) $K = 0$ かつ $H < 0$ …負放物点
- (4) $K = 0$ かつ $H > 0$ …正放物点
- (5) $K = 0$ かつ $H = 0$ …平坦点
- (6) $K < 0$ かつ $H = 0$ …極小点
- (7) $K < 0$ かつ $H < 0$ …負双曲点
- (8) $K < 0$ かつ $H > 0$ …正双曲点

このように、ガウス曲率と平均曲率の対は曲面の重要な幾何学的性質を表しており、認識を目的とした物体の記述に有効である。特に、物体が部分的に隠されているような状況でも利用できる利点がある。なお、曲率の定義から、 $K \leq H^2$ でなければならない (曲率空間での $K > H^2$ の領域は禁止帯²¹⁾と呼ばれる)。

2.2 選択的局所曲面あてはめによる微分幾何学 特徴の計算

微分幾何学特徴を計算するためには、先の定義から明らかなように、1次、2次偏微分が必要となるが、現実の物体表面は区分的にしか滑らかでないため、通常の一様な微分オペレータではエッジの近傍で偏微分値を正しく計算できない。そこで、エッジ周辺でも正確に微分値を計算できる新しいオペレータを導入する。本手法は、(1) 各点を中心とした窓の関数近似、(2) 各点についての最適な窓の決定、(3) 最適窓を用いた微分、の3つのステップから成っている。

2.2.1 窓の多項式近似

曲面あてはめの関数としては、2次微分可能である必要があり、かつ解析が容易なものが望ましい。さらには、雑音や量子化効果の影響を受けにくいものが多い。以上の理由から、各点で次の2次多項式を用いた最小二乗近似による局所曲面あてはめを行う。

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (5)$$

注目点ごとに式(5)の両辺の差の近傍内での二乗和を最小にするようにパラメータ $a \sim f$ を決定する^{12), 14)}。

5×5 の大きさの窓を用いて最小二乗法でこれらのパラメータを求めるためのオペレータを図1に示す。以下では、点(x, y)を中心とする窓 W(x, y)について求まったパラメータをそれぞれ、a(x, y), b(x, y), c(x, y), d(x, y), e(x, y), f(x, y)で表すことにする。

2.2.2 最適窓の決定

距離画像に対する微分オペレータを得るために曲面あてはめを行うという考え方はこれまでもいくつか提案されているが^{12), 14), 22)}, エッジの近傍でも一様な処理を行っているために、物体形状をばかす結果になっている。特に、距離値の不連続点であるジャンプエッジの周辺で偽の形状記述が得られる²³⁾。

この問題を解決するために、各点についてエッジを含まない窓を求め、この窓を用いて微分を行う。一般に、全点について(2m+1)×(2m+1)の大きさの窓を用いた局所曲面あてはめを行うと、各点は、(2m+1)×(2m+1)個の窓で被われている。そこで、エッジを含まない窓として、(2m+1)×(2m+1)個の窓のうち、曲面あてはめの誤差が最小のものを選ぶ。本手法は、図2に示すように、エッジの近傍では曲面あてはめの誤差が増大するという事実に基づいている。なお、図2(a)はトーラスの上に楕円体を置いた人工データであり、本論文での説明の全体を通じて用いる。

点(x, y)について最適窓 W(x-u, y-v)が選ばれると、(x, y)における曲面あてはめはパラメータの集合 {a(x-u, y-v), b(x-u, y-v), c(x-u, y-v), d(x-u, y-v), e(x-u, y-v), f(x-u, y-v)} で表される。(-u, -v)は点(x, y)から最適窓の中心への変位である。この選択的局所曲面あてはめの考え方は、濃淡画像に対する Slope Facet Model による平滑化²⁴⁾を距離画像の曲面あてはめに拡張したものである。

2.2.3 微分値および曲率特徴の計算

最初に、各点で1次および2次の偏微分を行い、次に偏微分値から法線ベクトルと曲率を計算する。

選択的局所曲面あてはめを行うことによって、距離画像内の点(x, y)における1次、2次偏微分値を次式で推定することができる。

$$\frac{\partial x}{\partial x}(x, y) = 2a(x-u, y-v)u + c(x-u, y-v)v$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial x^2}(x, y) = 2a(x-u, y-v) \tag{8}$$

