

25周年記念論文

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†近藤 邦雄^{††} 木村 文彦^{†††} 田嶋 太郎^{††}

本論文は、3次元形状の理解を容易にすることを目的として、インタラクティブレンダリング手法による3次元形状の表現について述べる。マンマシンインタラクションでは、図の果たす役割は大きく、図形情報を表現する能力の拡充が行われてきた。とくに、3次元形状を取り扱うことは、いろいろな応用にとって重要なものであり、3次元形状図の作成が望まれていた。筆者らは、3次元形状の特徴表現の方法を調査し、形状理解を容易にする表現を行うための基本原理をまとめた。そして、具体的に作画を行うための手順を考え、計算機で実現するためのアルゴリズムを作成した。この作画処理アルゴリズムは、きわめて単純で高速に実行可能である。さらに、このインタラクティブレンダリング手法とパースェイド法、ワイヤフレーム法、および光線追跡法との結合を行い、作画実験を行った。本研究で提案するレンダリングルール、濃淡付け技術、および3次元モデルを利用した表現技術の組み合わせによって、3次元形状の情報伝達を円滑に行うことができる。

1. 緒言

本論文は、3次元形状の理解を容易にすることを目的とし、インタラクティブレンダリング手法による3次元形状の表現について述べる。

近年、マンマシンインタラクション方式を用いたシステムが、多く利用されるようになってきた。このようなシステムにおけるインタラクションでは、図の果たす役割は大きく、図形情報を表現する能力の拡充が行われてきた。とくに、3次元形状を取り扱うことは、いろいろな応用にとって重要であり、3次元形状を表現した図、3次元形状図の作成手法の開発が望まれていた。

一般に、形状を分かりやすく示し、人の理解を助ける表現技術は、テクニカルイラストレーション分野では、レンダリングと呼ばれている。この表現技術は、人がもつイメージを、経験を利用して表現することを目的としている。この技術は、輪郭となる線図を作画し、それに、特徴の強調や省略をしながら、色彩・濃淡付けを行うものである。

この問題点は、1)輪郭を描くために手間がかか

る。2)特徴の強調や省略、色彩・濃淡分布に対して、優れた感覚や熟練技術が必要となる。3)作成時間がかかる、などである。

これらを解決するために、コンピュータ援助により、図を作成する方式は有効である。そのために、作画のための濃淡パターンと作画手順を整理し、自動化していくことが必要である。

このような計算機を用いた作画手法をインタラクティブレンダリング手法と呼ぶ。この技術が可能になれば、意図した図を適切、かつ容易に作画できる。

この手法で作成する3次元形状図には、大きく分けて、線画と面画がある。これらは、目的、作画の条件に応じて使い分けられている。形状の感覚的理解を助けるためには、線画より、面画の方が一般的には適切と考えられる。面画は、3次元形状を写実的に人に分かりやすく示すことができるからである。

このインタラクティブレンダリング手法を適用し、面画を作るために、輪郭を入力し、その内部に濃淡付けをする方法や、小さな領域を持つ筆を動かしながら、大きな領域に濃淡付けをする方法がある。

これらの作画技術を容易に作画できるようにペイントシステム^{1)~3)}としてまとめることは大切である。このシステムを用いれば、ものの丸み、ふくらみなどの形状的性質が表現でき、図から形状の感じをよく理解することができる。しかし、人の技術の違いによって、適切な表現の行えないこともある。これは濃淡パターン化や作画手順の整理がされていないためと考ええる。

† Representation of 3-D Shapes with the Interactive Rendering System by Kunio KONDO (Division of Graphic Science, College of General Education, Nagoya University), Fumihiko KIMURA (Department of Precision Machinery Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokyo) and Taro TAZIMA (Division of Graphic Science, College of General Education, Nagoya University)

†† 名古屋大学教養部図学教室

††† 東京大学工学部精密機械工学科

また、複雑な3次元形状の輪郭作成は、人にとって困難なことである。計算機内部モデルがあれば、それを利用して、輪郭の作成、陰影付け^{4)~6)}を行うことができる。このとき、作成した図に対して、レンダリング手法を用いて、修正することも可能である。

