

## 画像処理を用いた距離画像から3次元形状への変換

西尾 孝治 小堀 研一 久津輪 敏郎

大阪工業大学

近年、実形状を距離画像として計算機に入力する技術の進歩が著しい。距離画像は、X-Y平面上の2次元格子状の点列にZ方向の距離値を持たせたもので、Z-mapと呼ばれる。このZ-mapから3次元形状を計算機上で再構成できれば、計算機への形状入力にかかるコストを低く押さえることができる。そこで、本研究ではZ-mapから3角形ポリゴンで表現される3次元形状への変換手法を提案する。本手法では、Z-mapから3次元形状の特徴を抽出した2次元濃淡画像を作成し、これをZ-mapの点列に対応付けることで、従来から知られている2次元の画像処理の手法を適用する。また、3次元形状を構成する面を安定して得るためにハフ変換を用いた。

### Reconstruction of a Three Dimensional Object by using Image Processing.

Koji NISHIO, Ken-ichi KOBORI, Toshiro KUTSUWA

Osaka Institute of Technology

In recent years, the reverse engineering techniques have been developed progressively. With these techniques, real objects are captured as distance data called Z-map. If the system reconstructs a three dimensional shape automatically, the costs for reverse engineering is decreased. Then, we propose a reverse engineering method that reconstructs the three dimensional shape using Z-map data. This method consists of two basic techniques, image processing with two dimensional filtering, and Hough transformation. First, the system generates a two dimensional image that has distinctive feature of an original three dimensional shape. Second, surfaces of the shape are reconstructed by using the two dimensional image. With these techniques, this method offers inexpensiveness on calculating cost, and robustness of reconstruction.

## 1. まえがき

近年、実形状を計算機に入力する技術の発達に伴い、計算機上で3次元形状を再構成する要求が強まっている。そこで、実形状を測定して得られるデータとして、一般的な距離画像<sup>1)</sup>から3次元形状を再構成する手法を提案する。距離画像とはX-Y面上の2次元画像の各点にZ値を持たせたもので、Z-mapと呼ばれる。本手法では、Z-mapから形状の特徴を表す2次元濃淡画像を作成する事で、従来から知られている2次元画像に対する手法を適用して、3次元形状を再構成する。

## 2. Z-map-3次元形状変換

本手法は、次の3つの処理で構成される。まず、Z-mapをもとに、2次元の画像処理を用いて平面領域の抽出を行う。この面領域を面素と呼ぶ。次にハフ変換を用いて面素の平面方程式を求める。最後に各面素を成長させることで隣接する面素間の整合を行い、3次元形状を再構成する。

### 2.1. 法線ベクトル作成

入力データであるZ-mapの点列を用いて局所的な法線ベクトルを作成する。図1に示すように、Z-mapの点 $p(i,j)$ の法線ベクトル $n(i,j)$ は式(1)を用いて求める。ここで、 $p(i-1,j)$ から $p(i+1,j)$ へ向かうベクトルを $v_h(i,j)$ 、 $p(i,j-1)$ から $p(i,j+1)$ へ向かうベクトルを $v_v(i,j)$ とする。

$$n(i,j) = \frac{v_h(i,j) \times v_v(i,j)}{|v_h(i,j) \times v_v(i,j)|} \quad (1)$$

where

$$v_h(i,j) = p(i+1,j) - p(i-1,j)$$

$$v_v(i,j) = p(i,j+1) - p(i,j-1)$$

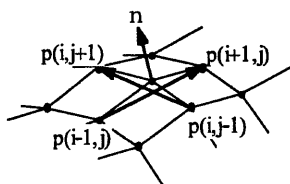


図1 法線ベクトル

### 2.2. 境界強調

Z-mapの各点の法線ベクトルのZ成分を濃度値として2次元の濃淡画像Gを作成する。Z-mapを濃淡画像として扱うことにより、従来用いられている画像処理の手法を適用することが可能となる。作成した濃淡画像GはZ軸の正方向無限遠点に光源を設定した場合に得られる濃淡画像に等しい。このことから、扱うモデルが多面体の場合には、再構成される3次元形状の面の境界部分で、濃度の変化が観測されることがわかる。ただし、図2(a)に示すような形状では、Z軸に対して等しい傾斜角を持ち、平面が接する場合に限り、同図(b)に示すように濃度の変化が観測されない。しかし、本手法では、濃淡画像Gのもとになる法線ベクトルを4近傍の点を用いて求めているため、同図(c)に示すように、このような部分においても濃度の変化を抽出できる。

