

## 6. ボリューム・データのグラフィックス表示

Visualization of Volume Data by Takayuki ITOH and Koji KOYAMADA (IBM Japan, Tokyo Research Laboratory).

伊藤 貴之<sup>1</sup> 小山田 耕二<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本アイ・ビー・エム(株)東京基礎研究所

### 1. はじめに

史上初の全編CG映画といわれている、映画「トイ・ストーリー」の製作現場を紹介したTV番組をみた。その番組では、映画の登場人物の形状データを作成する過程で、デザイナーが石膏などを使って登場人物の模型を作り、その形状を3次元測定器で測定して形状データに変換する光景を放映していた。愉快的な映画の製作過程には、とても地道な作業が積み重ねられていることを確認させられた。

さて、旧来のCGのアルゴリズムの多くは、平面上にある図形や、2次元曲面など、数式で表現される形状を扱うことが多かった。しかし近年では、前述した模型の測定結果のような、数式を用いないかわりに離散点の集合で表現される物体を、CGを用いて表示するアルゴリズムが、活発に研究されている。本稿では、ボリューム・データと呼ばれる、離散点の集合で表現されるデータを、グラフィックス表示する手法と、近年の実用例について述べる。

なお、紙面の都合により、国際会議SIGGRAPHでの報告内容の一部を参考文献から割愛してある。SIGGRAPHの予稿集は論文誌ACM Computer Graphicsに包括されているので、そちらを参照していただきたい。

### 2. ボリューム・データ

ボリューム・データは、グラフィックス表示の対象となる有限な3次元空間に、多数の離散点を設定し、スカラ、ベクトル、テンソルなどの各数値データを各離散点に与えたものである。ボリューム・データでは、対象となる3次元空間は多数の四面体や六面体などの小片にすき間なく分割さ

れ、その頂点に数値データが与えられていることが一般的である。本稿では、四面体や六面体の小片を**格子**、数値の与えられた離散点を**格子点**と呼ぶ。

ボリューム・データの典型的な例は、CTスキャナなどを用いた医療測定結果である。医療測定結果では、骨・筋肉・脂肪・皮質などの組織の特徴が単一のスカラ値として格子点ごとに保持されていることが多い。これは、合同な直方体格子で構成されるボリューム・データの一種である。

また、有限要素法や差分法による科学技術計算の結果も、ボリューム・データの典型的な例である。これらの科学技術計算では、六面体格子や四面体格子に分割されたボリューム・データにおいて、スカラ、ベクトル、テンソルなどの各値が算出される。

これらのボリューム・データの内容をグラフィックス表示によって理解する技術を、とくに**ボリューム・ビジュアライゼーション**と呼ぶことが多い。本稿では、ボリューム・ビジュアライゼーションの代表的な手法である、等値面生成、およびボリューム・レンダリングについて、次章以降で紹介する。図-1は、医療測定結果をボリューム・レンダリングによって表示した例である。図-2、図-3は、数値解析によって得られた部屋の温度分布を、それぞれ等値面、ボリューム・レンダリングによって表示した例である。

### 3. 等値面生成

等値面は、ボリューム・データ中において、等しい数値をもつ点の集合を表現した曲面である。実用上の理由から、等値面はポリゴンの集合で近似生成されることが多い。たとえば、図-4(a)に示すボリュームから図-4(b)に示す等値面が存在

するとき、この等値面は図-4(c)に示すようなポリゴンで近似生成される。等値面は、医療測定結果から特定の属性値をもつ器官の形状を抽出するときに多く用いられる。また、数値解析によって得られる温度、気圧、電荷などの物理量から、特定の数値をもつ領域を抽出するときに用いられる。

等値面生成は、後述するボリューム・レンダリングと比較して処理が高速であるうえに、出力結果がポリゴンの集合で表現されるので、既存のグラフィックスソフトウェアやグラフィックスエンジンを活用して、対話的な操作を実現することができる。一方、ボリューム・データ全体の数値分布を把握するためには、多数の等値面を連続生成し、それをアニメーション的に連続表示することが必要になる。