筆者らは、より作画を容易にし、質の高い絵を作成するために、濃淡パターン化⁷⁾、作画手順の整理が重要と考えた。

まず、従来の表現手法の特徴や欠点を整理し、特徴表現のための方法を調査した。これより、形状理解を容易にする表現を行うための基本原理として、面と面や面形状の性質の区別、3次元形状の位置・方向の表現が大切であることがわかった。そして、形状を局所的にみると2次曲面で近似できることから2次曲面の濃淡パターンを分類し、それを組み合わせることが有効であろうと考えた。

この考察をもとに、具体的に作画を行うための手順を考え、計算機で実現するためのアルゴリズムを考えた。この作画処理アルゴリズムは、きわめて単純で高速に実行が可能である。

さらに、このレンダリング手法とパスエイド法⁸⁾、ワイヤフレーム法⁹⁾および光線追跡法との結合を行い、作画実験を行った。

この結果、3次元形状図の作画にこのアルゴリズムが有効であること、および各種技術の組み合わせにより、効率よく3次元形状の作画が行えることが確かめられた。

以下、第2章ではグラフィクスにおける形状伝達に必要な技術、3章では3次元形状の表現、4章では形状表現のためのレンダリングルール、5章では作画実験と評価について述べる。

2. 形状伝達に必要な表現技術

コンピュータグラフィクスを用いて作られた絵を利用する目的は、いろいろなものがある。たとえば、目的を達成するための道具として用いられる設計図面や、カタログや絵画のようなもので、作られた図自身が重要なものである。3次元形状図は、情報を視覚的に伝えるという役目を持っている。この役目を達成するためには、次の要求を満たさなければならない。

- 1) 伝えたい情報が正確に表されていること。
- 2) 容易に理解できること

である。

そして、この2つを満たすためには、次に示す表現

技術を導入する必要がある。

1) 特徴の強調、省略

伝えたい情報だけを正確に表現することが、理解を容易にする。このために、形状特徴の強調、省略が行えることは重要である。人の持つイメージに合うように強調、省略を行うことによって理解を助ける。

2) 幾何学的に正確な作画

これは形状を表現するときに大切である。陰影は形状を示す補助手段で、幾何学的な誤りを、陰影によって修正できないからである。このため、立体を理解させる図をつくるときには幾何学的条件を満たしてから、陰影を付ける必要がある。

3) カラー濃淡表現

対象の内容に合わせて区別したり、強調するとき、および、対象を、より写実的に表現するとき用いる。

4) 対話による作画

人が自分の意図する図を作成するためには、対話的に作画できることが望ましい。たとえば、光線追跡法による表現にハイライトを入れるとか、写真のデータを修正するような場合である。このようなときに、手軽に作画ができることが大切である。

これらが可能となれば、意図したものを容易に描くことができ、理解を助ける表現が行えると考えられる。とくに、これらの条件のうち、3次元形状の情報伝達のための、特徴の強調・省略を以下では取り扱う。

3. 3次元形状図の表現

本章では、3次元形状の理解を助ける作画の基本原理について述べる。

まず、人が図からどのように形状を理解するかを考える。人は対象が与えられたとき、いろいろな形状の性質を整理して持っている経験的イメージと対象とに本質的な差があるかを調べる。人が図を見て形状を理解するとき、図の小さな一部分ずつを独立にみて理解するのではなく、自分のもつイメージの濃淡変化と、どのように違うかを見分けることを行う。これにより、人は濃淡から形状のふくらみや、へこみを理解できる。

図-1は平面的な図に、シンボリックにハイライトを加えたものである。図の一部分に特徴的なハイライトを加えることにより、立体的な感じを表現している。このように、絵に人が手を加えることによって、3次

元的に表現することは広く行われている。

図-2は顔の絵である。この例のような形状を表現するために、3次元モデルを計算機内部に作ることは困難である。濃淡付けを行い、立体感を出す方法は、簡略的で有効である。

これらの例においては、多数の人が幾何学的に正確に形状を認識しているとはいえない。

これに対して、図-3に示すような立体を見たとき、その一部が球面であるとか、円柱面であるとかというように、区別をつけることができる。これから、円柱面・球面のような2次曲面は、人が経験的に特徴を整理して、イメージとして持っていると考えられる。

