

解説

ボクセル指向3次元データ表現と
その表示技術†

藤代一成†† 茅 曉陽††† 國井利泰††††

1. ま え が き

自然界に存在する対象の標本化や現象の計測・モデル化の際に現れる多変量の3次元分布データ(ボリュームデータ)を、ボクセルと呼ばれる空間構成単位の集合を用いて離散的に表現し、その形状や内部構造を2次元画像として表示する技術に80年代後半から大きな注目が寄せられるようになった。このような3次元ボリュームデータのボクセル指向表現とその表示技術は現在、ボリュームビジュアライゼーション(volume visualization)の名のもとに、近年の計算資源の発達も相俟って、さまざまな応用分野で活発に研究・開発が進められている。しかし、発展途上であるだけに、同技術に関連する概念・用語にはいまだ混乱が残っており、カバーされるべき領域や技術の達成度に対しても、明確な共通認識が十分になされていないような状況にあると考えられる。

そこで本稿では、ボリュームビジュアライゼーション(以下VVと略す)を新しい世代の総合的な視覚情報処理技術として位置づけ、その概念、目的、処理の原理と枠組、代表的なアルゴリズム、実装環境、高速化を含む技術動向などについて、具体的事例を用いた平易な解説を試みる。なお、VVに関する解説記事は、すでに国内外でいくつか知られており^{1)~11)}、中でも文献5)は最良の一つである。本稿の執筆に当たっては、それらと相補的な役割が果たせるように心掛けた。

2. VV の位置づけ

本章では、VVが誕生してきた歴史的背景を辿り、その技術的本質を捉える。

2.1 VV 誕生の背景

科学技術に必要な不可欠な観察・実験の高度化に、コンピュータ利用技術が深く関わっていることは言うまでもない。たとえば、観察したい対象を画像として標本化できれば、半永久的な保存が効き、同じサンプルに異なった再加工が施せる。実験結果を一度コンピュータに登録すれば、結果の比較対照がシステマティックにしかも得心のいくまで繰り返せる。また、現象の数理モデル化が可能ならば、コンピュータシミュレーションによって同一現象を何度でも再生することができる。

さて、ボリュームを有する自然界の3次元物象が、ありのままに計測あるいは標本化/モデル化できれば、このようなメリットの拡大は必至である。80年代に入り、スーパーコンピュータや高性能グラフィックワークステーションが相次いで利用可能になり、大規模数値計算に基づく3次元シミュレーションが現実味を帯びてきた。一方、精度・速度ともに増した計測機器がこうしたコンピュータの周辺機器として接続され、3次元の計測データや画像データの取り込みも容易になってきた。

以上の目的と事情を背景として、すでに成果が発表されつつあった雲や霧のような不規則・不定形な自然物象のフォトリアリティを追求する画像合成技法^{12),13)}を基本に、3次元ボリュームデータをボクセル(ピクセルの3次元版)の集合として捉えデータ全体を可視化する技術が、1985年に米国のPixar社によって開発・発表された。これが科学技術向けの可視化(scientific visualization)を目的とするボリュームレンダリング、すなわち

† Voxel-Oriented Modeling and Rendering Techniques for Three-Dimensional Data by Issei FUJISHIRO (Dep. of Information Sciences, Faculty of Science, Ochanomizu University), Xiaoyang Mao (Div. of Application Engineering, Kubota Computer Inc.) and Toshiyasu L. KUNII (Dep. of Information Science, Faculty of Science, The University of Tokyo).

†† お茶の水女子大学理学部情報科学科

††† クボタコンピュータ(株)応用技術部

†††† 東京大学理学部情報科学科

VV の始まりとされている⁶⁾。

VV を用いれば、たとえば生体器官を多色ゼリーのように半透明化でき、対象を傷付けずに内部が観察できる。また、現象の支配方程式を数値的に解き、ディスプレイに映し出される仮想水槽中に本物そっくりインクの帯を流すこともできる。このように、VV は3次元ボリュームデータの表現、操作、表示、解析のための対話的環境を提供する。その意味では顕微鏡や天体望遠鏡以上の使命をVV は果たそうとしているのである。VV の科学技術計算における価値は、文献14)の中でも論じられている。