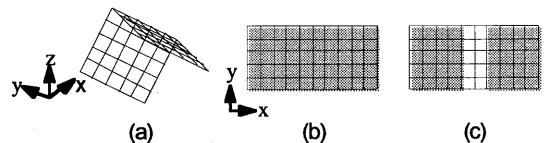


図2 濃淡画像

次に、濃淡画像Gに対してエッジ強調をおこなう。本手法では、エッジ強調オペレータとしてRobertsのオペレータ<sup>2)</sup>を用いた。次に、得られた画像に対してあらかじめ設定しておいた閾値を用いて2値化を行う。この結果、得られる2値画像の白画素が3次元における面領域を表すことになる。

### 2.3. 面素のラベル付け

作成した2値画像に対し面領域に対応させたラベル付けを行うことで、面領域のもととなる面素を作成する。

図3(a)に示すように濃淡画像で白画素であった、まだラベル付けが行われていない任意の画素 $g(i,j)$ を探索し、ラベル $m$ を付ける。この画素を

seed画素と呼ぶ。

次に、同図(b)に示すように画素 $g(i,j)$ の4近傍の画素のうち白画素であり、かつまだラベル付けがされていないものに対し、seed画素と同じラベル $m$ を付ける。以下、同様にラベル付けされた画素の4近傍の画素に対して再帰的にラベル付けを行い、同図(c)に示すように連続する白画素の領域に対し同一のラベル付けを行う。さらに、seed画素を探索し、同様にラベル $(m+1)$ のラベル付けを行う。これらの処理をラベル付けが行われていない白画素が無くなるまで繰り返す。

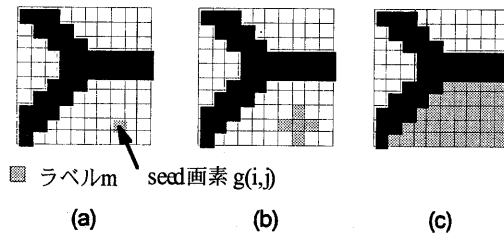


図3 画素のラベル付け

#### 2.4. ハフ変換を用いた画素の整形

ラベル付けを行うことにより抽出した画素は、形状再構成後の単一面を表現している。そこで、これらの画素の画素に対応するZ-mapの点列から平面方程式を求める。Z-mapの点列には誤差が含まれるため、本手法では画素の平面方程式を安定して求めるために、ハフ変換<sup>3)</sup>を用いた。

##### 2.4.1. ハフ変換

2次元の画像処理において、与えられた画像から線成分を抽出する手法としてハフ変換が知られている。ハフ変換は、雑音を含む画像から図形を抽出するのに有効な手法である。以下に2次元におけるハフ変換について簡単に述べる。図4に示すように2値画像中の黒画素 $g_i(X_i, Y_i)$ だけに対して、式(2)の変換を行う。例えば、図4(a)に示す $g_i$ に対して式(2)で与えられる $\theta$ - $\rho$ パラメータ平面への写像 $c_i$ を描くと同図(b)に示すように、それぞれ1本の曲線になる。このとき最も曲線の交差数が多い点 $(\theta_i, \rho_i)$ から直線の方程式を求めることが

できる。

$$\rho = X_i \cdot \cos \theta + Y_i \cdot \sin \theta \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \text{--- (2)}$$

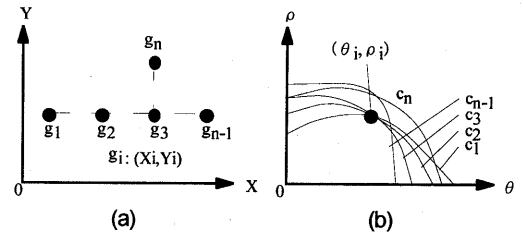


図4 X-Y平面と $\theta$ - $\rho$ パラメータ

本手法ではハフ変換のパラメータ空間を極座標系 $\theta$ - $\psi$ - $\rho$ パラメータ空間に拡張し、3次元の点群から平面方程式を求める。2次元の場合と同様に3次元空間中の点 $p(X_i, Y_i, Z_i)$ に対して式(3)の変換を行う。まず、3次元空間に存在するZ-mapの各点 $p(i, j)$ に対して式(3)の変換を行う。2次元画像に対するハフ変換ではパラメータ平面への写像は曲線であったが、3次元点群に対するハフ変換でパラメータ空間への写像は曲面になる。次に、パラメータ空間でこれらの曲面が最も多く交差する点 $(\theta_i, \psi_i, \rho_i)$ を求める。これらの値と式(3)から平面方程式が得られる。