これらの立体では、図に表現された形状と対象に対する認識が対応するので、あいまい性がなくなり、形状理解が容易になる。このため、2次曲面に対して濃淡パターン分類をして、形状の違いを示すことが、理解を助けることに役にたつといえる。

このように、濃淡パターンを作成する目的は、伝えたい形状のいろいろな性質を、人に容易に理解させることである。

図-3は、人が物理法則に従っておよその濃淡をつけたり、線を入れたりして、形状理解を助けるようにしようとした例である。

図-3において形状理解に役立つ点をあげると、

- 1) 円柱部の丸みが、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) 水平面と垂直面が濃度の違いで示されている。
- 4) 光線の一つと考えず、曲面形状を示すために、別の光源を仮定して表現している。
- 5) 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。

これから、3次元形状図作画の基本原理は1)面と面、2)面形状の性質、3)面の位置・方向などを区別できるように適切に表現することであると考えられる。このために、線の挿入、濃淡変化の強調表現が有効である。これらの表現技術をまとめたものを、レンダリングルールという。

4. 形状表現技術

本章ではレンダリングルールについて述べる。

ルールは大きく分けて、次の2つの考え方にもとづくものである。1)陰影・反射モデルを用いて計算し、

濃度を定めることができるが、3次元モデルを必要とし、大変な計算時間がかかるということから、ルール化して簡単に作画しようとするもの。2)陰影計算からは描くことができない特徴の強調、省略を表現法としてまとめるものである。たとえば、面と面の区別を行う線の挿入である。

4.1 面と面の区別

表現された図の中から面と面を区別することによって、人は一つ一つの異なった面として理解することができる。これは図から立体形状を理解するための第1条件である。このために、面の境界を明確に表現することが大切であり、線を追加する方法が有効である。

線は2種類にわかれ、図-4に示すように輪郭線と内形線がある。輪郭線は可視面と不可視面で構成される稜線、内形線は接続する2つの可視面で構成される稜線である。面と面を区別するルールを次に示す。

- 1) 輪郭線は濃く太い線で示す。
- 2) 後方に面のある輪郭線で、2面とも同じくらいの濃度のときは、後方の面に少し濃淡変化をつける。
- 3) ハイライト部の輪郭線は少し薄く細くする。
- 4) 内形線は、光って見えることが多いので、薄い線で示す。
- 5) 凹部で2面とも濃いときの内形線は、それらの面より少し薄い線にする。

これらのルールは図-5の手順で適用される。図-6に作画例を示す。16の面のデータをインタラクティブに入力して、約30分の作画時間であった。

これらの線の表現の特徴を次に示す。

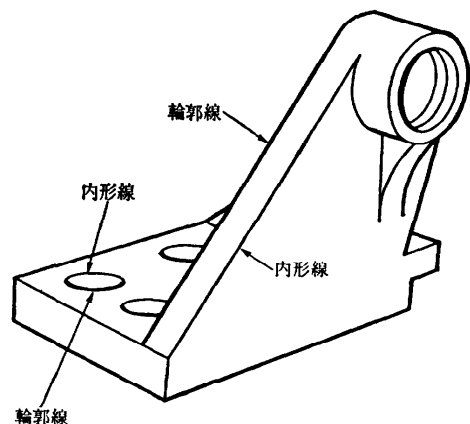


図-4 輪郭線と内形線

Fig. 4 Outlines and inner lines.

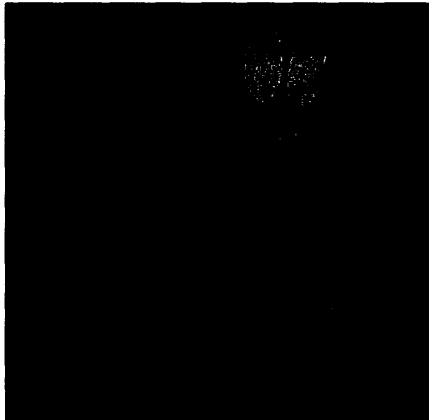


図-1 立体感の表現
Fig. 1 Representation of 3-D shapes.