2.2 VV の本質

前節でも述べたように、VV がレンダリング(映像化)の対象をあくまで実世界に求めている点は、VV を技術的に特徴づけるうえで最も重要である。より詳しく言えば、VV は実世界あるいはその仮想世界(シミュレーションモデル)に存在している素材を画像解析技術を用いて取り込み、自身の画像合成の対象としている。これにより、従来はそれぞれに固有の処理方式やモデルが必要であったため分化し、ほぼ独立に研究・開発が行われてきた画像解析(コンピュータビジョン; CV)¹⁵⁾と画像合成(コンピュータグラフィックス; CG)¹⁶⁾の両者が再統合されようとしているのである¹⁷⁾。したがってVV を、人間が行う視覚情報処理との可換性が成立する総合的な視覚情報処理体系: ビジュアルコンピューティング(visual computing)の一例として位置づけることができる¹⁸⁾。

VV が CV と CG を結び付けた要因の一つは、両者に共通する視覚データ表現として定義の最も単純なボクセル集合(voxel dataset)を採用したことがある。ボクセル集合は、対象となる3次元空間を、ボクセル(voxel=volume element)と呼ばれる空間基本単位の格子構造(lattice)で表現したものである。ここで元のボリュームデータは、各ボクセルのフィールド値として離散的に定義されている。

このボクセル集合を、CAD¹⁹⁾の立場からみると、形状モデルの世代交代の如実な結果とみることができる。これまでに形状モデルは、ワイヤフレーム(竹ひご)、サーフェス(表裏の判別がつかないボール紙)、境界表現や CSG (Constructive

Solid Geometry) のようなサーフェスをベースとしたソリッド(表裏の判別がつくボール紙)と発展してきた。その次に来るべきボリューム(粘土)を表現・表示するための第4世代形状モデルとして、ボクセル集合を捉えようというのである。実際ボクセル集合は、対象によってボリュームデータの構造が異なることに対応するために、従来は主として計算資源の制約から実用化を断念していた数え上げ型(enumeration type)ソリッドモデルに再び注目し、それを多値化したものである。このボクセル集合を用いるという意味から、VV を第4世代グラフィックス(fourth generation graphics)と呼ぶことがある^{19), 20)}。

3. ボリュームデータの種類と性質

本章では、まず VV の応用領域を3種類に分類し、実例を参照しながら VV の実際を概観する。次に、その分類を加味したボクセル指向データ表現の詳細を述べる。

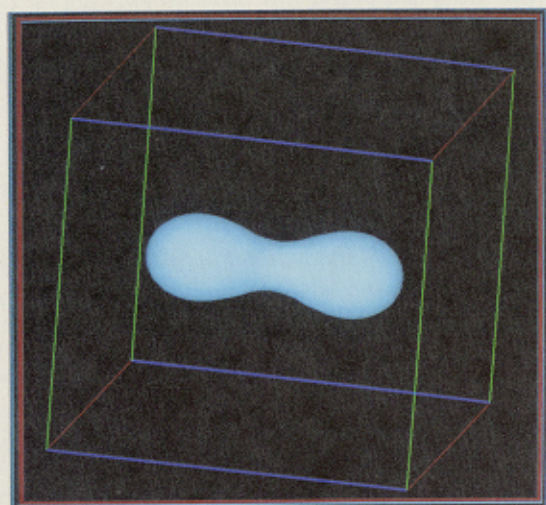
3.1 VV の応用領域

VV の主な応用領域は、それぞれに現れるボリュームデータを処理する際の性質の違いから、以下の三つのカテゴリに分類できる。

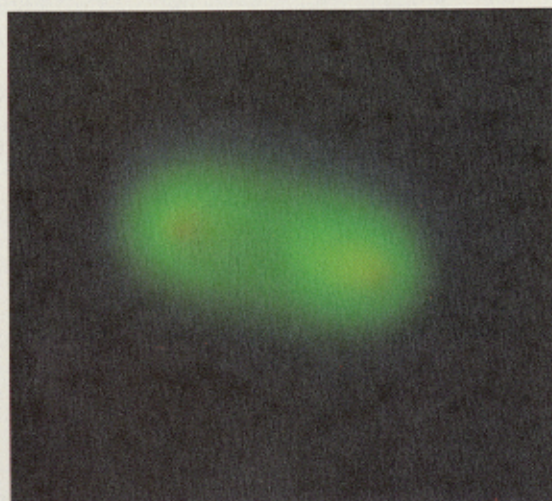
(1) ボリューム解析(volume analysis)

