

多重構造物の断面輪郭線からの再構成と半透明手法による 内部構造のステレオ表示†

中前 栄八郎^{**} 原田 耕一^{**} 金田 和文^{**}
安田 峯生^{***} 佐藤 明直^{***}

多重構造をもつ物体をいくつかの断面に切断したときの輪郭線からもとの物体を再構成し、その外形のみならず内部構造も含めて表示を行うことは、物体の構造を詳細に観察するうえで重要な問題である。本論文は、多重構造物の輪郭線を用いてその物体を再構成する方法、および再構成物体の擬似半透明表示による立体視法を提案する。すなわち、前者に対しては、(1)多重の輪郭線から物体を再構成する際、上下の断面の輪郭線の繋り関係を求めるための階層をなすデータ構造、(2)物体要素が溝をなして分岐する場合でもユーザの介入なく、微小な三角形要素によって物体を再構成できる方法、(3)上下の断面の輪郭線の形状が大きく相異している場合でも適切な物体再構成ができる手法を提案する。また、後者に対しては、(1)その表面を擬似的に着色した半透明な面としてステレオ表示し、(2)物体を構成する多数の微小な三角形を断面によってグループ分けすることにより、前後判定に要する時間を大幅に短縮する方法、(3)観察に適した半透明感のある画像を得るために、面の法線と視線のなす角の余弦に反比例して面の色を決定する方法、(4)物体要素を選択して表示する機能と、表示の際のパラメータを適切に変えることにより、観察目的に合った画像を得る方法を提案する。マウス胚子の発生過程の観察に適用することにより、本手法の有用性を示す。

1. ま え が き

種々の異なる性質の要素から構成される物体をいくつかの断面に切断したとき、その断面はこれら要素の輪郭線から成る。これらの輪郭線を利用して物体を再構成し、その物体の外形のみならず内部の構造も人間が理解しやすいように表示を行うことは、物体の構造を詳細に観察するうえで重要である。このことがとくに解剖学の生物発生過程の研究において望まれている。すなわち、ある生物の外形のみならず、その内部構造物の形状を観察するために、従来は、その生物を非常に薄くスライスした何枚もの断面写真を観察し、おのおの断面の情報から人間が頭のなかで立体像を想像して組み立てるか、人手によるスケッチにより透視図を作成してきた。しかし、その内部構造が複雑な場合には、これらの方法では十分な観察は不可能である。そこで、計算機を用いて断面上の輪郭線から物体を再構成し、内部構造も一目で理解できるような表示を行うことができれば、複雑な構造をもった生物でも容易に詳細な観察を行うことができる。本論文は、多重構造物の擬似半透明表示による立体視法を提案する

もので、マウス胚子の発生過程の観察に適用し、その有用性を示す。

物体の各断面上の輪郭線から、もとの物体の表示画像を得るための手順は、一般に、(1)断面からの輪郭線の抽出、(2)輪郭線からの物体の再構成、(3)再構成された物体の表示、の三つのステップに分けられる。

(1)については、断面画像にしきい値を設けて図形成分を抽出し、その輪郭線を求める手法が一般に用いられている¹⁾。(2)については、輪郭線間を三角形パッチで埋め、物体表面を再構成する手法が広く用いられている。その代表的なものとして、Fuchs らのグラフ理論を用いた三角形化手法がある²⁾。しかし、Fuchs らの手法は、断面間に分岐、合流がある場合の処理が解決されていない。これに対して、Christiansen らの三角形化手法は、分岐、合流の処理方法を示し、アルゴリズムも簡単で、上下の断面の輪郭線に大きな変化のない場合は、すぐれた三角形化が行える³⁾。(3)については、グラフィックディスプレイ上に、再構成された物体を三次元陰影表示する手法があげられる⁴⁾。また、物体の内部構造がわかるように、物体の任意の断面での切り口をあわせて表示する手法も提案されている⁴⁾。しかし、その物体内部の構造を一目で理解するには、物体要素の表面を半透明な面として表示する手法がすぐれている^{5),6)}。この半透明表示の手法は、従来の陰影値を用い、背後の物体の色と半透明表示する

† Reconstruction and Semi-Transparent Stereographic Display of an Object Consisting of Multi-Surfaces by EIHACHIRO NAKAMAE, KOICHI HARADA, KAZUFUMI KANEDA (Faculty of Engineering, Hiroshima University), MINEO YASUDA and AKINAO SATO (School of Medicine, Hiroshima University).