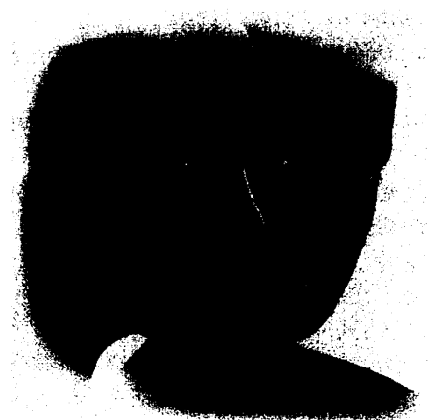


図-2 複雑な曲面の表現
Fig. 2 Representation of an impression of curved surfaces.



図-3 3-D 形状の表現
Fig. 3 Representation of 3-D shapes.



図-6 線の挿入例
Fig. 6 Example of line drawing.

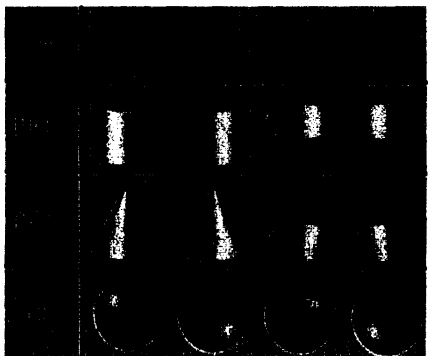


図-7 基本立体の濃淡パターン表現
Fig. 7 Representation of fundamental solids.

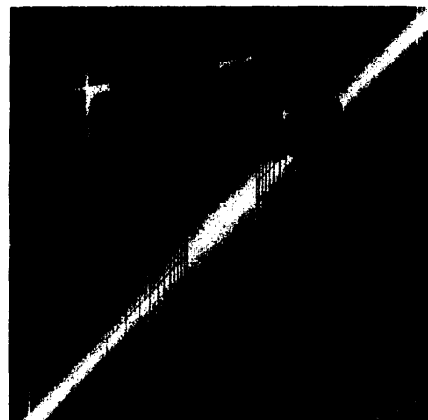
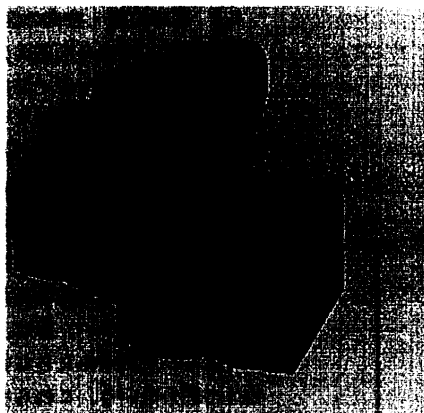


図-12 光線追跡法を利用した例
Fig. 12 Utilization of a ray tracing method.



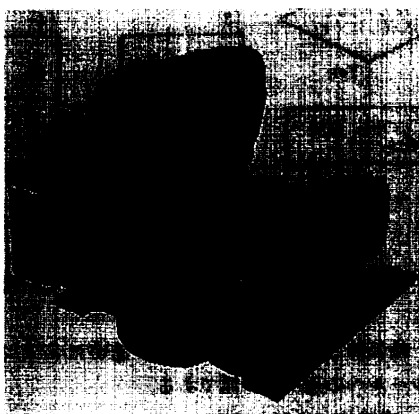
(a)



(b)

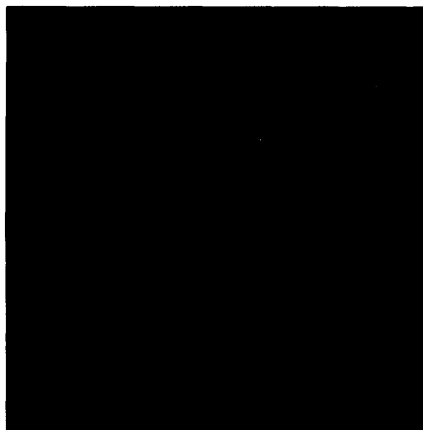


(c)

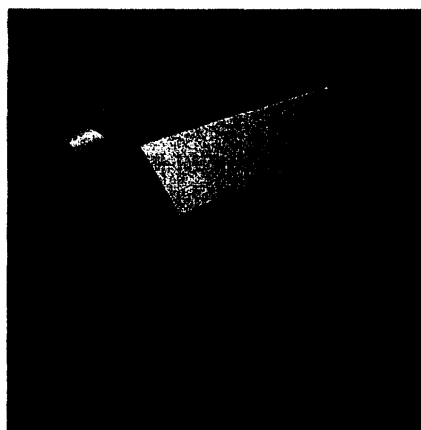


(d)

図-10 レンダリングルールの適用
Fig. 10 Application of rendering rules.