3次元標本データの表示や、3次元計測/シミュレーション結果の可視化など、VV が自然界の物象の解析手段として用いられる場合に相当する。

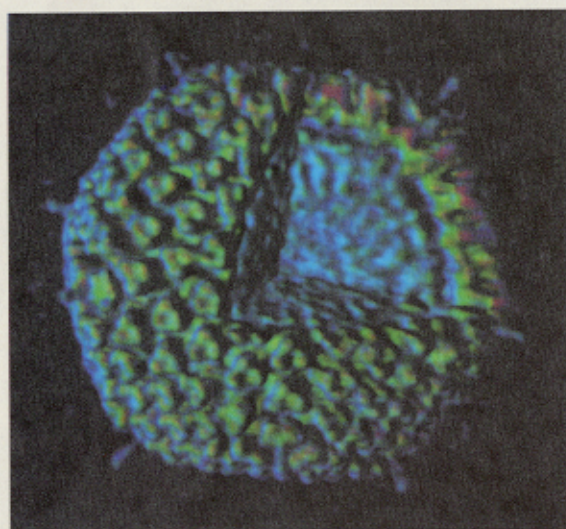
具体例を4つあげよう。図-1は水素分子の電荷密度分布²¹⁾を示している。3次元の電荷密度すなわち電子の存在確率密度は、シュレーディンガー方程式を数値的に解き、その解である波動関数からダイレクトに求まる(シミュレーション)²²⁾。同図(a)はある一定の電荷密度の値を示す空間部位を面で表現したものである。このような面を等値面(isosurface)と呼ぶ。等値面は、2次元の等高線(コンタ)の3次元への拡張である。等値面表示も広義の VV に属することに注意されたい。(b)は、ボリュームレンダリングを用いて半透明の電子雲を表示した例である。図-2は、アデノウィルスの立体像を複数の電子顕微鏡断面写真から再構成し右上手前の8分球を除去した後、ボリュームレンダリングを施した例である¹⁷⁾(標本)。図-3は、マクロオートラジオグラ



(a) 等値面表示



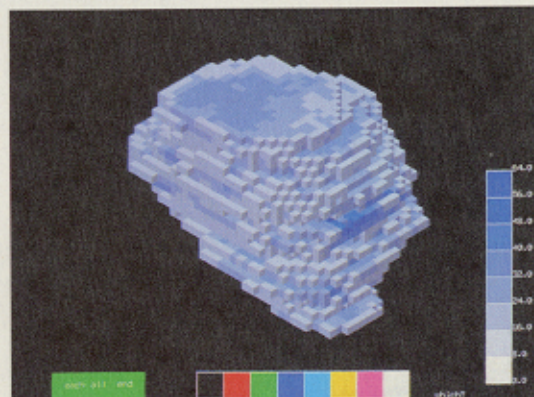
(b) ボリューム光線追跡

図-1 水素分子の電荷密度分布 (ボクセル数=64³)

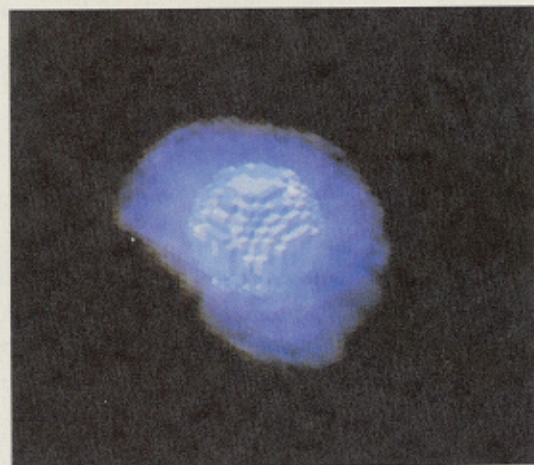
データ提供: P. S. Hexem, R. M. Burnett (Wistar Institute) and S. D. Fuller and M. Cyrklaff (the European Molecular Biology Laboratory)

図-2 アデノウィルスの電子顕微鏡写真からの再構成画像 (ボクセル数=101³)

フィー法²³⁾によって得られたラットの脳の平行断面列から図-2と同様に再構成して得た3次元機能マップで、(a)は脳標本の表面、(b)は脳内のある大きさの球の表面の細胞の活性度をそれぞれ表している(計測)。図-4は、竜巻(tornado)に似た流体場の内部構造を可視化した例である。柱状のサーフェスは鉛直方向の流体速度成分の等値面であり、表面の色は赤いほど水平方向の渦度(vorticity)が大きいことを示している(シミュ



