

### 3次元形状表現のための高品位白黒画像の描画法

神原 章、近藤邦雄、佐藤 尚、島田静雄

埼玉大学工学部情報工学科

立体形状の特徴を強調して作図するために、太さに変化を持たせて描く線分表現法と、ドットによる曲面表現法を提案する。線分表現においては、線分の形状と太さを独立に制御するための条件として、太さ制御点、太さ、末端の形状を指定するようにした。曲面であることを表すには、ドット分布を制御することとし、その条件は、ドット幅の制御位置、ドットの幅、濃さの変化の割合を指定する。これらの手法を対話処理としてまとめ、画像をポストスクリプト対応プリンタに出力させるシステムに構築した。本システムの手法によって、立体形状の理解を容易に作図することが可能となった。

### Drawing methodology of high quality monochromatic picture for three-dimensional shapes

Akira KANBARA , Kunio KONDO , Hisashi SATO , Shizuo SHIMADA

Department of Information and Computer Sciences  
SAITAMA University

For emphasizing spatial shapes in technical illustrations, a shading method is proposed against lines and surfaces by the aid of an interactive computer graphics. Lines are redrawn with variable linewidth by giving several control points including terminals where the linewidth is specified. Surfaces are marked by dotted belts along edges. The belt is specified in its width and density distribution at some control points. The interactive system manages a high quality printer which is controlled by a graphics PostScript. Pictures drawn are evaluated from the view of fine visibility.

## 1 はじめに

コンピュータグラフィクス分野では、ラスタディスプレイの発達により、カラー画像の表示技術に関心が寄せられている。特に物理法則に従った計算を行ない、よりリアルな画像を生成することがさかんに研究されている。これに対し、日常よく見る画像には白黒の線図形が多く利用されている。ここで、白黒の線図形をカラー画像と比較してみると、写実性という点では劣るが、

- (1) 情報伝達という点で、カラー画像に劣らないくらい優れた面がある。
- (2) カラー画像を生成するより実行時間が少ない。
- (3) 生産コストがカラー画像よりかからない。

の利点があり、多方面で利用されている。

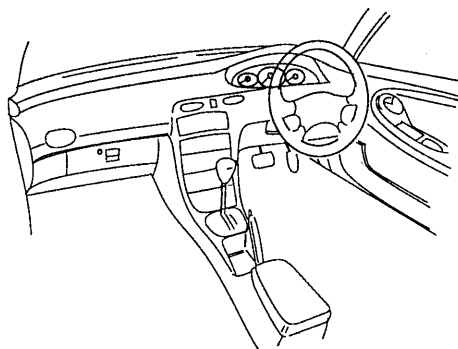
このことから、現在、計算機による白黒画像の表現は、多くのところで利用されている。しかし、形状表現の利用に対して、有効な手法を取り入れたシステムは、見られない。これは、よく利用されている作図システムにおいて、使用できる線分の種類が少ないことや、濃淡パターンが限られていることから理解できる。

従来の白黒画像の研究では、線分の形状や太さについてのものと、中間調の表現法についてのものに分類することができる。前者には、一定の太さの線分を接続する方法を提案した研究<sup>[1]</sup>がある。この研究では、その線分で何かを表現するというより、線分の接続を美しく見せることを目的としている。後者には、白黒で中間調を表す新しい方法を提案した研究<sup>[2]</sup>がある。この研究は、ディザ法による濃度曲線で、グラデーションをつくり、陰影を表現するものである。陰影の具合は、元画像の陰影の具合によって決められる。このように立体形状表現のための線分表現、ドット分布制御法は扱われていない。