(a) パースエイドと下図



(b) 透視画

図-13 パースエイドを利用した例
Fig. 13 Utilization of pers. aid method.

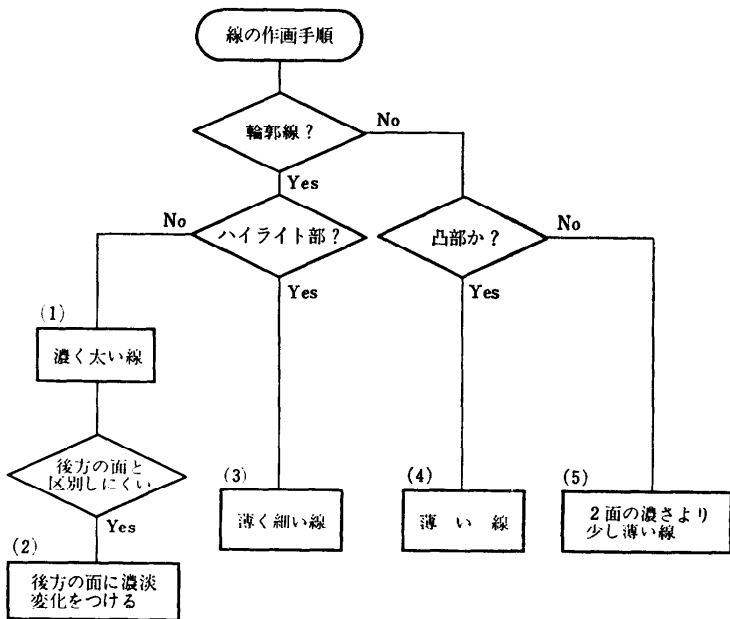


図-5 線の作画手順
Fig. 5 Line drawing procedure.

- 1) 各面の区別を、正確に表現することが可能である。
- 2) 輪郭線と内形線の判定を人が適切に行えるため、ルールへの適用が容易である。

4.2 面形状の性質の区別

面領域内の形状の性質の理解を可能にするルールを次に示す。

1) 立体の面内部を塗りつぶすためには、図-7のような濃淡パターンを用いる。図-7は平面、円柱、円錐、球の濃淡パターンである。光線を数方向に仮定することによって、パターンの数を限定し、作画を容易に行うことを可能とした。たとえば、円柱は、上面の楕円を定義するための3点と、側面の高さ、および、パターンの種類を入力することにより作画できる。

2) 同一面の表裏の違いを表現するためには、濃淡付けを点対称に行う。図-7の円柱の側面と穴の例が、点対称の濃淡付けの例である。

本ルールの特徴を次に示す。

- 1) 濃淡データを計算機内部に持つため、人の技術に左右されることなく、作画が可能である。
- 2) 濃淡パターンを組み合わせることでより、立体表現を効率良く行うことができる。

4.3 面の位置・方向の区別

面の位置・方向を的確に表現するためには、陰・影・反射・奥行きを、濃淡表現によって示すことが大切である。このために濃淡パターンの方向、濃淡幅の指定、濃度演算が必要となる。ここで、陰は対象物体に光線をあてたとき、光線のあたらない物体部分をいい、影は、物体に遮られ光線が当たらない他物体の部分という。これらを指定する手順を図-8に示す。これらの表現を、次のようにまとめた。

- 1) 面の傾きを示すには、濃淡変化の方向を指定する。このために、仮定する光線に対する面内の垂直線を基準にする(図-9)。反射光も同様に取り扱う。
- 2) 面の奥行きを示すには濃

