

ボリュームレンダリングについて

中嶋 正之

東京工業大学工学部像情報工学研究施設

あらまし 従来の多くのレンダリング法は、主として、平面で近似された幾何的なデータから構成される立体に対して、CG画像を生成する技法であった。それに対して、ボリュームレンダリングは、3次元空間内に分布しているデータを、分かり易くディスプレイ表示するもので、主にCTにより得られた医用データの画像表示処理法として提案されたレンダリング技法である。ボリュームレンダリングは主としてCT画像を対象に研究がなされているが、CTデータのみならず、3次元空間内に分布する温度、密度、風力等の観測データから工学や科学の分野における濃度分布等の測定データ等も対象とされる極めて有効な方法である。本チュートリアルでは、第3章においてボリュームレンダリングの基本である断層データの各種のレンダリング法を紹介し、第4章では、断層データから幾何データである平面パッチを構成した後、従来のレンダリング法を利用するボリュームレンダリングの初期の方法について紹介し、さらに5章では、狭義のボリュームレンダリング法ともいべき新しい各種のボリュームレンダリング法について紹介する。

Volume rendering algorithm

Masayuki NAKAJIMA

Tokyo Institute of Technology, Imaging Science and Engineering Laboratory.

4259 Nagatuta, Midoriku, Yokohama, 227, Japan

Volume rendering algorithm is a very powerful rendering algorithm for voxel data like CT images and many applications of this algorithm are considered in many kinds of area like science, engineering and medicine. In this tutorial, I introduce this algorithm which has many kinds methods or approaches. At first, I introduce the definition of Volume rendering and fundamental algorithm and I describe the classical volume rendering methods which uses the conversion from voxel data to geometrical data. Secondly, the new methods which can generate the images without the conversion to geometrical data. At last, I show the examples of volume rendering images generated from CT data.

1. はじめに

コンピュータグラフィックスにおけるレンダリング手法としては、1980年代は、並列処理が可能であり、かつ隠面処理が必要でなく、さらに透明物体の表現も可能なレイトレーシング法が盛んに研究がなされた。そして1980年代の後半から注目されているレンダリング法がラディオシティ法とボリウムレンダリング法である。その中で、ボリウムレンダリング法は、従来のレンダリング法とは、与えられるデータ形式が異なるため様々な方法が提案されておりかつ極めて広い応用分野を有する方法である。しかしボリウムレンダリング法は、その定義も曖昧であり、かつきちんと手法をまとめた解説も見あたらないため、あえてチュートリアルとして紹介することにした。

2. ボリウムレンダリングについて

まず始めにボリウムレンダリングという用語について紹介する。

2. 1 3次元CGについて

そもそもCGには、ペイントソフトや、曲線の描画等の2次元平面上でグラフィックス表示を行う2次元CGとさらに奥行き方向のデータも扱う3次元CGに分類され、現在のCGは、主として3次元CGが主流となつて研究されている。

そして3次元CGは、大きく分けてモデリングとレンダリングの過程から構成されており、モデリングでは、対象立体の3次元データをコンピュータ内に蓄積する過程となっており、具体的には、主に幾何的なモデル(ワイヤーフレームモデル、面モデル、ソリッドモデル等)が利用されている。一方レンダリング過程では、コンピュータ内に蓄積されたモデリングデータからスクリーン(ディスプレイ)上に可視画像を生成するもので、透視投影、隠面消去、陰影処理、付影処理等から構成される。

2. 2. ボリウムレンダリングの定義

従来の多くのレンダリング法は、主として、平面で近似された幾何的なデータから構成される立体に対して、CG画像を生成する技法であつた。それに対し、ここで紹介するボリウムレンダリングは、3次元空間内に分布しているデータを、従来のフォーンのモデル等の陰影モデルを使わずに、直接ディスプレイ表示するもので、主にCTにより得られた医用データの画像表示処理法として提案された新しいレンダリング技法である。この手法については、第5章で詳しく紹介する。

さらに現在ではその定義が拡張され、次章で詳しく紹介するが、広く一般に3次元ボクセルデータや多層データで与えられた立体のボクセルデータに対して内部を含めたレンダリング法の総称として使用されている。

すなわち、ボクセルデータに対してテクスチャ解析、いき値処理、輪郭線追跡等の画像処理を施し、画像内部の各種の領域を抽出し、各器官等の立体毎に3角形等の平面近似をほどこした後、従来の陰影処理等のレンダリング法を適用する方法である。

すなわち、ボリウムレンダリングとは、以下の様に定義される。

[狭義のボリウムレンダリング]

非幾何的なデータを直接スクリーンに可視化する方法をいう。

[広義のボリウムレンダリング]