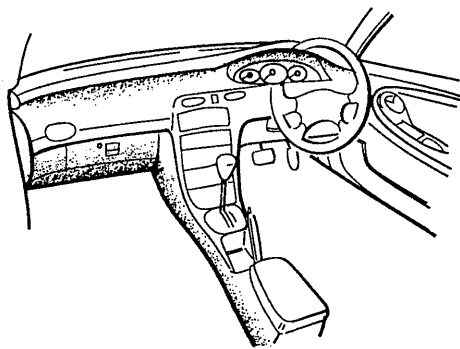
そこで、本研究では、白黒画像で情報を有効に伝える表現法として、太さ変化を自由に制御できる手法と、ドット分布を用いて形状の理解を助ける濃淡表現法を提案し、それらの手法をまとめて、描画システムを作ることを目的とする。本論文では、まずはじめに、各種の図の分析から明らかになった、線分の太さ変化や、ドット分布と形状表現の関係について述べる。次に、第3章で線分太さの制御、第4章でドット分布の制御法のアルゴリズムについて述べる。そして、第5章で、本システムの概要と、描画手順、作画例と評価について述べる。

## 2 白黒画像による形状表現

一般に多く使用されているイラストを見ると、主に陰影をつけることにより、立体的な表現をしている。テクニカルイラストレーション分野では、数種類の形状表現手法が紹介されている。図1(a)は、カタログに示された自動車のイラストを本研究で作成したシステムで描画した例である。図1(b)は、図1(a)から線分の太さ変化とドット表現などを取り除いた例である。これらを比較すると、形状の理解を助けるために、線分の太さ制御やドット表現が有効であることが分かる。以下に、この2つの表現の特徴とコンピュータで取り扱うための条件を示す。



(a) 陰影つけたもの



(b) 同一線を用いたもの

図 1: 表現の比較

## 2.1 太さを持つ線分による表現

線分に太さを持たせる手法は、物体の輪郭、平面の方向の変化、肌あい、ハイライト等を、線のタイプ、線の太さおよび太さ変化のある線を使って表現し、同時に、立体感や陰影効果を出すことができる。そのときの線の太さの役割は、太い線で表された部分は強調され、細い線で表された部分を弱めることである。また、太さ変化のある線は、物の形と奥行きを連想させるために使われ、立体感を出す。これらの表現を可能にする太さ変化を持つ線分は、図2に示すように3種類の表現にまとめられる。図の線分は、上から、徐々に太くなる線、中心が太い線、太いところがいくつかある線である。



図 2: 太い線の例

これらの線分を用いて、立体を表現するには、線分の形状によらず、任意の位置で、太さ変化の状態を変えることができる必要がある。この太さ変化をもつ線分を自由に制御するための条件は、次の3つである。

- (1) 太さを指定する位置
- (2) その位置での線分の太さ
- (3) 線分の末端の形状

本研究では、(1)の位置を点とみなし、太さ制御点と呼ぶ。この太さ制御点で、(2)の太さのデータを持つようにする。このようにすると、指定した位置(太さ制御点)で太さの変化の様子が決まることになる。また、(3)については、必要に応じ、形状を変更するようにする。

この方法は、線分の形状と太さを独立に制御する方法であり、線図形の属性を形状制御と太さ制御の2つに分けている。この方法を用いると太さ変化の状態を指定することが容易であり、太さ変更を曲率などで制御しないことから、任意の位置で太さを変えることが可能であり、同じ形状の線分でも表現内容の感じを変更することができるという利点がある。

パラメータ

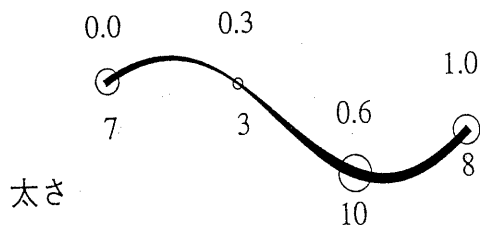


図 3: 太い線の描画条件

## 2.2 ドットによる表現

ドット表現は、陰影や丸みを出すと同時に、ザラザラした質感を出すことに使われる。ドットの明暗は、面による表現に空間の深さと奥行きを与え、平面を立体にまで発展させる造形要素である。人間の視覚は、色相によるよりも、明暗による感覚のほうが優先している。もしこの感覚がにぶっていると外界のものは、ただ平たく距離も深みもなく、また、物と物の区別ははっきりと見えない。従って、この明暗表現は、物体を表すことにとって重要な要素である。ドットは、基本的には、図4に示すように影となる部分につける。また、ドットは、図4(文献<sup>[3]</sup>より)のように、線分に沿うようにし、そのドットの幅を変化させるようにすれば、任意位置にドットづけできることが、各種イラストを観察したことにより、分かった。



