

3次元形状表現のための白黒画像の描画法

神原章[†] 近藤邦雄[†]
佐藤尚[†] 島田静雄[†]

本研究では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濃淡表現法を提案する。このために、まず特徴の強調のために従来からの人手による図を観察し、線分とドット表現のために必要なパラメータをまとめた。この分析によって次のように入力パラメータを整理した。線分による陰影表現においては、線分の曲率と太さを独立に制御するための入力パラメータとして、太さ制御点、太さ、末端の形状を指定する。面内の変化を示すためにドット分布を制御することとし、その入力パラメータは、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を構築した。本システムの手法によって、立体形状を容易に作図することが可能となった。

Rendering Methodology of Monochromatic Picture for Three-dimensional Shapes

AKIRA KANBARA,[†] KUNIO KONDO,[†] HISASHI SATO[†] and SHIZUO SHIMADA[†]

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。カラー画像の研究は、光線追跡法などにみられるような物理法則に従った計算を行う研究と強調省略を行う描画技術に関する研究^{1),2)}に大きく分けられる。前者は、よりリアルな画像を生成することが主な目的となっている。ここで用いたリアルな画像とは、写真などに忠実に従った画像を指し、カラー画像を用いることが多い。後者はリアルな画像とは異なり、その物体の特徴の誇張や陰影部分などの強調により、形状表現に利用されている。例えば、テクニカルイラストレーションに見られるような影と明るさのコントラストによる強調がそれである。

また、形状表現をするためにカラー画像や白黒画像

を利用する場合、各々に長所、短所がある。カラー画像は写実的な描画に有効であり、多彩な濃淡表現を利用することで、多くの陰影表現ができ、さまざまな分野に利用されているが、時間とコストがかかる。また、白黒画像では、白と黒の2色しか使用しないが、強調省略に関する技法が多々あるので、情報伝達という点で、カラー画像に劣らない表現をすることができる。これは、説明図や製図などに用いられていることからみても、情報伝達に有効であることがわかる。また、時間とコストの面でも非常に有利である。

一方、光線追跡法などの3次元形状データから計算する方法は、3次元モデルの構成に手間がかかる。これに対し、2次元作画で対話的に描画し、形状を表現することができる。この観点より、近藤らは、カラーによるインタラクティブなレンダリング手法¹⁾を提案した。これは、グラデーションを用いた対話的な濃淡づけによる形状表現を扱っている。また、齊藤²⁾は、手描き風のイラスト図の作成を扱っている。自動的な作図を目指

[†] 埼玉大学工学部情報工学科
Department of Information and Computer Sciences,
Saitama University

しているが、人の作図意図を反映するようにはなっていない。

さてすでに述べたように、白黒画像は情報伝達に有効である。その白黒画像特有の手法には、線分の形状によるものや、濃淡を扱う手法がある。例えば、線分の形状太さ変化を扱った研究として、一定の太さの線分を接続する方法を提案した研究³⁾がある。この研究は、線分の接続を美しく見せることを目的としている。また、線分の太さ変化をブラシのシミュレーションという考えから取り扱っている研究^{4),5)}や、ディザによる濃淡表現を扱っている Velho⁶⁾では、2次元図形の表現に重点がおかれ、3次元形状の表現について扱われていない。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不十分であることがわかる。

そこで、本研究では文献 1) の概念を継承し、情報伝達に有効である白黒画像の表現法として、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すること、ならびにそれらの手法をまとめて、2次元作画で3次元の形状表現効果を出す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、各種の図の分析を行い、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、第5章で、本システムの概要と、描画手順、第6章で作画例と評価について、最後に、まとめについて述べる。

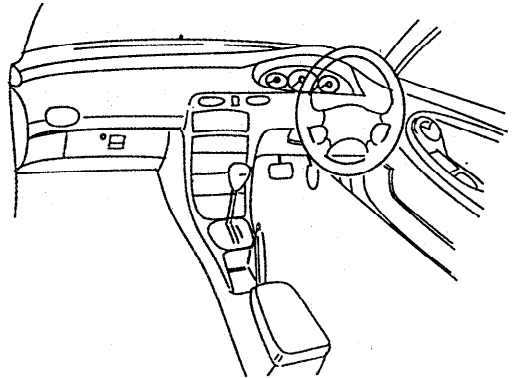
2. 白黒画像による形状表現

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)に線分の太さ変化とドット表現などを加えた例である。これらと比較すると、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わかる。以下に、この二つの表現の特徴とコンピュータで取り扱うための入力パラメータを示す。

