陰影情報および B-Spline 曲面近似による立体形状の認識*

(第3報, 制御点の配置と認識効率)

沈 英 謀^{*1}, 津 村 幸 治^{*2}
吉 田 嘉 太 郎^{*3}, 斎 藤 義 夫^{*4}3D Recognition from Shading and B-Spline Surface Approximation
(3rd Report, Control Points Arrangements and Recognition Efficiency)Yin-mou SHEN, Kouji TSUMURA,
Yoshitaro YOSHIDA and Yoshio SAITO

In the former report, we applied B-Spline surfaces to approximate the local surface of the shading and used the steepest descent method to minimize the difference between the shading of B-Spline surfaces and the image shading. Through the application of the method for the noise shading, we could reduce the effect of the noise and recognize the shape more correctly than the conventional method. However, being an interface for CAD, it is necessary to improve the recognition efficiency. Therefore, in this report, we examine the control points arrangements and B-Spline degrees, and according to the result, we investigate a new process to set more control points around the extremum of the object. As a result, the proposed method can be available to recognize the shape from image shading.

Key Words: Computer Aided Design, Modelling, Image Processing, 3D Recognition, Shape-from-Shading, B-Spline Surface, Free-Form Surface

1. はじめに

陰影情報から物体の形状を認識する方法については, Pentland⁽¹⁾や伊東⁽²⁾が曲面を局所的に球面の一部として近似し, 曲面の傾きを求める方法を提案している. しかし, これらの局所的な手法では, 画像濃淡値の微分値を計算過程で用いるため, 画像に含まれるノイズが形状の推定結果に大きな影響を与えるという欠点を有している. そこで, 前報⁽³⁾⁽⁴⁾では, 自由曲面の表現によく利用されている双三次 B-Spline 曲面を用い^{(5)~(8)}, この B-Spline 曲面の陰影と入力画像との誤差を最小化することにより, 曲面の形状の認識を試みた. その結果, 従来の研究手法と比較して, 容易に三次元形状を B-Spline 曲面として補間できること, 凹凸面にも適用できること⁽³⁾, またステレオ視のように複数の陰影情報を利用することで認識精度を向上で

きること⁽⁴⁾, など, その有効性が確かめられた.

一方, 本手法を CAD システムのインターフェイスとして用いるためには, 認識精度を落さずに, 処理速度を改善することが望まれる. この点については, 制御点数および B-Spline 次数を適切に設定することが重要といえる⁽⁸⁾. 前報⁽³⁾⁽⁴⁾では, 初期状態において, 制御点は xy 平面で等間隔に配置したが, 複雑な曲面形状の物体を対象とする場合, 認識誤差が生じやすいと考えられる. この問題に対して, 極値など曲面の特徴を利用して領域を分割することにより, 曲面近似の精度をあげることが期待できる^{(9)~(11)}.

そこで, 本研究では, まず制御点の間隔および B-Spline 次数が認識精度および処理時間に及ぼす影響を解明するとともに, その結果に基づいて, 濃淡値の微分を用いて, 濃淡値が急変する部分を抽出し, その近傍に制御点を配置する方法を提案する.

2. 認識効率に及ぼす影響因子

図1に示す入力画像は, ソンブレロとして知られている $\sin(r)/r$ で表現される物体, および楕円体である. ノイズとしてはノイズの最大振幅が画像のダイナ

* 原稿受付 1997年12月1日.

^{*1} 正員, Department of Management Information System, Kung Shan Institute of Technology (台湾台南県永康市大湾路949号).^{*2} 正員, 東京大学大学院工学研究科 (☎113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).^{*3} 正員, 千葉大学工学部 (☎263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33).^{*4} 正員, 東京工業大学工学部 (☎152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1).

E-mail: shen@mis.ksit.edu.tw

(a) Sombbrero (b) Ellipsoid

Fig. 1 Input images

ミックレンジに対して $\pm 10\%$ をかけた一様分布のランダムノイズを用いた。本報では光源方向を任意の方向に指定することができるが、視点の方向が光源の方向と違うという制限が必要である。入力画像データは次のような条件で作成されている。

- (1) 光源の方向, x 軸との角度: 45° , z 軸との角度: 45°
- (2) 画像情報の大きさ: $129 \times 129 \text{ dot}^2$