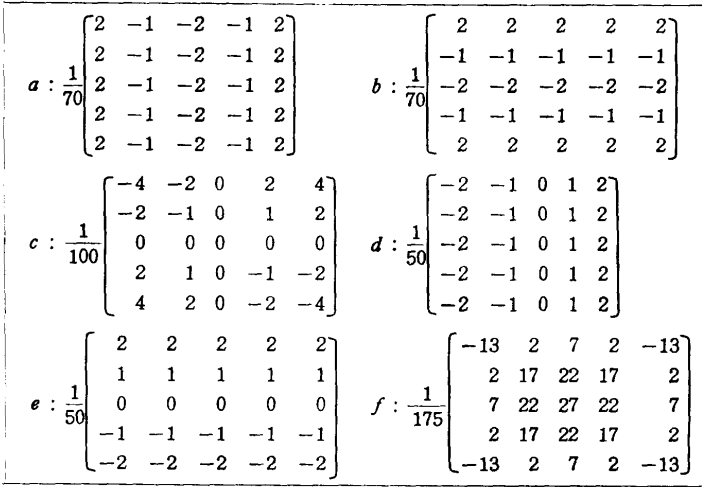
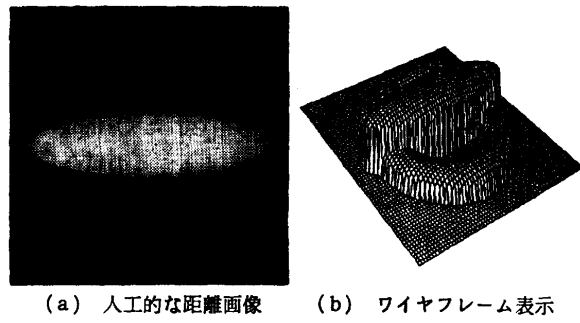


図1 局所2次多項式近似のパラメータを求めるための5×5オペレータ

Fig. 1 A set of operators for local biquadratic surface fit using a 5×5 window.



(a) 人工的な距離画像 (b) ワイヤフレーム表示 (c) 曲面あてはめ誤差の分布

図2 2次多項式を用いた局所曲面あてはめにおける最小二乗誤差の分布

Fig. 2 Distribution of the least squared errors of local biquadratic surface fit.

$$+d(x-u, y-v) \tag{6}$$

$$\frac{\partial x}{\partial y}(x, y) = 2b(x-u, y-v)v + c(x-u, y-v)u + e(x-u, y-v) \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial z}{\partial x} : \frac{1}{700} & \begin{bmatrix} 40u-28v-28 & -20u-14v-14 & -40u & -20u+14v+14 & 40u+28v+28 \\ 40u-14v-28 & -20u-7v-14 & -40u & -20u+7v+14 & 40u+14v+28 \\ 40u-28 & -20u-14 & -40u & -20u+14 & 40u+28 \\ 40u+14v-28 & -20u+7v-14 & -40u & -20u-7v+14 & 40u-14v+28 \\ 40u+28v-28 & -20u+14v-14 & -40u & -20u-14v+14 & 40u-28v+28 \end{bmatrix} \\
 \frac{\partial z}{\partial y} : \frac{1}{700} & \begin{bmatrix} -28u+40v+28 & -14u+40v+28 & 40v+28 & 14u+40v+28 & 28u+40v+28 \\ -14u-20v+14 & -7u-20v+14 & -20v+14 & 7u-20v+14 & 14u-20v+14 \\ -40v & -40v & -40v & -40v & -40v \\ 14u-20v-14 & 7u-20v-14 & -20v-14 & -7u-20v-14 & -14u-20v-14 \\ 28u+40v-28 & 14u+40v-28 & 40v-28 & -14u+40v-28 & -28u+40v-28 \end{bmatrix} \\
 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} : \frac{1}{35} & \begin{bmatrix} 2 & -1 & -2 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} : \frac{1}{35} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} : \frac{1}{100} \begin{bmatrix} -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ 4 & 2 & 0 & -2 & -4 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

図 3 選択的局所曲面あてはめに基づいて1次および2次偏微分を計算するための5×5オペレータ
 Fig. 3 A set of operators for estimating the first and second partial derivatives using the selective local surface fit.