** 広島大学工学部第二類 (電気系)

*** 広島大学医学部第一解剖学教室

物体の色を一定の割合で混ぜ合わせる方法がよく用いられている⁷⁾。しかし、この手法では半透明感の乏しい画像しか得られないので、面が視線方向に垂直な部分は透明度が高く、周辺部分の面が視線に平行に近くなるほど透明度が低くなる透明度パラメータを用いる手法も提案されている⁸⁾。

本論文では、(1)については、断面写真中に画像処理手法により自動的に輪郭線を抽出することがきわめて困難な部分が存在しているので、タブレットにより人間が輪郭線を入力する方法を採用する。(2)については、Christiansenらの手法に次の3点の改良を加えた。すなわち、

- 1) 任意の数の輪郭線が多重構造を構成していても、物体を再構成することができる。
- 2) 三角形のパッチを生成する際、上下二つの断面の輪郭線間に分岐、合流がある場合でも、ユーザの介入なしに行うことができる。
- 3) 上下二つの断面の輪郭線の形状が急激に変化する場合でも適切な三角形化が行える。

また(3)については、現実に則した半透明表示が必ずしも観察に適したものではないため、物体の内部構造を把握しやすいような半透明表示を行う。すなわち、半透明感を強調し、さらに物体内部の要素の形状もわかりやすく表示を行うため、物体の正面部分の色を抑え、輪郭部分へ行くほど、その物体要素の色が濃くなるように、面の法線と視線とのなす角の余弦に逆比例して面の色を決定する。また、物体の要素を構成する面の透過率を必要に応じて変化させたり、物体の任意の要素を選択的に表示する機能を備え、これらを効果的に使うことにより、観察に適した表示が行える。このような方法で、右眼、左眼に対する2枚の画像を出力し、それらを立体視することにより、物体内部の三次元的構造も容易に把握できる。

以下に、物体の再構成法と、再構成された物体の表示法について述べ、適用例をあげてその有用性を示す。

2. 輪郭線からの物体の再構成

2.1 多重輪郭線を扱うためのデータ構造

Christiansenらの物体再構成手法は、上下二つの断面の輪郭線に大きな変化がないことを条件としている。そのため、上下の断面の輪郭線に対して、それぞれ輪郭線を内包する x, y 軸方向に辺をもつ長方形の重なり具合から繋りを判断している。しかしながら、

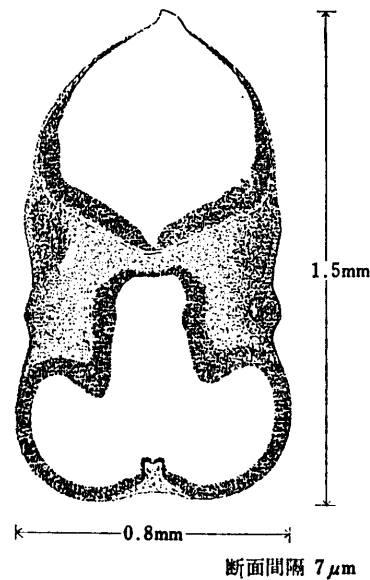


図1 マウス胚子の頭部断面写真
Fig. 1 Sectional photograph of mouse's embryo.

多重となった輪郭線に対しては、この方法を使うことはできない(図1参照)。そこで、このような多重となった輪郭線も処理できるようなデータ構造を採用する。すなわち、物体を頂点として物体要素、小物体、輪郭線、輪郭点の順に階層構造をなす。ここで物体要素は、物体を構成している互いに性質の異なる要素であり、小物体は、その物体要素の分岐、合流が生ずる区間である。また、輪郭線は各断面上の物体要素の輪郭であり、輪郭点は、その輪郭線を構成する点である(図2参照)。このようなデータ構造を用いることにより、輪郭線が多重となった場合でも、上下の断面の輪郭線の繋りは、その輪郭線の属している小物体を調べることにより、容易に求められる。また、物体要素の分岐、合流に対しては、それぞれの小物体の繋り関係だけを与えればよい。

したがって、ユーザは各輪郭線の繋りを各断面ごとに与える必要はなく、輪郭線をタブレットを用いて入力する際に、その輪郭線の属する小物体を指定するだけでよく、その他の手数は必要としない。

2.2 特殊な分岐における自動処理アルゴリズム

生物体をスライスした断面の輪郭線においては、図3のように溝をなして分岐する場合がしばしば発生する。このような場合には、Christiansenらは、次の処理方法を示している。たとえば、図3において、上部断面の分岐した二つの輪郭線 T_1, T_2 について、その外側の輪郭部に属している $A-B-C-D-E-F-$