以下に B-Spline 次数および制御点間隔が認識結果に及ぼす影響を調べた結果を述べる。

2・1 B-Spline 次数の影響 最急降下法により 1000 回反復計算し、得られた等高線の認識結果を図 2, 3 に示す。図 2, 3 より同じ制御点間隔において、全体として B-Spline 次数 2, 3 の場合 (特に間隔 8 の場合), 原画像データにもっとも近付いている。一方, B-Spline 次数 4 の場合, 歪みが大きくなっている。

制御点間隔 8 (制御点数 17×17) において, ソンブレロの中心を通る断面で次数 2, 3, 4 の認識結果を比較した例を図 4 に示す。図より, 次数 4 の認識形状の歪みが大きくなっている。

この点を明確にするために, ソンブレロの画像データ $(\sin(r)/r)$ を直接用いて同一の制御点 (p) 配置状態で, B-Spline 次数 2, 3, 4 の曲線特性を調べた。その比較結果を図 5 に示すように, 次数が増えるにつれて, 原画像データとの差が大きくなることがわかる。この原因としては次のことが考えられる。次数が増えるにつれて, 曲線上の点がより多くの制御点から影響を受けるため, 曲線がさらに平均化されて滑らかになる。よって曲線の大事な特徴 (ピーク, 谷) も, より滑らかになって損なわれてしまうと考えられる。特に制御点間隔が大きいほど, その傾向がさらに強いことは B-Spline 曲線の式からも容易に判断できるといえる。

2・2 制御点間隔の影響 一般的に, 制御点間隔を小さくすると, 曲面の近似精度はあがると考えられる。ところが, 図 2, 3 の (a), (b), (c) に示すよう

Fig. 2 Contour recognition (sombbrero)

Fig. 3 Contour recognition (ellipsoid)

に, 制御点間隔 4 の場合 (制御点数 33×33) には, x 軸と 45° 方向の近傍には大きい歪みが生じており, 制御点間隔が小さいほうが誤差が大きくなる結果が得られた。

この原因を次に述べる。この例では, 光源の方向が x 軸および z 軸に 45° の方向であるので, 原物体の曲面の法線方向がこの光源の方向と一致する部分におい

Fig. 4 Result comparison in different B-Spline degrees (interval=8)

Fig. 5 B-Spline curves characteristic comparison in different B-Spline degrees

て、入力画像の濃淡値がもっとも大きい。ここでは、入力画像を次式(1)で正規化した後、ランダムにノイズ10%を混入しているため、大きい濃淡値の画素は、原画像との差が大きくなり、歪みが生じやすい。

$$E^n(x, y) = 2 \times \frac{E^i(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} - 1.0 \quad (1)$$

$E^n(x, y)$: 入力画像 $E^i(x, y)$ を正規化した値

I_{max} : $E^i(x, y)$ の最大値

I_{min} : $E^i(x, y)$ の最小値

従って、制御点間隔が小さ過ぎる場合には、ノイズの影響を受けやすく近傍の制御点による補正効果が現れにくい。よって、制御点間隔(間隔=4)が小さいと大きい歪みが生じやすいと考えられる。特に次数が小さい場合(次数2)、間隔が小さ過ぎると、歪みがさらに大きくなる(図2(a), 3(a))。これは次数が減少するにつれて、曲線上の点がより少ない制御点から構成されるため、大きい歪みを平均化することができない。

Fig. 6 Relation between errors and control points intervals (sombrero)

Fig. 7 Relation between errors and control points intervals (ellipsoid)

次に、ソンプレロと楕円の結果を比較すると、図2, 3により、間隔が4と小さい時、複雑な形状のソンプレロの場合は、楕円の場合と比較して歪みの程度が小さくなっている。一方、間隔が大きい時、ソンプレロの場合は、認識形状がかなり歪んでいる。このことは複雑な形状の物体に対し、制御点数を多めに配置する必要があることを意味している。

2・3 認識効率に及ぼす影響 図6, 7は、制御点間隔およびB-Spline次数が二乗平均誤差⁽³⁾ E_z に及ぼす影響を調べた結果であり、次のことがわかる。

- (1) 制御点の間隔が小さいとき(間隔=4)、誤差が大きくなる。特に次数2の場合、この傾向がさらに強い。
- (2) 制御点の間隔が6~8の時、誤差が比較的に小さい。
- (3) 制御点の間隔が大きいとき(間隔=12以上)、誤差が急激に増大する。

Table 1 Relation between B-Spline degrees and recognition time (interval=8)

Degree	2	3	4
Time(min)	24	29	47
Errors Ez(sombrero)	3.41	4.17	23.3
Errors Ez(ellipsoid)	2.98	3.74	12.03

