曲面の形状感の表現（第1報）*

——中間調を用いた図の作成——

近 藤 邦 雄** 木 村 文 彦***

A Method for Rendering an Impression of
Curved Surfaces (1st Report)
—A Creation of Halftone Pictures—

Kunio KONDO and Fumihiko KIMURA

The purpose of this study is to devise a suitable method of the rendering for better man-machine communication in the manipulation of pictures by computers with this method, one can easily get an impression of 3-D shapes by pictures. In this paper, the followings are studied: (1) A classification of the pattern for directly rendering the shade of curved surfaces, (2) an investigation of techniques for easy creation of halftone pictures with computers, (3) a creation of softwares for displaying an

impression of curved surfaces with shaded patterns. The following results are obtained: (1) This method, which interactively creates pictures by an emphasis and/or an omission of characters of shapes, is a good method that is helpful in getting the impression of curved surfaces, (2) The classification of patterns to show the difference of shapes is established, (3) The software is available not only for representing the characters of shapes but also for producing some pictures for a poster and so on.

Key words: rendering, impression of curved surfaces, halftone, computer classification of a pattern, emphasis, omission, character of shapes, man-machine communication.

1. ま え が き

本研究の目標は計算機を用いた図形の取扱いにおいて、人と計算機との情報交換を良くするために、人が図形を容易に理解できるような表現法を考察することである。従来コンピュータグラフィックスの分野で表示の問題は多く行われてきたが、人にとって理解しやすい形状の特徴強調・省略に関する表現は不十分と考える。この問題を考察するために、①曲面の形状感を直接的に表現するための濃淡のパターン分類を行う。②線図データを与え濃淡変化を指示することにより、容易に濃淡付けが行える手法を考察する。③これらによって形状感表現を容易に実現できるソフトウェアを作成する。ここで形状感とは人が形状から受ける感じのことをいい、計量的に正確なものではない。つまり形状のおおざっぱな特徴的なもの、たとえば、ふくらみ、へこみ、でこぼこなどという言葉で示されるものをいう。この形状感は自覚的、主観的なものであるが、人と計算機との情報交換においては、形状感は形状理解に対して大切なものであるので、これを客観的に取り扱うことを考えていく必要がある。

本研究では計算機を使って対象の形状感を表すことを

考える。この形状感を表現する方法は従来から、線図と面画の手法が用いられている。線図では地形の等高線表示のように曲面を規則的な平面で切断し、そこに表れる曲線を表示する方法が用いられることが多い。これは技術的には正確であるが曲面の形状感は表現しにくく、人は図からその感じを知覚しなければいけない。また、面画の分野では陰影付けの方法がある。この方法は物理法則を用いてそれに対応するモデルを作り、図を表示するものである。この方法は、対象の位置、光源・視点の位置を入力すると、その後は設定した条件式に従って濃度が計算され図が作成できる。その図に対して変更を行うときは光源の位置・数を変えたり、設定した条件式を変えたりする。しかし、曲面の形状感を表現するためにはこの方法では不十分である。これは物理法則を用いると人が形状をよく理解できるような特徴の強調・省略を行うことができないからである。

これに対し、芸術の分野でも形状を示すために線画や面画の方法が使われている。ここでは濃淡をつける面画の手法を考える。この濃淡法は物の丸み、ふくらみなどの形状的性質を表現でき、これによってかいた図から形状の感じをよく理解することができる。これは絵画を描く人が物を表現するとき特徴の強調を行っているか、または経験的に曲面の濃淡パターン分類をしていてそのパターンに合うように濃淡付けを行っているからであると考える。

* 原稿受付 昭和58年5月21日、昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和57年10月19日）にて発表。

** 正 会 員 名古屋大学教養部（名古屋市中種区不老町）

*** 正 会 員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

Fig.1 Intersection of a cylinder and sphere

Fig.2 Illustration of Fig.1

本研究では、人の判断をとり入れることのできるインタラクティブな計算機的手法を用いて形状の特徴の強調・省略を行えるようにしようとした。まず、人が曲面の形状の違いを区別できるようなパターン分類を試み、それらの形状の特徴を直接表現する手法を考えた。ここで取り扱う曲面は人がよく知っている球・円すい・円柱などの2次曲面である。次に計算機を使って濃淡表示を行うことのできるソフトウェアを作成した。このソフトウェアは上記のパターンを表示したりする濃淡付けの機能を持ち、それを人が指示することにより濃淡図形を描くことができる。さらに、人が計算機に対して各種の指示をしながら図を作成できるので、対象の特徴強調・省略を行うことができる。