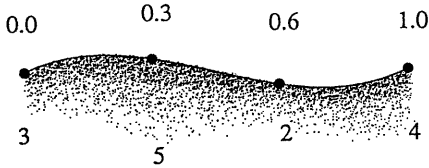
図 4: ドットのイラスト例

このようなドット分布は、以下の条件を決定することにより描画できる。(図5)

- (1) ドットの幅を変化させる位置
- (2) その位置でのドットの幅
- (3) ドットの濃さの変化の割合

本研究では、太さ変化のある線分と同じように、(1)の場所を点とみなし、ドット制御点と呼ぶことにする。ドット制御点では、その位置でのドットの幅をデータに持つようにする。また、濃さの変化の割合は、濃度曲線と呼ばれる関数によって、制御する。この曲線を自由に変えることにより、濃度を決定する。

パラメータ



ドットの幅

図5: ドットづけの条件

この手法を用いれば、線の形状によらずに、ドットをつけたい場所にドットづけをすることが可能である。本研究では、以上で説明した太さ変化を持つ線分とドット分布による2種類の表現方法を用いて陰影を表し、形状表現をするシステムを構築する。

### 3 線分の太さ制御手法

線分の太さ変化のための計算法として Bézier 曲線のオフセットラインの計算を次のように変形して利用することにした。(図6参照)

#### 3.1 Bézier 曲線と接線

Bézier 曲線を生成する制御点を  $P_0, P_1, \dots, P_n$  とする。E をシフト演算子としたとき、この曲線は次のようになる。

$$R_0(t:n) = (1-t+tE)^n P_0 \quad (1)$$

(1) 式を微分すると

$$\frac{1}{n} \frac{dR_0(t:n)}{dt} = R_1(t:n-1) - R_0(t:n-1). \quad (2)$$

ただし、 $R_i(t:m)$  は  $P_i, \dots, P_{i+m}$  で決まる Bézier 曲線  $(x'_i, y'_i)$  を表すものとする。また、(2) 式は、

$$R_0(t:n) = (1-t)R_0(t:n-1) + tR_1(t:n-1) \quad (3)$$

と書ける。

ただし、 $t$  はパラメータであり、 $(0 \leq t \leq 1)$  となっている。

#### 3.2 オフセットラインの幅の制御

幅を指定する関数を  $f(t)$  とし、

$$L = \frac{f(t)}{\sqrt{(x'_1 - x'_0)^2 + (y'_1 - y'_0)^2}} \quad (4)$$

とおくと、2本のオフセットラインの座標  $O(t:n)$  は、次のようになる。

$$O(t:n) = R_0(t:n) \pm L \times (-v_y, v_x) \quad (5)$$

ただし、

$$(v_x, v_y) = \frac{1}{n} \frac{dR_0(t:n)}{dt} \quad (6)$$

この計算によって求まる座標をつなぐことによって、幅の変化する線分を生成できる。

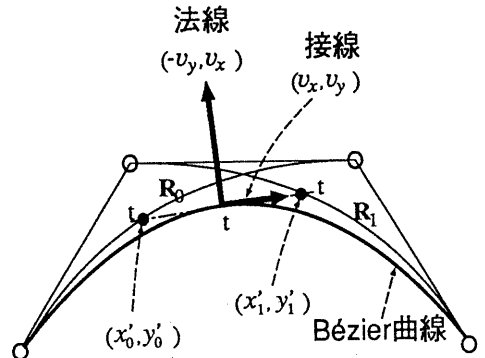


図6: Bézier 曲線の接線

#### 3.3 末端形状と線分の塗りつぶし

中心となる線分の始点、終点において、いくつかの形状を与えることが可能である。本研究では、円や接線に垂直に線分を設定し台形として塗りつぶすことを行う。また、中間部分は中心線分のパラメータから求めた2本のオフセットラインで作られる台形の塗りつぶしを繰り返すことにより一本の太さ変化のある線分を作画する。