(a) 表面



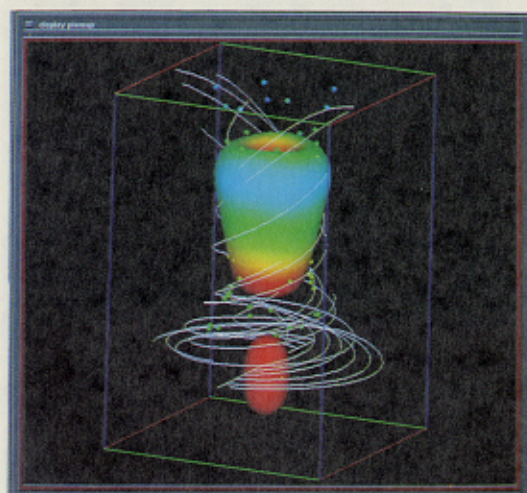
(b) 内部

データ提供: 順天堂大学医学部脳神経外科教室
ソフトウェア: 自作

図-3 ラットの脳の活性度分布 (ボクセル数=32³)

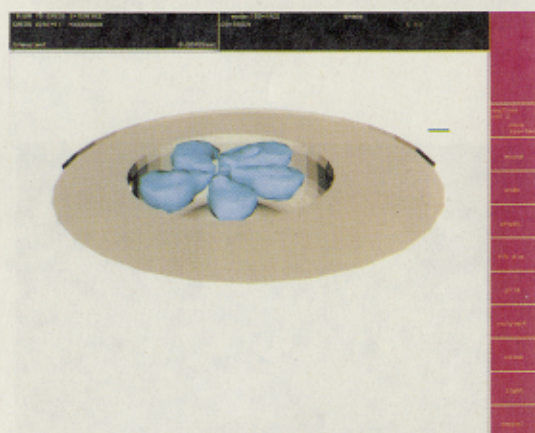
(3) ボリューム合成 (volume synthesis)

一転して、例えば機械部品のような人工形状の応力パターンを有限要素解析することを考える。それには、従来のソリッドモデルの形状データに応力という多値属性データを付加するような拡張を考えればよい。また、航空機/船舶/自動車などの周りの流体場の解析には、ボディ形状を反映した境界条件を考慮する必要がある。室内空調解析における障害物も同様である。このように、工業製品の形状設計とともに機能検査も同一データを用いて行おうとする CAE 環境²⁴⁾では、人工的な形状を反映したボリュームデータを生成しなければ



データ提供: Brian Kowalski (NCSA)

図-4 tornado 的流体場の可視化 (ボクセル数=64³)



データ提供: 日野自動車工業(株)

ソフトウェア: Multigra Ver1.1

(日野自動車工業(株))

(株)アーク情報システム

図-6 エンジン内の燃料分布の等密度面表示

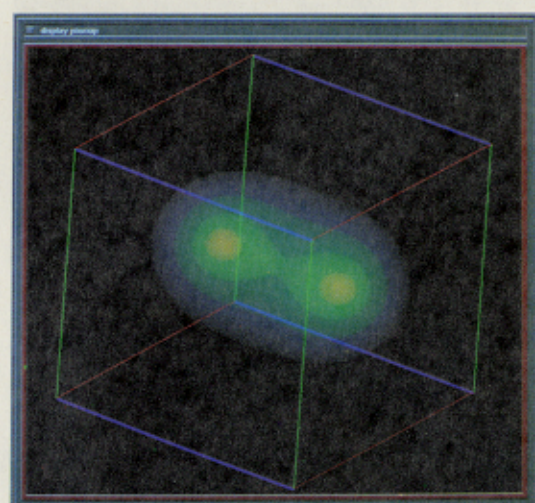


図-9 4枚の半透明等値面の重ね合わせによる水素分子の電荷密度分布表示

レーション)。

このほかにも、ボリューム解析が応用される問題として、質量分布(宇宙物理学)、地震エネルギー分布(地球科学)、ホールの残響特性(音響学)などが知られている。

(2) ボリューム分類 (volume classification)

