コンピュータビジョン 42－2
(1986. 5. 22)

規則的パターンの投影像を利用した三次元物体の識別の試み

吉武敏幸* 杉原厚吉** 杉江 昇*
*名古屋大学工学部 **東京大学工学部

多数の規則的な正方形のパターンを平行光線を使って物体に投影し、その画像を用いて物体の三次元的な形、姿勢を認識しようという試みである。まず、投影するパターンのみかけ上のひずみを使って、パターンが投影されている部分の面の法線ベクトルを決定する。次に、パターンの中心点を使って画像面に対しボロノイ領域分割をほどこす。そして、隣接関係にあるパターンに対応する法線の間のなす角度が小さいものを、同一の面に属すると考えて面領域として抽出する。さらに、同一の面に属するベクトルの平均と分散を取り平面か、曲面かを区別する。最後に、交わる二つの面に対して、その平均の法線のなす角度を求めて物体の認識を行う。

A RECOGNITION METHOD OF 3-D OBJECT USING PROJECTED REGULARPATTERNS

Toshiyuki YOSHITAKE * Kokichi SUGIHARA ** Noboru SUGIE *
*Faculty of Engineering, Nagoya University **Faculty of Engineering, Tokyo University.

Some experimental results for recognizing 3-D structures using images of projected regular patterns are reported. Reguler patterns are projected by parallel rays of light onto object surfaces. First, from the distortion of each pattern on the surface of the object, the normal vector to the surface is determined. Next, the neighboring relation among normal vectors is decided using Voronoi diagram. Surface regions are extracted by grouping neighboring normal vectors having similar directions. Surface types are characterized by the means and variances of normal vectors belonging to the regions. Finally, the object is recognized by examining the angles between the mean vectors.

1　まえがき

人間の視覚機能を機械に持たせることは、大変有用な事だと考えられる。そのため、機械が視覚を用いて環境を認識するための技術は、重要な研究課題となっている。特に、外界をカメラで写して得られるような二次元画像からそこに写っている三次元物体の形状を認識することは、環境認識の基礎となるものであり、多くの手法が提案されている[1],[2]。ここでは、処理時間が短くてすむ単眼視に注目する。

単眼視においては、三次元被写体の二次元画像から、元の三次元物体の形状を認識するためには、何らかの手がかりが必要となる。一般には、被写体の表面テクスチャの分布やひずみを使って、面の傾きを求める方法が用いられる。しかし、その方法では物体の表面に、何らかのテクスチャが存在していることが必要である。これに対して、被写体に対して規則的パターンを投影し、その幾何学的ひずみを利用して面の傾きを求める手法が提案されている[3],[4]。この方法では物体の表面テクスチャは不要であり、応用範囲が広いと考えられる。規則的パターンの投影の方法は、一個の光源から平行光線を用いて投影し、それを一台のカメラで観測する方法をとっている。この論文では、この手法で求めた物体の面の傾きを表す法線ベクトルと、そのベクトルの始点として表される規則的パターン（正方形）の二次元画像上における対角線の交点という二つの情報を元にして、二次元画像から三次元物体の表面形状を復元し、同時に被写体を正多角柱の集合と考えた時に元の物体が何であるかを認識しようとするものである。以下、二次元画像からの法線ベクトルの抽出、法線ベクトルの情報を元にした、物体の識別の順に述べていく。

2　撮影

撮影は、図１に示すようにして行う。スライド・プロジェクターから、多数の同一形状の規則的パターンを投影する。スライド・プロジェクターは平行光線とはいえないが、１５０㎜の望遠レンズを用いて近似的な平行光線を作る。カメラも同様に２００㎜の望遠レンズを使う。投影軸、カメラ光軸が水平になるように