非幾何的なデータに対して、画像処理等の手法を施した後、幾何的なデータに変換した後、内部を含めた3次元データの可視化を行う方法

ボリウムレンダリングは主としてCT画像を対象に研究がなされているが、以上の定義からも明らかな様にCTデータのみならず、3次元空間内に分布する温度、密度、風力等の観測データから工学や科学の分野における濃度分布等の測定データ等も対象とされる。

ボリウムレンダリング法の考え方そのものは古くからあつたが、それが注目され始めたきっかけは、Drebinらが1988年にSIGGRAPHにおいて行った発表である¹⁾。この論文は、断層画像からアーチファクトの少ない立体画像の生成とその効果的な実装方法について述べたもので、従来から多くの類似した論文が発表されているが、ソリッドモデルや表面モデルではないボクセルデータからのレンダリングアルゴリズムとして、ボリウムレンダリングという用語を全面的に押し出して発表したことにより注目されることになった。

本チュートリアルでは、第3章においてボリウムレンダリングの基本である断層データの各種のレンダリング法を紹介し、第4章では、断層データから幾何データである平面パッチを構成した後、従来のレンダリング法を利用するボリウムレンダリングの初期の方法について紹介し、さらに5章では、狭義のボリウムレンダリング法ともいべき新しい各種のボリウムレンダリング法について紹介する。

3. 断層画像の立体表示

CGの応用の中で最近注目されているテーマの一つに、医用画像の3次元表現がある。現在、臨床医学の分野では、コンピュータ断層撮影法(CT)や核磁気共鳴映像法(MRI)等によって、生体内部の3次元データの計測が行われている。しかし、臨床医が診断の際に見るのは、計測されたデータを多数の2次元画像で表したものである。このような画像から生体内部の構造の空間的な配置を推定するのは、人間にとって容易な作業ではない。そこで、人体内部組織が明瞭ではCTデータに対して画像強調や画像解析等の処理を施した後、3次元CGの様々な手法を用いて対象物体や器官、内部組織等をCT断層画像から復元し、3次元表示を行う研究が行われている^{2),3)}。

この様なCT画像からのボリウムレンダリングにおいては、明確な器官、組織さらに病巣の表示においては、特に画像処理の適用が極めて重要となる。本チュートリアルでは、CG表現の技法の紹介が重要であるから、画像処理の技法については、多くの著書^{9),18)}があるので割愛し、画像処理後(テクスチャ解析を行い、等質領域を求め、その輪郭線群のデータを得る)の輪郭線データのレンダリング法について紹介する。

3. 1 ワイヤーフレーム表示

対象器官等の最も簡単な表示法が図1に示すようなワイヤーフレーム表示である。

断面で与えられる物体・器官等の表面をワイヤーフレームで構成するときには、まず断面の輪郭線等を表す線分を用いる。この場合、階調画像として与えられる断層画像から線分の抽出は、いき値処理等を施して2値化し、その黒領域の外部の輪郭線を抽出することにより線画化する。輪郭線だけで不足であれば、隣接する断面の輪郭

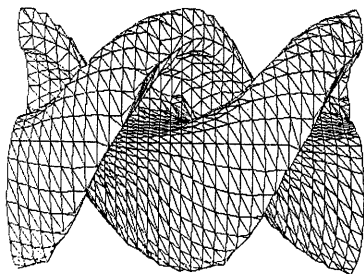


図1 ワイヤフレームの例

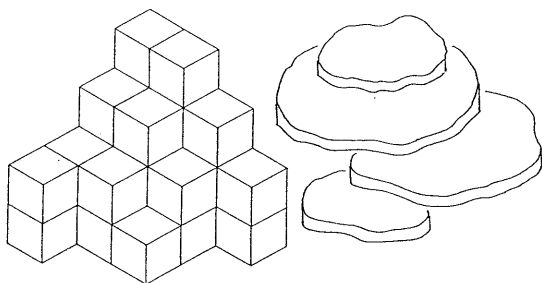


図2 ボクセルの例

図3 輪郭線掃引法概念図

線間を結ぶ線分を追加する。十分線分を追加すると、ワイヤフレームは物体表面を表示する多面体(polyhedron)の辺となる。

ワイヤフレームを表示するときには、全ての線分を線幅1の同じ輝度値の線分で描くことが多い。しかし、物体の3次元的な形状を理解しやすくするために、視点からの距離によって線分の線幅や輝度値を変化させたり、陰線消去を行ったりして表示することもある。陰線消去を行うときには、2次元の表示領域を等方的に分割する過程で、各部分領域内の物体の複雑さに応じて繰り返すワーノック型アルゴリズム(Wornock algorithm)等が用いられている。

ワイヤフレームで構成された物体表面を平滑化するときには、線分列の頂点に対してスプライン曲線(spline curve)、Bスプライン曲線(B-spline curve)、ベジェ曲線(Bezier's curve)等を当てはめる⁴⁾。そして、元の線分列をこれらの曲線上の点を結んで得られる滑らかな線分列に置き換える。このとき曲線上から取り出す点の数が多ければ線分列は滑らかになる。