このソフトウェアを用い、多くの例を扱い、パターン表示とソフトウェアの評価を行った。以下、2節の濃淡図形による形状感の表現では形状感表現のためには写実的表現でなくパターン表現が有効であることを述べ、3節でパターンに濃淡を付けたりするソフトウェア、4節ではなめらかな濃淡変化を作る乱数ディザ法、5節で濃淡図形作画の実験例について述べる。

2. 濃淡図形による形状感表現

2.1 写真表現と形状感表現

形状感の理解しやすい図を作画するためには、単に写実的な表現ではいけない。人が形状を理解しやすいように手を加える必要がある。特によく知っている曲面に対してそれをパターン分類して形状感の違いを示すことが理解を助けることに役立つと考える。図1は円柱と球の相貫体の写真、図2はこれをもとに本ソフトウェアを用

Fig.3 Photograph and a illustration of a machine part

Fig.4 A hole of a cylinder

(a) A is a hole, (b) A is not a hole, (c) A is a cone
い濃淡表示した例である。これらを形状感の表現という点で比較すると次のようになる。

1) 球・円柱は一樣な変化をもつ曲面である。光源を一つと考えたとき、その濃淡変化は単調であり、光源の位置をかえても一定のパターンを持っている。写真ではいろいろな反射光のため濃淡は一樣でなく、形状を誤解する可能性がある。イラスト図では濃淡幅を大きくとり一樣な変化をつけてみた。これにより、人のイメージと一致し理解を助けることができる。

2) 相貫線に注目すると、写真では右はよく分かるが左は濃淡差がないためよく分からない。イラスト図では濃度を変えることによりはっきりと示すことができる。

図3は機械部品の写真とイラスト図である。影になっている部分は濃度がほぼ一定のため形状変化はよく理解できない。形状感を表現するためには濃淡変化をつける。図4は穴のあいた円柱を示そうとした例である。(a)は穴に見えるが、(b)は外側と濃淡変化が違うため形状が理解しにくい。(c)は円すい状に感じとれる。

このことから、濃淡付けを行うときに、それを変化さ

Fig. 5 Photograph and a contour line of shading (divide 256 level into 10 equal parts)

	Sphere	Elliptic paraboloid	Cylinder	Cone	Hyperboloid of one sheet
Pattern					
Output					

Fig. 6 Classification of patterns and examples

せると異なった形状に理解されてしまう可能性があり、さらに人がよく知っている曲面についてはその形状感の違いを示すパターン分類を行うことが必要となる。

2.2 濃淡表示のための2次曲面のパターン分類

ここでは曲面形状感の表現に利用できる2次曲面のパターン分類を行い、形状の違いを示す濃淡表現法を考える。ここで取り上げる球、円柱などは人がよく知っている曲面で共通に理解しているものと考えられる。そのためパターンをはめこむことによって形状理解を助けることができる。それに対し、自由曲面は形を人が知っているものではないので、特徴を与えられても形状を思い起こすことはできない。形状そのものを示す表現法を考える必要がある。ここで扱う2次曲面内部の濃淡はパターンをもとに内挿によって求めてもよいと考える。これら表現した図と描かれた内容はパターン分類によって一致し、あいまいさなく理解できるからである。パターン分類を行うことにより細かな陰影計算は行わず、あらかじめ考えた形状に対応するパターンをはりあわせ、図を作成する方法を実現できる。

ここでは、2次曲面のパターン分類を行うために次の方法を行った。

- (1) 実際の模型を見ながら形状伝達のための濃淡作画を行い、いくつかの共通点を見い出す。
- (2) 図5のような写真をいくつか撮り、等濃度線を作

画する。

(1)の方法では模型の濃淡変化を人がそのまま写しとることはむづかしく、形状を分かりやすくするために濃淡を修正するので、描かれたものは人が理解しやすいと考えられる。また、(2)では図5のように実際の濃淡変化を出すことにより、(1)の結果の評価を行うことができた。これらをもとにパターンの整理を行った。その結果を図6に示す。球は楕円の拡大、円柱は楕円弧の平行移動、円すいは直線の回転、楕円放物面・一様双曲面は左辺から右辺への中間写像によって面の領域が決定される。この領域内に濃淡付けを行うための濃度分布曲線は、図の例で球はBezier曲線、円すいは直線、楕円放物面、円柱、一様双曲面は円弧の一部を指定し濃度を決定した。

このようにパターンを数式化することにより、曲面の形状の違いを示す濃淡変化を作ることが可能となった。そして、このパターンに従って濃淡付けを行うことにより、曲面形状の理解を容易にした。

3. 濃淡図形作画のソフトウェアの機能

どのような濃淡図形を描くかを2章で述べた。これらの要求を満たす面画の道具が必要である。本ソフトウェアは計算機援用によって面画作成を行うために作られた。簡単なコマンドや濃淡付け領域のデータ・濃度データを入力することによって、人の濃淡付けの技術に左右