### 3.1 マーチング・キューブ法による等値面生成

等値面のポリゴン近似生成手法は、1987年のSIGGRAPHで報告されたLorenzenらの研究から、「マーチング・キューブ法」と呼ばれることが多い。マーチング・キューブ法では、格子の各辺について、両端点のスカラ値  $C_1$ 、 $C_2$  と  $C$  の大きさを比較し、 $C_1 < C < C_2$  が成立する辺を抽出する。このとき、辺上のスカラ値が線形補間によって求められるとすると、抽出された辺上には等値面との交点が存在する。このとき、交点の座標値  $P_c$  は、両端の格子点の座標値を  $P_1$  および  $P_2$ 、格子点におけるスカラ値を  $C_1$  および  $C_2$  として、

$$P_c = \frac{(C - C_1)P_2 - (C - C_2)P_1}{C_2 - C_1} \quad (1)$$

により求められる。この式で求められた交点を連結してポリゴンを生成することで、等値面との交差部分を近似表現することができる(図-4(d)(e)参照)。同様な処理を各格子において実行することで、ポリゴンの集合が生成される。

なお、マーチング・キューブ法の報告よりも以前に、陰関数  $S(x, y, z)$  で表現される曲面  $S(x, y, z) - C = 0$  をポリゴンによって形状近似する目的で、同様な手法が報告されている<sup>1)</sup>。

### 3.2 等値面の曖昧性の解消

マーチング・キューブ法では、六面体格子からのポリゴン抽出において、図-4(f)のように、2種類以上のポリゴン抽出パターンがあり得る曖

昧なパターンが存在する。この曖昧性は、隣接ポリゴンの不連続性を生む可能性があり、医療測定結果や、科学技術計算結果の理解を妨げる要因となる恐れがある。

そこで近年では、これらの誤解を防ぐために、ポリゴン抽出上の曖昧性を解消する手法が多く報告されている。主な手法として、六面体格子を5個の四面体格子に分割して、それぞれの四面体格子ごとにポリゴンを抽出する手法があげられる<sup>2)</sup>。また、曖昧性の存在する格子面上における等値面との交線を双曲線と仮定して、双曲線の方程式の定数項と等値面の定数  $C$  との大小比較によってパターンを特定する手法も知られている。

また、誤解を防ぐ別のアプローチとして、等値面生成において一値で指定される数値  $C$  のかわりに、数値の範囲  $[C_1, C_2]$  を与え、その範囲内の数値をもつ領域を半透明表示することで、等値面に類似した曲面を不明瞭に表現する手法が知られている。一例として、 $C_1 < C < C_2$  である数値をもつ格子をボリューム・レンダリングする手法が報告されている。また、最近では、マーチング・キューブ法を拡張し、 $C_1 < C < C_2$  である数値をもつ領域をポリゴン近似して抽出する手法<sup>3)</sup>が報告されている。

### 3.3 等値面生成の高速化手法

3.1節で示した等値面生成手法は、基本的にはボリューム・データ中のすべての格子に対して処理が行われる。しかし、等値面と交差する格子数はボリューム・データ中のごく一部分であることが多く、ほかの非交差格子との不要な交差処理に多くの処理量を要する。そこで、非交差格子の多くを処理から省略する高速化手法が報告されている。文献4)に示される手法では、ボリューム・データ中でスカラ値が極大または極小となる点を抽出し、抽出された点を連結する格子の集合を形成する。この集合から等値面との交差格子を抽出し、交差格子を出発点として隣接する交差格子を再帰的に処理することで、非交差格子の多くを処理から省略して、高速に等値面を生成する。

### 3.4 等値面のデータ量削減手法

マーチング・キューブ法によって生成される等値面のポリゴン数は、一般的にはボリューム・データの格子数の2/3乗に比例するといわれている。しかし現実には、平面に近い曲率をもつ部位