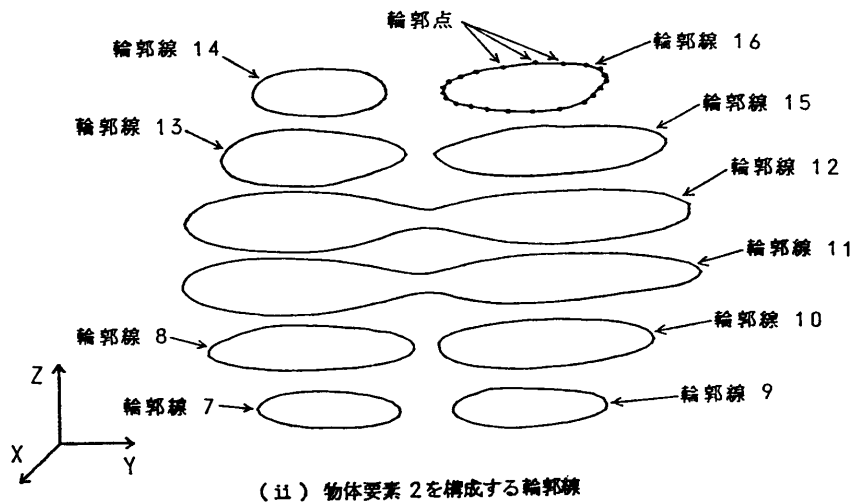
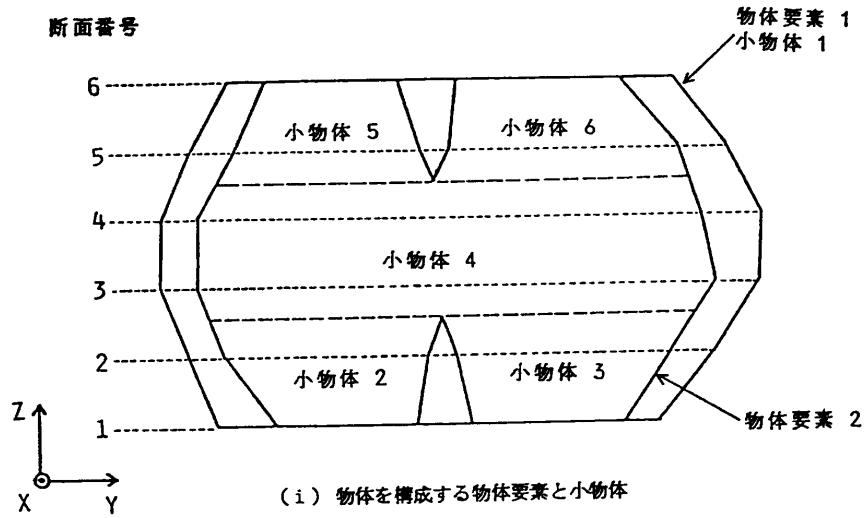


図 2 階層構造をなすデータ構造
Fig. 2 Hierarchical data structure.

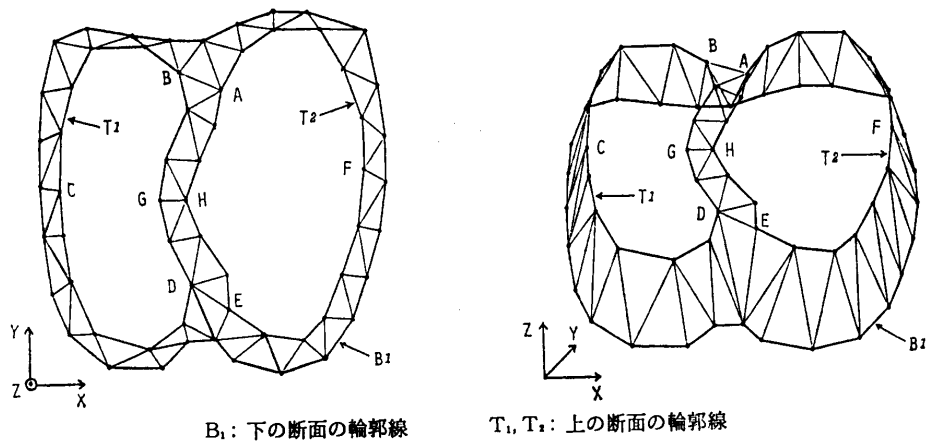
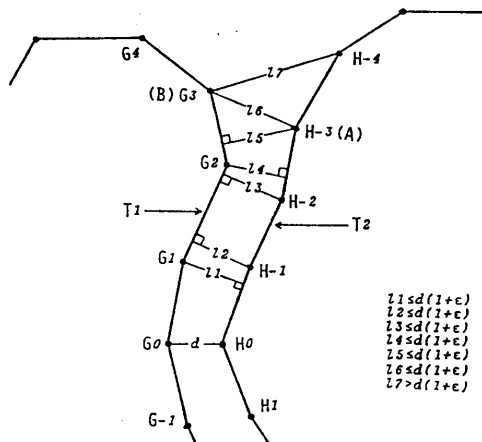


図 3 溝状分岐の処理方法
Fig. 3 Process dealing with gap branch.