$$\rho = (X_i \cdot \cos \theta + Y_i \cdot \sin \theta) \cdot \cos \psi + Z_i \cdot \sin \psi \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \text{--- (3)}$$

ハフ変換を用いて平面を求める場合、3次元空間における点をハフ変換してパラメータ空間における曲面に変換する必要がある。また、その結果として点群と同数の曲面を保持する必要がある。ハフ変換の結果の格納には一般に配列への累積度数が用いられる。パラメータ空間をパラメータに対応づけた配列に割り当て、曲面が交差する部分の度数をインクリメントし、全ての点について累積が終了した後で、最も度数の大きい部分のパラメータを平面方程式のパラメータとして採用する。

以上のように、ハフ変換では各点に対して、パラメータ空間への写像を行うため、計算コストを要することや、平面の検出精度を上げると、パラ

メータ空間を保持するメモリ量が膨大になるなどの問題点がある。そこで、本手法では平面の検出精度を低下させることなく、高速に平面方程式を求めめる選択的ハフ変換を導入する。

### 2.4.2. 選択的ハフ変換

面素に含まれる画素に対応するZ-mapの点 $p(i,j)$ は局所的な法線ベクトルを保持している。また、法線ベクトルをもとにした濃淡画像から面素を生成しているため、同じ面素に属する点の法線ベクトルはほぼ同じと考えられる。そこで、パラメータ空間への度数の累積を全パラメータ空間に対して行うのではなく、面素に属する任意の点が保持する法線ベクトルに対応する $c(\theta_{mid}, \psi_{mid})$ を中心として、選択的に度数の累積を行う。以下に、その手順を示す。

(1) 平面方程式を求めようとする面素に属する任意の点 $p(i,j)$ の法線ベクトル $n(i,j)$ から式(4)を用いて、パラメータ空間での度数の累積の中心となる $c(\theta_{mid}, \psi_{mid})$ を求める。

$$\begin{aligned} \theta_{mid} &= \text{asin} \left( -\frac{Y_1}{r_1} \right) \\ \psi_{mid} &= \text{asin} \left( -\frac{Z_1}{r_2} \right) \\ \text{where } r_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \\ r_2 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2} \quad \text{--- (4)} \end{aligned}$$

(2) 面素に属する各点に対してハフ変換を行いパラメータ空間への度数の累積を行う。ただし、全パラメータ空間に対して累積は行わず、式(5)で示されるパラメータ空間に対してのみ度数の累積を行う。ここで、 $\theta_{range}$ 、 $\psi_{range}$ 、 $\rho_{range}$ は、あらかじめ設定しておいた閾値を表す。

$$\begin{aligned} \theta_{mid} - \theta_{range} < \theta < \theta_{mid} + \theta_{range} \\ \psi_{mid} - \psi_{range} < \psi < \psi_{mid} + \psi_{range} \\ -\rho_{range} < \rho < \rho_{range} \end{aligned} \quad \text{--- (5)}$$

## 2.5. 面素の成長

これまでの処理で面素の平面方程式と大まかな面の輪郭を求めた。しかし、本手法では面素の境界を近似的な法線ベクトルから得られる濃淡画像から求めているため、図5に示すように面素は実際の面に比べて少し収縮した面になっている。このため、これまでに得られた面素を本来の面に近づけるために面素の成長を行う。

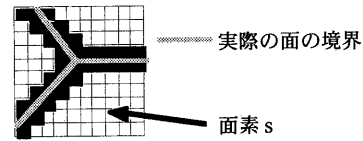


図5 成長前の面素

まず、ラベル $m$ をもつ面素 $s$ に4近傍で隣接する黒画素 $g(i,j)$ を見つける。次に、画素 $g(i,j)$ が以下の2つの条件を満たす場合に、この画素にラベル $m$ を付ける。

