

# 曲面の形状感の表現

## 濃淡図形作画のためのレンダリングルール

近藤邦雄(名大) 木村文彦(東大)

### 1. まえがき

本研究の目標は計算機を用いた図形の取り扱いにおいて、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案し、対象物の形状理解と感覚的評価をインタラクティブに取りあわせる方法を確立することである。

従来からコンピュータグラフィクスで行なわれている光線追跡法は計算機に大きな負担をかけている。また、人が形状を容易に理解できるような形状の特徴の強調・省略は行なわれていない。

本文では、人の形状理解を助ける表現法を考案するために、1) 濃淡図形による形状感理解の問題を整理し、濃淡表現のための技術をまとめる。2) 形状理解しにくい部分に対して、どのような技術を使えばよいかというレンダリングルールを作成し、その評価を行なうことを目的とする。

筆者らは形状感理解を助ける表現法の問題に関し、曲面形状の違いを示す濃淡パターン分類を行ない、それらを作画することが可能となるソフトウェアを作成した。そこでは、一つ一つの曲面形状の違いを示すことはできるがそれらが組み合せてできている機械部品のような立体に対しては、濃淡パターンを当てはめるだけでは全体としておかしい場合が生じた。これから、濃淡付けのための技術を利用するレンダリングルールが必要となった。

従来からよく知られている光線追跡法や Smooth Shading法は反射モデルを作って濃度計算を行なうものである。光線追跡法は画面上の各点に対して反射計算を行ない、濃淡図形を作画する。Smooth Shading法は多面体近似し、頂点の濃度値を内挿してなめらかな濃淡変化を作り出している。また単に早く作画するために平面で近似して作画する方法もある。これらの方法によって作画される図は本研究の目標とする形状の特徴強調・省略をした図とは異なる。たとえば、立体の2面がわずかな角度で構成されている場合、実際に見ておぼつかない差があり、反射計算による図も同様である。また、反射モデルの場合は作画した後で図や反射モデルの計算を行なう。これに対し、ここでは人がある目的をもって、このような図にしたいということを手軽にできるようにすることを目的としている。

そのため、濃淡図形の形状感表現と理解の問題点を調べ、理解しにくい点について整理した。そして、人が計算機を用いて濃淡図形を作画するときの手順とそのため必要な技術を作成した。さらに、それらの技術をどのような部分に用いたらよいかというレンダリングルールをまとめた。そして、そのルールに従って、濃淡図形作画プログラム CARP (Computer Aided Rendering for Presentation) を用い、作画実験を行ないルールの評価を行なった。

以下、これらについて、2) 濃淡図形作画プログラムの解説と図の修正技術について説明し、3) では、濃淡図形による形状理解に関する考察を述べ、4) でレンダリングルールについて、5) 作画実験とレンダリングルールについての効果について説明を行なう。

## 2. 濃淡図形作画プログラム CARP

### 2.1 作画プログラムの概説

人は頭の中でいろいろな形状の性質を整理し、メンタルイメージとして持っている。形状表現のためにはこのメンタルイメージをできるだけ生かすことが大切である。形状を理解しようとするとき、人は自分か持っているメンタルイメージと与えられた対象との本質的差があるかどうかを調べる。そして、そのイメージと対象とに本質的差がなく一致するとき、人は同じものであると理解する。

濃淡表現された図から形状理解するとき、こまかな一点一点を調べるのではなく、メンタルイメージの濃淡変化とどう違うかを調べていると考えられる。これより、筆者らは、濃淡パターンの分類を行ない、それに基づいて濃淡付けを行なうことが形状理解を助けると考えた。

図1は 計算機を用いてメンタルイメージに合うような濃淡図形を作画するときの手順である。最初に各面の領域を与えながら濃淡パターンを用い、濃淡付けを行なう。次に、区別しにくい点があるかどうかを人が見て判断し、線を入れたり、濃淡を変更したりする。そして、変更したことにより、誤解を生じるような点がないかを人が調べる。これを繰り返し行なうことにより、自分が目的とする図を描くことが可能となる。これらのことが可能になれば、人の濃淡付け技術に左右されずに、作画を進めることができる。