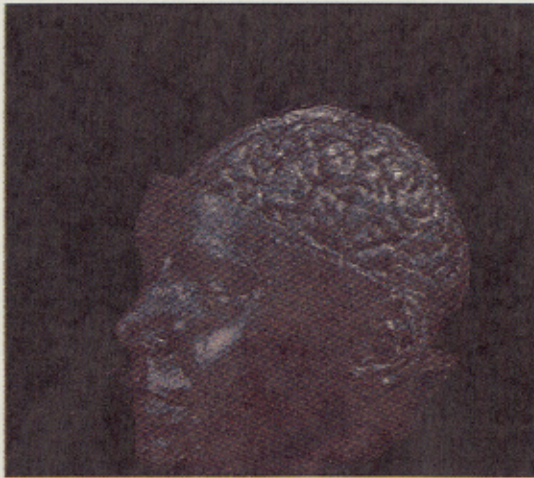


図-1 医療測定結果のボリューム・レンダリングによる表示例

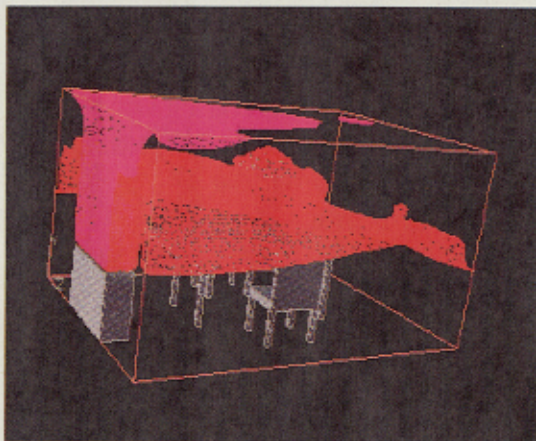


図-2 数値解析結果の等値面による表示例

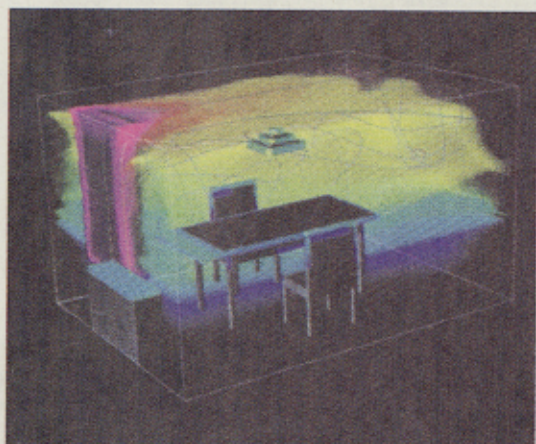


図-3 数値解析結果のボリューム・レンダリングによる表示例

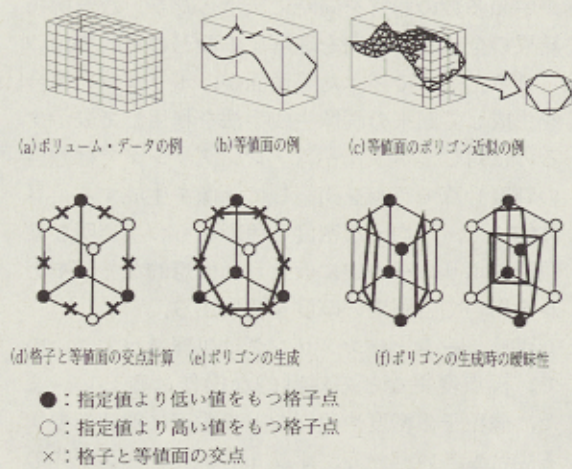


図-4 等値面の生成手法

や、視点から遠い部位のポリゴンが細かく生成される必要はない。むしろ、ポリゴン数は格子数よりも画像の解像度に依存するべきであり、必要以上に細かいポリゴン生成は画像生成速度を低下する一因となる。

この問題に対して近年では、Level of detail の考え方を適用して、等値面のポリゴン数を減少する諸手法が提案されている。具体的には、1992年のSIGGRAPHで報告されたTurkやSchroederの手法に代表される、ポリゴン数を減少する部位におけるいくつかの頂点や辺を消去し、消去された頂点や辺の周辺のポリゴンを再生成する手法が多く用いられる。