骨・軟骨・筋肉・脂肪といった性質の異なる含有物(material)が複雑に入り混じった生体組織は、スキャナによって単一の変量(密度)をもつボリュームデータとして標本化されるのが普通である。ここから骨と軟骨のような隣接組織間の境界の形状を推定することは CV の典型的な問題に属する。また、仮に抽出されたとしても、このような曖昧な境界を、スプライン関数のような人工的な関数によって果たしてうまく近似できるかどうかという疑問が、VV 研究・開発の基本的な動機づけの一つとなっている¹⁾。

VV ではその代わりに、CV の知見を利用したボクセル分類と呼ばれる中間プロセスで、各ボクセルのフィールド値から複数の含有物の割合を推定し、さらにおのおの含有物の光学的性質を考慮しながら、対象を混合したままレンダリングする。むしろ、こうすることで境界の視認を人間側に委ねるのである。図-5にボリューム分類を施した人間の頭部画像の例を示す。皮膚、骨、脳の各部位が明確に識別できるであろう。

同様の例は、鉱物学における鉱石の含有成分比の解析などにも現れる。



データ提供：徳島大学医学部放射線科

ソフトウェア：Volume Design

((株)メディカルデザイン)

図-5 MRI と CT から得られた人間の頭部データの
ボリュームレンダリング画像 (ボクセル数=256³)

ばならない。これをボリューム合成と呼ぶ。図-6はその端的な例で、エンジン内部で蒸発した燃料の分布を等値面表示している。ここで、円筒形の構造物はピストンの最上面を表している。

このほかにも文献5)では、ボリューム合成が必要な例として、医学応用における人工補綴物、器具、メスの軌跡などの幾何オブジェクトをあげている。これらは、標本・計測データとともに描かれるために、対象内外の判別がつくような二値ボクセル集合に変換される。

3.2 ボクセル集合の定義

本節では、前節で示した性質の異なるデータソースを考慮し、フィールド型、トポロジ/ジオメトリ、フィールド値の取扱いの三つの観点から、ボクセル集合の定義に現れる微妙な差異を整理しておきたい。

まず、ボクセルフィールドのデータ型は、スカラー、ベクトル、テンソルのいずれかである。たとえば図-1の電荷密度はスカラーフィールドである。また図-4の流体場のボクセルには、空間の3方向の成分をもつ速度ベクトルが指定される。ベクトルフィールドはまた、同一空間に分布する複数の変量間の因果関係を追求する際にも利用される。海洋観測で得られる海流の速度、温度、塩分濃度、二酸化炭素濃度などはその典型例である。

次に、ボクセルのトポロジ（接続関係）は、

- 六面体格子構造 (structured)
- 四面体格子構造 (unstructured)
- 非格子構造 (general)

の3種類に分類できる。また、六面体格子構造をもつボクセル集合は、さらにそのジオメトリにより、

- 均一な直方体格子 (even, regular)
- 不均一な直方体格子 (rectilinear)
- 不規則格子 (scattered, irregular)

の3種類に分類される。標本データは通常、均一な直方体格子を形成するが、計測/シミュレーションデータはその限りではない。

四面体格子構造は、有限要素解析などで利用されているUCD (Unstructured Cell Data) に対応し、ボリューム合成において任意形状のボリュームデータを近似する際に用いられることが多い。また非格子構造は、多変量の統計データのようにサンプルデータ間のトポロジがまったく存在しな

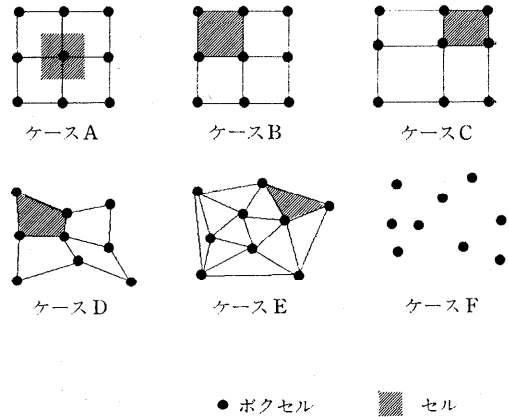


図-7 ボクセルのトポロジ/ジオメトリとセルの定義パターン

いケースである。非格子構造のボクセル相互の接続や、より制限の強いトポロジへの変換を目的としたアルゴリズムはスキャンライン法の応用によって設計可能なので、以下では断りのない限り六面体格子構造だけを扱うことにする。