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}(x, y) = 2b(x-u, y-v) \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}(x, y) = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}(x, y) = c(x-u, y-v) \quad (10)$$

ただし、 (x, y) に対する最適窓として $W(x-u, y-v)$ が選ばれたと仮定している。式(6)~(10)に図1のオペレータを代入することによって図3に示す変位 $(-u, -v)$ を含む微分オペレータの一般形(5×5の場合)が得られる。なお、変位 $(-u, -v) = (0, 0)$ の場合には Beaudet の2次オペレータ²⁵⁾と等価になる。

各点で変位 $(-u, -v)$ を求めた後で、図3の微分オペレータの一般形を畳み込むと計算時間が膨大になるので、実際の計算では、まず図1のオペレータの畳み込みによる局所多項式近似パラメータと近似誤差を各点について記憶しておく。次に、近傍での近似誤差の最小値探索を行って $(-u, -v)$ を決定し、式(6)~(10)を用いて各点での微分値を推定する。この方法は、畳み込みと最小値フィルタおよび高々1次の多項式評価からなっており、画像処理プロセッサ等による高速化が期待できる。

ガウス曲率と平均曲率は上述の方法で求めた微分値を式(3)、(4)に代入することによって計算する。同様に、単位法線ベクトルは式(2)から求まる。選択的局所曲面あてはめを行った場合と行わない場合のそれぞれについてガウス曲率と平均曲率の符号マップを図4に示す。ただし、 $|K| \leq 0.00001$ で $K=0$ 、 $|H| \leq 0.003$ で $H=0$ と見なしている(後述の $K_0=0.00001$ 、 $H_0=0.003$)。正曲率点を白、ゼロ曲率点を灰色、負曲

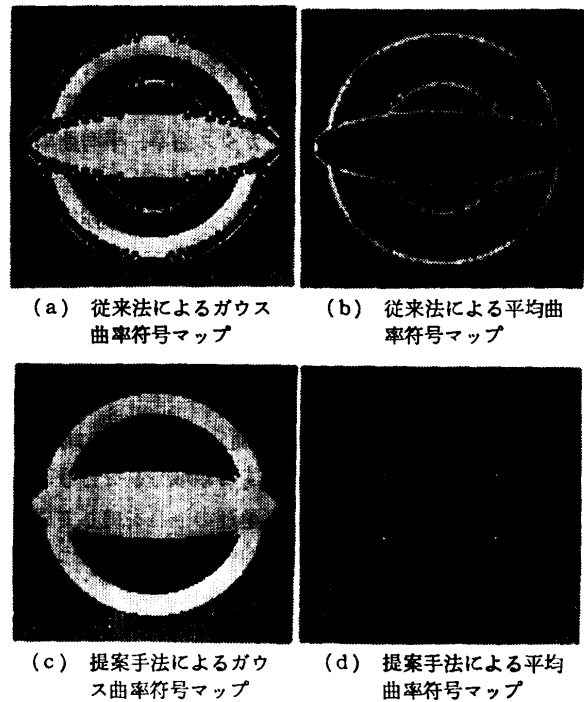


図 4 選択的局所曲面あてはめを用いた場合と用いない場合の曲率符号マップの比較

Fig. 4 Comparison of the selective local surface fit with the conventional non-adaptive window method for computing curvature sign maps.

率点を黒で表している。同図からも、選択的局所曲面あてはめによって距離および法線の不連続点の近傍でも曲率がほぼ正しく安定に計算されていることが分かる。

3. 距離画像の分割と記述

3.1 分割の定義および処理の概要

対象は平面および曲面から構成されており、画像内には複数の物体が存在し得るとし、特別な仮定はおかない。唯一の仮定として、物体表面は区分的に滑らか（2次微分可能）であるとする。分割の単位となる領域は幾何学的な意味での基本単位であり、かつ物体を記述・認識する上で重要なものでなければならない。そこで、次の2つの条件を満足する最大の4連結成分として領域を定義する。

- (1) 領域の内部では、ガウス曲率と平均曲率の符号の組合わせが一定である。
- (2) 領域内には、距離および法線ベクトルに関する顕著な不連続点が存在しない。

上記の目的を達成するために、本論文では、大きく分けて次の3つのステップから成るセグメンテーション法を提案する。

- (I) 局所的表面特徴の計算：2.2節で述べた手法を用いて、各点ごとに1次、2次偏微分を計算し、法線ベクトル、ガウス曲率、平均曲率を求める。
- (II) 初期分割：3種類の初期分割マップを作成する。2.1.2項で述べた曲率符号マップ(KH符号マップ)およびジャンプエッジマップ、ルーフエッジマップである。3つの初期分割マップを作成する過程は互いに独立しており、並列的に実行される。
- (III) 最終分割：3種類の初期分割マップを統合し、先の2条件を満足する領域分割を行う。

図5はこのセグメンテーション処理の流れを表している。以下では、上記(II)および(III)のステップについて詳しく述べる。

3.2 領域に基づく初期分割

2章で述べたように、ガウス曲率(K)と平均曲率(H)の符号から、見えている限り観察方向に不変な8つの基本曲面タイプに画素を分類することができる。この画素分類によって領域分割を行う。