なお、第4章で述べる三角形パッチ(triangular patch)によって構成された物体表面から、三角形の辺のデータだけを取り出したものも、ワイヤフレームである。

3. 2 ボクセルによる構成と表示

物体の断面のデータは、2次元の画素の集合である。この画素に厚さを加えると、2次元の微小な直方体になる。これを2次元の画素(pixel=picture cell)と区別してボクセル(voxel=volume cell)といい、普通は立方体のボクセルを用いる(図2)。ボクセルによる構成は、物体の最も直接的な構成手法であり、どのような複雑な形状の断面を持つ物体も、与えられた断面のデータに忠実に

に構成できる。しかも、物体の表面だけでなく、内部の形状も表現できる。但し、断面の間隔がボクセルの大きさよりも大きいときには、隣接する断面間をボクセルで内挿することが行われている⁵⁾。

ボクセルで構成された物体の表面を視点から見ると、見える面の向きは高々3種類である。したがって、高々3種類の輝度値を用いれば、この物体の表面を表示することができる³⁾。しかし、与えられた断面のデータの画素が大きいときにこの表示手法を用いると、表示された像に現れる凹凸が目障りになる。このような場合には、表示する像の各画素が表す物体表面の微小部分の法線を、8近傍の画素のZバッファ上の値から推定し、その法線からその画素の輝度値を求めるグラディエントシェーディング法(gradient shading method)などが用いられている。なお、グラディエントシェーディング法を用いるときには、Zバッファ上の値にフィルタリングを施して平滑化する場合の前処理を行うと、より滑らかな物体表面が表示できる。平滑化のためのフィルタには、次のようなものがある⁶⁾。

- 可変重みフィルタ(variable weight filter)
3×3の近傍の値に、中心の値との差に依存する重みをかけて足し合わせて、これを中心の値とする。グラディエントシェーディング法の前処理としてよく用いられる⁶⁾。
- 中央値フィルタ(median filter)
3×3や5×5などの近傍の値の中央値を中心の値とする。グラディエントシェーディングの前処理にも適している⁶⁾。
- 平均値フィルタ(mean filter)
3×3や5×5などの近傍の値の平均値を中心の値とする。グラディエントシェーディングの前処理にも使用することができる。このフィルタは、計算量が少なくすむので広く用いられている⁷⁾。
- エッジ保存フィルタ(edge-preserving filter)⁸⁾
5×5近傍領域を重なりを有する小領域の集合に分割し、それらの領域で最も分散の小さい領域の平均値を中心の値とする。グラディエントシェーディング法の前処理として用いると、かえって細かい凹凸を強調してしまうこともある⁶⁾。

3. 3 輪郭線掃引法による構成と表示

輪郭線掃引法(border sweeping method)³⁾は、断面の間隔と等しい厚みを断面の輪郭線に与え、これを側面とする板状切片的積み重ねで物体を構成する手法である。図3に輪郭線掃引法概念図を示す。断面の輪郭線のデータとしては、先に述べたワイヤフレームの内、断面の輪郭線を表している線分を用いればよい。

この手法によって得られた板状切片を表示するときには、板状切片を多面体とみなして、多面体を表示するためのシェーディングの手法の中から適切なものを選んで用いればよい。多面体のシェーディングの手法については、多くのCGの本に掲載されているので省略する。

輪郭線掃引法は、ボクセルを用いる手法と同様に、複雑な形状の断面を持つ物体にも適用できる。

4. 従来のレンダリング法を利用する方法

4. 1 三角形パッチの生成

ボリュームレンダリングの最も基本的な方法は、互いに平行な2次元断層画像群から、表示したい立体を構成する2次元輪郭線群を求め、それらの輪郭線に対し、三角形パッチを生成し、最終的には、シェーディング法等の従来のレンダリング法を施す方法である。

4. 1. 1 三角形パッチによる構成と表示

物体の形状を表す微小な三角形面素の集合を三角形パッチ(triangular patch)という。断面で与えられる物体の表面を三角形パッチで構成するときには、隣接する断面のうち一方の断面の輪郭線上の1点と他方の断面の輪郭線上の2点を頂点として個々の三角形を決定して、隣接する断面の輪郭線間を接続する。頂点に用いる点の特徴点(feature point)と呼ばれ、ベクトルトレーサ(vector tracer)⁹⁾等によって決定される。三角形パッチを構成することを、トライアンギュレーション(triangulation)という²⁾。「三角形パッチのアルゴリズム」などというときの「三角形パッチ」は、トライアンギュレーションを意味する。図4に三角形パッチの概念図を示す。三角形パッチによって物体表面を構成する手法は、3次元山岳形状を等高線から作成するとき^{10), 11)}をはじめとして、広く用いられている。