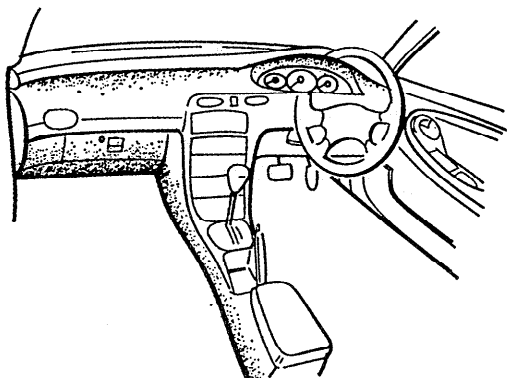
2.1 太さを持つ線分による表現

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、2次元作図では、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。テクニカルイラストレーション分野では、線の太さによる立体感を出すには、左上45°から平行光線が射しているものとする。そのとき、影になる部分の線を太くすることで陰影を表現する。このため、計算機による2次元作画で立体感を出すには、太さ変化のある線分が必要になる。また、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。



(a) 同一太さの線分による例
(a) Line drawing.



(b) ドットづけを行った例
(b) Drawing using shading methods.

図1 イラスト図の例
Fig. 1 Example of illustration.

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、太さ変化状態を変える機能が必要である。この太さ変化をもつ線分を自由に制御するための入力パラメータは、次の三つである。

- (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)の位置を点と見なし、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二つに分けている。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。

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、ガラガ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、色相による感覚よりも、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、物と物の区別をはっきりと見えない。したがって、この明暗表現は、物体を表すために重要な要素である。各種イラスト図を観察した結果、次のことがわかった。(1)ドットの多くは、図4に示すように影となる部分につける。(2)ドットは線分に沿うようにし、幅を変化させて描くようにする。本研究では、この2点に注意してドット描画を行うことにした。

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を示す座標
- (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)の位置を示す点をドット制御点と呼ぶことにする。ドット制御点は、ドットの幅を制御するための点である。また、濃さの変化の割合は、濃度分布曲線と

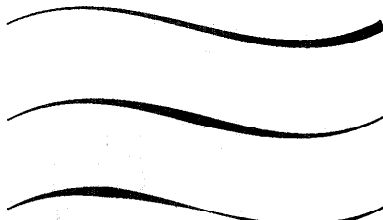


図2 太さ変化のある線の例
Fig. 2 Example of line with variable linewidth.

パラメータ

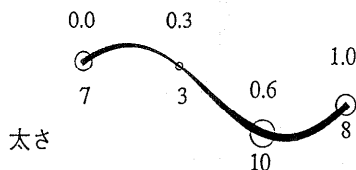


図3 太さ変化の線分描画のパラメータ
Fig. 3 Parameters of line shading.

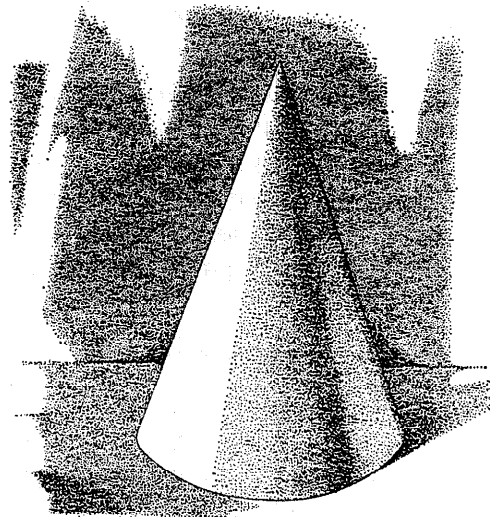
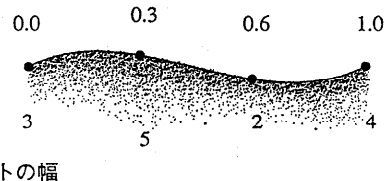


図4 ドットづけの例
Fig. 4 Example of dot shading.