### 3.5 画像データからの形状復元

1996年のSIGGRAPHでCurlessらは、物体形状の測定結果をポリゴン近似するために、等値面生成手法を適用した手法を報告している。この手法では、複数方向から撮影した画像データをもとにして、物体形状を表すボリューム・データを生成し、そのボリューム・データから等値面を生成して物体形状を復元している。この手法は、前述したモデルの形状データ生成などの目的にも応用できると考えられる。

## 4. ボリューム・レンダリング

ボリューム・レンダリングは、ボリューム・データの全体的な数値分布を一画像に表現する手法であり、1988年のSIGGRAPHでの報告をきっかけにして活発な研究が続いている。医療測定結



果中の多数の器官を同時に表示したり、数値解析結果の全体的な傾向を理解するなどの目的で用いられる。前章で述べた等値面が、ポリゴンの集合を生成して旧来の画像生成手法を利用して表示するのに対し、ボリューム・レンダリングでは独自の輝度計算モデルを構築して画像を生成する。具体的には、不均一な密度と色彩をもつ半透明な微粒子をボリューム中に仮定し、仮想的な光学モデルを用いて各画素の輝度を算出する。

ボリューム・レンダリングは処理量が大いので、視点変更などの対話的な操作は難しい。また、微粒子の密度や色彩などの設定に熟練を要する場合も多い。一方、ボリューム・データ全体の数値分布を1枚の画像で把握することが可能である。また、画像に多少の不明瞭さがあるために、かえって数値分布の誤解を防ぐことができる場合も多い。

#### 4.1 レイ・キャスティング法

ボリューム・レンダリングでは、レイ・キャスティング法とよばれるアルゴリズムを用いて画像を生成することが多い。レイ・キャスティング法では、スクリーン中の一画素を通過する視線がボリューム・データ中を通過する過程で、複数のサンプリング点を設定し、サンプリング点における輝度値を累算する(図-5(a)参照)。一例として、視点から遠いサンプリング点から順に輝度値を累算する以下の式が用いられる。

$$C_t = C_{t-1}(1 - a(S_t)) + c(S_t)a(S_t) \quad (2)$$

$C_t$ : 輝度値の  $t$  番目のサンプリング点までの累算値 ( $C_0=0.0$ )

$S_t$ :  $t$  番目のサンプリング点におけるスカラ値

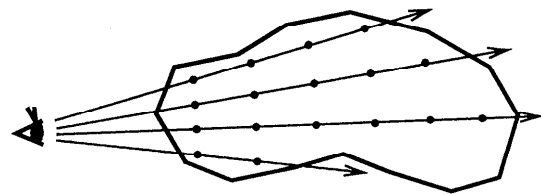
$c(S_t)$ : スカラ値  $S_t$  に対する輝度値

$a(S_t)$ : スカラ値  $S_t$  に対する不透明率

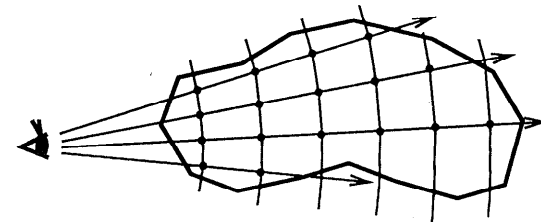
医療測定結果からみられる器官の質感や、数値解析結果から得られる数値分布の立体感を表現するために、輝度値  $c(S_t)$  の計算には Lambert の拡散反射モデルや Phong の鏡面反射モデルなどの輝度計算モデルを用いられることが多い。ここで、輝度計算モデルには物体の反射率と法線方向が必要である。ボリューム・レンダリングでは、物体の反射率にスカラ値  $S_t$  の関数を用い、法線方向にスカラ値の勾配方向を用いることが多い。