これらの考えを実現するために本研究では、1) 人の形状理解を助ける表現、2) インタラクティブな図の作成が行なえる濃淡図形作画プログラム CARP を作成した。

図2は CARP のシステム構成である。タブレットに各種のコマンドが用意され、線画・面画処理が行なえる。これらを図1に示す手順に従って利用する。たとえば、ある任意の領域内に濃淡付けを行なうときは、領域をタブレットで入力し、マスをかけ、濃淡変化のデータを与えることにより、濃淡を付けることができる。

これらの機能のうち、基本的処理については先に報告したので、ここでは濃淡修正処理について説明する。

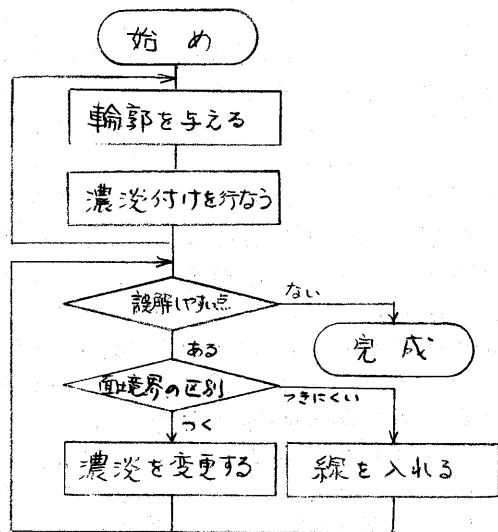


図1 計算機利用の濃淡図形作画手順

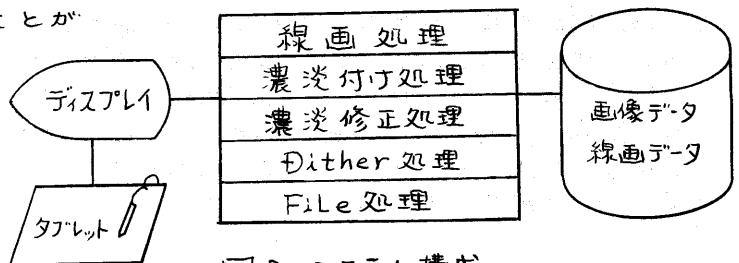


図2 システム構成

## 2.2 濃淡修正処理

濃淡修正は、すでになんらかの色が付けられている部分に対して行なうものである。

ここでは、修正したい範囲の境界部で先につけられている色と一致するような濃淡変化を作り出すことを行なう。

そのために、図3に示すような修正濃度比曲線  $f(x)$  を設定し、修正濃度値  $a_m$  と修正前の値  $a_p$  との差と修正濃度比曲線の値から、式(1)を用い濃度計算を行なう。

$$a = (a_m - a_p) \cdot f(x) + a_p \quad \text{---(1)}$$

$a_0$ : 修正前の各点濃度値

$a$ : 修正後の濃度値

これらを与えた領域内について行なうことにより濃淡修正を行なうことができる。

図4は赤から白に変化する長方形内に中心部を白にして円状にぼかす様子を示したものである。このような点を中心とした修正では、修正範囲を円以外にも多角形、スプライン曲線を用いることができる。

また、線分を中心とした修正もこの応用として行なうことができる。

これらの修正機能を利用することにより、より早くイメージに合う濃淡図形を作画することが可能となる。

## 3. 濃淡図形による形状理解

### 3.1 反射モデルによる濃淡図形

形状を人に理解しやすいように表示するためには、物理的な陰影・反射法則に従って作画することは基本原則である。

しかし、単に実際の様子を写実的に表わすだけではいけない、日常見られる分りにくい写真から分かるように、人の理解を助けることができないう場合がある。

従来からの濃淡表示例として Ray tracing 法があげられる。これらはいくつかのモデルが提案されており、図6はその例である。背景光、拡散反射光、鏡面反射光の値が合成され濃度計算されたものである。影や各面相互