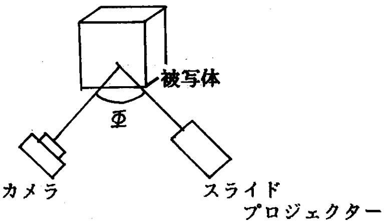


図１　撮影

スライド・プロジェクターとカメラを置く。投影軸とカメラ光軸のなす角度Φは一定の既知の値とする。これによって撮影された画像を計算機で処理して、被写体の表面形状を知る。

3　法線ベクトルの抽出

規則的なパターンを、平行光線を用いて３次元物体に投影すると、その物体の面の方向によってパターンはひずんで見える。投影軸に対してカメラ光軸のなす角度Φがわかっていれば、パターンのひずみから面の方向を正確に求めることができる。このことを利用して、二次元画像上にあるパターンのひずみから、そのパターンが投影されている元の三次元物体の面の向きを知ることができる。

3－1　考え方

パターンが投影される対象面をＳとする。これは$\mathbf{n}=(a, b, c)$を法線ベクトル（単位ベクトル）とする平面である。これに対して、投影軸、カメラ光軸を表す単位ベクトルをそれぞれ$\mathbf{m}$, $\mathbf{l}$とする。$\mathbf{m}$の方向へ投影されるパターンの中のベクトルを$\mathbf{p}$としたときこれが対象面Ｓに射影されたベクトルを$\mathbf{q}$とし、$\mathbf{q}$を$\mathbf{l}$に垂直な画像面Ｔに正射影したベクトルを$\mathbf{r}$とする（図２参照）。

このとき、次の関係が成立する。

$$\mathbf{m}\cdot\mathbf{p}=0, \qquad (1)$$

$$\mathbf{n}\cdot\mathbf{q}=0, \qquad (2)$$

$$\mathbf{l}\cdot\mathbf{r}=0, \qquad (3)$$

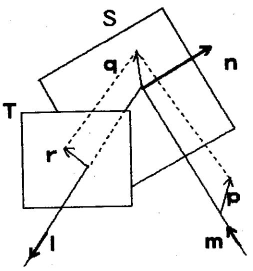


図２　平面とベクトル

$\mathbf{q}$は$\mathbf{p}$を正射影したものであるから、k_1を適当な定数として

$$\mathbf{q}=\mathbf{p}+k_1\,\mathbf{m} \qquad (4)$$

とおくことができる。（２）、（４）より

$$\mathbf{n}\cdot\mathbf{p}=k_1\,(\mathbf{n}\cdot\mathbf{m}) \qquad (5)$$

$$\mathbf{q}=\mathbf{p}-\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{p}}{\mathbf{n}\cdot\mathbf{m}}\,\mathbf{m} \qquad (6)$$

が得られる。$\mathbf{r}$は$\mathbf{q}$を正射影したものであるから、同様にして、

$$\mathbf{r}=\mathbf{q}-(\mathbf{l}\cdot\mathbf{q})\,\mathbf{l} \qquad (7)$$

となり、（６）、（７）より、

$$\mathbf{r}=\mathbf{p}-\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{p}}{\mathbf{n}\cdot\mathbf{m}}\,\mathbf{m}-\left[\mathbf{l}\cdot\mathbf{p}-\frac{(\mathbf{n}\cdot\mathbf{p})(\mathbf{l}\cdot\mathbf{m})}{(\mathbf{n}\cdot\mathbf{m})}\,\mathbf{l}\right] \qquad (8)$$

が得られる。これから、次に示す方法で対象面Ｓの法線ベクトルを求めることができる。

画像平面がxy平面と平行で、投影軸$\mathbf{m}$がxz平面と平行になるように座標系を設定する。又、カメラ光軸$\mathbf{l}$はz軸と平行になるようにする。各座標軸に平行な単位ベクトルを、それぞれ$\mathbf{e}_x$、$\mathbf{e}_y$、$\mathbf{e}_z$とする。（８）は、

$$\mathbf{r}=\left[\mathbf{p}\cdot\mathbf{e}_x-\frac{(\mathbf{n}\cdot\mathbf{p})(\mathbf{l}\cdot\mathbf{e}_x)}{(\mathbf{n}\cdot\mathbf{m})}\right]\mathbf{e}_x+(\mathbf{p}\cdot\mathbf{e}_y)\,\mathbf{e}_y \qquad (9)$$