#### 4.2 ボリューム・レンダリングの高速化手法

レイ・キャスティング法は処理量の大きい手法



(a)レイ・キャスティング法のサンプリング点



(b)等距離面を用いた手法のサンプリング点

図-5 ボリューム・レンダリングのサンプリング点

であるので、その高速化手法がいくつか報告されている。代表的なものに、数値変化の大きい部位のみにおいてレイのサンプリング点を階層的に増やす手法や、周波数領域にボリューム・データを変換する手法などが知られている。

その一方で、ボリューム内部に仮想された多数のオブジェクトを、半透明表示機能をもつグラフィックソフトウェアで高速表示することにより、ボリューム・レンダリングに類似した画像を表示する手法が活発に報告されている。代表的な手法に、格子面を視点からの距離でソートして重ね描きする格子投影法や、スカラ値で色づけされた半透明の球状物体をボリューム中に隙間なく設定して重ね描きする手法などがある。また、近年では、レイ・キャスティング法に非常に近い画像を得る手法として、視点からの等距離面を高速生成して半透明に重ね描きする手法も報告されている<sup>9)</sup>。図-5(b)から分かるとおり、この手法ではレイ・キャスティング法と同一数のサンプリング点を輝度計算に用いている。

#### 4.3 写実的な画像生成のためのボリューム・レンダリング

医療測定結果や科学技術計算結果への適用例に比べると報告例は少ないが、写実的な画像生成を目的とした手法も報告されている。

ボリューム・レンダリングの前身となる手法として、1984年の SIGGRAPH で Kajiya らは、境

界の不明瞭な物体（たとえば雲、霧、炎など）を表現する手法を報告している。この手法では、3次元空間中における水滴などの微粒子の密度をスカラ場で設定し、光源からの直射光がボリューム・データ中の各格子点に到達する強度を算出する。

また、レイ・キャスティング法に反射・透過方向への追跡処理を加えることで、チンダル現象のような照明効果や、放射光をもつ炎などの物体を表現する手法が報告されている。また、1987年のSIGGRAPHでRushmeierらによって報告されたボリューム・ラジオシティ法では、ボリューム・データ中の光エネルギーの平衡状態を算出することで同様な効果を表現している。

## 5. ボリューム・ビジュアライゼーションの実用例

ボリューム・ビジュアライゼーションの技術はすでに各方面で実用が進められており、CG利用技術の中でもCADにならぶ市場規模をもつといわれている。本章では、前章までに示した各技術の実用例のいくつかを紹介する。

### 5.1 外科手術シミュレーション

Virtual realityの考え方をういた外科手術の計算機シミュレーションは、教育や手術計画などの目的で注目を集めている。外科手術シミュレーションでは、ユーザはメニューから道具を選択し、道具を仮想的に操作する。操作結果は画面上に表示される。たとえばメスを操作することで人体の皮を切り、ドリルを操作することで骨に穴をあける様子が表示される。

人体のモデルには、医療測定結果のボリューム・データを直接用いる方法と、等値面生成などを用いてポリゴンの集合に変換したものを扱う方法が考えられる。たとえば、文献6)に報告されるシステムでは、ボリューム・データを直接操作し、切開などの操作とその結果の視覚化を実現している。しかし、大きなボリューム・データを外科手術シミュレーションに直接用いることは、対話性などの点で問題がある。それに対して、文献7)に報告されるシステムでは、ポリゴン数を減らして簡略化した等値面によって人体モデルを表現し、3次元テクスチャを用いて写実性の高いシミュレーションを実現している。このシステム

では、道具による仮想的な操作に対し、ポリゴン形状の変形などの処理を行うことで、対話的な速度で人体モデルの形状処理と画像表示を実現している。

### 5.2 科学技術計算とグラフィックス表示技術の一体化

科学技術計算は一般的に、入力データの作成、計算実行、計算結果のグラフィックス表示、の3つの手続きから構成される。この一連の流れを1回行っただけでは、満足のいく計算を行うことは困難であり、現実には、グラフィックス表示結果を参照して、計算実行に必要なパラメータや入力データの変更を行うことが多い。従来、それぞれの手続きをウォータフォールの進めざるを得なかったため、科学技術計算は時間のかかるものになっていた。そこで、効率よく質の高い計算を実現するために、これら3つの手続きを可能な限り並行して稼働させる、「ステアリングシステム」の研究がすすめられている。