Table 2 Relation between control points intervals and recognition time (degree=3)

Interval	4	6	8	10	12
Time(min)	104	48	29	19	14

- (4) B-Spline 次数の影響は全体として次数が小さいほど誤差が少なく、高次数による近似精度の向上は少ないといえる。

計算時間については、UNIX ワークステーション AS4035 (110MHz 前後) で 1000 回反復計算をして得られた例を表 1、表 2 に示す。表 1 は B-Spline 次数と計算時間 (間隔=8) の関係で、次数が大きくなるにつれて計算時間が増加した。特に次数 4 の場合、計算時間がかなりかかるし、誤差も大きい。次数 2、3 の場合は、計算時間が少ないし、ある程度の間隔以上 (間隔=6) では、認識形状が原画像データに近付いており誤差が小さい。

表 2 は制御点間隔と計算時間 (次数=3) の関係である。計算時間は制御点間隔のほぼ自乗に反比例していることがわかる。上述の結果により、間隔 6、8 の場合は、認識形状がもっとも原画像データに近付いている。

本研究で対象とした曲面は、凹凸を含む滑らかなもので曲面が視点の方向 (z の方向) から観察できることを前提としている。以上の結果を総合すると次のことがいえる。

- (1) B-Spline の次数は、2、3 次で十分に近似ができ、高次にするとかえって精度がでにくいこと。
- (2) 制御点間隔は、6 ~ 10 程度が B-Spline の次数との関連で精度がよく、計算時間も考慮すると間隔 8 が適していること。
- (3) 上記の B-Spline 次数と制御点間隔はノイズに対するロバスト性と認識精度と密接に関係しており、対象陰影画像の状態に依存すること。

3. 制御点の配置方法

図 8 に示すように、B-Spline 曲線近似において、物

Fig. 8 Peak generated by inserting control point near the peak of the object

Fig. 9 Image histogram

体の重要な特徴である極値の部分では平均化されて滑らかになる。極値の部分の保存するためには、極値の近傍に制御点 (* 印) を挿入する必要がある。これによって原曲線に近付くことができる (8)。

そこで、認識効率を上げるために、形状の特徴を抽出し、制御点を効果的に配置する方法について次に検討する。極値のような特徴では、濃淡値が急変すると予測されるので、濃淡値の微分を用いて極値を抽出できる。ところが、背景と物体の境界線の濃淡値の差も大きい。極値を抽出するためには、背景から物体の領域を分離する必要がある。

3・1 境界線のしきい値の決め方 対象物が占める領域を把握することは、形状を認識する上で重要な情報となる。対象物の領域を示す境界線を正確に抽出するためには、対象物と背景の濃度や対象物の形状など画像がもつ性質に応じてしきい値を適切に設定する必要がある (9)。このしきい値を自動的に定めるための手法がこれまでも数多く提案されており、画像の性質を濃度ヒストグラムで表現し、ヒストグラムの

Fig. 10 Differential value distribution (sombbrero : noise 10%)

Fig. 11 Differential value histogram

形状に基づいてしきい値を選択している^{(12)~(14)}. この方法は少ない計算量でしきい値を決定できる利点を持つので, 本研究にも適用を試みた.

図 1(a) に示すソンプレロ物体を対象に, 入力画像を正規化して得られたヒストグラムを図 9 に示す. 図より, 画像濃淡値 $-0.8 \sim -0.5$ の部分に, 明確な極小値が存在していることから, しきい値 T を -0.65 と定める. 画像値がこのしきい値より大きい部分を物体領域, しきい値以下である部分を背景領域とし, 両者境を境界線として定義する.

3・2 極値の抽出過程 物体領域において, 極値を示す部分の抽出について次に述べる.

(1) 背景および境界線を除いて, 次式より正規化した画像 $E^n(x, y)$ の微分値 $f(x, y)$ の最大値 f_{max} を求める.

$$f(x, y) = \sqrt{f_x^2(x, y) + f_y^2(x, y)} \quad (2)$$

$$f_x(x, y) = \frac{E^n(x+1, y) - E^n(x-1, y)}{2} \quad (3)$$

$$f_y(x, y) = \frac{E^n(x, y+1) - E^n(x, y-1)}{2} \quad (4)$$

Fig. 12 Control points arrangements

得られた微分値の分布図を図 10 に示す. 図より f_{max} は画像の中央部分に存在していることがわかる. この座標を (x_c, y_c) と定める.