と書き換えられる。各ベクトルを成分表示すると、次のとおりである。

$$\mathbf{n}=(a,\ b,\ c),\quad a^2+b^2+c^2=1, \qquad (10)$$

$$\mathbf{m}=(m_x,\ 0,\ m_z),\quad m_x{}^2+m_z{}^2=1, \qquad (11)$$

$$\mathbf{l}=(0,\ 0,\ 1), \qquad (12)$$

ｉ）$\mathbf{p}$がy軸と平行な場合

$\mathbf{p}$を$(0,\ p_y,\ 0)$、$\mathbf{r}$を$(X_1,\ Y_1,\ 0)$とする。

$$X_1=-\frac{b\,m_x}{a\,m_x+c\,m_z}\,p_y, \qquad (13)$$

$$Y_1=p_y, \qquad (14)$$

ii）$\mathbf{p}$がy軸に垂直な場合

$\mathbf{p}$を$(p_x,\ 0,\ p_z)$、$\mathbf{r}$を$(X_2,\ Y_2,\ 0)$とする。

$$X_2=\frac{c}{m_z\,(a\,m_x+c\,m_z)}\,p_x, \qquad (15)$$

$$y_2=0, \qquad (16)$$

法線ベクトルの各成分は（13）、（15）、及び、$a^2+b^2+c^2=1$から求められる。

投影する前の正方形パターンとそれがひずんでできた画像上の平行四辺形を比較して、法線ベクトルを求

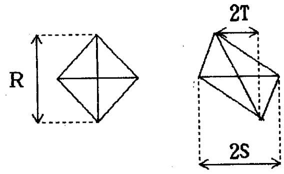


図３　法線ベクトルの計算

めることができる。すなわち、図3のようにR，S，Tを定めると、

$$a = \frac{R - S\cos\Phi}{\sqrt{T^2 + S^2 + R^2 - 2RS\cos\Phi}},$$

$$b = \frac{T}{\sqrt{T^2 + S^2 + R^2 - 2RS\cos\Phi}},$$

$$c = \frac{S\sin\Phi}{\sqrt{T^2 + S^2 + R^2 - 2RS\cos\Phi}},$$

によって、a，b，cを計算できる。

3－2　処理

規則的パターンを投影した三次元物体の画像を計算機に入力し、2値化する[5]。このデータを連結領域に分割する。これによって、各パターン領域を抽出する。そして、これらの領域ごとに反時計まわりの外周点列を輪郭線として求める。この点列から角度を用いて直線とみなせる部分を取り出し四角形となるものについてのみその四辺を直線近似する。また正方形のパターンは平行四辺形に射影されるので、対辺の比を使って平行四辺形でないものを除く。これによって得られた平行四辺形から3－1で述べた考え方に従って、法線ベクトルを抽出する。

出力データとしては法線ベクトルのx、y、zの各成分とそのベクトルの始点である二次元画像上の平行四辺形の対角線の交点のx、y座標が得られる。

4　物体の識別

2次元画像のデータから、法線ベクトルのx，y，z成分、及び　その法線ベクトルの始点の座標が得られた時、これらのデータから元の3次元物体の面の構成を認識する手法を述べる。

4－1　考え方

与えられたデータは次のように考えられる。2次元画像をxy平面と考えて、2次元画像上の座標は3次元物体をxy平面に射影した点を表す。法線ベクトルの始点は、3次元物体上の法線ベクトルの始点のxy平面への射影である。この時の法線ベクトルは、その始点の座標の近傍における3次元物体の面の方向を表す。