4. 1. 2 Delaunayの方法

2次元平面上に散在する点に対して三角形パッチを施す手法は、Delaunayの三角形パッチ法がよく知られている⁵⁾。Delaunayの三角形パッチ法について図5の点A, B, C, Dが与えられた場合を例に述べると、図5では、

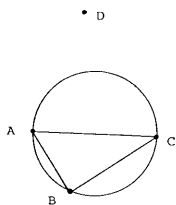
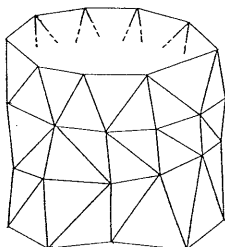
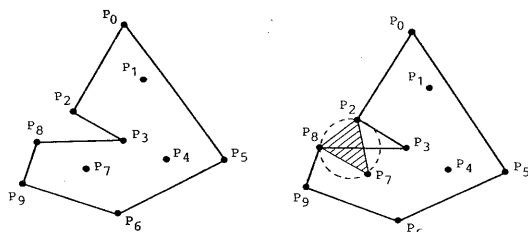
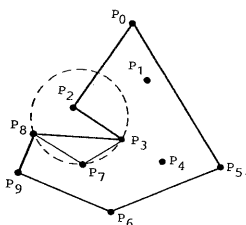


図4 三角形パッチの概念図 図5 Delaunayの三角形パッチ法



(a) 点を結ぶ線分を1部分 (b) Delaunayの三角形パッチ
決定している場合 を用いた場合



(c) 線分に囲まれた領域に対する三角形パッチ点
の輪郭線が決められている場合

図6 点の輪郭線が決められている場合

点A, B, Cの3点を通る円の中に他の点が存在しないため $\triangle ABC$ を構成する。このようにDelaunayの三角形パッチ法は、3点を通る円の中に他の点が存在しないとき、その3点で三角形を構成することを与えられた全ての点に対して行って、三角形パッチを施す手法である。

次に、図6(a)に示すように2次元平面上に10個の点が与えられていて、点どうしを結ぶ線分が一部分決定しているとする。そして、図6(a)のパッチで示す線分で囲まれた領域に三角形パッチを施すことを考える。この場合Delaunayの手法を用いると、Delaunayの手法は図6(a)のような予め結ばれた線分については考慮されていず、ただ、点の配置だけを考慮しているため、図6(b)の $\triangle P_2 P_7 P_8$ に示すような目的の領域をはみ出した三角形を構成してしまう。そこで、このような領域に三角形パッチを施すために次のような手法が提案された³⁾。この手法は、Delaunayの三角形パッチ法を基礎とした方法で、3点 P_3, P_7, P_8 で三角形を形成する条件は、線分 $P_3 P_7, P_7 P_8, P_8 P_3$ が輪郭線と交差せず、3点 P_3, P_7, P_8 を通る円の中に他の点が存在しないか、または、図6(c)のように円の中に点 P_2 が存在しても、線分 $P_3 P_8, P_7 P_2, P_8 P_2$ のいずれかが輪郭線と交差する場合は $\triangle P_3 P_7 P_8$ を形成するものとする。

4. 2 断層輪郭線データの三角形パッチ

断層輪郭線のデータとは、図7に示すように、ある物体をいくつかの平行な平面で切ったときに得られる、各断面の輪郭線の集まりである。各輪郭線は山岳形状の場合は等高線と呼ばれものである。等高線群データに対して三角形パッチを行うということは、等高線群で表現されている物体の表面形状を構成することである。図7で

得られる等高線群データの各等高線は曲線であるが、三角形パッチを行うために、各等高線に対して何等かの方法で多角近似を行わなければならない。ここでは、等高線とは多角形近似した等高線を指すものとする。等高線群に対する三角形パッチは図8に示すように隣接する等高線の互いの等高線の頂点をつなぐことによって行う。しかし、等高線の頂点どうしの結び方によって、再現される形状が変わってくる。そこで主な等高線群に対する三角形パッチ手法について述べる。

単純な輪郭線に対する方法

与えられた等高線群に、同一の高度が存在しないような単純な等高線群に対して三角形パッチを行う手法は、Fuchsらによって提案されている²⁾。Fuchsらは、隣接する等高線の間を最適に三角形パッチする方法として、隣接する等高線の間には張られる三角形の面積が最小になるような三角形パッチ法を提案した。隣接する等高線の間には三角形パッチを施す別の手法に、三角形パッチを行う対象として特に形成外科などの応用を考えた手法がKeppelによって提案されている¹⁹⁾。それは、図9(a)のような、人間の顔の断面から得られた輪郭線データに対して三角形パッチを施し顔を再生する場合、図9(b)のように2つの断面と、断面の周りに張られた三角形で囲まれる体積Vが最大になるように三角形パッチを行う手法である。また、Christiansenの手法における隣接等高線間の三角形パッチ法は、図10(a)のように等高線 C_1 を構成する点と等高線 C_2 を構成する点を結ぶ線分のうち長さが最も短い線分をまず結び、次に $P_1 Q_2, P_2 Q_1$ のうち短いものを結んで三角形を構成する²⁰⁾。この作業を順次繰り返すことによって三角形パッチを行う。