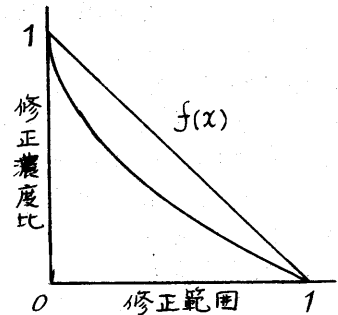


図3 修正濃度比曲線

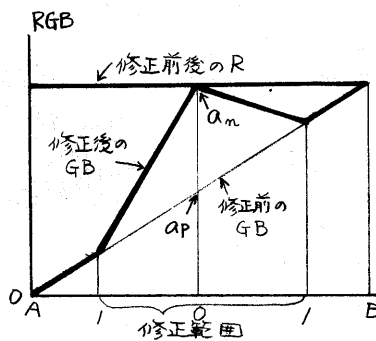


図5 修正前後の濃度

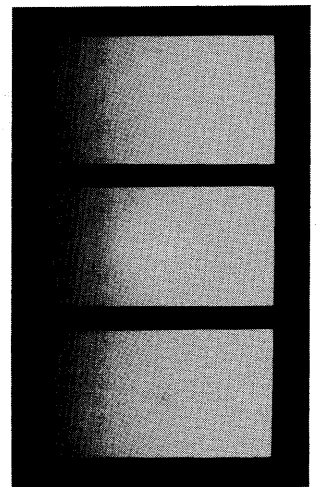


図4 修正例

の反射は含まれていないため、凹部に不自然さが感じられる。また、一般的にこのような反射モデルを用いた場合、理解しにくい点がいくつか生じる。たとえば、1) 光があたらなため、一定の暗さになる。2) 立体のわずかな段差はほとんど同濃度になる。3) 直角になっている2面などに対して、光が同角度になるとき、面の濃度は同じとなる。

これらの理解しにくい点は、より秀れた反射モデルによって解決できることもあるが、反射モデルを変えても修正できないものや、どんな条件を与えたらよいか分らないものもある。いくつかの光源を与えることが可能となっても、自今が望むように濃淡を变化させることはむづかしく、変更したくない部分に対しても、光源の影響はおよぼされてしまう。

このため、形状の特徴を示すような濃淡を作ることは非常にむづかしい。

したがって、描きたい濃淡図形を作る手法が必要となる。また、特徴をはっきり区別して示すことにより、形状を良く理解できる表現法が大切となる。

### 3.2 CARPを用いた濃淡図形

図7は計算機を用いて作画した濃淡図形の例である。これらの図は人がおおよその物理法則に従って、濃淡をつけたり、線を入れたりして、人に対して形状感の理解を助けるようにしようとした例である。

これらの良い点をあげると

- 1) 円周部の丸みが濃淡変化によってよく示されている。
- 2) 図の輪郭線が濃くはっきり示されている。
- 3) 平行な2面の濃度が奥行きの違いにより変えて示されている。
- 4) 水平と垂直な面が濃度の違いで示されている。
- 5) 光源を1つと考えず、曲面形状を示すため、別の光源を仮定している。
- 6) 離れた面の区別に黒い線を用い、異なった位置を示している。