T₁, T₂: 溝状分岐した上の断面の輪郭線

図4 分岐点A, Bの探索方法

Fig. 4 Process searching for branch point A and B.

Aのループを作り、これと下の断面の輪郭線 B₁ との間に三角形パッチを発生する。次に、セグメント B—G—D と A—H—E 間に三角形パッチを発生する。この処理により、溝状の分岐(合流)をする場合も物体を再構成することが可能となる。しかし、この場合、点 A, B, D, E を人為的に与える必要がある。そこで、このような分岐(合流)の処理を自動化し、ユーザの労力を軽減するために、点 A, B, D, E を探索するアルゴリズムを以下に提案する(図4参照)。

- (1) 輪郭線 T₁ と T₂ が一つの単位面積の正方形に内包するようにスケール変換を行う。
- (2) 輪郭線 T₁ と T₂ の間の最短距離を与える輪郭点 G₀, H₀ を探し、その距離を d とする。
- (3) i ← 0, j ← 0 とする。
- (4) G_i, G_{i+1} を通る直線に対して、点 H_{-(j+1)} からおろした垂線が線分 G_iG_{i+1} 内に落ちる場合は(5)へ。線分内に落ちない場合は(6)へ進む。
- (5) 垂線の長さ l が l ≤ d(1+ε) (ε は許容範囲) のときには、j ← j+1 とし(4)へ。l > d(1+ε) のときは、G_i を B, H_{-j} を A とし終了する。
- (6) H_{-j}H_{-(j+1)} を通る直線に対して、点 G_{i+1} からおろした垂線が線分 H_{-j}H_{-(j+1)} 内に落ちる場合には、(7)へ。線分内に落ちない場合には(4)へ帰る。
- (7) 垂線の長さ l が l ≤ d(1+ε) のときには、i ← i+1 とし(6)へ。l > d(1+ε) のときは、H_{-j} を A, G_i を B とし終了する。

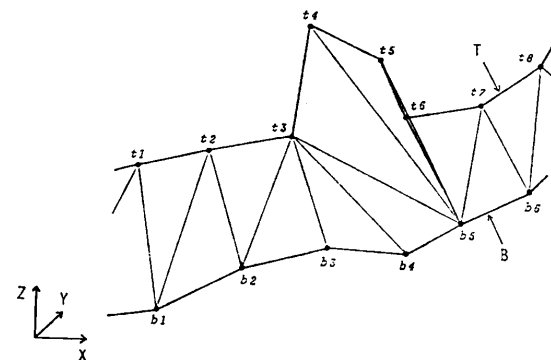
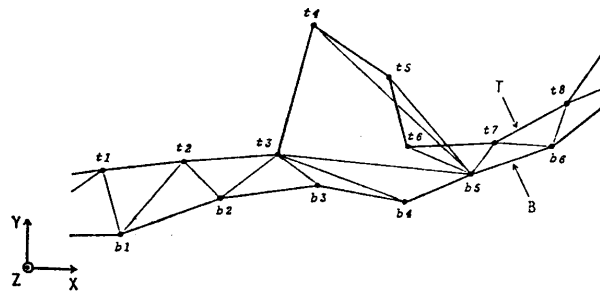
ただし、(4), (6)のステップにおいて、ともに垂線が線分内に落ちなくなった場合には、ステップ(8)へ移る。

- (8) 点 H_{-(j+1)}, G_{i+1} のそれぞれから最短の距離にある相対する輪郭点 G_k, H_{-k} を探し、二者のうち短いほうの距離 l が l > d(1+ε) ならば、G_i を B, H_{-j} を A とし終了する。l ≤ d(1+ε) ならば、 $\overline{H_{-(j+1)}G_k} \leq \overline{G_{i+1}H_{-k}}$ のとき j ← j+1, i ← k とし、 $\overline{G_{i+1}H_{-k}} \leq \overline{H_{-(j+1)}G_k}$ のとき i ← i+1, j ← k' とし(4)へ帰る。同様に、点 D, E を探索する。

適切な許容範囲 ε を選ぶことにより、上述の手法を用いて、点 A, B, D, E を自動的に求めることができる。

2.3 断面間で大きな変化をもつ輪郭線に対する三角形化手法

Christiansen らの三角形化手法は、上下の断面の輪郭線間の変化が小さい場合には、すぐれた物体を再構成することができる。しかし、輪郭線間の変化を小さくするには、断面間隔を小さくし、かつ輪郭線を取り込む際に輪郭点を密にとらなければならない。これは、複雑な物体の全体像を観察しようとする場合に、データ量が増加し、処理時間も長くなる。そこで、三角形パッチを構成する際に、そのパッチが妥当なもの



T: 上の断面の輪郭線 B: 下の断面の輪郭線

図5 Christiansen らの三角形化手法に形状の相異の大きな輪郭線を適用した例

Fig. 5 Application of Christiansen's method to contours having remarkably different shapes each other.