(2) 図 10 では f_{max} のほかに, 微分値の大きい画素も存在している. そこで, 図 11 に示す微分値 $f(x, y)$ のヒストグラムの結果を参考に, 微分値が約 0.26 以上の画素を極値 $f_f(x_f, y_f)$ として抽出する. これは形状の特徴を示す輪郭部分に対応していると考えられる.

3・3 制御点の配置過程 本研究では, 制御点のバランスを保つために, 初期の制御点の配置においては, 同一の行, 列の y, x 座標をそれぞれ同一の値とする⁽³⁾. また, 第 2 節の結果に基づき, 計算時間を少なくするために, 基本的に制御点の間隔を 8 とし, 以下に制御点の配置過程を述べる.

(1) 前述したように, 極値の近傍に制御点を挿入すると, 近似曲線を原曲線に近付けることができるが, 制御点間隔が小さ過ぎると, ノイズの影響で歪みが生じやすくなるといえる. 従って, もっとも重要な極値の最大値 f_{max} の座標 (x_c, y_c) を基準制御点とし, y_c, x_c にそれぞれ 1 行, 1 列に制御点を配置する. f_{max} 近傍の配置においては, 図 12 に示すように, 両側の 2 行 (y_{c-1}, y_{c+1}) および 2 列 (x_{c-1}, x_{c+1}) にそれぞれ y_c, x_c との間隔を 6 として制御点を配置する.

(2) 抽出されたすべての極値 $f_f(x_f, y_f)$ に対して, 制御点を配置することは難しいので, ここでは代表的な部分にのみ挿入する例を示す. 挿入場所が狭い部分に集中すると, ノイズによる影響が大きく, 制御点を

Fig. 13 Input data(noise:10%)

Table 3 Inserted control points

	(x_c, y_c)	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
Sombrero	(60,60)	40	82	40	80
Sphere	(52,46)	45	83	45	81

挿入する効果が少ないと考えられる。従って本研究では、 x_f の最小値 x_{min} 、最大値 x_{max} 、 y_f の最小値 y_{min} 、最大値 y_{max} をのみ利用して制御点を配置する。ただし、「2・2 制御点間隔の影響」で述べたように、制御点間隔が6以下と小さ過ぎる場合には、ノイズの影響を受けやすく近傍の制御点による補正効果が現れにくいので、ここでは x_{min} 、 x_{max} 、 y_{min} 、 y_{max} はそれぞれ以下の条件を設定した。それぞれの条件が成立しない場合、それぞれの行、列に最初に制御点を配置しないこととする。

$$x_c - x_{min} \geq 20 \quad (5)$$

$$x_{max} - x_c \geq 20 \quad (6)$$

$$y_c - y_{min} \geq 20 \quad (7)$$

$$y_{max} - y_c \geq 20 \quad (8)$$

次に、挿入位置を考慮して平均の間隔が約8となるように制御点を配置する。

3・4 認識結果 図1(a)のソムブレロおよび図13(a)に示すくぼんだ球を対象に、B-Spline 次数2を用いて極値近傍に制御点を配置して実験を行ない、得られた結果を次に述べる。

「3・3 制御点配置過程」に基づいて求めた極値の座標を表3に示す。表よりソムブレロおよび球の f_{max} がそれぞれ中心のピークおよび稜線に存在している。ここで、球の場合では x_{min} 、 y_{min} はそれぞれ $x_c - x_{min} = 7$ 、 $y_c - y_{min} = 1$ となり、式(5)、(7)が成立しないため、最初に x_{min} の列および y_{min} の行に制御点を配置しないこととする。

上述の手順にしたがって求めた制御点の初期分布状態、最終分布状態および認識された等高線の結果を図

Fig. 14 Contour recognition(sombrero)

Fig. 15 Contour recognition(sphere)

14, 15に示す。図14, 15より本手法は制御点間隔8と比較して、ソムブレロの中心および球の稜線部分に制御点を配置することにより、それらの極値の部分に制御点の数が比較的に多くなっていることがわかる。

認識形状の結果を明らかにするために、物体の中心を通った断面の比較図を図16, 17に示す。図16に示す

Fig. 16 Result comparison in cross section(sombbrero)

Fig. 17 Result comparison in cross section(sphere)

ソンプレロの場合には、制御点間隔 6, 8 の場合と比較して、極値近傍 (中心のピーク) において原画像データに近付いており、制御点の挿入効果が顕著に表されている。一方、図 17 のくぼんだ球においては、制御点間隔 8 よりわずかに効果がみられるが、ソンプレロほど明確といえない。

