曲面体の法ベクトル分布による3次元物体の 特徴抽出の一手法[†]

長 田 正*・木 室 義 彦*

Determining 3-D Shape from the Distribution of Normal Vector on a Curved Surface

Tadashi NAGATA* and Yoshihiko KIMURO*

This paper describes the shape representation of 3-D objects which utilizes the normal vector obtained from 2-D images.

It is proposed to use the 2-D plane which is obtained by projecting the Gaussian sphere perspectively as the characteristic space for representing 3-D objects, and the shape of the surface of any 3-D object is corresponding to the figure on this plane. As for some basic curved surfaces, the characteristic figures on the plane are shown and these are extracted in the characteristic space. Each of them is easily extracted using techniques for image processing. The method for the detection of ellipses in the characteristic space is described in detail. And, it is experimentally clarified that the detection of two or more ellipses in the same characteristic space is possible. Since the extraction of the 2-D figure is carried out all over the plane, overall region analysis without an effect of the positional error becomes possible.

Moreover, the technique, by which the curvature of the curved surface is presumed by using the ratio of the area of the curved surface in the scene and the density of the normal vector in this characteristic space, is obtained. The method, by which both principal curvature and the tangential line vector are used, is proposed for representing the object which can not be satisfactorily represented only in the distribution of the normal vector. It is also shown that the characteristic

space proposed earlier is also applicable to the method, because the change of the vector is shown as the figure in this characteristic space.

Key Words: computer vision, intrinsic characteristic, Gaussian sphere, surface orientation

1. ま え が き

物体の3次元形状を測定、認識しようとする場合、対象物体と入力となる視覚情報との関係を正しく把握する必要がある。明らかに3次元から2次元への射影では、情報量は減少するわけであるから、その情報の復元がコンピュータビジョンでの研究の一分野となる。3次元情報の復元の手法としては、なんらかの適当な(物理的、経験的)拘束を与えるか、同一の物体に対して複数の異なる画像情報を得るかなどで、情報量を増加させることが考えられている。

視覚情報はその目的に応じて取捨選択され、認識に有効な情報(特徴)が抽出されるが、この特徴量の抽出と選択、評価は認識する対象、環境によって異なることが多い。曲面体の形状を測定、認識しようとする場合、曲面を表現する本質的特徴(intrinsic characteristic)の取得と、その曲面を認識、分類する特徴空間の設定に対して、種々の手法、アルゴリズムが提案されている。たとえば、物体の面の向き(法ベクトル)を得、法ベクトル空間を用いるのもその一つである^{1)~3)}。

法ベクトルの測定法としては、Horn らによって始められた濃淡画像を入力とする一連の研究、たとえば photo-metric stereo method (照度差ステレオ法)⁴⁾を挙げることができる。

法ベクトル空間は、微分幾何ではガウス球を用いるが、計算機処理の都合により、種々の離散化が図られ

[†] 第24回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭60・7)

* 九州大学工学部 福岡市東区箱崎 6-10-1

* Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka

(Received May 29, 1987)

(Revised September 7, 1987)

る。シーンの再現には、平面図形処理の点で有効な勾配空間が用いられることが多い⁴⁾。また、池内らによって提案されたガウス球面を直接離散化する EGI⁵⁾は、その離散化の手間においても、回転について対称な球面がマッチングに有効に作用するため、トップダウンの処理に用いられる。これらの特徴空間はお互い本質的に等価な法ベクトル空間であるが、計算機処理の簡便さ以上に、その離散化の状態から特徴的な物体表現法を得ることができる。勾配空間での線画との双対関係⁶⁾や、EGIでの面素を質量とみなす慣性モーメントの定義などがそれである。

本論文では、ガウス球を平面に平行投影して得られる特徴空間において、被写体表面の性質を求める手法について述べる。まず、この特徴空間と従来の法ベクトル空間との比較を行い、つぎに、この法ベクトル空間の特徴を利用した曲面表現法を提案する。最後に、この法ベクトル空間を接ベクトル空間へ拡張し、接ベクトル分布を用いる物体表現を示す。

2. GPM による特徴の表現

ガウス球（ガウス写像）は、ベクトル場の始点を固定して、単位球面上でベクトルを表現するものであり、ここでは、原画像に対応する各ベクトルを写像の対象とすることになる。