であるかをチェックしながら三角形化を行うことにより、輪郭線間にかなりの変化がある場合でも三角形化を適切に行うことができるアルゴリズムを提案する。

Christiansenらの三角形化手法では、上下の輪郭点の最も近いものから出発し、次の輪郭点までの距離の短いほうをとることにより三角形のパッチを構成する。そのため、上下の断面の輪郭線の形状にかなりの相異がある場合、断面上部から見ると、図5のように三角形のパッチが互いに交差する不自然なパッチが構成される。また、左回りに三角形化を行う場合と、右回りに三角形化を行った場合とでは、再構成された物体の形状が大幅に異なるという不都合が生じる。

このような不自然な形状の三角形パッチが構成される時は、一つの輪郭点が数多くの三角形パッチにより共有されている。また、相対する輪郭点を結ぶ線分の長さが、本来結ばれるべき輪郭点間の距離よりも大きくなる。そこで、これら2点を考慮して、不自然な三角形パッチが構成されるのを防ぐために、三角形化の際に以下の条件を課す。

【条件】 同一輪郭線側に2頂点をもつ三角形パッチが共通の辺をもつ場合、その辺の長さは三角形パッチの同一輪郭線側にある2頂点による底辺側の共通点から、その近傍の相対する側の輪郭点までの線分のなかで最短距離である。

この条件により、図5の線分 b_4t_3 は、線分 b_4t_5 よりも長いために t_3 と t_4 は結ばれず、 b_3 と t_4 が結ばれる。このようにして三角形化を行った結果は、図6となり適切な三角形パッチを構成する。

3. 半透明ステレオ表示

3.1 処理手順

前節で述べた手法により再構成された三次元物体を、その内部構造が容易に把握できるように、物体要素の表面を擬似的に着色した半透明な面として表示を行う。この手順は概略次のステップから成る。

- (1) 眼の位置、および注視点の設定
- (2) 三角形の各頂点の透視変換⁹⁾
- (3) 物体を構成する三角形の面の前後判定
- (4) 三角形の面の色の決定
- (5) グラフィックディスプレイ上への表示

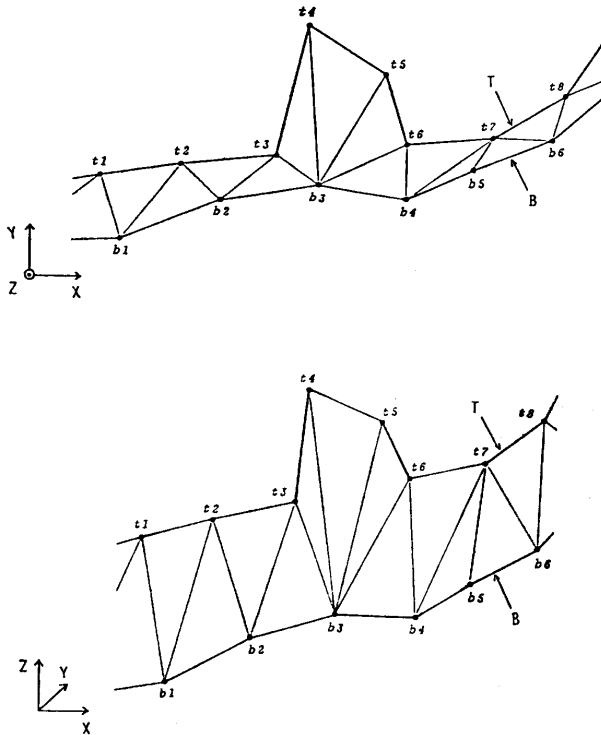
なお、ステレオ表示を行うために(1)~(5)のステップを右眼と左眼について繰り返す。

以下、(3)、(4)のステップについて詳述する。

3.2 面の優先順位テーブルの作成方法

眼の位置から見て、重なった面の後ろのものほど明るさを落とすために、面の前後判定が必要となる。本システムにおいては、すべての面を優先順位(眼に近いものほど優先順位は高いものとする)に並べたテーブルを作成する。ここで、各物体要素の表面は多数の微小な三角形の面により構成されているため、透視面に投影された場合、一つの三角形と重なる三角形はきわめて少数である。したがって、すべての三角形の面について一度に前後判定を行い、優先順位テーブルを作成することは無駄であり、処理時間も非常に長くなる。

そこで、物体を構成する面を図7に示すように各断面ごとにグループ分けする。このグループの優先順位は、眼の位置が与えられればきわめて簡単に求まる。たとえば、図7のように眼の位置の x 座標成分が断面間 i に存在すれば、グループの優先順位は i が最も高く、 i から上あるいは下へ遠ざかるにつれて優先順位は低くなる。そして、このグループの優先順位に従い、そのグループ内に存在する面の前後判定を行い、



T: 上の断面の輪郭線 B: 下の断面の輪郭線

図6 条件を課した三角形化手法に形状の相異の大きな輪郭線を適用した例

Fig. 6 Application of proposed method to contours having remarkably different shapes each other.