パラメータ



ドットの幅

図5 ドットづけのパラメータ
Fig. 5 Parameters of dot shading.

呼ぶ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。

この手法を用いれば、線の形状によらず、ドットをつけたい領域にドットつけ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 (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。

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

ただし、 $P_{i+1} = E^i P_0$ ($0 \leq i < n-1$) である。

(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、

$$L = \frac{f(t)}{\sqrt{(x_1' - x_0')^2 + (y_1' - y_0')^2}} \quad (4)$$

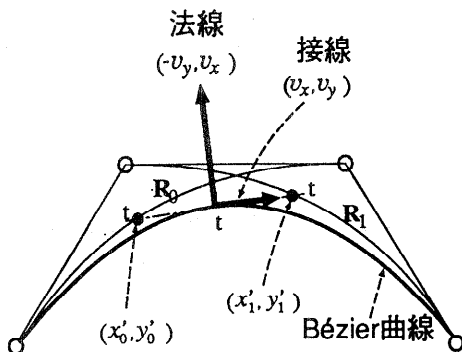


図6 Bézier 曲線の接線
Fig. 6 Tangent line of Bézier curve.

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めた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。また、この手法は近似に過ぎないが、この線分を表すには、近似で十分である。

3.3 末端形状と線分の塗りつぶし

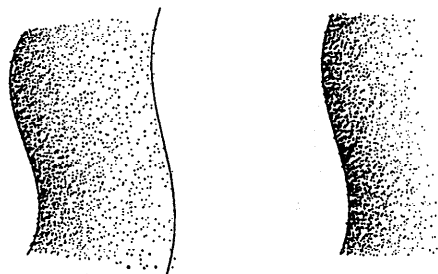
太さ変化のある線分を描くとき、中心となる線分の始点、終点において、いくつかの形状を与えることが必要となる。本研究では、末端形状は、曲線の始点に対して設定できる垂線としたり、始点に任意の大きさの円を設定できる。また、曲線の間中部分は中心となる線分のパラメータから求めた2本のオフセットラインで作られる四辺形の塗りつぶしを繰り返し行うことによって一本の太さ変化のある線分を生成する。

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、線分に沿うドットつけの幅を任意位置で制御できる方法について述べる。線分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(a)は、ドットつけを行う領域を決定する2本の線分と、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7(b)は、領域を決定するための1本の線分、ドット制御点、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



(a) 基本ドットつけ (b) 簡易ドットつけ
(a) Based dot shading. (b) Simple dot shading.

図7 ドットつけ手法
Fig. 7 Dot shading methods.

用いば、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 ドット分布のアルゴリズム

図7のような濃淡づけを行うアルゴリズムについて説明する。以下の手順に従って、線分に沿ったドットを描くようにした。

- 1) 濃度曲線によって表示したい位置の濃度 *rate* を計算する。ここで、*rate* は、0.0~1.0 まで変化する。また、濃度曲線とは、曲線によって濃度を設定するものである。
- 2) 濃度に合わせて、ドットの大きさ *D* を徐々に変化させる。*d_{max}*, *d_{min}* は、それぞれ、最大、最小のドットの大きさであり、本システムでは、半径をそれぞれ、0.6, 0.1 にしている。

$$D = d_{\max} \times rate + d_{\min} \quad (7)$$

- 3) (1)式を用い、図8のように、2本の線分のパラメータ ((1)式の *t*) ごとの座標 *r₁*, *r₂* を求める。計算された座標 *S(x, y)* は、次のようになる。

$$S(x, y) = r_1 + len \times \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|} \quad (8)$$

ここで求められた座標 *S(x, y)* にドットを描画すると、規則的に分布するため不自然に見える。これを防ぐために再配置することにした。具体的には、乱数により -2 から +2 の範囲で座標を移動してから描画している。

ドット分布の従来手法では、ある範囲全体の各画素について計算する手法や、元画像の濃度によりドットの濃度を定める方法⁹⁾などを用いていた。これらは、ディザ法を用いて濃淡表現している。ディザ法とは、ある範囲のすべての画素に対し、各々の画素について一定の閾値によって発色するかしないかを決定し、濃淡表現する手法である。したがって、すべての画素に

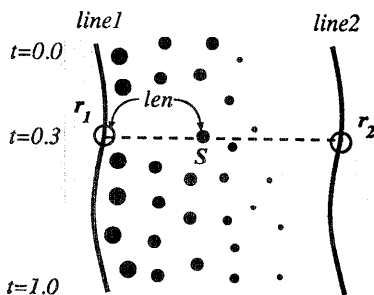


図8 ドットづけの原理
Fig. 8 Principle of dot shading.