法線の似たもの同士を集めて面領域を抽出したい。そのために、最初に、ベクトルの始点同士で画像T上で近いものを線分で結んでいく。これによって、xy平面を三角形に分割することができる。ここで、線分によって結ばれた点を隣接関係にあるとする。これにより、一つの点，法線ベクトルに対して、他のすべてを参照し調べる手間を省き、隣接関係にある点（4～6個程度）を見るだけでよいようになる。この論文では”近さ”を自然な形で表す手法としてＶｏｒｏｎｏｉの領域分割を行い、Ｄｅｌａｕｎａｙの三角形分割[6]を用いている。

まず、隣接点間の法線ベクトルの成す角度を求める。これが　ある一定値（ここでは15度としている。）以内であれば、その2点は同一の面内にあると考える。角度がこの一定値より大きければ、2点は別の面に属するとして隣接関係を切断する。この時、元々隣接関係にあった2点が属する2平面は交わるとする。

このようにして、隣接関係を持つ点の集合、つまり、線分で結ばれて連結成分を構成する点の集合を得ることができる。これを面領域と呼び、この面領域が一つの面を表す。この面領域の数が画像内に存在する面の数である。次に、この面領域に属する法線の平均と分散を求める。求められた平均法線ベクトルはこの面の向きを与えるものである。又、法線ベクトルが平均法線ベクトルとなす角の分散が一定値（この実験では角度をラジアンで表したとき0．1を採用している）以上の時には、この面領域は曲面とされる。

複数の平面が存在する場合、それらが交わるならば、交わる角度を求める。これは平均法線ベクトル間の内積を取ることによって求められる。この時同時に、その面領域に属するすべての始点のx座標、y座標を平均した点から、平均法線ベクトルが出ているものとしてその交わりが凸か凹かを求める。

面領域が曲面だと判断されれば、その面領域に属するすべての隣接点について凹凸を求め、それによって、凸曲面であるか，凹曲面であるかを定める。

最後に、平面はすべて多角柱の一部と考えて、すべ

ての面が垂直に交わるならば四角柱、他の角度で交わるものがあれば、それに合わせた多角柱の側面だと判断する。

以下では、それぞれの処理ステップをもう少し詳しく述べる。

4－2　Ｖｏｒｏｎｏｉ線図とＤｅｌａｕｎａｙ三角形分割

Ｖｏｒｏｎｏｉ線図とは、平面の凸多角形分割の一つであり以下のようにして求められる。

平面上にｎ個の点　$P_i(x_i, y_i)$ $(i=1, \cdot\cdot\cdot, n)$ が与えられたとき、点P_iの”勢力圏”$V_n(P_i)$を

$$V_n(P_i)=\prod_{j=1}^{n}\{P \mid d(P, P_i) \leq d(P, P_j)\}$$

（$d(P, P_i)$は点Ｐと点P_iのＥｕｃｌｉｄ距離とする。）で定義し、これを点P_iに対するＶｏｒｏｎｏｉ多角形という。$V_n(P_i)$ $(i=1, \cdot\cdot\cdot, n)$ による平面の分割をＶｏｒｏｎｏｉ線図（—diagram）と呼ぶ。図４はランダムに発生させた３０点に対するＶｏｒｏｎｏｉ線図の例である。

Ｖｏｒｏｎｏｉ線図において、点P_iと点P_jのそれぞれに対応するＶｏｒｏｎｏｉ多角形が共有の辺をもつ時、点P_iと点P_jは隣接関係にあると言い、点P_iと点P_jとを線分で結ぶことによって、P_i $(i=1, \cdot\cdot\cdot, n)$ の凸包の三角形分割が得られる。これは、Ｖｏｒｏｎｏｉ線図を平面グラフと見たときの双対グラフであり、Ｄｅｌａｕｎａｙ三角形分割（—triangulation ）と呼ばれる。