このような特徴空間への原画像からの写像は、物理的拘束や仮定（常識）により情報を取捨選択しており、情報の欠落により一般に逆写像は行えない。しかし、情報の量、種類を減ずることで、新たな特徴量をこれらの情報の組合せで表現することができる利点がある。

ここで提案する GPM (Gaussian sphere Projection Map) 法は、ガウス球を平面に射影し、その平面上に描かれる図形を問題とするものである (Fig. 1)。実

際の画像より得られる法ベクトルは、通常ガウス球の視線方向を中心とした可視半球部分にのみ現れる。この視線方向に垂直な平面に法ベクトルを射影することで、各画素に対応する面素の法ベクトルの数、方向の情報を落とさずに表現することができる。このことは、実際の画像からボトム・アップに物体を再構成するのに有効である。また、この GPM への写像では、法ベクトルの画像内での位置情報が失われており、法ベクトルの存在位置に起因する誤差や、その周囲への影響が除かれることになるので、画像全体の大域的処理を行うことが可能となる。さらに、一般のベクトル場について、その特徴空間 (GPM) が平面であるため、従来の画像処理法で用いられてきた手法をそのまま応用することができる。

3. GPM 上の法ベクトル分布

3.1 曲面を表わす法ベクトルの軌跡

まず、従来の法ベクトル空間で表現された曲面（平面、円柱面、円錐面、球面）が、GPM 上でどのように表現されるかを考え、その特長を示す。

曲面の法ベクトル $\mathbf{e}$ は、曲面が u, v のパラメータで表わされているとき、

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{P}_u \times \mathbf{P}_v}{|\mathbf{P}_u \times \mathbf{P}_v|} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $\mathbf{P}_u, \mathbf{P}_v$ は、 u, v 曲線に沿った曲面の接ベクトルである。この式より、曲面が $u-v$ 平面で定義できれば法ベクトルを求めることができる。ガウス球と GPM では、ベクトルの視線方向の成分を 0 することで、その射影が表わされる。

GPM において、平面、球面の法ベクトル分布は直観的に理解できるので、ここでは円柱面、円錐面についてその法ベクトル分布を調べる。

円錐面を、中心軸が y 軸に平行、母線と中心軸のなす角 τ なる正円錐と考え、これを x 軸について θ 、つぎに z 軸について ϕ だけ回転させるものとする。このとき、法ベクトルが GPM 上に描く軌跡の方程式は、

$$\left(\frac{f \cos \phi + g \sin \phi}{\cos \tau} \right)^2 + \left(\frac{f \sin \phi - g \cos \phi - \cos \theta \sin \tau}{\sin \theta \cos \tau} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

となり、長径 $= \cos \tau$ 、短径 $= \sin \theta \cos \tau$ 、傾き $= \phi$ 、中心と原点との距離 $= \cos \theta \sin \tau$ なる楕円を GPM 上に描く。ここで f, g, h は、カメラ座標系の x, y, z 軸に一致するガウス球の軸を表わす。また GPM では、ガウス球の可視半球部分のみが射影されることを考慮

Fig. 1 GPM (Gaussian sphere Projection Map)

すれば、視線ベクトルを $(00-1)$ とし、 $h \leq 0$ の条件より、この楕円は長径を境として、上半分、または下半分のみ現れることがわかる。また、円柱面の場合は $\tau = 0$ とすればよい。

この結果を従来の法ベクトル空間の場合と比較するとつぎのようになる。

	平面	円柱面	円錐面	球面
ガウス球 (球面)	点	平面曲線	平面曲線	点分布
勾配空間 (無限遠平面)	点	直線	双曲線	点分布
G P M (単位円面)	点	楕円	楕円	点分布

円柱、円錐面を表わす法ベクトルの軌跡に関しては、ガウス球を思い浮かべれば容易に理解できる。基本的に円柱、円錐面の決定は、ガウス球と交差する平面の面ベクトルと、平面とガウス球中心との距離の三つのパラメータを求めることであり、この点で三つの特徴空間は等価である。しかし、実際の計算機処理を考慮すると、データ構造として通常用いられる配列表現では、配列の添字が隣接情報を与えるという点で球面より平面のほうが取り扱いやすく、また、無限遠平面を表現対象とするにはデータを有限値として扱う計算機では大域的処理には十分ではない。GPM は以上の点で有用と考える。