ついて計算を行い、描画する必要がある。しかし、これらの手法では、任意の位置にドットづけをすることができないので、絵図を描くには適していない。そこで、任意位置に容易にドットづけをできるようにしたものが本手法のドットシェーディングである。

本手法の場合、すべての画素にドットを描く必要がないので、各画素につき計算する必要がない。この結果、通常のディザ法に比べ速い描画をすることができ、カラーに比べ、見劣りしないような画像を生成することができる。

4.3 領域決定とドットづけ手法

本節では、基本ドットづけと簡易ドットづけの各手法の領域決定について述べる。

(a) 基本ドットづけ手法

まず、ドットづけの領域を決める2本の線分を与える。この2本の線分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、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うためには、分布が意図するような形状になるように、2本の線分の形状を変更すればよい。

(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。この場合も、ドット分布の変更は、基本ドットづけと同様に行えばよい。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、編集を行いやすいという利点がある。

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。また、出力にはPostScriptプリンタを用いた。

5.2 描画手順

本システムを用いて、次に示す四つの手順で描画を行う。

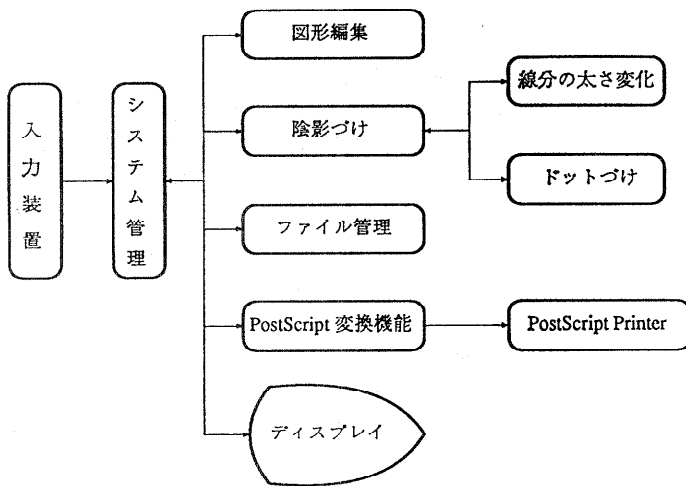


図 9 システム構成
Fig. 9 Configuration of the system.

1. 線分の入力

線分形状の入力は、対話的な入力と座標ファイルの呼び出しの二つの方法を用いる。折れ線、自由曲線はいくつかの頂点や制御点を与えることで決定できる。描かれた線分が不適當な場合全体を入力し直すことは好ましい方法ではない。不適當な部分の頂点を移動することで意図した線分の形状を作成する。また、一部分を追加消去したりすることで形状を変形させることが必要である。したがって、線分の頂点をツリー構造で持ち、追加消去が容易にできるようにする。そして、座標の移動は画面上で対話的に変更する。

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) 意図に合わない場合、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う。

- (1) ドットづけする領域を決定する 2本の線分を指定する。または、1本の線分と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。

(2) 濃度分布曲線によってドット分布を決定する。

(3) 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

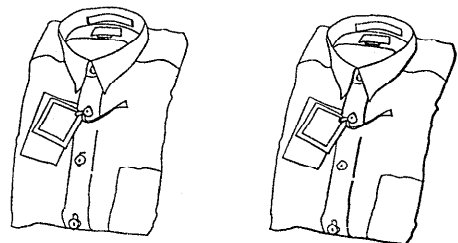
本システム上のコマンドを用いて、PostScript のファイルを出し、印刷する。このシステムでは画面表示ルーティンと同様の処理を PostScript 出力できるように文字列を生成することによって、プリント出力する。

6. 作画実験

筆者らが、本システムを用いていくつかの描画例を作成し、本研究で提案した手法の評価を行った。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わかる。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、20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



(a) 同一太さの線分による作図例
(b) 太さ変化のある線分を用いた作図例
(a) Example of line drawing. (b) Example of line shading.