Fig.7 Constitution of this software

されず面画が作画できる。本ソフトウェアの構成を図7に示す。人はここに用意されたコマンドを、処理したい内容に応じて使用することができる。以下にこれらのコマンドの機能について説明する。

1) 濃淡付けの線・面の範囲設定

基本的操作として図8に示す平行移動、回転、拡大、縮小、中間写像、マスクがある。さらに線分は直線、自由曲線があり、これらの内部を濃度変化させることができる。これらの操作によって濃度を与えるとき、最初に与えた線分と線を移動する方向の両方に濃度をつけることができるので、たとえば、同じ回転を行っても異なった図を作成できる。

2) 図形の変換

作成した一つの図を一つの画面の任意の場所に配置するためのものである。平行移動、回転、鏡映変換、縮小が行える。これらを用いることにより、容易にいくつもの図形を作画することができる。

3) 濃淡の選定

濃淡の変化を作り出すために、ここでは図9に示すような濃度分布曲線の種類とそれらの合成を考えた。濃度を与えるためにはこの曲線のどのような変化の範囲を使うかというデータとどの濃度値のところへ設定するかという2種類のデータを入力することにより濃淡変化が決定

できる。No.1~No.6は簡単な数式で表されるものであるが、これらによって、2次曲面の形状を濃淡表現することが可能である。また、複雑な変化を示すときには、No.7のBezier曲線を使用する。これらの濃度分布曲線を2方向で合成させることにより、No.8のような濃淡変化を作り出すことができる。No.8の

例では、線分に放物線、平行移動の方向に円弧の濃度分布曲線を与え、その平均値を濃度として表示したものである。

4) 基本曲面の表示

人がよく知っている曲面について濃淡付けや範囲指定が楽になるように手順をまとめ標準値を定めた。これらの入力を行うことにより、2節で説明した人の理解を容易にするパターンに合うように濃淡付けができる。ここで用いられる曲面の種類は図6に示されている。たとえば、円柱の側面を表示するためには、濃淡付けの面の範囲設定のために、上辺の楕円の位置、長軸・短軸のデータ、楕円の範囲、楕円を平行移動する量を与え、濃淡付けのために濃度範囲（明と暗の値）と明部の位置（楕円を10等分したときの任意の値）を与える。濃度分布曲線は放物線を使用するようになっている。

5) 画像の処理

乱数ディザ法による擬似高階調表示や濃度の変更・平滑化を行う。特に、ディザ法を用いることにより表示装置の階調が5~10階調程度と低いものでも偽輪郭が見えないためなめらかな濃淡変化を作ることができる。

6) ファイル・作業領域の管理

コマンド入力手順データの呼出し、画像データのクリア、保存、呼出しを行う。また、二つの画像データの重

	Translation	Rotation	Scaling	Half mapping	Masking	Line
Input data	Quantity of translation dx, dy Number of point $P_n(x, y)$	Rotation angle Center point of rotation Number of point $P_n(x, y)$	Scale Number of point $P_n(x, y)$	Number of point $P_n(x, y)$ $P_n(x, y)$	Number of point $P_n(x, y)$	Number of point $P_n(x, y)$
Creation of an area						
Example						

Fig.8 Creation of areas for painting

Fig.9 Selection of a continuous tone

ね合わせを行うことができる。

これらの機能を使って、濃淡図形を作画する手順は次のようである。

- (1) 描きたい図形の輪郭・濃淡付けの範囲をタブレットにより入力し、ファイルに保存する。または、キーボードにより数値データを入力する。
- (2) 一つの面に対し濃淡の選定をし、濃度分布を計算する。これらを繰り返し行うことにより濃淡図形を作画する。
- (3) 面が2次曲面であれば、前述のパターンを表現するコマンドを入力する。
- (4) これらの画像データは作業領域内に生成されるので計算機内部のファイルに保存する必要がある。これを用いて、後に図の追加・修正を行うことができる。

4. 乱数ディザ法による濃淡表現

形状感を表現する濃淡図形を作画するためには、濃淡階調数が大きい装置が望ましい。小さな階調数の装置を使用する場合はソフトウェアで大きな階調数を実現する必要がある。入力階調数が装置の階調数よりずっと大きいとき、それを等分割して表示すると図10(a)のようになる。各階調の変化する部分において、偽輪郭ができてなめらかな濃淡変化が得られず、このままでは曲面の形状表現に用いることはできない。