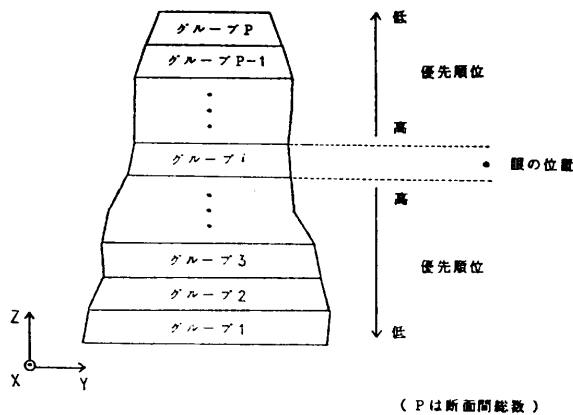


図 7 断面ごとにグループ分けを行う前後判定

Fig. 7 Judgement of priority by means of sectional partition.

テーブルに優先順位の高い面から、その面番号を格納する。

このように、物体を構成する面が各断面によりグループ分けでき、そのグループの優先順位もきわめて簡単に求まる性質を利用することにより、優先順位テーブルの作成時間を大幅に短縮できる。

3.3 表示の際の面の色の決定

従来の現実に則した半透明表示手法が、必ずしも観察に適した画像を生み出すものではないために、物体内部の要素を容易に把握できる仮想的な半透明モデルを設定し、それを用いて面の色の決定を行う。

(1) 半透明感を強調し、かつ物体要素の形状を把握しやすくするために、物体要素の正面部分の色を抑え、周辺部へ行くほど、その要素の色が濃くなる関数 $1/\cos\theta$ を用いる。ただし、 θ は面の法線と視線のなす角である。このモデルにより各面の色成分は、次式

で決定する。

$$I_{k\theta} = I_{k0} / \cos(\theta - \alpha) \quad (k=R, G, B) \quad (1)$$

ここで、 $I_{k\theta}$ は面の色成分、 I_{k0} は $\theta = \alpha = 0$ のときの面の色成分、 α は面の明るさの位相を変化させるパラメータ角である。

(2) 眼の位置から見て重なり合う物体要素の前後関係を明らかにするため、各面の明るさは物体要素 i を構成する面を 1 回通過すると、どの色成分も t_i 倍となる。ただし、 t_i は物体要素 i の透過率である。

(3) 各物体要素の前後関係をわかりやすくするために、物体を取りまく媒質中において、面の明るさは距離の 2 乗に比例して減衰する。

したがって、各面の色成分 I_k は、透過率と距離による減衰により次式となる。

$$I_k = K(I_{k0}/r^2) \prod t_i \quad (k=R, G, B) \quad (2)$$

ここで、 K は補正係数、 r は任意に設定された基準点から面までの距離。

このモデルの妥当性を確かめるために、簡単な円筒モデルを半透明ステレオ表示し、その立体視を行った。その結果、得られた画像は十分半透明感があり、物体の三次元的構造も容易に捕えることができた (図 8 参照)。

物体を三角形パッチのまま、グラフィックディスプレイ上へ表示すると無用の皺を生ずる。これを防ぐために、各頂点での法線ベクトルをその頂点を取り囲んでいる面の法線ベクトルの平均値とし、三角形パッチ内の法線ベクトルを、その 3 頂点の法線ベクトルから線形補間して求める Gouraud のスムーズシェーディング¹⁰⁾の手法を適用する。

3.4 各種の表示効果とその適用例

前節で述べた半透明表示手法を用いて、多重構造物を内部構造も含めて効果的に観察を行うための表示方法について、マウスの胚子の頭部の表示例をあげて説明する。なお、この表示例は 12 枚の断面より再構成されたもので、四つの物体要素より構成されている。

まず、物体全体を内部構造も含めて観察しやすくステレオ表示を行ったものを図 9 に示す。この例では、面の明るさの位相を変化させるパラメータ角 α をゼロ、物体要素の透過率 t_i ($i=1\sim 4$) をすべて 0.6、距離による減衰の割合を制御する基準点を眼の位置と物体との中間点