GPM では、平面、円柱面、円錐面、球面は法ベク

(a) Needle diagram

(b) GPM

(c) Parameter space ($\tau=0.0$)

トルの軌跡として特徴的に表わすことができる。任意の曲面が、適当な分割によりこの基本曲面の集まりとして表現されることが予想できるとき、GPM 上での基本曲面の特徴より対象曲面体の領域化を行うことができる。特に、平面、円柱面、円錐面は GPM 上の法ベクトルの描く図形を非常に簡単な式で表現することができるため、この式より得られるパラメータを物体検出の際のテンプレートとして用いることができる。

3.2 法ベクトル分布抽出の具体的手法

実験においては、法ベクトル抽出には、 $128 \times 128 \times 8$ bit の2次元配列を入力画像として、照明の方向を変えた3枚の濃淡画像を用いる照度差ステレオ法を使用した。平面の検出には GPM 内の局所的なピーク(孤立点)を探索する。円柱面、円錐面抽出のための楕円検出法としては、大域的処理と複数個の楕円検出が行える Hough 変換を用いている。

Hough 変換では常に計算量の多さが問題となるが、GPM 上で配列を切り、楕円は2点以上を通るとする拘束によりこの計算量を減少させることができる。配列には対応する画素数をいれておき、全面素に対し計

```

0060 HOUGH TRANSFORM START (ELLIPSES)
0061 HOUGH TRNS. END
0062 << SORTING & CLUSTERING >> -----
0063 ----- SORTING LIST (20/ 400) -----
0064 THETA PSI TAU DENS.
0065 -4.5 0.0 0.0 0.6530 + A
0066 -9.0 0.0 0.0 0.6158
0067 -18.0 -135.0 0.0 0.6149 + B
0068 0.0 0.0 0.0 0.5865
0069 -27.0 54.0 45.0 0.5767
0070 -36.0 45.0 36.0 0.5689
0071 -9.0 0.0 9.0 0.5435
0072 -4.5 9.0 0.0 0.5357
0073 -18.0 9.0 9.0 0.5269
0074 -13.5 -144.0 0.0 0.5220
0075 -54.0 -126.0 27.0 0.5161
0076 -63.0 -117.0 36.0 0.5093
0077 -45.0 36.0 45.0 0.5073
0078 -9.0 9.0 0.0 0.5073
0079 -27.0 9.0 18.0 0.5005
0080 -45.0 -135.0 18.0 0.4956
0081 -40.5 -135.0 18.0 0.4907
0082 -13.5 9.0 9.0 0.4878
0083 -31.5 72.0 54.0 0.4761
0084 -22.5 63.0 45.0 0.4751
0085 : : : :
0086
0087 -- RESULT LIST ( / 400) -----
0088 THETA PSI TAU DENS.
0089 -7.0 1.9 3.3 0.6693 + A
0090 -18.3 -131.4 1.0 0.6216 + B
0091 -27.0 -54.0 0.1 0.4396
0092 -27.0 54.0 0.0 0.3032
0093 -13.5 -99.0 0.0 0.2386
0094
0095 -- ESTIMATE ----- SUM OF DENS. < 150%
0096 CYLINDER ?
0097 PRINT CYLINDER PARAMETER AT ELLIP5 (DEG)
0098 ITYPE, PHI, THETA, T, X
0099 2 1.922 -7.014 0.000 66.931
0100 CYLINDER ?
0101 PRINT CYLINDER PARAMETER AT ELLIP5 (DEG)
0102 ITYPE, PHI, THETA, T, X
0103 2 -131.444 -18.349 0.000 62.161

```

(d) Process of clustering

Fig. 2 Detection of ellipses

算を行ったのと同様の結果を得ることができる。

Hough 変換の精度は変化させるパラメータの幅に左右されるが、楕円のパラメータ θ, ϕ, τ は、互いに対称ではないため、パラメータの変化を単調に行うことはできず、パラメータ決定の際の θ, ϕ, τ 3次元空間でのクラスタリングなどの分散の調整も容易には行うことができない。この問題を解消するため、ここではパラメータの変化を物体の姿勢という意味で、立体角に合せて θ, ϕ を変え、パラメータ決定には θ, ϕ, τ 空間で高密度領域を抽出し、各領域間で法ベクトルデータを共有しているかどうか、つまり楕円が近接しているかどうかでクラスタリングを行っている。