次に二乗平均誤差および計算時間の比較を表 4 に示す。ソンプレロにおいては、本手法は平均間隔 8, 6 の場合と比較して、誤差が約 30% 減少した。計算時間においては、本手法の計算時間は、平均間隔=8 の場合と比較して約 12% 増えたが、誤差の改善も明確に現れる。これに対して、くぼんだ球の場合には、ソンプレロほど誤差の低減には結びついていない。制御点の挿入効果が、くぼんだ球に対して少ない原因としては曲面が C^1 級であるため、ノイズの影響が局部的に受けやすく、制御点の配置が難しいことが挙げられる。

以上のことにより、本手法は極値のような曲面の特徴を生かした部分に、制御点を増やすことで、計算時間をあまり増加させずに、認識精度を向上できることを示した。ここでは稜線や極大値の部分に制御点を数点挿入する方法を提案したが、さらに複雑な形状に適用するためには稜線情報を精度よく抽出し、それに基

Table 4 Errors and time comparison

Conditons	Proposed	Interval 8	Interval 6
p number	18×18	22×22	17×17
Errors(sombbrero)	2.40	3.41	3.45
Errors(sphere)	3.59	3.82	3.64
Time(min)	27	24	38

づき領域を分解して処理を進める必要がある。有効な領域分解法と組み合わせれば本手法の認識効率は増大するものと考ええる。

4. 結 言

制御点の間隔および次数が認識結果に及ぼす影響を解明するとともに、その結果に基づいて B-Spline 近似法を用いて極値のような曲面の特徴を生かした制御点の挿入により曲面認識を試みた。その結果、次のような結論を得た。

- (1) B-Spline 次数は 2 次, 3 次でも有効な認識精度が得られること。
- (2) 制御点間隔は約 8 ドットのとき, もっとも認識効率がよくなること。
- (3) 極値近傍に制御点を追加挿入することにより, 容易に認識精度を向上できること。

文 献

- (1) Alex P. Pentland, Local Shading Analysis, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-6-2 (1984), 170-187.
- (2) 伊東敏夫, 局所濃淡と輪郭線を用いた明瞭解析型形状推定法, 電子情報通信学会論文誌, 76-8, D-II (1993), 1647-1653.
- (3) 沈英謀・藤村誠・津村幸治・斎藤義夫・吉田嘉太郎, 陰影情報および B-Spline 曲面近似による立体形状の認識, 日本機械学会論文集, 64-621, C(1998), 1860-1866.
- (4) 沈英謀・藤村誠・津村幸治・斎藤義夫・吉田嘉太郎, 陰影情報および B-Spline 曲面近似による立体形状の認識 (第 2 報) —ステレオ視による立体形状の認識—, 日本機械学会論文集, 64-624, C(1998), 3230-3237.
- (5) 古島終作・金井理・高橋秀智, 手書き図面の自動認識による 3 次元自由曲線, 精密工学会誌, 59-6 (1993), 969-974.

- (6) 本田知己・谷口直之・岩井善朗, はん用 C A D における B スプライン曲線の局所修正法に関する研究, 日本機械学会論文集, 61-591, C (1995), 4536-4541.
 - (7) 嘉数侑昇・古川正志, CAD/CAM/CG のための形状処理工学入門, (1995), 27-53, 森北出版株式会社
 - (8) 山口富士夫, コンピュータディスプレイによる形状処理工学II, (1982), 77-151, 日刊工業新聞社.
 - (9) 河村真・後藤敏行・鳥生隆・関口隆, 輪郭とエッジの一致尺度に基づく再帰的しきい値決定のための高速アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, 76-9, DII(1993), 1878-188.
 - (10) 鳥脇純一郎, 画像理解のためのデジタル画像処理, (1993), 98-99, 昭晃堂.
 - (11) 安居院猛・長橋宏, 知的画像処理, (1994), 34-35, 昭晃堂.
 - (12) 大津展之, 判別および最小二乗基準に基づく自動閾値選定法, 電子情報通信学会論文, 63-4, D(1980), 349-356.
 - (13) 鳥生隆・岩瀬洋道・後藤敏行, 最小値フィルタを利用した2値化のしきい値選定法, 電子情報通信学会論文誌, 72-11, DII(1989), 1800-1806.
 - (14) Kittler J. and Illingworth J., Minimum Error Thresholding, *Pattern Recognition*, 19-1 (1986), 41-47
-