(1) 面素 $s$ が持つ平面方程式より、 $g(i,j)$ に対応するZ-mapの点 $p(i,j)$ から面素への距離 $d(i,j)$ を求める。この距離 $d(i,j)$ が設定した許容誤差 $D_{th}$ より小さい。

(2) 画素 $g(i,j)$ がまだラベル付けされていない。

この画素を新たな輪郭画素として同様のラベル付けを行うことで、面素の成長を行う。全ての $g(i,j)$ に対して上記の2つの条件のどちらかが満たされなくなるまで処理を続ける。

## 2.6. 画素の成長

これまでの処理で面素として認識されなかった画素を面素として扱い、面素の場合と同じ処理により画素を成長させる事でこれを新たな面素とする。この処理により、Z-mapを面素の集合として扱うことが可能になる。

## 2.7. 矩形メッシュ

最後に、生成した面素から三角形ポリゴン群を

作成し3次元形状を再構成する。通常、Z-mapを三角形ポリゴンへ変換する場合均一な格子状にポリゴンメッシュを生成する。しかし、この方法では生成される三角形ポリゴンの数が膨大になる。そこで、本手法では面素に矩形を当てはめ、これを対角状に2つに分割することによって2枚の三角形ポリゴンを生成した。図6(a)に示すような3つの面素が与えられた場合、同図(b)に示すように矩形を作成し、これを対角に2つの三角形ポリゴンに分割して、三角形ポリゴンを生成する。この方法では三角形ポリゴンの数は減少するが、細長いポリゴンが生成されるという問題を持つ。今回はインプリメントしていないが、面素の境界から閉ループを作成し、直線近似を行い、これらの多角形から直接三角形ポリゴンを生成する方法が考えられる。

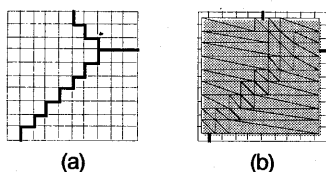


図6 矩形メッシュ

### 3. 実験と考察

本手法の有効性を考察するためにZ-mapから3次元形状を再構成する実験を行った。まず、図7(a)に示す形状からZ-mapを作成し、これを本手法への入力データとして用いる。次に、同図(b)に示すように、Z-mapの各点ごとに隣接する4近傍の点を用いて近似的に法線ベクトルを求め、そのZ成分を濃度情報とした2次元画像を作成する。これに対しエッジ強調処理を行ったものを同図(c)に示す。さらに、2値化処理を行った結果を同図(d)に示す。この画像と入力データであるZ-mapを用いて3次元形状を再構成した結果を同図(e)に示す。同様に、同図(f)に示す形状に対しても実験を行った。Z-mapから得られる濃淡画像を同図(g)に、エッジ強調を行ったものを同図(h)に、2値化

処理を行ったものを同図(i)に示し、再構成された3次元形状を同図(j)に示す。なお、同図(e)、および(j)には面素の境界を示すためにワイヤフレームを重ねて表示している。

図7(d)、および(i)からわかるように、平面領域が白画素として、エッジ部分とその周辺が黒画素として分類されている。しかし、このままでは、黒画素部分に周辺の平面領域に相当する部分が含まれている。この画像に対して面素の成長処理を行うことで、同図(e)、および(j)に示すように隙間の無い面素を作成することができる。

つぎに、入力データとして図7(a)に示す形状から、 $24 \times 24$  から  $128 \times 128$  までの解像度のZ-mapを作成し、濃淡画像生成、ハフ変換、面の成長に要する時間、および処理後に得られる面素数、矩形メッシュを構成する三角形ポリゴンの数を計測した。この結果を表1に示す。濃淡画像生成、ハフ変換、および面の成長のいずれの処理もZ-mapを構成する点の数に比例して処理時間が増加することがわかる。一方、解像度  $n \times n$  のZ-mapに対して格子状に三角形ポリゴンからなるメッシュを作成した場合、その面数は  $2n^2$  となる。これは、Z-mapの解像度  $n$  が2倍になると生成される面数が4倍になることを示している。これに対し、表1から本手法では矩形メッシュを作成することで、Z-mapの解像度が2倍になった場合でも、生成される面数を2倍程度の増加におさえられていることがわかる。