ところで、実際に画素分類を行うためには K と H を近似的に0と見なすためのしきい値が必要になる。例えば、平面は本来、 $K=0$ 、 $H=0$ であるが、実際には雑音や距離画像の量子化効果のために、平面上の点が平坦点として求まらない。ここでは、 K と H の0に関するしきい値を $+$ 、 $-$ 対称に選ぶことにし、 K_0 、

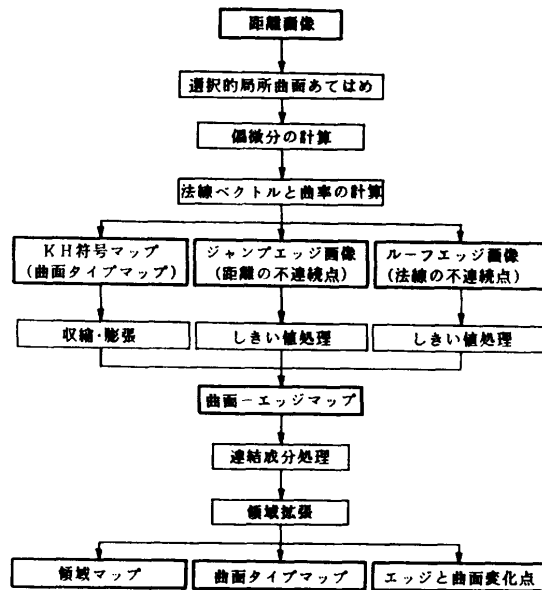


図5 距離画像セグメンテーションの流れ

Fig. 5 The overall control flow for the range image segmentation algorithm.

H_0 で表す。すなわち、 $-K_0 \leq K \leq K_0$ のとき $K=0$ と見なす。 K と H の定義から、(1) $K_0 \equiv H_0^2$ 、画素が禁止帯に分類されないための、(2) $K_0 \geq H_0^2$ の2つの条件を満足するように K_0 、 H_0 を選ぶ。

次に、雑音と見なされる微小領域を除去するために収縮・膨張処理を行う。最初、各領域について1画素分の4連結収縮を行い、次に、画像内にラベルなしの画素がなくなるまで、並列的に各領域の4連結膨張を行う(結果を図6(a)に示す)。この段階では、曲面タイプの異なる領域はほぼ正しく分離されているが、エッジを介して接している同タイプの領域は分離されない。

3.3 エッジに基づく初期分割

3.3.1 ジャンプエッジの抽出

各画素におけるジャンプエッジ強度 M_{jump} を8近傍での距離差の最大値と定義し、次式で計算する。

$$M_{jump}(x, y) = \text{Max} \{ |z(x, y) - z(x+k, y+l)| : -1 \leq k, l \leq 1 \} \quad (11)$$

ただし、 z は選択的局所曲面あてはめによって求めた距離値である。このエッジ画像のしきい値処理によってジャンプエッジマップを得る。

3.3.2 ルーフエッジの抽出

ルーフエッジは法線ベクトル解析によって求めることができる。各画素でのルーフエッジ強度 M_{roof} を、

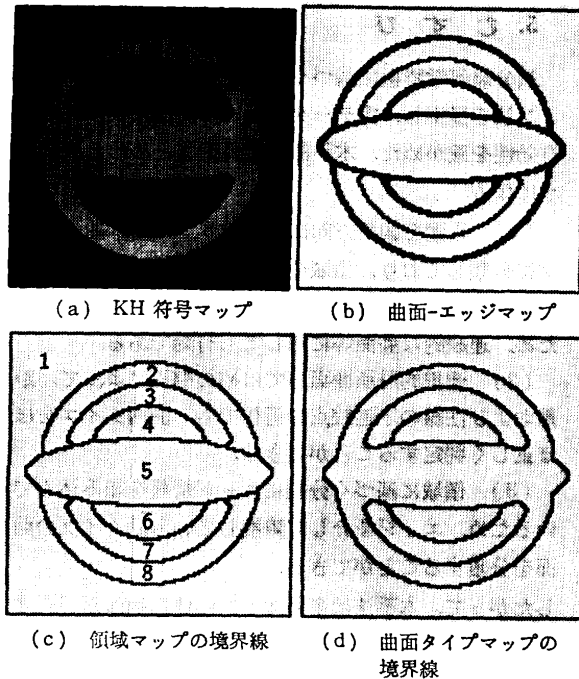


図6 領域分割の各段階での結果

Fig. 6 Results at each stage of region segmentation.