Christiansenは、この三角形構成法を用いても三角形の形や大きさが揃うため、Fuchsらが提案した最適化の計算をしなくても代用できるとした。

複雑な等高線が存在する場合

Fuchs, Keppelの三角形パッチ法は、与えられた等高線群の中に同一の高度の等高線が存在しない場合だけを対象としていた。しかし、図11(a)(b)のように1つの高度に2つ以上の等高線が存在する場合も考えられ

る。図11(a)のような等高線に三角パッチを行う手法として、次のような手法がある¹¹⁾。

図11(a)の等高線 C_1 、 C_2 と C_3 の間を三角形パッチする手法は、まず図11(c)に示すように、等高線 C_1 を構成する点と等高線 C_2 を構成する点を結ぶ線分の中で、最も長さの短い線分で等高線 C_1 と C_2 を連結する。そして結んだ線分の中点に特徴点Mを付加する。特徴点Mの高度は、図11(d)に示すように、高度 i と高度 $i+1$ の中点の高度を与える。次に、図12(a)に示

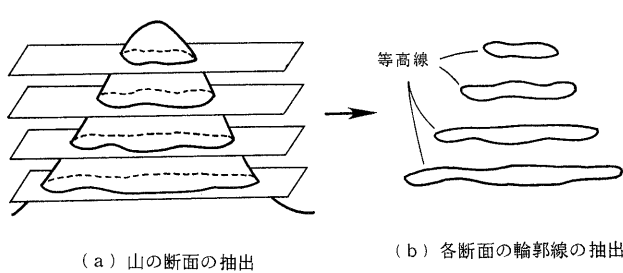


図7 等高線データ

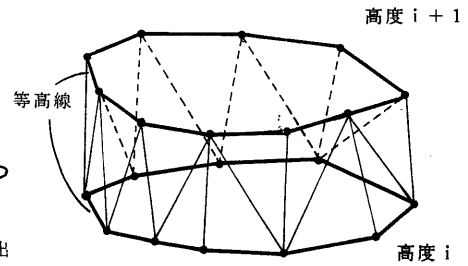


図8 等高線データに対する三角形パッチ

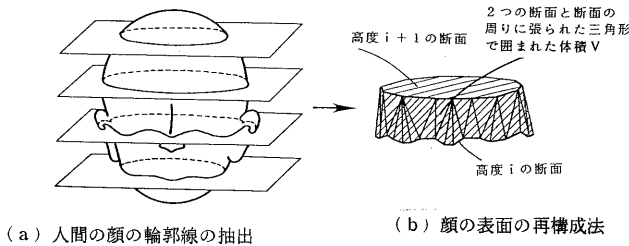


図9 Keppelの三角形パッチ手法

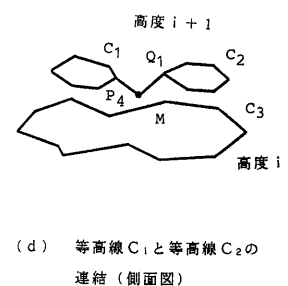
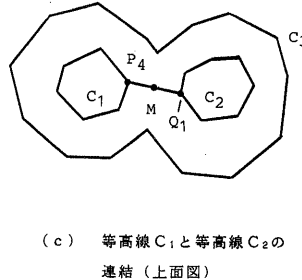
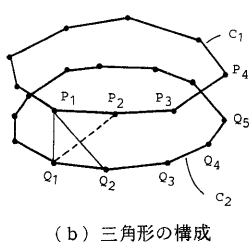
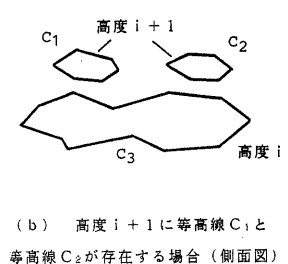
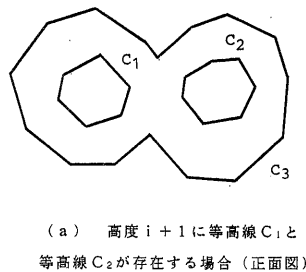
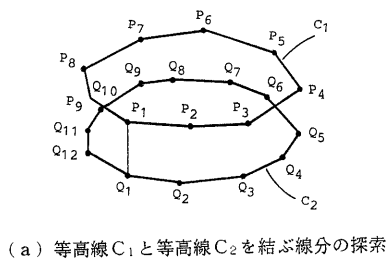
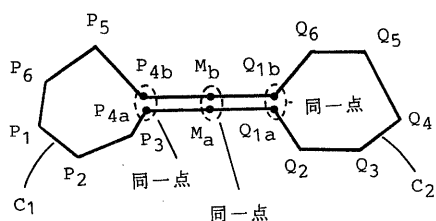
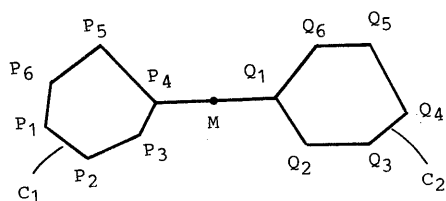
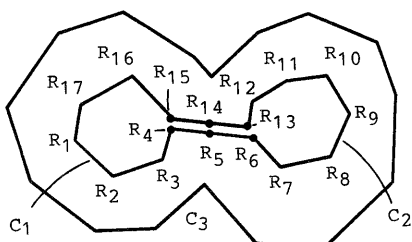