## 4 濃淡表現のためのドット分布制御法

### 4.1 ドット分布制御法

本節では、線分に沿うようなドットづけを行い、ドットづけの幅を任意位置で制御できるような陰影を実現する方法について述べる。線に沿うようにドットをつけるとは、図7のようなドット表現のことをいう。

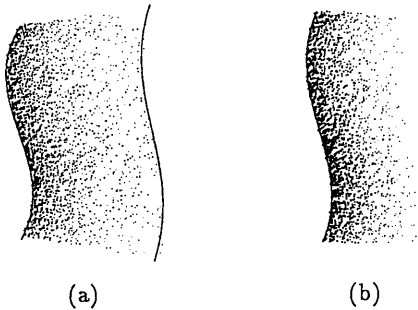


図7: ドットづけの指定

図(a)は、ドットづけを行なう領域を決定する2本の線分、ドット制御点、その位置のドット幅、さらに、ドットの濃さを決定するための濃度曲線を指定することによって描いた。図(b)は、領域を決定するための1本の線分とドットの幅を入力することにより、描いた例である。この方法を用いれば、ドット変更は、幅を変える位置を指定し、その位置での幅を入力すればよい。

以下、このドットづけに必要なドット濃さ制御と領域決定について述べる。

### 4.2 ドット濃さの制御

ドットの濃さの制御は、濃度曲線によって行なう。この濃度曲線は、濃度が0から1まで変化するとき、ドットが、全くない状態から、密度を濃い状態へと変化させる曲線である。濃度曲線の値により、ドットの間隔が変わり、中間調を表現することができる。この濃度曲線によって濃度を決定した後、濃度に対応させてドット描画の間隔を徐々に変えたとともに、ドットの大きさを変化させる。このとき、単に、間隔を変えるだけでは、機械的になり、不自然な感じを受けるので、乱数により、描画座標を再配置してから描画するようにする。

### 4.3 領域決定とドットづけ手法

先に示した図7(a)は、基本ドットづけ手法である。本節では、まず、この基本ドットづけについて述べ、次にその応用として、図7(b)について述べる。

#### (a) 基本ドットづけ手法

ドット描画法アルゴリズムを図8に示す。この図中の $t$ は、パラメータであり、線分の始点から終点に対応するもので、0から1まで変化する。このパラメータは、(1)式で表されるBézier曲線のパラメータである。この曲線を用いて領域を決定する。

まず、ドットづけの領域を決める2本の線を与える。この2本の対応するパラメータによって、幅が決まる。この幅に対して濃度曲線を与えることによって、囲まれた領域のドットづけを行なうことができる。この手法で描いたドット分布の変更を行なうためには、ドット制御点を与え、対応する曲線のパラメータを求め、それによって幅を再計算し、曲線を修正する。この修正された曲線をもとに、ドット分布は変更される。ここで、ドット制御点とは、ドットづけを行なう幅を決定する点をいう。

#### (b) 簡易ドットづけ手法

基本ドットづけ手法をもとに、図7(b)のような1本の線と幅を与えるという、より簡単な入力でドット分布をつくり出すことができる。

1本の線分を入力し、その線分上に、いくつかのドット制御点を与え、それが持つドット幅を画面上で与える。この与えられた幅の座標から、対応する曲線を生成し、領域を決定することができる。2本の対応する線分が同じときは、幅を指定する座標をひとつ与えるだけで良い。この方式では、ドット制御点により、任意の位置でドットの幅を変えることができることから、編集を行ない易いという利点がある。

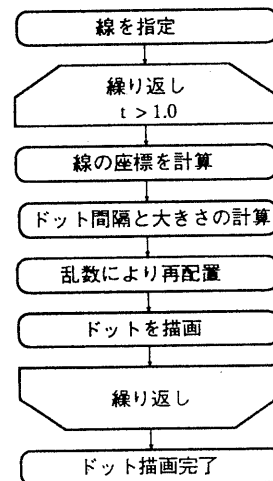


図8: ドットづけのアルゴリズム

## 5 描画システムの概要

### 5.1 システム構成

システム構成を図9に示す。本システムは、X11R4のウィンドウシステム上で、Xlibを用いて作成した。

### 5.2 描画手順

本システムを用いて、次に示す4つの手順で描画を行なう。

#### 1. 線分の入力

線分形状の入力は、次の2つの方法を用いる。

- (1) 入力装置を用いて、対話的に入力する。
- (2) 図形データをファイルから呼び出して利用する。この方法では、線分の形状のデータのほかに太さの情報をファイルに追加する必要がある。