8近傍での法線ベクトルの角度差の最大値と定義し、次式で計算する。

$$\begin{aligned}
 M_{\text{max}}(x, y) &= \text{Max} \left\{ \text{Cos}^{-1} \left(\frac{\mathbf{n}(x, y) \cdot \mathbf{n}(x+k, y+l)}{|\mathbf{n}(x, y)| \cdot |\mathbf{n}(x+k, y+l)|} \right) : \right. \\
 &\quad \left. -1 \leq k, l \leq 1 \right\} \\
 &= \text{Max} \{ \text{Cos}^{-1}(\mathbf{n}(x, y) \cdot \mathbf{n}(x+k, y+l)) : \\
 &\quad -1 \leq k, l \leq 1 \} \quad (12)
 \end{aligned}$$

単位法線ベクトル \mathbf{n} は、1次偏微分値を用いて式(2)から求める。ジャンプエッジ同様、しきい値処理を行い、ルーフエッジマップを得る。

3.4 最終分割

3種類の初期分割マップを統合することによって、最終的な分割を得る。この統合過程は、(1)2つのエッジマップのKH符号マップへの重ね合わせ、(2)曲面タイプごとの連結成分処理、(3)領域の拡張、の3つのステップから成る。

3.4.1 エッジマップのKH符号マップへの重ね合わせ

先の初期分割によって得られる曲率符号マップにおいて、各点は曲面タイプに対応した1~8のラベルを持っている。これにエッジマップを重ねることによって曲面-エッジマップを作成する。ここで、ジャンプ

エッジ点は値-2を持ち、ルーフエッジ点は値-1を持つ。図6(b)に曲面-エッジマップを示す。同図では、KH符号マップの境界表現(黒)にジャンプエッジ(濃い灰色)とルーフエッジ(淡い灰色)を重ねて表示している。なお、いずれのエッジマップもエッジ強度の平均+標準偏差でしきい値処理を行っている。

3.4.2 連結成分処理

領域マップを作成するために、曲面-エッジマップ内における非エッジ点に対して連結成分ラベル付けを行う。ここで、非エッジ点は領域番号をラベルに持つが、エッジ点は負のラベルのままである。

3.4.3 領域拡張

最終的な分割を得るために、次の2つのステップで領域拡張を行う。最初、各領域について並列的に、KH符号マップを参照しながら境界を越さないよう、条件付き4連結膨張を行う。次に、エッジと完全に重なっているKH符号マップ内の微小領域を除去するために、先の領域を並列的にエッジ点(負のラベル)がなくなるまで無条件に膨張する。

また、上で求めた領域マップに対応した曲面タイプマップを得るために、曲面-エッジマップ内の非エッジ点に対して上と同様の領域拡張処理を行う。

図6(c)、(d)に、最終的に求めた領域マップと曲面タイプマップの境界を示す。楕円体とトーラスの外側の面が正しく分離されていることが分かる。

3.5 分割結果に基づくシーンの記述

ここで述べた距離画像の分割によって、(1)領域分割に加えて、(2)観察方向に不変な曲面タイプの判定、(3)領域間のエッジタイプ(ジャンプエッジ、ルーフエッジ、曲面変化点)の判定が可能である。図6(c)の分割結果と曲面タイプおよびエッジタイプから、このシーンは図7のような領域隣接グラフとして表現できる。

エッジタイプには、(i)ジャンプエッジ、(ii)ルーフエッジ、(iii)曲面変化点の優先順位があり、順位の高いエッジほど物体の輪郭に対応している可能性が高い。ジャンプエッジは必ず物体の輪郭を表していると仮定すると、領域1~8から成る図6(c)の分割結果は、物体1(領域1)、物体2(領域2と3)、物体3(領域4)、物体4(領域5)、物体5(領域6)、物体6(領域7と8)の6つの物体から成っていると解釈できる。ただし、物体1、3、5が1つの背景であり、物体2と6が1つのトーラスを成す等の結論を導くためには他の仮説・検証過程が必要である。

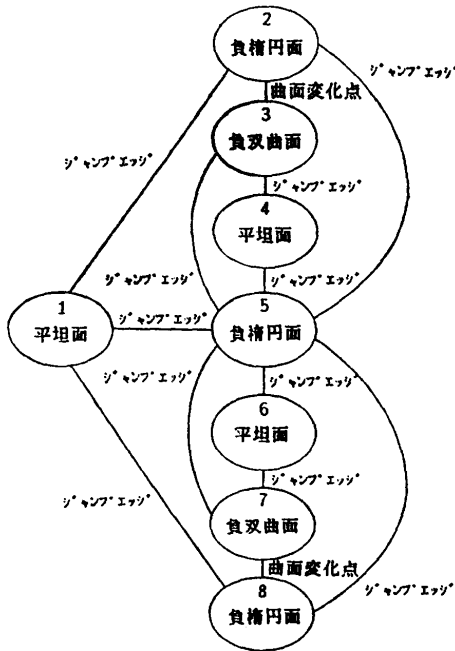


図7 図6(c)の分割結果に対する領域隣接グラフ
 Fig. 7 A region adjacency graph for the segmented image in Fig. 6(c).