図10 隣接した等高線間の三角形構成法

図11 等高線の連結手法



(a) 連結した等高線を1つの閉曲線として見る方法



(b) 連結した等高線を構成する点列の順番の再構成

図12 連結した等高線を閉曲線として見る方法

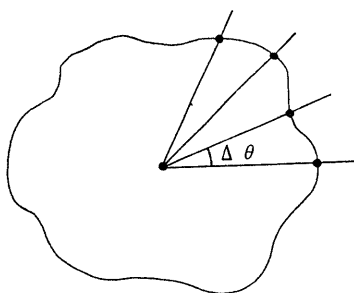


図13 物体の断面への円柱座標系の適用例

ように連結した等高線の連結部分 P_4-M-Q_1 を分離して考えることによって、連結した等高線を1つの閉曲線と考える。そして、図12(b)のように等高線を構成する点列の番号を付け直すことによって、1つの高度に1つの等高線が存在する場合と同様のアルゴリズムで三角形パッチを行うことができる。

円柱座標系の利用

三角形パッチのアルゴリズムの複雑さは、輪郭線からの特徴点の決定手法にも依存する。そこで、円柱座標系(cylindrical coordinate system)を用いた物体表面の構成手法がある¹²⁾。これは、断面の中心軸から放射状に半直線を伸ばし、輪郭線との交点を特徴点とし、隣接する断面の同じ角度の特徴点を接続して物体表面を構成する手法である。この手法を用いると、特徴点の接続が簡単のため、三角形パッチのアルゴリズムが極めて簡単になる。しかし、扱うことができる物体は円筒状の物体に限定されている。図13に物体の断面への円柱座標系の適用例を示す。

円柱座標系を用いて物体を表現するということは、物体の断面を2次元の極座標系(polar coordinate system)で表現することである。物体の断面などの2次元図形を2次元の極座標系で表現する手法は、断面で与えられる物体をワイヤフレームを用いて表示するとき⁴⁾や、物体の形状を輪郭曲線の形状から分析するときなど¹³⁾に用いられている。また、3次元の極座標系、すなわち球座標系(spherical coordinate system)を用いて物体を表現する手法も提案されている¹⁴⁾。

5. 新しいポリウムレンダリング法

前章までに述べた方法は、初期の方法であり、断層画像から画像処理の手法を利用して、ワイヤフレームまたはサーフェスモデル等の幾何モデルを作成し、それに対して従来のレンダリングを適用する方法であった。それに対し、ワイヤフレームやサーフェスモデルを作成することなく、直接断層データからCG画像を生成する新しいポリウムレンダリング法が多数提案されている¹⁵⁾。

以下に代表的な方法について述べる。

5.1 優先法の利用

ポリウムレンダリングの方法として、隠面、隠線消去法で利用されていた視点に近い方を優先的に表示する方法がある。主な方法について以下に示す。

レイキャスティング法

光線追跡法を同様な方法によりポリウムレンダリングを施す方式がポリウムトレーシング法である。

この方法は、視点からスクリーン上の1点に対して、視線ベクトルを放射し、そのベクトルに沿って、ポリウム内を不透明度が1になるまで進行する。そして、最終的には、それまでの累積カラーを求めて、その画素点の色とする¹⁵⁾。

クロスセクション法

ポリウムレンダリング法の1つとして、ボクセルデータ内のある内部領域を表示する技法がある。その代表的な方法がクロスセクション法である。

この方法は、3次元空間内をXY面の平行な2枚の平面、YZ面に平行な2枚の平面及びZX面に平行な2枚の平面によって切り取られるポリウムの立体を表示する方法であり、対象物体の断面表示が行える。

5. 2 その他の方法

優先法を利用した方式以外のその他のボリュームレンダリング法について紹介する。

マーチンキューブ法

3次元行列内に蓄積されたデータから一定の濃度の表面を多角形で近似するのがマーチンキューブ法である。この方法は、CTデータなどからこのアルゴリズムは以下の通りとなっている¹⁶⁾。