などがあげられる。

これらから、1) 面の境界、2) 面形状の性質、3) 面の位置・姿勢の3つを区別できるような線の挿入、濃淡

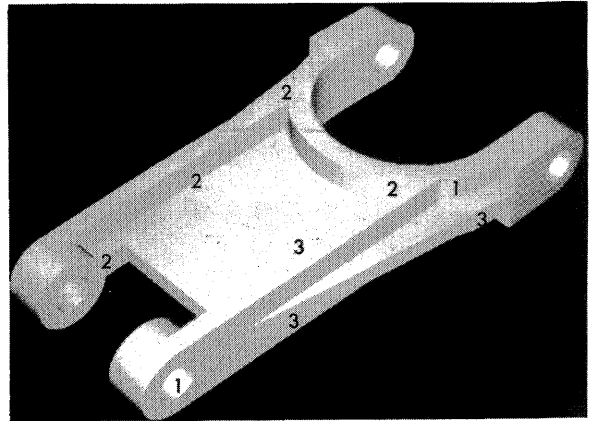


図6 光線追跡法による作画例

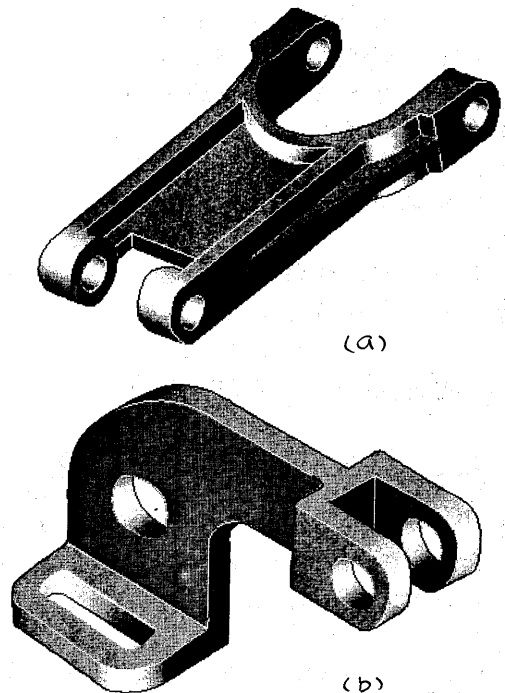


図7 CARPによる濃淡図形

変化の強調の表現が立体形状の理解を助けるといえる。

また、これらの区別を行なうためには表現技術をうまく利用することが大切である。このために、どのようなところにどんな技術を用いればよいかというレンダリングルールが必要となる。

#### 4. レンダリングルール

立体形状の理解を助けるためには、先に述べたように、1)面の境界、2)面形状の性質、3)面の位置・姿勢を区別できるように表現することが必要である。

ここでは、これらを区別するために、CARPシステムの濃淡付け機能をどのように使えばよいかというレンダリングルールについて述べる。

以下に述べるルールは次の2つの内容に分けることができる。オ1に、実際の反射計算で濃度は決まるが、ルール化することによって簡単に作画できるもの、オ2に、どんな反射計算を行なっても描くことができず、表現法としてまとめるものである。

##### 4.1 面の境界の区別

面の境界が濃淡の違いだけで区別しにくいとき、また、強調したいときは境界線を強調するとよい。ここで、図の中に表わそうとする境界線を、輪郭線と内形線の2つに分ける。

輪郭線は可視面と不可視面で構成される稜線をいい、内形線は接続する2つの可視面で構成される稜線のことをいう。曲線の場合は近似的に直線の集合と仮定し、同様に区別することができる。

- 1) 濃い太い線を用いて輪郭線を示す。
- 2) 光が当たる輪郭線や境界までハイライトがあるとき、輪郭線は少し細くうすくして示す。
- 3) 後方に面がある輪郭線で、2面とも同様の濃度のときは後方の面を境界部で少し濃淡変化をつける。2面ともうすい濃度のときは線を濃くしてもよい。
- 4) 内形線は光って見えるときが多いので、うすい濃度の線で示す。
- 5) 凹部で2面とも暗いときは、それらより少しうすい濃度とする。

##### 4.2 面形状の性質の区別

本文では球・円柱のような2次曲面を取り扱う。これらの濃淡変化には光源の位置を変えても変わらない一定のパターンがある。これに従って濃淡をつければ、人のメンタルイメージとよく合い、人の形状理解を助けることができる。また、一つの曲面でも表と裏があり、これによって濃淡は異なる。