#### 2. 太さ変化の線分描画

以上の制御法を利用して線分を描くためには、次のような手順で行なう。

- (1) 折れ線や自由曲線を入力する。
- (2) 太さ変化を表現するために、画面上で線分の任意の位置と、その位置の太さを入力する。
- (3) 線分形状や太さ、太さ変化状態を画面上を見ながら対話的に変更する。

#### 3. ドットの描画

計算機上で、ドットをつけるには、以下のような手順で行なう。

- (1) ドットをつける線を指定する。
- (2) 線の上下(左右)どちらにドットをつけるか指定する。
- (3) ドットの幅の形状を指定する。幅の形状とは、徐々に太くなるとか、中心が太いなどのことである。
- (4) 必要に応じて、幅を変更させる。この幅の変更は、任意位置で可能である。

#### 4. PostScript プリンタへの出力

本システム上のコマンドを用いて、PostScriptのファイルを出力し、印刷する。

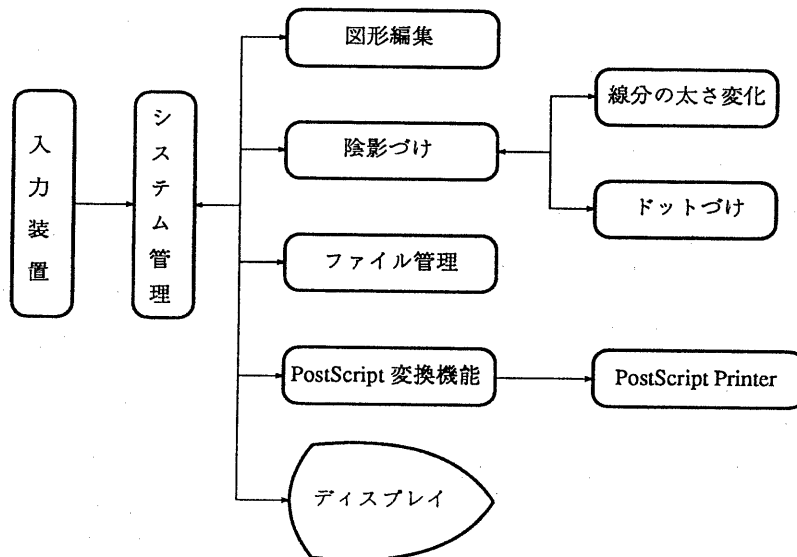


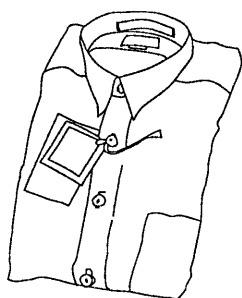
図9: システム構成

## 6 作画実験

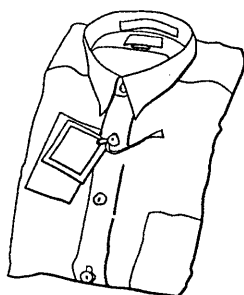
本システムを用いて、いくつかの描画例を作成し、評価を行なう。描画した例を図10と図11に示す。

図10 (a)は、同一太さの線を用いて描いた例である。これを図(b)のように、左斜め上部から、光線が当たっているとして、陰影づけしたものである。立体の感じが出ていることが分かる。この図は、図形データのファイルから読み込み、太さを与えたもので、描画時間は、30分程度である。