図7では各領域について曲面タイプしか示していないが、表面積（領域分割の過程で1次偏微分から計算可能）等の属性を付加することにより、同様の記述形式を持つモデルとの照合による認識が可能となろう。

4. 実験結果

実データを用いた実験結果の一例を示す。本実験では、カナダ NRC で開発されたレーザレンジファインダ³⁾で得られた距離画像を用いた。キャリブレーションの後に等間隔に標本化された画像である。原データは 256×256 の大きさであるが、実験の都合上、再標本化した 128×128 の画像を用いた。微分オペレータは 5×5 のものを用いた。

図8は、多面体と曲面物体を含むシーン (DYPRO 1) についての結果である。なお、曲率の符号と曲面タイプの違いを色の違いで表している。最終結果である同図(1)では、曲面タイプマップに領域の境界を重ねて表示している。K₀, H₀ はそれぞれ、0.0004, 0.02 を用いた。曲面領域として球面（負楕円面）と円筒面（負放物面）がほぼ正しく識別されており、多面体についても、各面が分離されている。ただし、画像の枠の近くと3つ以上の面が複雑に交差する部分では微分値が正しく計算されないため、曲面タイプの誤判定が起こっている。

5. むすび

微分幾何学特徴に基づく距離画像のセグメンテーション法を提案し、実データを用いた実験によってその有効性を確かめた。本手法の特長をまとめると次のようになる。

(1) 画素を観察方向に不変な8つの基本曲面タイプに分類しており、領域全体について特別な関数形を仮定せずに、セグメンテーションが可能である。このため、連続的な曲面等に対しても有効である。