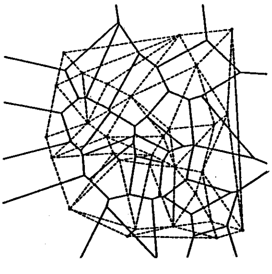


図４　Voronoi 線図（文献〔6〕より）

Ｖｏｒｏｎｏｉ線図は、不規則に与えられた点までの間の隣接関係を自然な形で定義していると言うことができる。以後は、与えられた点P_iを母点と呼ぶ。ここでは、デジタル画像ということに注目して名古屋大学工学部鳥脇研究室の間瀬氏が作成したプログラムを使用した[7]。

4－3　角度による分割

上のＤｅｌａｕｎａｙ三角形分割をつくる際に与えられた母点は、それぞれ法線ベクトルの始点であった。ここでは、隣接する２つの点から出る法線ベクトルのなす角が、１５度以上であれば隣接関係を切る。この結果始めは１つに繋がっていた点が、複数の連結成分に分割される。このときの連結成分が１つの面を表す。但し、隣接を切ると言っても連結関係にあった事は覚えておき、そのことから、２つの面が交わると判断する。つまり、２つの面があっても、それぞれの面に属する点がＤｅｌａｕｎａｙ三角形分割の時に１つも繋がっていないならば、２つの面は交わらないとして、角度は出さない。さて、複数の点の繋がりができたら、それをクラス分けする。このときクラス内の点が１つしかなければ、誤差として取り除く。クラス分けは、すべての点の中からある点に繋がる点を除いていき、除いたものを１つのクラスする。残ったもので同じ事を繰り返し、すべてが分けられるまで続けるようにする方法を取っている。

4－4　平面と曲面の区別

分割過程において、得られたそれぞれの面領域について、それに属する法線ベクトルの平均と分散を求める。この平均と分散を求める時には、法線のｘ成分，ｙ成分，ｚ成分を用いるが、それらは角度に対して線形ではないので、一度、ｘ軸，ｙ軸，ｚ軸と成す角度に変えて平均と分散を出し、再度ｘ，ｙ，ｚ成分に変え、正規化する。ここで求めた法線ベクトルの平均は、その面のカメラに対する角度を表している。

法線の分散は、その面に属する法線のばらつきを表しているので、これが大きければその面に属する法線

はばらついている、つまり曲面となっていると考える。そのしきい値は、角度をラジアンで表したとき0．1としている。

平面と曲面ではその後の処理が異なっている。平面に対しては平面同士が交わる角度を法線ベクトルの平均から求める。これは、先に2つの平面が交わると判定されたものだけに行う。又、カメラから見て、その交わり方が凹か、凸かを、判定する。

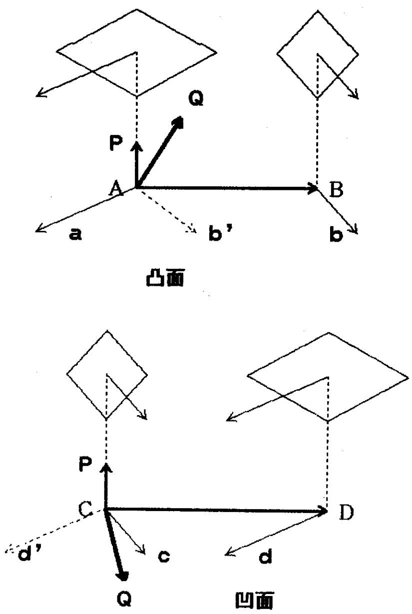
曲面に対してはその凹凸を求める。その曲面に属する法線ベクトルのうち、その始点が隣接関係にあるものすべてについて2本の法線ベクトルの凹凸を求め、面全体として凸で隣接するものが多いか、凹で隣接するものが多いかを数え、凸が多ければ凸曲面、そうでなければ凹曲面とする。