Fig. 2 に楕円検出により姿勢の異なる二つの円柱として分類できた実験結果を示す。Fig. 2(c)は θ, ϕ, τ 3次元配列において $\tau=0$ でスライスした θ, ϕ 平面の密度分布の鳥かんと等密度線図であり、Fig. 2(d)に上で説明した、クラスタリングの具体的な過程を示している。各図に、計算結果と対応する二つの楕円を矢印で示している。

この Hough 変換では、楕円群が交差する場合や楕円を構成する点群の分散が大きい場合、計算により得られる曲面の面積の総和が元の曲面のそれよりも大きくなることもある。Fig. 2(d)ではそのしきい値として面積の総和を1.5以下とすることにより二つの円柱面を抽出している。

4. GPM 上での密度分布

4.1 GPM での見かけの面積と密度分布との関係

先にも述べたが、勾配空間、EGI, GPM の違いは離散化した特徴空間にある。ここでは、GPM 特有の見かけの面積と GPM 上の密度分布との関係について述べる。

まず、対象として球を考える。球はすべての方向について法ベクトルを一樣にもっているが、画像面に投影される際、法ベクトルと視線ベクトルとのなす角に応じて見かけの面積が減少する。このため離散化された画像の各画素に対応する法ベクトルをガウス写像すると、ガウス球面上では、視線に垂直に近いベクトルほど法ベクトルの終点密度は小さくなる。GPM では、これを再度平面に投影するわけであるが、これは球の映るガウス球への写像のちょうど逆写像となり、凸状物体である限りその法ベクトルとガウス球は一対一に対応することから、その GPM は、球の映る画像を球の半径=1に規格化したものに等しくなる。このとき、見かけの面積(画素数)は保存される。このため、球を写す画像を GPM に射影した場合、画像中

の球面上の任意の図形は、GPM 上で保存され、その内部の法ベクトルは一樣分布し、かつ GPM 上での対応する画素数密度は、画像中の球の大きさに比例する。半径 $=\infty$ の球面は平面となる。

以上は、曲面の曲率は曲面の面分の面積とガウス球面の面分の面積との比で与えられる、という定義を直接 GPM 上で実践したものといえる。

これを拡張すると、球に接する曲面、具体的には円柱面、円錐面の検出が GPM 上での楕円検出以外の方法でも行うことができる。

4.2 密度分布を用いた円柱面の検出

GPM 上の密度分布を曲面検出に用いる場合、その実現可能性と精度を確認する必要がある。ここでは円柱を対象として具体的手法と実験結果を示す。

高さ h 、底円の半径 r の円柱 C の曲率 k は $1/r$ で与えられる。また、円柱のすべてが隠れなく映っている場合、その見かけの面積を s とすると $\lambda s/h=r$ の関係がある。ここで λ は円柱の姿勢で決まる係数である。この円柱が GPM に射影されているとき、その面積(ここでは楕円の長さ)を s_G 、密度(ここでは線密度)を ρ とすると $s=\rho \cdot s_G$ となり、 h が得られれば k が計算できる。通常、物体には隠れがあることから s, h は得られず、 ρ から k は計算できない。しかし、全画面でなく幅 w のライン上で GPM を考えれば w を h の代わりとして計算できる。また、円柱の端から端まででなくとも部分的な円柱の見かけの面積を長方形 $w \cdot l$ で任意に取り出し、GPM 上の対応する ρ の分布が得られれば、円柱の曲率が推定できる(**Fig. 3**)。ここで w, l は検出しようとする円柱の最小径に下限が、画像の複雑さによりその上限が決められる。また長方形の方向は円柱の姿勢で制限される。球面の検出には法ベクトル密度と射影された長方形の w, l の比を調べることで行える。

実験では、GPM 上の密度(線密度)を得るために、単位円を正方格子状に区分し、その領域内で密度を計算した。単位円を半径に対し n 分割したとき、線密度の得られる円柱は画素数にして n 個の半径以上のものとなる。これは線密度を得る曲線の長さを格子数で与えるためである。計算量の増加をいとわなければ、