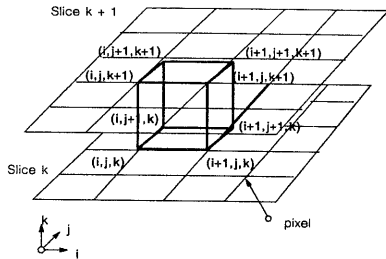


図14 マーチンキューブ法

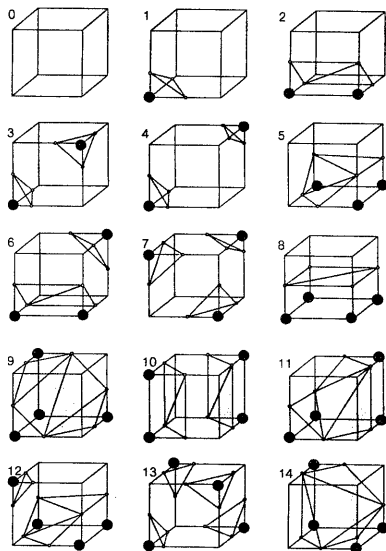


図15 マーチンキューブ法における表示面の生成パターン

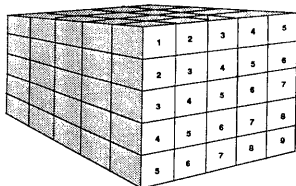


図16 セルバイセル法

[アルゴリズム]

- (1) 3次元行列内のスライスデータ群を分割し、図14に示すようにマーチンキューブを作る。
- (2) 各キューブの8つの頂点の濃度が、これから表示したい器官の濃度より高いか低いかに判定。
- (3) 頂点が器官の部分に含まれる場合に頂点に・印すると、そのパターンは図15に示す16通り存在する。
- (4) そのパターンに従い、図15中に黒い平面として図示するような面を生成し、器官の多面体近似を作成する。
- (5) 多面体近似された各平面に対して、法線方向を求め、従来のシェーディングを施す。

この方法は、ボクセル状に与えられた荒いデータに対して、14通りの平面パターンの生成を行うため、より精度の高いレンダリングが行えることになる。

セルバイセル法

3次元ボクセルデータに対して、1点を立方体と考え、図16に示すように、視点に近い立方体ごとにレンダリング処理を実行するのがセルバイセル法である²¹⁾。

半透明表示法

ある断面の表示ではなく、ある物体の内部にある物体を、分かりやすく表示する方法に半透明表示法がある。この方法は、同一の画素における外側と内空の輝度値を適切な割合で足し合わせたものをその画素の輝度値とすれば、物体の半透明感ある程度は表現できる³⁾。さらに半透明感を強くするためには、視点の方向ベクトルとのなす角度 θ が直角に近いベクトルを持つ画素ほど、大きい輝度値を与えられることにより行える¹⁷⁾。この方法では、輝度値をほぼ $1 / \cos \theta$ に比例させているが、 θ が直角に近いとき $1 / \cos \theta$ は非常に大きな値になってしまう。そこで、輝度値をほぼ $1 - \cos \theta$ に比例させる方法もある。

図17(a)は、心臓の断層画像から求めたワイヤフレーム画像、(b)は、その陰影画像であり、(c)は、外側を半透明表示した例である。

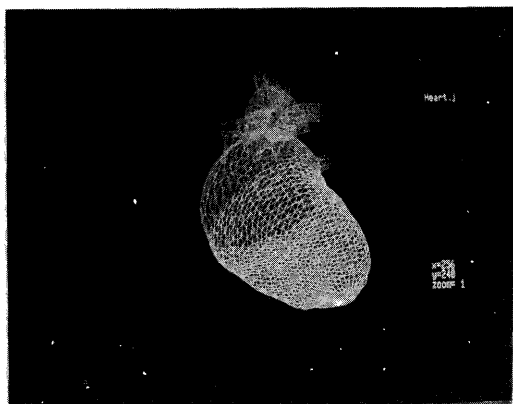
6. おわりに

本チュートリアルでは、筆者らの研究室で行っている研究を中心にその主なボリュームレンダリング法について紹介した。ボリュームレンダリング法はそもそもその概念が広くここでは、その1部のしか紹介していないものとも考えられる。またボリュームレンダリングは、CT画像の可視化のみならず各種の3次元空間内に分布するボリュームデータの可視化法としても着目されており、科学、工学さらに産業の分野においてその応用範囲が広がっている。それらの具体的な応用については、次の機会に紹介したい。