最後に、本手法では面素の平面方程式を安定して求めるために選択的ハフ変換を用いたが、度数の累積の中心となる  $\theta$ - $\psi$ - $\rho$  パラメータに対して、度数の累積の範囲の設定によって処理時間が異なることが考えられる。この事を考察するために、累積範囲を中心となる  $\theta$ - $\psi$  パラメータに対して閾値を  $\pm 10$  度から  $\pm 80$  度まで変化させた場合のハフ変換にかかる処理時間を計測した。この結果を表2に示す。

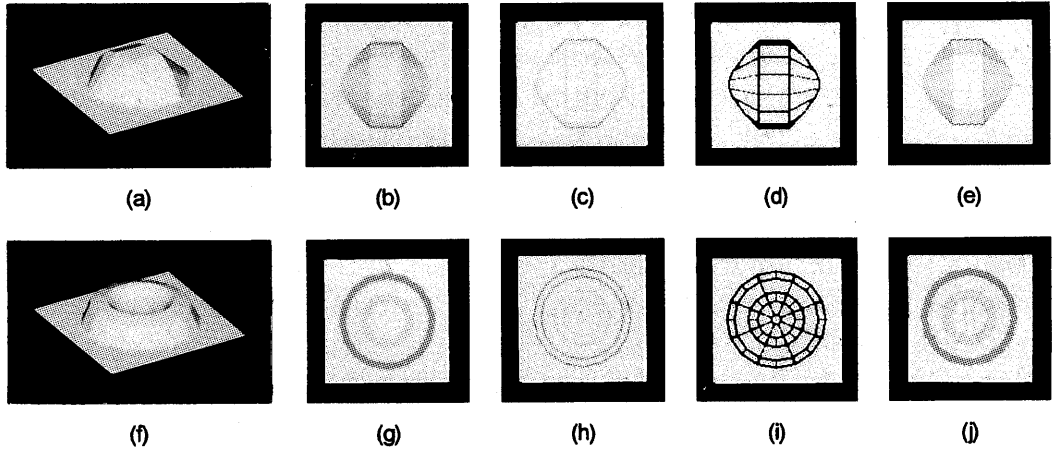


図7 実験形状

表1 処理時間と生成面数

解像度	処理時間 (sec.)				面素数	ポリゴン数
	濃淡画像作成	ハフ変換	面の成長	合計		
24	0.01	0.38	0.02	0.41	4	412
32	0.01	0.72	0.04	0.76	4	580
48	0.01	2.04	0.09	2.14	14	834
64	0.03	3.78	0.11	3.92	16	1186
72	0.04	4.87	0.16	5.43	16	1412
128	0.12	16.00	0.48	16.58	16	2608

表2 閾値とハフ変換時間

閾値(degree)	変換時間(sec.)
10	16.00
20	62.93
40	299.79
80	1235.01

選択的ハフ変換において度数の累積の幅を変化させた場合、パラメータ空間における度数の累積の幅を $n$ 倍にすると、度数の累積の対象となるパラメータ空間の体積が $n^2$ 倍になるので、変換処理にかかる時間も $n^2$ 倍になる。いくつかの形状に対する実験から $\pm 5$ 度程度で十分に形状を再構成することが可能であった。

なお、実験にはシリコングラフィクス・クレイ社のグラフィック・ワークステーション (CPU : R8000, 90MHz)を使用した。

#### 4. まとめ

Z-mapの3次元データを2次元画像に対応させる事で、従来から知られている画像処理アルゴリズムを適用して3次元形状を再構成する手法を提案した。また、平面を安定して得られる手法として選択的ハフ変換を導入した。これにより、一般的なハフ変換より高速に変換結果を得ることが可能となった。

今後の課題として、面素の境界として得られた稜線は、現状のままではエイリアシングを含んでいるので、これを除去するために稜線の直線近似を行い、稜線群で構成される閉ループから、直接三角形ポリゴンを構成することがあげられる。

#### 参考文献

- 1) 安居院 猛, 長橋 宏: 知的画像処理, pp.95-96, 昭晃堂 (1994) .
- 2) 安居院 猛, 中嶋 正之: 画像情報処理, pp.18-19, 昭晃堂 (1991) .
- 3) Hough, P.V.C. : Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 306965 (1962) .