MITでは、計算実行部分に可視化プロセスを接続したり、切り離したりできる分散環境を構築している<sup>8)</sup>。これにより、グラフィックス処理が計算実行に与える負荷を小さくしている。NASAでは、遠隔地にいる複数の研究者が、計算結果に関して議論の行える環境を構築している<sup>9)</sup>。計算結果データをそれぞれの研究者に配信して、自由にグラフィックス表示をしたり、ほかの研究者とパラメータを共用することができる。

筆者らは、ステアリングに適した表示システムとして、サーバで生成された等値面を転送して、クライアントで表示するシステムを試作している。本システムはボリューム・データ全体を転送する従来のシステムよりもネットワーク負荷が小さいうえに、等値面生成処理をサーバの高い処理能力にまかせることでクライアントの画像表示の操作性を向上している。

## 5. おわりに

本稿では、医療測定結果や数値解析結果を中心とするボリューム・データのグラフィックス表示に関する諸手法と、最近の実用例について紹介した。なお、本稿の内容の一部は、<http://www.trl.ibm.co.jp/projects/s7340/visualiz/ivs.htm>に詳しく述べられている。

**謝辞** 外科手術シミュレーションに関する執筆にご協力いただいた、日本アイ・ビー・エム(株)大淵竜太郎氏に感謝いたします。また、原稿中の図-1を提供して下さった、日本アイ・ビー・エム(株)宮澤達夫氏に感謝いたします。図-1の画像生成に用いたデータは、米国 North Carolina 大学の標準データセットであり、オリジナルデータは Siemens Medical System 社のご好意によりいただいたものです。

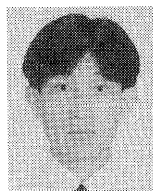
### 参 考 文 献

- 1) Wyvill, G., McPheeters, C. and Wyvill, B.: Data Structure for Soft Objects, The Visual Computer, Vol. 2, No. 4, pp. 227-234 (1986).
- 2) Guezic, A. and Hummel, R.: Exploiting Triangulated Surface Extraction Using Tetrahedral Decomposition, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 1, No. 4 (1995).
- 3) Fujishiro, I. et al.: Volumetric Data Exploration Using Interval Volume, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 2, No. 2, pp. 144-155 (1996).
- 4) Itoh, T., Yamaguchi, Y. and Koyamada, K.: Volume Thinning for Automatic Isosurface Propagation, Proceedings of IEEE Visualization '96 (1996).
- 5) Koyamada, K. and Itoh, T.: Fast Generation of Spherical Slicing Surfaces for Irregular Volume Rendering, The Visual Computer, Vol. 11, No. 3, pp. 166-175 (1995).
- 6) Kitagawa E. et al.: An Interactive Voxel Data Manipulation System for Surgical Simulation, 3rd IEEE International Workshop on

Robot and Human Communication, pp. 204-209 (1994).

- 7) Ohbuchi, R. et al.: Integrated Medical-image System for Cancer Research and Treatment, IBM Journal of Research and Development, Vol. 40, No. 2, pp. 185-210 (1996).
- 8) Clucas, J. and Watson, V.: Interactive Visualization of Computational Fluid Dynamics, the 2nd International WWW Conference (1994).
- 9) Haines, R.: pV3: A Distributed System for Large-Scale Unsteady CFD Visualization, AIAA Paper 94-0321, Reno NV (1994).

(平成8年10月31日受付)



伊藤 貴之 (正会員)

1968年生。1990年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。現在、同社東京基礎研究所にて、計算機による形状処理および画像生成に関する研究に従事。



小山田 耕二 (正会員)

1983年京都大学工学部電気工学科卒業。1985年同大学院修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。現在、東京基礎研究所にて、サイエンティフィックビジュアライゼーションの研究・開発に従事。工学博士。IEEE Computer Society 会員。