これを解決するために乱数ディザ法を用いた。これは小さな階調数の装置を用いるとき、擬似的に高階調数表

Fig.10 Output of pictures

示する方法でなめらかな濃淡変化を作り出すことができる。ここでは入力濃度値 m と乱数を用いて求めたしきい値を比較し、その大小によって表示レベル値 n を決める。しきい値は

$$ID = \text{IFIX}(R \times D + (\text{IFIX}(M/D) \times D))$$

ここで、 R : 0~1 の乱数、 M : 表示階調数、 D : $M/(\text{装置階調数 } N-1)$ 。

そして、表示レベル値 n は、

$$m \leq ID \text{ ならば } n = \text{IFIX}(M/D)$$

$$m > ID \text{ ならば } n = \text{IFIX}(M/D) + 1$$

とし、表示レベル値 n を決定する。

図10(b)は(a)と同じ入力値に対して乱数ディザ法を用いた例で、10階調の表示装置を用いて256段階を表示しようとしたものである。本ソフトウェア内部では描きたい部分に対して各画素ごとにディザ処理を行うので図の輪郭がぼけることはない。本方法は表示レベルが5階調程度以上のとき、なめらかな濃淡変化が得られ有効である。

5. 濃淡図形の作画例

図11はイラストの例で、人は自由曲線の計算のためのいくつかのポイントを与え、輪郭を計算させ、さらになめらかな濃淡変化を作るために中間画像・濃度の指示を行った。そして背景はもう一つの画像として作成し、これに重ね合わせを行った。下部はディザ処理をせず、偽輪郭の有無の違いを示した。

図12は機械部品の作画例である。本例の濃淡付けを

Fig. 11 Illustration

(a) Picture of 400×400 points displayed on a 1024×1024 16-level display

(b) Picture of 400×400 points displayed on laser printer by means of 5×5 patterns

Fig. 12 Shaded picture of machine parts

行うためには、数種のコマンドとデータを入力する。たとえば、円柱面を描くためには放物線の濃度分布曲線を選び、その曲線の使用範囲とその最高濃度値、最低濃度値を入力する。さらに、この濃度をつける領域を設定するために、円柱面の上・底面の楕円の大きさ・位置を指定する。これによって濃淡付けができる。

これらは形状感の理解を助けるために、①各辺を黒・白の線で示し面の区別をつけた。②面内部にパターンを利用し円柱表現を行った。(a)では穴の部分で境界を示さなかったため、上面との区別がつきにくくなっている。また辺に丸みのあることを示すために線を用いず濃淡を変えることを行った。(b)では4つの穴が大きさも方向も同じことを示すために濃淡付けを同じにした。また影になる部分に対して、面のつながりを示すためにパターンをはめこんでみた。

これらの表示例と比較するために、光線追跡法を用いて、図12(b)のモデルの陰影図を表示してみた。形状理

解を助けるという点から評価すると陰影図にいくつかの理解しにくい点があった。これは、①いくつかある反射条件のうち、ほかの面の反射などが省略されている。②辺をはっきり示したりする強調・省略を行っていないなどが原因である。

反射のモデル化にも現実を示すためには限界があり、正確でないと考える。今後は光線追跡法と本方法をうまく使い分けることにより、理解を助ける表現が可能になると考えられる。

6. 結 論

本稿では、曲面の形状感を示すパターン分類の考察と人がいろいろな指示を行うことにより濃淡図形を作画することのできるソフトウェア、さらにそれらの適用例について述べた。この結果、次のようなことが分かった。

- (1) 機械的に陰影計算を行い面画を作成する方法に比べ、特徴の強調・省略を行い図を作成する方法は形状感の理解を助ける有効な手段である。
- (2) 2次曲面の形状の違いを示すためのパターン分類を行うことにより、曲面形状感の区別ができる表現法を確立した。これにより、表現する内容と図が一致し人の形状理解が正確なものとなる。
- (3) 本ソフトウェアを使うことにより、人がインタラクティブに指示を加えることができるので形状の特徴強調・省略が行える。また、機械部分のような立体表現だけでなくポスターなどのイラスト図にも有効である。

今後の問題として次のことがあげられる。

- (1) 基本的な面画ソフトウェアは作成できたが、複雑な形状にパターンをそのまま当てはめるだけでは人に対して不自然な感じを与える。これらのパターン相互関係をうまく表現する。
- (2) 複雑な形状を取り扱うために入力方式・処理方式の有効な手法・システムを確立する。
- (3) 本研究で使った面画の各手法を一般的なものとして整理する。

謝 辞

本研究の進行全搬に対して、東京電機大学穂坂衛教授、名古屋大学田嶋太郎教授に御指導を賜りました。

文 献

- 1) 穂坂 衛, 木村文彦, 田嶋太郎, 近藤邦雄: 曲面の形状感の表現, 情報処理学会CG研資料 (1982).
- 2) J.D. Foley: Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison Wesley, Reading, Mass., (1982).