図 10 シャツ
Fig. 10 A shirt.

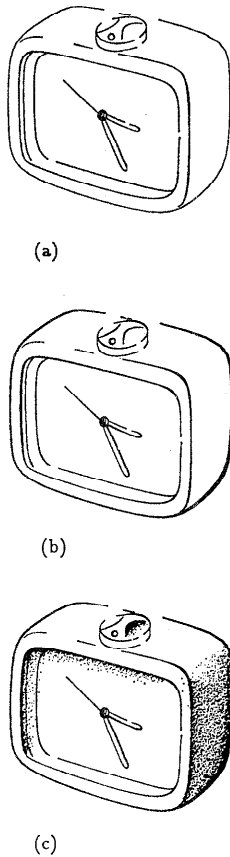


図 11 時計
Fig. 11 A clock.

- (a) 同一太さの線分による作図例
(a) Example of line drawing.
(b) 太さ変化のある線分を用いた作図例
(b) Example of line shading.
(c) ドットづけを加えた作図例
(c) Example of dot shading.

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行い完成するまでに、35分程度かかった。このように本ドットづけ手法の利用によって、人手による作業の省力化が実現できた。

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入力パラメータを明らかにした。これによって、計算機による描画法を考案できた。
- (2) 線分の太さ変化とドットの幅の変化を行う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。
- (3) 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わかった。
- (4) 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クスでも、可能となった。

また、今後は、質感表現を行う機能を追加し、作画システムの充実をはかる予定である。

参 考 文 献

- 1) 近藤, ほか: 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, pp. 1401-1408 (1985).
- 2) Saito, T. and Takahashi, T.: Comprehensible Rendering of 3-D Shapes, *Proc. SIGGRAPH '90*, Vol. 24, No. 4, pp. 197-206 (1990).
- 3) Yao, C. and Rokne, J.: Fat Curves, *Computer Graphics Forum*, Vol. 10, No. 3, pp. 237-248 (1991).
- 4) Strassmann, S.: Hairly Brushes, *Proc. SIGGRAPH '86*, 22 (1986).
- 5) Pham, B.: Expressive Brush Strokes, *CVGIP Graphical Models and Image Processing*, Vol. 53, No. 1 (1991).
- 6) Velho, L. and de Miranda Gomes, J.: Digital Halftoning with Space Filling Curves, *Proc. SIGGRAPH '91*, Vol. 25, No. 4, pp. 81-90 (1991).

(平成4年7月29日受付)
(平成5年5月12日採録)

**神原 章** (正会員)

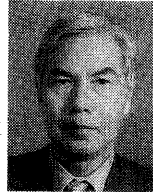
1970年生。1992年埼玉大学工学部情報工学科卒業。同年同大学大学院入学。現在コンピュータグラフィックスの研究に従事。

**近藤 邦雄** (正会員)

1954年生。1979年名古屋工業大学第2部機械工学科卒業。工学博士。名古屋大学教養部図学教室、1988年東京工芸大学電子工学科講師を経て1989年埼玉大学工学部情報工学科助教授。コンピュータグラフィックス、ユーザインタフェース、形状モデリング、感性と知識をもとにした画像処理の研究に従事。日本図学会会員。

**佐藤 尚** (正会員)

1964年生。1987年学習院大学理学部卒業。1989年国際基督教大学修士課程修了。1990年学習院大学博士後期課程中退。同年埼玉大学工学部情報工学科助手。アルゴリズムの設計と解析、コンピュータグラフィックス、曲面理論などの研究に従事。日本数学会会員。

**島田 静雄** (正会員)

1931年生。1954年東京大学工学部卒業。工学博士。1959年東京大学工学部土木工学科助手、講師を経て、1963年名古屋大学工学部助教授、教授。1983年から工学部共通講座情報検索学に配置替。1990年から埼玉大学工学部情報工学科教授。自動作図とグラフィックス、情報管理、データベースの研究に従事。土木学会などの会員。