(2) 選択的局所曲面あてはめの導入によって、距離および法線の不連続点の近傍でも、曲面タイプをほぼ正しく判定することができる。

(3) 領域に基づく分割にエッジ情報を組み込んでいるため、エッジを介して隣接している同タイプの曲面を分離することができる。

したがって、本手法は多面体と自由曲面物体が混在するような複雑なシーンに対しても有効である。

解決していない問題点としては次の2点をあげることができる。

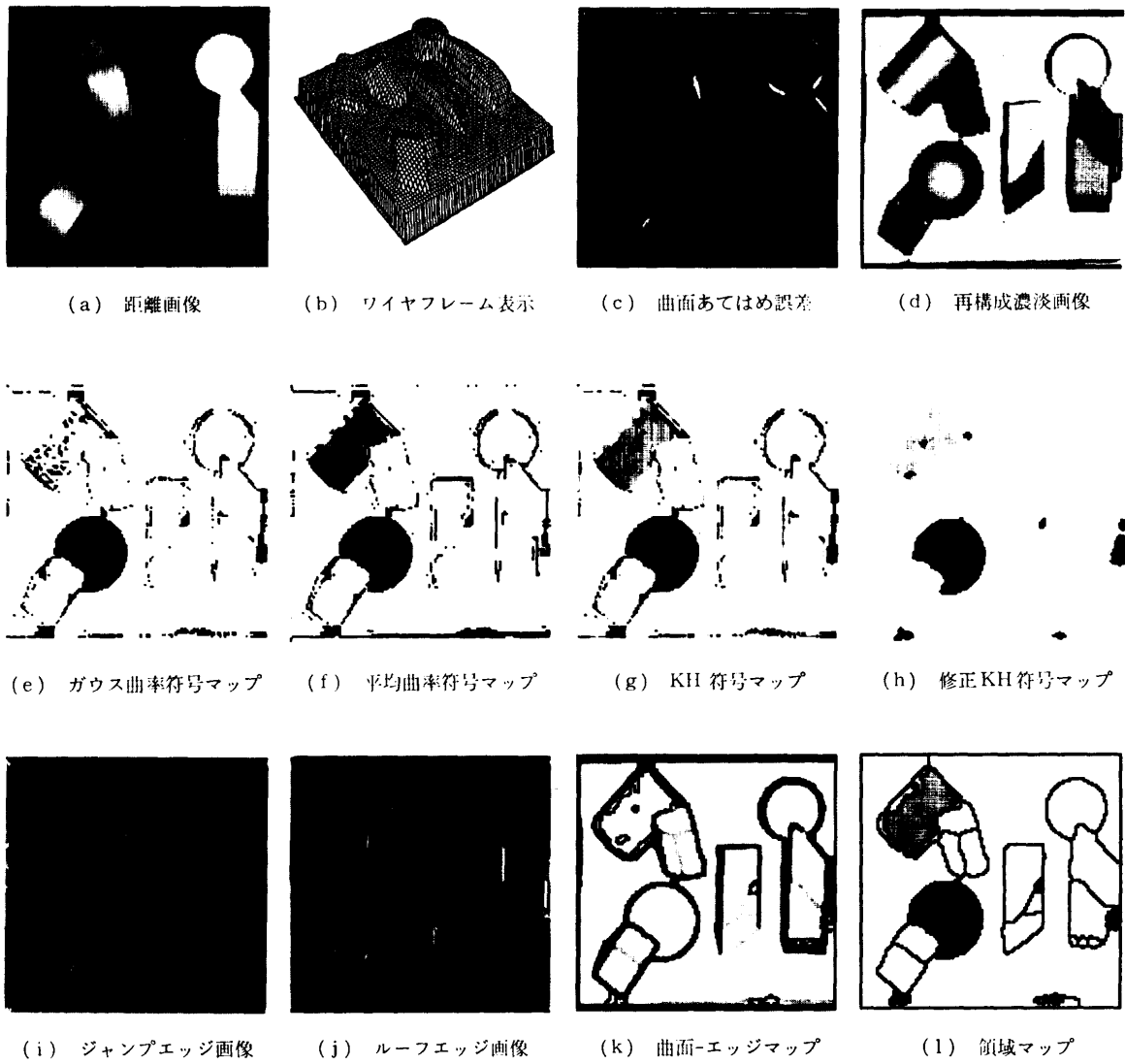
(a) 現在のところ、最終結果に影響を与えるパラメータ K₀, H₀ を手動で選んでいる。自動設定を検討する必要がある。

(b) 本論文で述べた選択的局所曲面あてはめでは、窓の大きさと形が固定であるため、3つ以上の面が複雑に交差する場合には、すべての窓がエッジに重なり、曲面タイプを正しく計算できないことがある。これを解決するためには、可変窓や尺度空間フィルタリングを検討する必要がある。

また、本手法を通常の逐次型汎用計算機でそのまま実行すると計算時間が膨大になるが、計算時間の大部分は選択的局所曲面あてはめによる曲率計算に費やされており、2.2.3項で述べた理由から、画像処理プロセッサあるいは並列計算機の利用による高速化が可能である。

今後は、上記問題点について検討を加えるとともに、(i) 3.5節で抽出したシーン記述とモデルとの照合による物体の認識、および(ii) 複数方向から観察した距離画像を用いた物体モデル（体積表現）の自動構築について研究を進める予定である。

謝辞 本研究は、第1著者が科学技術庁長期在外研究員としてマギル大学知能機械研究センター (McRCIM) 滞在中に行ったものである。御討論いただいた Baris I. Demir, David Gauthier, Andre Sokalski



ガウス曲率と平均曲率:

- 正曲率点
- ゼロ曲率点
- 負曲率点

KH 符号マップ:

- 負格円点
- 負放物点
- 負双曲点
- 禁止帯
- 平坦点
- 極小点
- 正格円点
- 正放物点
- 正双曲点

図 8 多面体と曲面物体を含む実際の距離画像 (DYPRO 1) についての実験結果
 Fig. 8 Experimental results for a real range image (DYPRO 1) consisting of both polyhedral and curved objects.

を始めとする McRCIM 関係各位ならびに距離画像データを御提供いただいたカナダ国立研究会議 (NRC) に感謝する。また、本研究は一部、カナダ国立科学技術研究会議 (NSERC) の援助 (Grant G1840) によった。