これらの表現を行なうためには次のように濃淡を付けるとよい。

- 6) 面の内部を塗りつぶすにはパターンを利用し、その変化を強調して示す。
- 7) 面の表裏の違いは、人に対して凸と凹

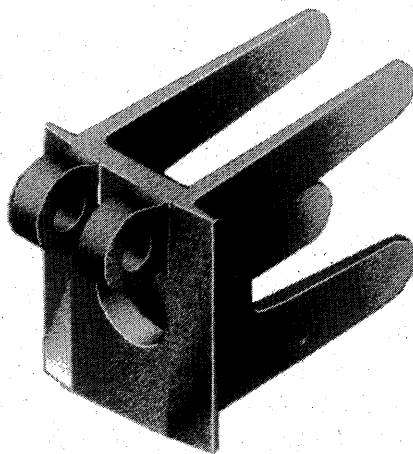


図8 レンダリングルールの適用例

が逆になり、これにより反射も変化する。これを示すには点対称の濃淡付けを行なうとよい。

#### 4.3 面の位置・姿勢の区別

面の位置を区別するために濃淡変化をつけることを行なう。反射モデルを用いる方法では、光源位置から各点までの距離をパラメータとして与えることにより、濃淡変化を作り出している。これによって、面の濃淡は近くで明るく、遠くで暗くなり、奥行きの違いを示そうとしている。単純な凸立体のときはこの方法によって形状理解を助けることができが、実際に存在する立体は凹部も多く、これらは他面の影響を受けるため、反射計算は複雑になる。また、影は立体の位置や姿勢を理解するために有効なものであるが、悪い面もある。影の部分が一定濃度となり、形状の変化が分らなくなることである。

ここでは、これらを簡単にうまく表現し、形状理解を助けるための方法を以下に示す。

- 8) 面の傾きを示すには、仮定する光線に対する面内の垂直線を基準とし濃淡パターンを当てはめる。
- 9) 面が光線に平行、または画面に平行に近くなるほど濃淡変化を小さくし、奥行きが大きいほど濃淡変化を大きくする。
- 10) 凹部を示すときは、他面の反射を考え少し明るくする。
- 11) 影になる部分を示すには、すでにしている濃度を一定値だけ下げる。  
このとき、影になる部分が面の大部分をしめるときは面全体の濃度を下げる。
- 12) 強い光線がなく、散乱光を仮定するときは、影の境界をはっきり示さず、濃い部分から、徐々に変化させる。

#### 5. 作画実験

図9にレンタリングルールに従って作画した例を示す。a) は2方コックの線図、b) は濃淡図を描くために入力された線図で、白い線は領域設定、うすい線は濃淡付けのための線である。これをもとに作画した実験例をc, d, e, fに示す。

c) はパターンをもとに濃淡付けを行なったものである。円柱の凹の感じをつかむことができる。また、垂直・斜めの面に対して濃淡変化の方向を変えている。しかし、この図を見てもわかるように面の境界の区別がつきにくい部分がある。さらに、うすい部分と濃い部分が急に変わっている部分もある。

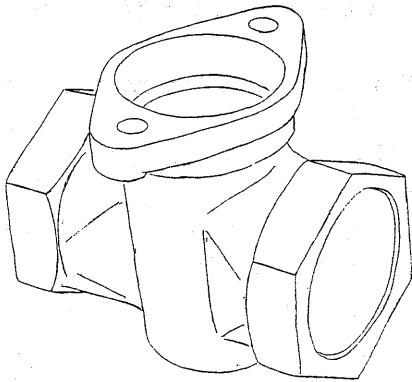
d) は境界をはっきり示すために濃い線を追加して示したものである。これによって、同濃度で区別しにくい境界も区別できるようになった。しかし、内形線まで濃い線で示したため、不自然な感じがある。

e) は内形線をうすい線で示し、さらに、辺の丸みを強調するためにハイライトを出してみたものである。円弧は濃淡変化のある線を用いて示している。また、面の境界で丸みがあることを示すために、境界のわずかな範囲をなめらかな濃淡変化になるように修正を行なった。

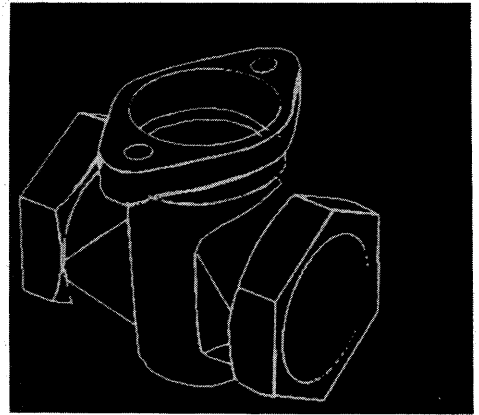
f) は太陽光線の少し強い感じを出すために影をはっきり示した。これらの境界線はタブレットにより2次元座標値として入力し、その範囲内の濃度を一定値だけ下げたようにした。床面への影は手前を濃く、後方をうすく示した。