○凹凸の区別

凹凸の区別は、次のようにして行う。ここでは2本の法線ベクトルを使う。平面の交わりを求める時は、2つの面の法線ベクトルの平均が、それぞれの面に属する始点のx，y座標を平均した点から出ていると考えてそれを使う。曲面の時は、その面に属する隣接した始点を使う。実際の方法は図5に示したようにする。これの説明をすると、点A，Bから、法線ベクトル**a**，**b**がでているとする。ベクトルABを90度回転させ、ベクトルABに垂直なベクトル**P**を作る。次に、2つの法線ベクトルの外積を求めてそれをベクトル**Q**とする。図を見ればわかるように、この2つのベクトルの成す角度は、法線ベクトルが凹か凸かによって90度より大きいか小さいかが変わる。そこで、**P**と**Q**の内積をとり、正ならば、つまり成す角が90度以内ならば凸面だと考え、負ならば、つまり成す角が90度より大きければ凹面だと考える。

4－5　角柱の角度を求める

平面が2つ以上ある場合、その間の角度が求められる。ここでは、被写体は正多角柱であると仮定して、交わった角度から何角柱であるかを求める。法線ベクトルの成す角度θは、面の成す角度ϕに対して、



a，b，c，d：法線ベクトル
A，B，C，D：法線ベクトルの始点
P　：**AB，CD**に垂直なベクトル
Q　：**a×b，c×d**

図5　凹凸の区別

$$\theta = 180 - \phi$$

で、求められる。そこで、角柱の角数Kは、

$$K = 360 \div \theta$$

で、Kを四捨五入することによって、求められる。

ここで、K＝4の場合、2つの面は垂直で四角柱ということになるが、多角柱の側面と底面も垂直に交わるので、区別するために、すべての面が垂直になる時だけが四角柱であり、他の角度で交わる面がある場合はそれが優先され垂直の面は無視される。例えば、面A，B，Cがすべて90度で交わる場合、全ての面で、K＝360÷90＝4となり四角柱と判定できる。面A，BとA，Cは90度、B，Cは60度で交わる場合、A，BとA，CではK＝4となるが、B，CはK＝360÷60＝6となる。この場合、K＝6が優先され六角柱と判定する。つまり、面Aが底面となる。このようにするため、90度以外の角度があったときはその角数を記憶しておく。すべての角度を調べた後、記憶に角数があればそれを使い、90度は無視する。

なければ、四角柱とする。

5　結果と考察

ここでは、実験の結果とそれに対する考察をした後、手法とプログラムの問題点を考察する。図６に実験における認識の各過程の出力画像を示す。

表１．柱体の認識実験結果

	全データ数	成功したデータ数	識別率（%）
四角柱	１４	１３	９２．９
六角柱	１２	１１	９１．７
円柱	７	４	５７．１

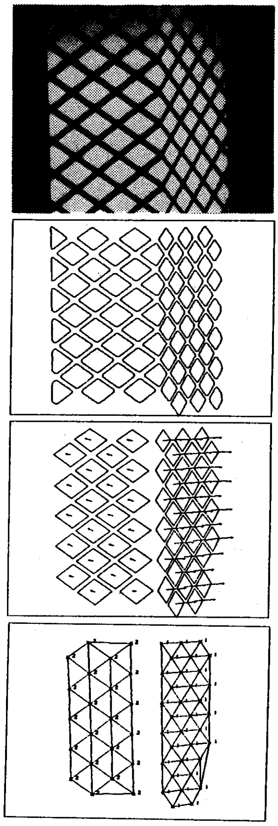
〇識別率

表１に、四角柱、六角柱、円柱を用いて、合計３３シーンで行った認識実験の結果を示す。四角柱と六角柱はかなりよい識別率を示した。識別できなかったデータは、後に示すような理由で２値化できなかったもので、ある程度うまく２値化できたものは１００％識別できる。又、一つの面にパターンが２～３個しかなくても面の方向は正確に抽出することができる。