参 考 文 献

- 1) Jarvis, R. A.: A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 122-139 (1983).
- 2) 杉原厚吉: 画像を利用した立体計測の諸手法, 情報処理学会研究会資料, CV 33-4 (1984).
- 3) Rioux, M.: Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners, *Applied Optics*, Vol. 23, No. 21, pp. 3837-3844 (1984).
- 4) Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range Imaging System for 3-D Object Recognition, *Proc. 7 ICPR*, pp. 806-808 (1984).
- 5) Ohta, Y. and Kanade, T.: Stereo by Intra- and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. PAMI-7, No. 2, pp. 139-154 (1985).
- 6) Besl, P. J. and Jain, R. C.: Three-Dimensional Object Recognition, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 17, No. 1, pp. 75-145 (1985).
- 7) 山本裕之, 田宗道弘, 田村秀行: 距離画像の入力と処理, 信学技報, IE 86-128 (1987).
- 8) Oshima, M. and Shirai, Y.: Object Recognition Using Three-Dimensional Information, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. PAMI-5, No. 4, pp. 353-361 (1983).
- 9) Faugeras, O. D., Hebert, M. and Pauchon, E.: Segmentation of Range Data into Planar and Quadratic Patches *Proc. CVPR '83*, pp. 8-13 (1983).
- 10) Muller, Y. and Mohr, P.: Planes and Quadrics Detection Using Hough Transform, *Proc. 7 ICPR*, pp. 1101-1103 (1984).
- 11) 若山忠雄: 曲面物体の構造線の算出とその表示法, 信学技報, IE 76-94 (1977).
- 12) Besl, P. J. and Jain, R. C.: Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Images, *CVGIP*, Vol. 33, No. 1, pp. 33-80 (1986).
- 13) Vemuri, B. C., Mitiche, A. and Aggarwal, J. K.: Curvature-Based Representation of Objects from Range Data, *Image and Vision Computing*, Vol. 4, No. 2, pp. 107-114 (1986).
- 14) Yang, H. S. and Kak, A. C.: Determination of the Identity, Position and Orientation of the Topmost Object in a Pile, *CVGIP*, Vol. 36, Nos. 2/3, pp. 229-255 (1986).
- 15) 白沢寿夫, 佐藤宏介, 井口征士: 距離画像を用いた連続2次曲面の認識, 信学技報, PRU 87-15 (1987).
- 16) Bhanu, B., Lee, S., Ho, C. C. and Henderson, T.: Range Data Processing: Representation of Surfaces by Edges, *Proc. 8 ICPR*, pp. 236-238 (1986).
- 17) Tomita, F. and Kanade, T.: A 3D Vision System: Generating and Matching Shape Descriptions in Range Images, *Proc. 1st Conf. on Artificial Intelligence Applications*, pp. 186-191 (1984).
- 18) Herman, M.: Generating Detailed Scene Descriptions from Range Images, *Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 426-431 (1985).
- 19) 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何, 裳華房, 東京 (1977).
- 20) do Carmo, M. P.: *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1976).
- 21) 横矢直和, M. D. レビン: 微分幾何学特徴に基づく距離画像の分割と記述, 信学技報, PRU 87-96 (1988).
- 22) Brady, M., Ponce, J., Yuille, A. and Asada, H.: Describing Surfaces, *CVGIP*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-28 (1985).
- 23) Besl, B. J. and Jain, R. C.: Segmentation through Symbolic Surface Descriptions, *Proc. CVPR '86*, pp. 77-85 (1986).
- 24) Pong, T. C., Shapiro, L. G. and Haralick, R. M.: A Facet Model Region Growing Algorithm, *Proc. PRIP '81*, pp. 279-284 (1981).
- 25) Beaudet, P. R.: Rotationally Invariant Image Operators, *Proc. 4 ICPR*, pp. 579-583 (1978).

(昭和63年2月26日受付)
(平成元年6月13日採録)

横矢 直和 (正会員)



昭和26年8月12日生。昭和49年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和54年同大学院博士課程修了。同年、電子技術総合研究所入所。以来、コンピュータビジョンおよび画像処理ソフトウェアの研究に従事。現在、同所知能情報部画像研究室主任研究官。この間、昭和61~62年マッギル大学知能機械研究センター客員教授。工学博士。IEEE, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 人工知能学会, AVIRG 各会員。

**マーチン D. レビン**

1938年生. 1960年マッギル大学工学部電気工学科卒業. 1963年同大学院修士課程修了. 1965年ロンドン大学インペリアル・カレッジより Ph. D. 取得. 現在, マッギル大学工学部電気工学科教授, マッギル知能機械研究センター所長を兼務. カナダ高等研究機構フェロー, 国際パターン認識学会 (IAPR) 会長. この間, 1972~73年 JPL 研究員, 1979~80年ヘブライ大学客員教授. コンピュータビジョン, 医用画像処理, ロボティックスの研究に従事. 主な著書「Vision in Man and Machine」(McGraw-Hill), 「Computer Assisted Analyses of Cell Locomotion and Chemotaxis」(CRC Press).