3次元空間の各軸で隣接する計8個のボクセルを頂点とする六面体は、一般にセル (cell) と呼ばれる。特に、均一な立方体格子はキューブ (cube) と呼ぶこともある。セル内のフィールド値は通常、3重 (trilinear) 補間手法を用いて補間される。一方、中心に格子点座標をもち格子間隔を一辺とする立方体をキューブとし、キューブ内のフィールド値は一定とする定義法もあり、標本データに頻繁に適用される。実際には各キューブが微小であるため大きな問題にはならないが、同一のボクセル集合に対して定義されるキューブが、上述の2種類の定義では、格子間隔の半分だけ平行移動していることに注意されたい。

以上のボクセルのトポロジ/ジオメトリとセルの定義の組合せは、後述のVVアルゴリズムの適用範囲を決定するうえで重要な尺度となっている。次章以降での参照のために、図-7に6通りの定義パターンを示しておく。

4. VV の枠組

本章では、VVの枠組を用いて、3種類の代表的な可視化アプローチの処理の流れを明らかにする。

まず図-8に、前章での解析を基に、文献5)に示されているものにさらに改良を加えた包括的なVVの枠組を示す。VVのプロセスは、モデリン

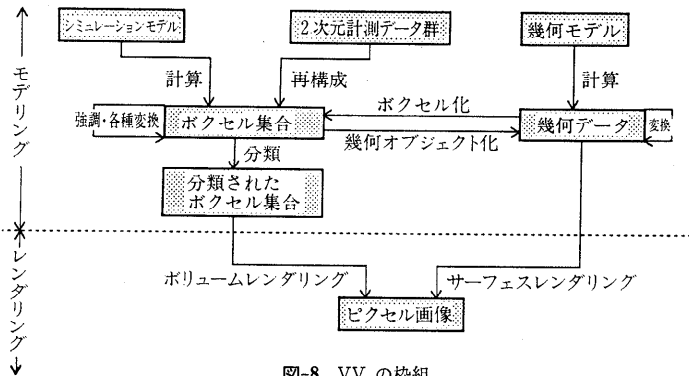


図-8 VV の枠組

グとレンダリングに二分される。前半のモデリングでは3種類の異なったボリュームデータソースから表示用の3次元データを構成し、後半のレンダリングでそれを2次元のピクセル画像にマッピングする。

ボリュームデータソースは、シミュレーションモデル、計測データ、幾何モデルの3種類である。上述のように、3次元シミュレーションは、直接計算によりボクセル集合を生成する。また、計測データは、スキャナやセンサのような計測機器を通じて、まず平行な二次元断面の列で与えられ、次に専用の補間手法を用いて、ボクセル集合に3次元再構成(3D reconstruction)される。なお、高度な原理に基づく計測装置によってはダイレクトにボクセル集合が得られる場合もある。また、ボリューム合成に必要な幾何データは、通常3次元オブジェクトのサーフェスを表す平面パッチの集合として与えられ、ボクセル化によってボクセル集合に変換される。

ボクセル集合と幾何データにはそれぞれ、レンダリングの前処理として画像処理の諸技法を駆使した再帰変換(強調、幾何変換、間引きなど)が必要に応じて施される。また、両者の橋渡しを行う目的で幾何オブジェクト化とボクセル化の相互変換が置かれている。

幾何オブジェクト化によって、一度ボクセル集合が幾何データに変換されれば、従来のサーフェスレンダリング(surface rendering)技法を用いたレンダリングが可能となる。これをインダイレクト(indirect)アプローチと呼ぶ。幾何オブジェクト化には2種類ある。一つは、あるフィールド値に注目し、その値の面を含むセルを選択していく等値面化(isosurfacing)であり、もう一つは、あ

る条件を満足するキューブの側面を順に構成していくCuberilleアプローチである。

一方、ボクセル化(voxelization)は、一種の3次元ラスタ変換(rasterization)であり、連続的な幾何データを、最も良く近似している2値ボクセル集合に変換する働きをする。ボクセル集合が幾何オブジェクトに変換されない場合は、分類操作を受けた後、ボリュームレンダリング(volume rendering)が適用されて、ダイレクトにピクセル平面に射影される。こちらがダイレクトアプローチであり、狭義のVVとして現在も研究・開発の中心となっている方式である。