- 淡幅を大きくする。
- 3) 仮定する光線に面が平行、または表示面に平行に近くなるほど濃淡幅を小さくする。

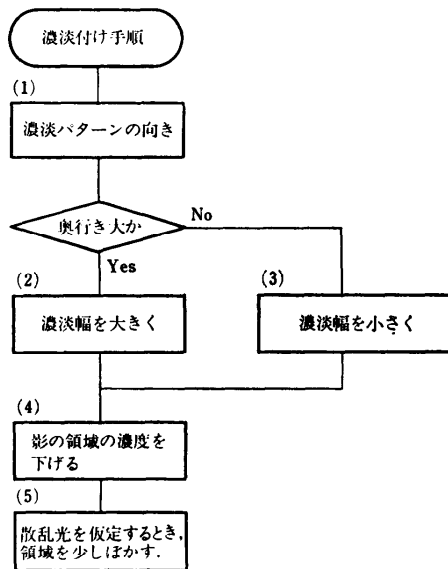


図-8 濃淡付け手順
Fig. 8 Shading procedure.

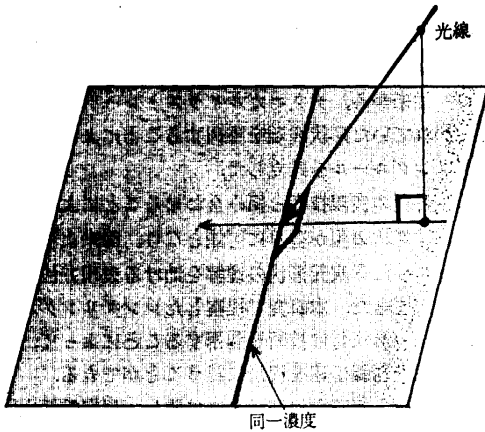


図-9 濃淡パターンの向き
Fig. 9 Direction of shade pattern.

4) 姿勢を示すには影の領域のすでに描かれている濃度を一定だけ下げる。これによって、強い光線の影が表現できる。

5) 仮定する光線が弱い散乱光のときには境界を少しぼかす。このためには、影の領域周辺の色に徐々に濃淡を変化させる。

このルールによって、対象の各面や全体の形を明確に表現することが可能となる。

5. 作画実験

5.1 作画例

レンダリングルールの評価のために、図-10に、ルールの適用を変えてみた例を示す。これらは写真をもとに、人が輪郭データを入力し、レンダリングルールを以下の図(a)から図(d)の順に適用し、作画したものである。

図(a)は、各面に濃淡パターンを利用し、作画したものである。これによって平面、円柱の感じをつかむことができる。しかし、この図からみてもわかるように、面の境界の区別がつきにくい部分がある。

図(b)は、輪郭線を濃い線で示した。内形線もここでは濃い



図-11 ワイヤフレームを利用した例
Fig. 11 Utilization of a wire frame method.

線を用いた。

図(c)は、内形線をうすい線で、楕円は濃淡変化のある線を用いて面の境界を示した。

図(d)は、影の領域を少し濃度を下げることにより、はっきりと示し、強い光線の感じを表現した。

これにより、形状伝達のための表現には、レンダリングルールが有効であるといえる。

次に、立体表示機能を用いた実験例を示す。図-11はワイヤフレーム表示した透視図をもとに彩色し、透視画としたものである。

図-12は、光線追跡法によって作画した文字の例に、ハイライトと背景を加えたものである。このよう

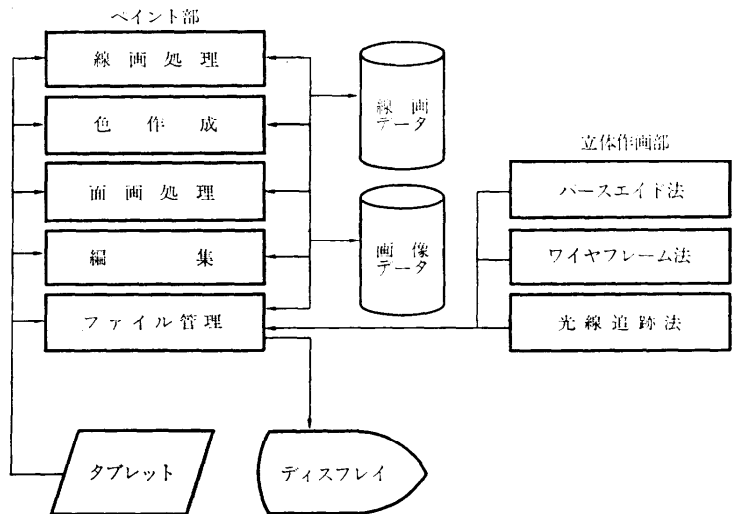


図-14 CARP の機能構成
Fig. 14 Structure of CARP rendering system.