図11は、主に曲面の様子を表現しようとした例である。図(b)は、太くしたところを強調して、面が曲がっている様子を表現した。一定の線で描いたものより、曲面の様子が理解しやすい。(c)では、ドットを加えることにより、陰影と曲面の様子を表現している。太さ以外にドットを与えることにより、さらに立体感が増し、奥深い表現となった。この図の作画時間は、(a)の図から、(b)のようにするまでに、15分程度で作画することができた。さらに、(c)のようなドットづけを加えるまでに、35分程度かかった。ドットづけは、多少時間がかかるが、人手によって作画するよりは、速く作画できる。

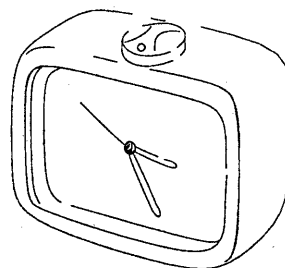


(a) 同一線を用いたもの

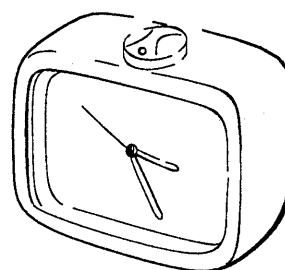


(b) 太さを与えたもの

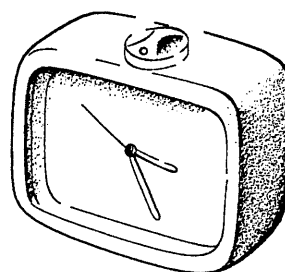
図10: シャツ



(a) 同一線を用いたもの



(b) 太さを与えたもの



(c) ドットをつけたもの

図11: 時計

## 7 まとめ

本研究では、多くのイラスト図を観察し、経験や熟練した技術によって描かれていた、太さ変化のある線分や、ドットパターンによる表現法を分析した。そして、立体形状の奥行きを強調して表現するための太さに変化を持たせた線分表現法を提案し、イラスト図の描画の有効性を評価した。さらに、陰影を表現するためのドットによる表現法を提案し、理解しやすい形状表現が可能かどうかを評価した。これらから、次のことを示した。

- (1) イラスト図に用いられている太さ変化のある線分と、ドット表現を描画するための条件を明らかにした。これによって、計算機による描画法を考案できた。
- (2) 陰影表現に必要な、線分の太さ変化とドットの幅の変化を行なうには、Bézier曲線のパラメータを利用することにより、実現できることが分かった。
- (3) 太さ変化のある線分表現やドットによる表現は、陰影や曲面の様子を表現することに有効である。
- (4) 2次元作画に本研究で提案した表現を利用することにより、3次元形状の理解を支援することが分かった。
- (5) 人手による描画と同程度の表現がコンピュータグラフィックスでも、可能となった。また、PostScriptを用いたことにより、高品位な白黒画像を得ることができた。

また、今後の課題は、次のようである。

- (1) 質感表現を行なう機能を追加し、作画システムの充実をはかる。
- (2) 立体形状データを利用した面内部の表現法を確立し、より正確な3次元形状のレンダリングに役立てる。

## 参考文献

- [1] C.Yao,J.Rokne : Fat curves,Computer Graphics Forum, Vol.10,No.3, pp.237-248,1991
- [2] Luiz Velho,Jonas de Miranda Gomes : Digital Halftoning with Space Filling Curves, Computer Graphics, Vol.25,No.4,pp.81-90,1991
- [3] 高橋正人、ヴィジュアルデザイン研究所編：イラスト技法ハンドブック、ダヴィッド社、1977
- [4] 近藤、他：インタラクティブレンダリングシステムによる3次元形状の表現、情報処理、Vol.26,No.11,1985
- [5] 齊藤隆文：曲面形状の記述法と描画法、1991
- [6] S.Strassmann : Hairly Brushes, Proc. SIGGRAPH'86 22,1986
- [7] Binh Pham : Expressive Brush Strokes, CVGIP Graphical Models and Image Processing, Vol.53, No. 1991
- [8] 清水吉治：マーカーテクニック、グラフィック社、pp.115-120、1990
- [9] 竹村俊彦：立体図の画きかた《応用編》、大河出版、1972
- [10] 大竹、吉岡、石川：レンダリング モデリング 製品デザインにおける表示論、美術出版社、1965