これらによって、写真とは異なり影の部分にも濃淡変化があり、形状理解を助け

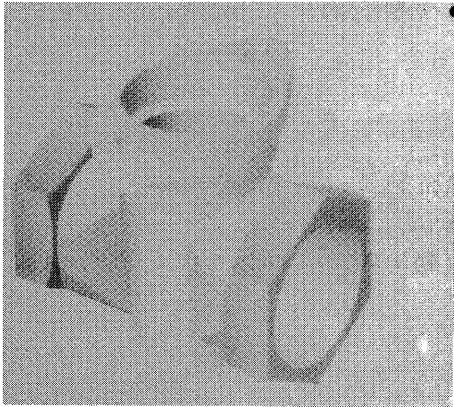
ている。これらから、レンダリングルールを人が理解しながら、入力データに生かすことによって理解を容易にする図を作成できることが分かる。



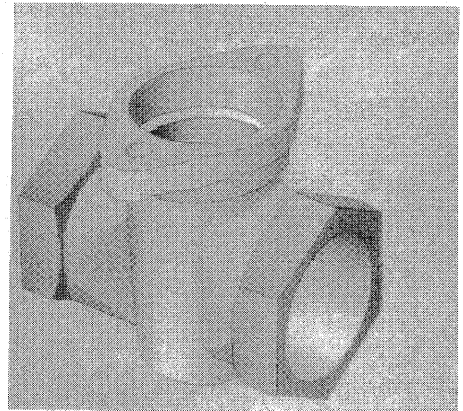
(a)



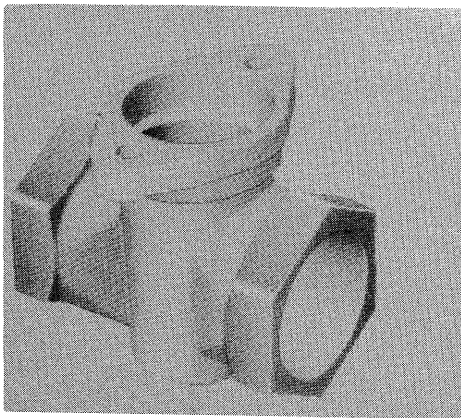
(b) 線図



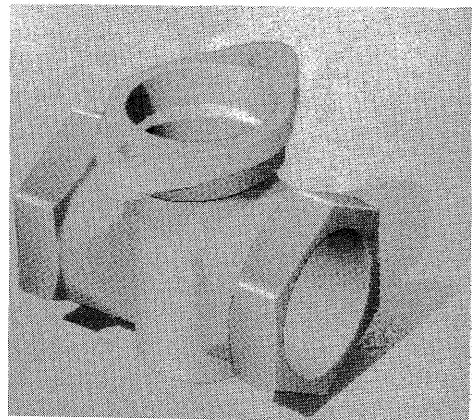
(c) 濃淡ハッチのあてはめ



(d) 濃い線の追加



(e) 内形線の処理



(f) 影の追加

図9 作画例

## 6. まとめ

本研究では濃淡図形作画プログラムCARPを作成し、これを立体表現に用いるためのレンダリングルールを整理し、それをもとに作画実験を行なった。

その結果、

- 1) 人の形状理解を助ける濃淡図の条件を整理し、形状理解を助けるためには、それらの条件を満足することが大切であることを確めた。
- 2) レンダリングルールを人がわかる段階の言葉でまとめ、CAPPを用いて、濃淡図形を作画し、ルールの有効性を確めた。
- 3) CARPシステムがこれらの作画に有効であることが分かった。

また、本研究では最初の輪郭を2次元図形として直接入力している。人がこれらの立体の輪郭を描くことは困難であり、この最初の輪郭をうまく入力する方法を確立することが今後の問題である。

## 謝辞

本研究の進行全般に関して、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いただきました。光線追跡法の作画に関して、東京大学千代倉弘明氏に御援助いただきました。

## 参考文献

- 1) 田嶋・近藤 曲面の形状感の表現 情報CG研資料 1982
- 2) J.D. FOLEY Fundamentals of Interactive Computer Graphics
- 3) 千代倉, 木村 自由形状設計のための曲面生成法 情報CG研資料 1982