に反射モデルでうまくいかないと、人がレンダリングシステムを用いて修正することで、2つの技術の特徴を生かし、より理解しやすい形状表現が行える。

パースエイドを用いて作成した例を、図-13に示す。図-13(a)がエイドをもとに作画した下図で、図-13(b)が下図をもとに濃淡付けしたものである。

これらの結果、インタラクティブレンダリング手法、3次元モデルを用いた表示技術を組み合わせることによって、より効果的な形状表現が行えるようになった。

5.2 レンダリングシステム CARP の概説

前述の作画実験に用いたレンダリングシステム CARP について概説する。CARP の機能構成を図-14に示す。

a) 線画機能

輪郭作成機能は折れ線、スプライン曲線、円、楕円、矩形、水平、垂直線、ベジェ曲線がある。線画作成の補助としてグリッド機能、セグメント機能がある。

b) 色作成機能

利用する色を作成する方法として基本色選択、カラーバーによる作成、色表変換がある。色演算は色データの和、差、平均がある。

c) 面画機能

面画作成機能は単色塗りつぶし、中間写像による濃淡付け、補間による濃淡付け、図形変換による濃淡付けがある。さらに、ブラシ機能は色置換、色合成、エアブラシ、ぼかしなどの機能がある。面画作成機能の補助手段としてマスク機能、画像データ消去がある。

d) 変換機能

線画、面画の平行移動、回転、拡大、縮小、鏡映変換、および、色変更しながら変換する機能がある。

e) ファイル管理機能

画像データ、線画データの保存、再生を行う。さらに、入力した手順を記録し、実行することもできる。

これらの機能を利用することによって、本論文で示したような図が容易に作画できる。

6. 結 論

本研究では立体形状の理解を容易にするための表現

方法を考察し、作画の基本原則を示した。これをもとに作画アルゴリズムをまとめ、作画実験を行った。

この結果、

1) 従来から、テクニカルイラストレーション分野で行われていた形状表現を整理することによって、レンダリングルールを確立した。

2) 各種の表現技術と組み合わせることによって、質の高い形状表現が容易に可能となり、従来より課題となっていた3次元形状の理解を助ける表現方法を示すことができた。本研究で提案したレンダリングルール、および濃淡付け技術を利用することによって、3次元形状の情報伝達を円滑に行うことができる。

謝 辞 本研究の進行全般に関し、東京電機大学穂坂衛教授にご指導を賜りました。東京大学長島忍助手には、3次元ワイヤモデルの表示について援助をいただきました。また、笹徳印刷(株)の皆様には作画実験にご協力いただきました。

参 考 文 献

- 1) Kitching, A.: ANTICS-Graphic Animation by Computer, Computer & Graphics Vol. 2 (1977).
- 2) 安居院, 他: コンピュータアニメーション, 産報出版, p. 89 (1983).
- 3) Beach, R. J. and Beatty, J. C.: The Message is the Medium Multprocess Structuring of an Interactive Paint Program, SIGGRAPH '82, (July 1982).
- 4) Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shading Display, Communication of the ACM, 23, 6, pp. 343-349 (1980).
- 5) 高木, 他: 色分散を考慮した光線追跡の一方法, 情報処理学会グラフィクスと CAD シンポジウム, pp. 81-88 (Dec. 1984).
- 6) Gouraud, H.: Computer Display of Curved Surfaces, Utah University, Computer Science (June 1971).
- 7) 近藤, 木村: 曲面の形状感の表現 第1報中間調を用いた図の作成 精密機械 Vol. 49. No. 12.
- 8) 近藤, 田嶋: モダングラフィクス, コロナ社 (1982).
- 9) 磯田, 長島: 教育用3次元図形処理プログラムの開発, 図学研究, p. 17 (1982).

(昭和60年7月1日受付)