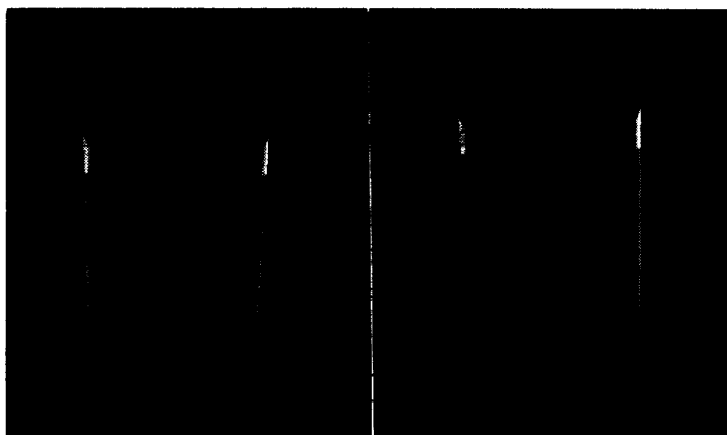


図 8 円筒モデルの半透明ステレオ表示

Fig. 8 Semi-transparent stereographic display of cylindrical models.

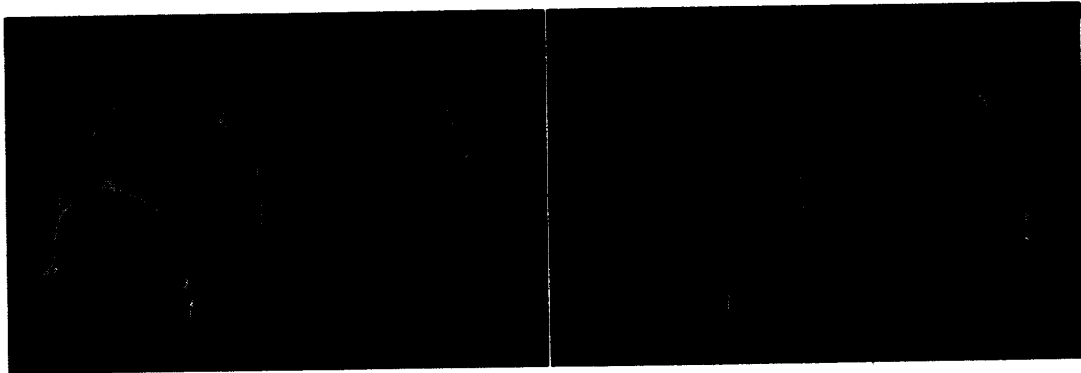


図 9 半透明ステレオ表示例
Fig. 9 Semi-transparent stereographic display of mouse's embryo.



図 10 面の明るさの位相を変化させた表示例
Fig. 10 Changing phase of brightness.

に設定している。

この表示の場合、物化要素の正面部分が観察しにくい場合がある。その場合には、半透明感は多少損われるが、面の明るさの位相を変化させるパラメータ角 α を 90° に近づける。図 10 に示すように、物体表面の形状がわかりやすい画像が得られる。

次に、物体内部の要素の多重度が低い場合には、透過率は小さな値でよい。しかし、要素の多重度が増し、内部の物体要素まで観察する場合は、透過率を大きくする。このとき、透過率をあまり大きくしすぎると物体要素の前後関係が把握しにくくなるため注意を要する。また、内部にある特定の要素に注目する場合、その要素の透過率をゼロに近づけると、その物体要素が観察しやすくなる。透過率をゼロとすると、当然のことながらの物体要素は完全な不透明体となる。

物体が奥行方向に長い形状で、とくに前面部分を観察する場合、後方の面により観察しにくくなる場合がある。そのような場合は、基準点を眼の位置に近づけると、距離による減衰効果が強まり、後ろの部分に感わされることなく観察ができる (図 11 参照)。



図 11 距離による減衰効果の表示例
Fig. 11 Diminishing effect of distance.

特定の物体要素の形状を観察したい場合、その物体要素のみを抽出して表示するとよい。その際、その物体要素の透過率をゼロとして不透明体とし、面の明るさの位相を変化させるパラメータ角 α を 90° に近づけて表示を行うと、従来の陰影表示に相当する画像が得られ、形状の把握が容易となる (図 12 参照)。また、物体から複数の任意の物体要素を除いて表示を行うことも可能である。