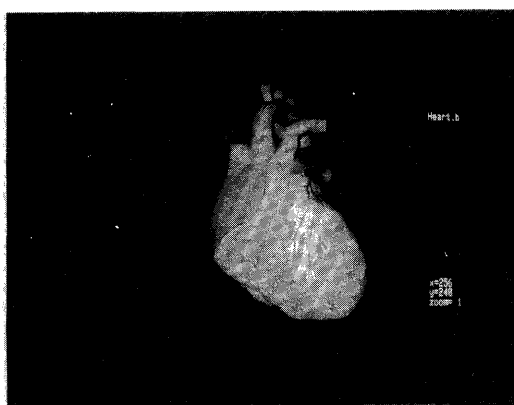
我々の生活する空間は、まさにボリュームデータから構成されており、その効果的なレンダリング法は、今後コンピュータの高速化とともにCGにおけるレンダリング法として益々重要になってくるものと思われる。

[参考文献]

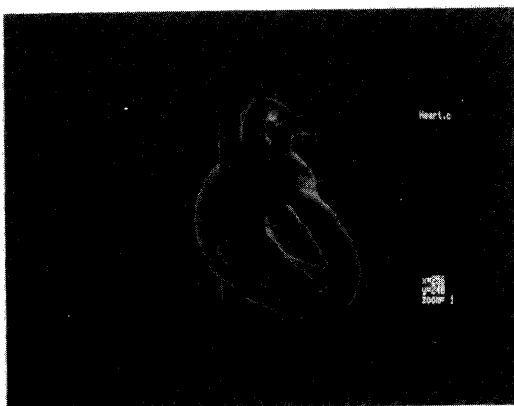
- 1) Robert A. Drebin, Loren Carpenter and Pat Hanrahan: Volume Rendering, SIGGRAPH, vol. 22, No. 4, pp. 65-74(1988)



(a) ワイヤフレーム表示の例



(b) 陰影表示の例



(c) 内部の半透明表示の例

図17 心臓のボリュームレンダリングの例

- 2) J. K. Udupa: "Display of 3D information in discrete 3D scenes produced by computerized Tomography", Proc. IEEE, 71, 3, pp.420-431 (1983)
- 3) 鳥脇純一郎: "最近の医用画像3次元表示の基本手法", 医用電子と生体工学, 24, 5, pp.293-303 (1986)
- 4) M. Kuwahara and S. Eiho: "3-D Heart Image Reconstructed from MRI Data", 9th International Conference on Pattern Recognition, pp.1198-1201(1988)
- 5) J. S. Chen and W. Lin: "A New Surface Interpolation Technique for Reconstructing 3-D Objects from Serial Cross-Sections" 9th International Conference on Pattern Recognition, pp.1100-1102(1988)
- 6) 橋本, 安田, 横井, 鳥脇: "CT画像を用いた頭蓋形成手術プランニングシステムの開発", 信学技報, PRU87-4(1987)
- 7) 河田, 南: "画像処理のためのフィルタリング手法", インターフェース Oct. 1988, CQ出版社, pp.192-203(1988)
- 8) M. Nagao and T. Matsuyama: "Edge Preserving Smoothing", Computer Graphics and Image Processing, 9, pp.394-407 (1979)
- 9) 安居院, 中嶋: "画像工学の基礎", 昭見堂, pp.85-86(1986)
- 10) 安居院, 宮田, 中嶋: "三次元山岳形状の等高線からの自動作成法", 信学論, J69-D.12, pp.1905-1912 (1986)
- 11) 安居院, 長, 中嶋: "等高線からの双峰山岳形状の自動再生法", 信学論, J71-D.5, pp.849-855(1988)
- 12) T. Yasuda, S. Yokoi and J. Toriwaki: "A Simulation System for Brain and Plastic Surgeries Using CT Images", Proc. International Joint Conference on Pattern Recognition '88(1988)
- 13) E. Panayirci and Y. Denizhan: "Shape Analysis Based on Boundary Curve Segmentation", NATO ASI Series, F42, pp.143-159(1988)
- 14) 安田, 橋本, 後藤, 横井, 鳥脇: "CT画像を用いた頭蓋形成手術計画支援システムの機能強化", 信学技報, PRU88-8, pp.23-30(1988)
- 15) 稲藤正彦: "ボリュームレンダリングの基礎", 日経C G, Vol. 4(1989)
- 16) William E. Lorensen & Harvey E. Cline: "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface construction Algorithm", SIGGRAPH, Vol. 21, No. 4, pp.163-169(1987)
- 17) 金田, 植田, 中前, 原田: "断面の多重輪郭線からの物体の再構成と半透明手法による物体内部のステレオ表示", 信学技報, IE82-94, pp.31-36(1982)
- 18) 安居院, 中嶋: "画像情報処理, 森北出版, (1991)
- 19) E. Keppel: "Approximating Complex surface by triangulation of contour lines", IBM Journal of Research and Development, Vol. 19, pp.2-11 (1975)
- 20) H. N. Christensen and T. W. Sederberg: "Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics", SIGGRAPH, Vol. 12, No. 3, pp.187-192(1978)
- 21) Craig Upson and Michael Keeler: "V-Buffer", SIGGRAPH, Vol. 22, No. 4, pp.59-74(1988)