Fig. 3 Principle of the method

Fig. 4 Result

GPM 上の楕円の長さを求めればよい。

円柱の場合の実験結果を Fig. 4 に示す。同図は見かけの面積が一樣分布したときの密度からのずれで規格化されている。一般に、主曲率の計算には離散化された曲面の第1基本形式を解くことが行われる^{7),8)}。実験結果にこれを併せて示している (Fig. 4(b))。曲率分布の両端に計算誤差およびデータの欠落部分が見られるが、これは照度差ステレオ法を用いたことにより円柱周辺部のカメラ軸に垂直に近い法ベクトルが欠落し、ノイズ除去が十分行われなかったためである。

曲面の第2基本形式を用いる計算法では、明るさ(法ベクトル)の微分値の計算が必要であり、画像中のノイズその他の影響を考慮すると法ベクトルの平滑化、誤った法ベクトル(ノイズ)の除去といった前処理を通常必要とする。

これに対し、本手法では、設定する長方形の窓はGPM 上の対応する画素数を単に数えるためだけにあり、窓の大きさを適当に選べば、実験結果にも示されるように、簡単な計算で同程度の精度の計算結果を得ることができる。また、長方形の窓の内部の密度計算は、曲率の計算と同時に平均化を行っていることになり、測度の違いによる曲率の相対的な大きさは、長方形の窓の大きさを変えることで表わすことができ、階層的な画像処理を行える利点がある。

5. GPM 上での接ベクトル分布

5.1 接ベクトル空間の設定

法ベクトルの分布より曲面を特徴的に表わすことが可能であるが、画面内に複数個の物体が混在する場合、見かけの面積の違いは明確には法ベクトル空間には現れない。また、より複雑な物体が隠れをもって画面内にある場合、たとえば円柱面と楕円柱面や、一様にノイズの広がった平面と球面、円柱で構成される輪環面と球面では、その違いを陽には表わすことができない。

この理由は、法ベクトル分布による方法がGPM

上での図形処理といった大域的な処理だけを行っており、法ベクトルの局所的な連続性を表現していないことにある。したがって、この欠点を補うためには、法ベクトルの連続性を、各画素に対応する面素の法ベクトルの変化(曲率)として、その位置情報により表現しておかなければならない。

一般に、主曲率、主方向は曲面の第2基本形式を解くことで得ることができ

る。法ベクトル空間としては2次元のガウス球面が使用できたが、主曲率をその長さとする主方向ベクトル(接ベクトル)空間を考えると、その特徴空間は、五つのパラメータをもつことになり、直観的にも計算機処理の点でも得策とは考えられない。

よく知られているように、主方向は一般に直交する。このことを考慮して、二つの主方向の内、主曲率の絶対値が0に近いほうの主方向を与える接ベクトルを射影すべき特徴量として選ぶことにする。このように接ベクトルを選択した場合、この主方向は、これを母線とする円柱の中心軸方向と一致し、直交する主方向の曲率は、その円柱の曲率半径となり、曲面を円柱面で近似することになる。換言すれば、曲面を円柱パラメータ空間に射影することになり、そのGPM でのベクトル分布は画像内の円柱分布を表わすものとして捉えられ、局所的位置情報を含んだGPM が得られることになる。いま接ベクトル空間は主曲率を半径とする連続なガウス球面が考えられており、この平行投影であるGPM 群は円柱状の3次元空間を構成する。

このとき、GPM 上の図形は、円柱の変化を表わしているため、一般化円筒法⁹⁾のうち横断面が円の場合の掃引規則にはほぼ等しくなる。たとえば輪環面は円柱の主軸の回転としてGPM の断面に楕円を描く。また円錐面は円柱の回転と曲率半径の連続的な変化からGPM 内に楕円面を構成する。球面は曲率一定で、かつ主方向が不定であるからGPM の横断面に点分布することになる。曲率0で一定の平面の場合、このGPM では平面に平行な曲率半径0の円柱群として楕円を描く。