空間上における物体内部の要素の位置をより正確に観察する際には、図 13 に示すような三次元スケールをあわせて表示することにより、位置の数量的把握も可能である。

以上の機能を組み合わせて使うことにより、観察に適した表示画像を得ることができる。

なお、本報告に使用した計算機は、TOSBAC データシステム 600、グラフィックディスプレイは Graphica

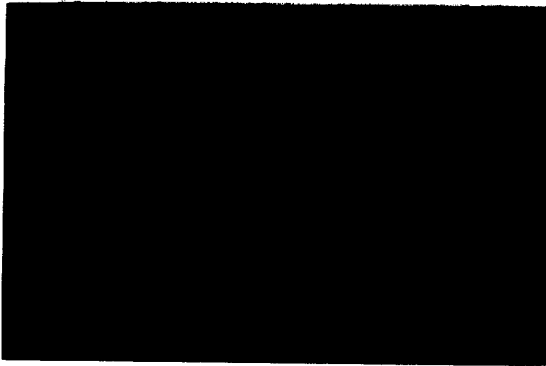


図 12 物体要素抽出表示例
Fig. 12 Depicting an object-element.

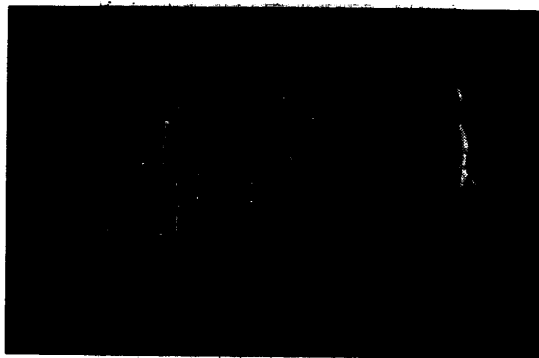


図 13 三次元スケール表示例
Fig. 13 Displaying an object with together three dimensional scale.

M 508 である。また計算時間は、図 9 の例においては物体再構成において約 15 秒、半透明ステレオ表示(画像 2 枚分)において約 12 分であった。

4. む す び

断面上で多重な輪郭線を形成する物体を再構成し、半透明ステレオ表示を行う方法について述べた。

輪郭線から物体を再構成するステップにおいては、分岐、合流をもたない小物体の概念を導入したデータ構造を用いることにより、幾重にも重なり合った輪郭線から物体を再構成することができる。また、溝状の分岐、合流をもつ物体要素の輪郭線も、2.2 節で提案した手法を用いることにより、ユーザの介入を必要とせず処理が可能となった。さらに、三角形パッチを構成する際に簡単な手順により、上下の断面の輪郭線の形状に大きな相異がある場合でも、適切な三角形化を行うことができることを示した。

再構成された物体の表示のための面の色を決定する

際に(2)式を用いることにより、観察に適した半透明率のある表示画像を得ることができる。また、透過率、距離による減衰などのパラメータを変化させることにより、また物体要素を選択的に表示する機能を用いることにより、観察目的に適した表示を行うことができる。

謝辞 本研究の一部は放送文化基金の助成援助によるものであり、これに感謝する。

参 考 文 献

- 1) 萬, 横井, 鶴岡, 三宅: ラスタ型グラフィックディスプレイによる頭部 CT 像の三次元表示の一方法, 情報処理学会, コンピュータビジョン研究会, 14-1 (1981).
- 2) Fuchs, H. et al.: Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours, *Comm. ACM*, Vol. 20, No. 10, pp. 693-702 (1977).
- 3) Christiansen, H.N. et al.: Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics, *Proc. ACM SIGGRAPH '78*, pp. 187-192 (1978).
- 4) Robb, R.A. et al.: Quantitative Imaging of Dynamic Structure and Function of the Heart Lung and Circulation by Computerized Reconstruction and Substruction Techniques, *Proc. ACM SIGGRAPH '76*, pp. 246-256 (1976).
- 5) Sungunoff, A. et al.: Computer Generated Image for Medical Applications, *Proc. ACM SIGGRAPH '78*, pp. 196-202 (1978).
- 6) 萬, 横井, 鶴岡, 三宅: ラスタ型 GD による頭部 CT 像の三次元表示(2), 情報処理学会, コンピュータビジョン研究会, 19-7 (1982).
- 7) Newell, M.E. et al.: A New Approach to the Shaded Picture Problem, *Proc. ACM Nat. Conf. '72*, pp. 443-450 (1972).
- 8) Kay, D.S. et al.: Transparency for Computer Synthesized Images, *Proc. ACM SIGGRAPH '79* pp. 148-164 (1979).
- 9) Yamashita, H., Harada, K., Nakamae, E. et al.: Stereographic Display on Three Dimensional Magnetic Field of Electromagnetic Machines, *Trans. IEEE*, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4692-4697 (1981).
- 10) Foley, J.D. et al.: *Fundamentals of Interactive Graphics*, pp. 580-584, Addison-Wesley Publishing Co., Reading (1982).

(昭和 58 年 11 月 11 日受付)

(昭和 59 年 9 月 20 日採録)