それに対して円柱はあまりよく識別できない。これは円柱の大きさに対してパターンが大きすぎる場合は、Ｖｏｒｏｎｏｉ分割での隣接点間の法線ベクトルの成す角度が大きくなり側面を複数の平面に分割してしまうことが原因である。これにより円柱が十数角形とされてしまう。これは２値化がうまくいかない時にも生じるので、識別がいっそう困難になっている。

〇２値化の問題

実験において、２値化の際にパターンがつながってしまう現象が頻繁に生じた。これは２値化のしきい値が、うまく分かれる値より暗いレベルの値になっているためである。２値化のもう一つの問題点として、被写体の面とスライドとの角度が大きすぎて面全体の明度が低く、面が一つ完全に除かれてしまうことがある。



(a)　入力画像

(b)　輪郭線

(c)　法線ベクトル

CLASS 1 - 2 = 119.0286 DEGREE

CLASS 1 - 2 = 6 KAKUCHU

(d)　Voronoi 分割によるクラス分け

図６　六角柱の出力結果

〇被写体に対するパターンの大きさについて

先にも触れたように、被写体に対してパターンが大きすぎる場合、識別が困難になる。このことは特に円柱に対して顕著である。法線ベクトルは一つのパターンのひずみを利用して求められるので、基本的にはパターンは平面上にある必要がある。そこで、被写体が円柱のような曲面の場合、次のような条件が必要となるであろう。パターンは被写体に対して十分小さく、パターン自体は平面上にあるとみなすことができる。

6　あとがき

本論文においては、３次元物体に規則的パターンを投影して、それを一定の角度から観察し、パターンのひずみから法線ベクトルを抽出し、それを利用して元の３次元物体の形状を認識する手法を述べた。又、このアルゴリズムを用いて実験したところ、ここで使ったような単純な角柱に対しては、かなりの精度で元の物体を識別できることが分かった。

この研究を通して、単眼視による３次元物体の形状認識の可能性が大きくなったと考えられる。

今後の課題として、次のようなことが考えられる。

１）　問題点でも述べたように、２値化における大津の自動しきい値選択法が不安定でありうまく２値化できないものがある。原因を考えると、画像全体を同一のしきい値で２値化するところに限界があると考えられる。場所に合わせたしきい値を得るようなアルゴリズムが必要だと考えられる。

２）　曲面の認識において、現在は凹凸しか調べていない。しかし、隣接点間の法線の成す角や凹凸がわかるのだから、より高度に面の起伏等を認識することが可能になると考えられる。

３）　この識別アルゴリズムは、隣接点間の関係を主に考えている。そのため、３次元物体の全体像の把握が十分になされていない。つまり、一つの面内の離れた点や交わらない２つの面の間の関係は使われない。そこで、これらのことを使ったりして物体の全体像が把握できれば、より正確な認識、より複雑な面の認識が可能になると考えられる。

参考文献

(1)　谷内田正彦：”多重画像を利用したシーンの理解”，情報処理，24，1，pp.1429-1436（昭58-12）.

(2)　杉原厚吉：”サーベイ：画像を利用した立体計測の諸手法”，情処コンピュータビジョン研資，33-4 (1984).

(3)　岡崎　潔：”規則的パターンの投影像を利用した立体形状抽出法の研究”，名古屋大学工学部電気学科 昭和58年度　卒論.

(4)　浅田、辻：”縞状パターンを投光したシーンの動画像解析”，情処コンピュータビジョン研資，39-2 (1985).

(5)　大津展之：”自動閾値選定法”電総研研究報告，第 818号，ＰＰ.157-163 (1981).

(6)　伊理正夫編：”地理的情報の処理に関する基本アルゴリズム”，社団法人　日本オペレーションズ・リサーチ学会　昭和58年.

(7)　Green, D.J. and Sibson, R. "Computing dirichlet tessellations in the plane", The Computer Journal 21, 2, pp.168 (1977).