以上のように接ベクトルの描く図形を新たな特徴量とすることが可能となる。

5.2 GPM の接ベクトル空間への拡張

ここでは、法ベクトル空間のGPM を曲率の大きさを垂直な軸として拡張している。これによりピーク点検出、楕円検出といったいままでの図形処理のアルゴリズムをそのまま用いることができる。

(a) Needle diagram

(b) Normal vector

(a) Needle diagram

(b) Normal vector

(c) Tangential vector

Fig. 5 CYLINDER

(c) Tangential vector

Fig. 7 RING (1/4)

(a) Needle diagram

(b) Normal vector

(c) Tangential vector

Fig. 6 CUBE

円柱、立方体、輪環面の場合の実験結果を Fig. 5 ~ 7 に示す。これらは曲率 $-\alpha \sim +\alpha$ の範囲で重ね合わせてプロットしている。円柱面は円柱パラメータ空間でのピーク点の検出として得られている。立方体は三つの平面を表わす楕円群で表現される。輪環面 (1/4) はその主軸が視線に垂直に回転しているため、楕円の 1/4 が II, IV 象限にそれぞれ得られている。I, III 象限の楕円群は輪環面の外縁部、内縁部に接する円柱であり、その曲率半径は異なっている。

この接ベクトルの GPM では、対象物体を連続す

る円柱の組合せとして表現しており、従来、別個に記述、検出されていた平面、球面を同じフィールドで表現できる。平面が楕円で表わされる点は、法ベクトル空間と較べて冗長に考えられるが、円柱を多面体近似し、各面分の表わす楕円の交点を考えると、これは円柱の接ベクトルの方向と一致する。対象物体の多面体近似は、画素の大きさ、測度を変えることに等しく、トップダウン処理のように、モデルと捜し出す画像中の対象物体との大きさが異なる場合や、入力画像の測度が不明な場合、平面群から曲面が予測でき、これは利点の一つに数えられると考えられる。

6. あとがき

3次元物体の本質的特徴がベクトルで得られるとき、これを、ガウス球の正射影像 (GPM) 上での2次元図形として評価することを提案した。この2次元図形は、物体の3次元的特徴を表わすベクトルの連続的な変化を表現しており、特徴ベクトルの変化を表現するベクトルといったような、副次的特徴量も同時に求めることができる。これらの特徴量は、すべて GPM 上に表現されており、従来の2次元図形処理手法がそのまま適用でき、また、GPM 上で獲得された手法は、容易に他へ転用することが可能である。

3次元物体の典型的な体積記述法である一般化円筒法は、表面記述法といえる GPM とは厳密には一致しないが、モデルの表現法としては有効であるため、輪環面のように掃引規則が GPM のそれと互いに一致するように、モデル、シーンを記述することにす

ば非常に有効な手法となろう。

問題点としては、任意の曲面に対し、基本曲面への適当な領域分割をどのように行うかがある。面と面との関係をうまく表現できなければ、複雑な物体、複数個の物体に対し、見落としがうまれるおそれがある。また、ここでは実画像よりボトムアップにモデルを生成するため、見えない部分の表現が行われていない。今後は、物体モデルと対象モデルの適切な表現を考え、トップダウン的処理を併用することが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) B. K. P. Horn: Obtaining Shape from Shading Information, The Psychology of Computer Vision, 115/155, McGraw Hill (1975)
- 2) 池内克史: 反射率地図に基づき、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する 2 手法, 信学論, **J65-D-7**, 842/849 (1982)
- 3) 大島正毅: 3 次元情報を用いる物体認識の研究, 電総研研究報告, 第 826 号 (1982)
- 4) R. J. Woodham: Analysing Image of Curved Surfaces, Artificial Intelligence, **17**, 116/140 (1981)
- 5) K. Ikeuchi: Recognition of 3-D Objects Using the Extended Gaussian Image, 7th IJCAI, 595/600 (1981)
- 6) B. K. P. Horn: Understanding Image Intensities, Artificial Intelligence, **8**, 201/231 (1977)
- 7) 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何, 裳華房 (1977)
- 8) 池内克史: 幾何モデルより導出された解釈木によるピンピッキングのための目, 情報会研資, コンピュータビジョン, **38-6**, 1/8 (1985)
- 9) G. J. Agin and T. O. Binford: Computer Description of Curved Objects, 3th IJCAI, 629/640 (1973)