次章と6章で、以上三つのアプローチについてさらに詳しく説明する。なお、同様の分類は文献6)でも採用されている。

5. インダイレクトアプローチ

5.1 等値面表示アプローチ

(1) アルゴリズム

ボクセル集合から効率的に等値面を生成する代表的なアルゴリズムとして、マーチングキューブ(marching-cubes)法²⁵⁾が知られている。この方法は、単一のキューブの8頂点で定義されるフィールド値と目的値との大小関係の組合せが、キューブ内に存在する等値面パッチのパターンを15通りに分類できるので、それを参照しながら、全ボクセルで連結した等値面を構成していく方法である。図-1(a)、4の等値面はともにマーチングキューブ法によって生成したものである。

従来、このマーチングキューブ法に対して、パターンによってはパッチの張り方にあいまいさが存在し、複雑な等値面の場合には面上に「とび」などが残る欠点が指摘されていた。しかし、この

あいまいさの大部分は、最近提案された双曲線パラメータ値による判別方式^{11),26)}によって解消できる。マーチングキューブ法は、ケースB以外にC, Dの場合にも適用できる点に注意されたい²⁾。

また、同法の等値面構成と同様の考え方を四面体格子のセルに適用した四面体分割法²⁷⁾も以前から知られている。この方法はケースEのボクセル集合に直接適用できる点でポリウム合成などには有利である。また、ケースB~Dのボクセル集合でも、各六面体セルを四面体分割することによって適用可能となる。

ところで、標本・計測データの場合、ボクセル集合から直接等値面を得るのではなく、各2次元断面上でコンタを求めた後、平行な隣接断面間のコンタ同士を線分で適当に(例えば、パッチの表面積の和が最小になるように)結び、等値面を形成していくアルゴリズムが70年代後半から盛んに研究・開発されてきた^{28),29)}。このアルゴリズムでは、コンタ接続の際の分岐処理などが困難な場合があるが、この種の問題については、ホトピー理論を用いて解法の一般化を図る試みが近年知られている³⁰⁾。しかし、一般にコンタ間の解像度が断面上の解像度よりも劣るため、再構成された等値面は非等方的であり、幾何変換などの操作には適しているとは言えない。そこで、断面間の補間処理をしてボクセル集合を得た後に3次的に等値面を形成する前述の手法のほうが一般的には利用されている。

(2) 利害得失

等値面表示アプローチは、「ポリウムデータは抽出可能な複数のサーフェスから構成されている」という層の構造が前提として与えられれば、特定の値のデータ分布を確認する目的に効果的に利用することができる。また等値面は、結果的に大幅な記憶量の節約につながり、既存のソフトウェアやジオメトリエンジンを上手に利用することによって、ポリウムの高速な操作と表示を可能とする。一方、フィールド値の空間コヒーレンスが悪い場合には、等値面を張るのに大量にパッチが必要なこともあり、一概に空間効率が高いとは断言できない。さらに、複雑な構造のポリウムデータに対しては、等値面の構成が本来的に不可能な場合も考えられる。また、仮に等値面が張れたとしても、面自身を半透明にしない限り面内部

の情報をそれ以上操作することはできない。

さらに、等値面によって確認できるものは、ポリウムデータへの「インタフェース」にしか過ぎないことを常に念頭に置かなければならない⁶⁾。「インタフェース」ということばは、ポリウムデータそのものではなく、それを理解するための手がかりを与えるものという意味で用いている。そのため、ポリウムデータそのものの解釈には人間自身が責任をもたなければならず、そのためには可視化の対象に関する専門知識が要求され、不完全な場合には誤解を招く恐れも生じてくる。たとえば図-1において、外部から与えられたエネルギーによって電子雲が歪められ、同じ電荷密度を表す等値球の半径が小さくなったとしよう。実は、これは電子雲全体の縮小を意味するものではない。全空間における電荷密度の積分値は1であるから、等値球の外部に存在する電荷密度分布の拡がりを意味するのであり、かえって電子雲は拡大しているのである²²⁾。

5.2 Cuberille (キューブ表示) アプローチ

Cuberille アプローチは、主に医学・生理学分野の3次元画像処理で利用されてきた方式で、ケースAの処理に相当する。端的に言えば立方体の積み木を用いたモデリングならびに表示方式と考えればよい。積み木一個が単一のキューブに対応する。視点に遠いほうから順に積み木を重ねて射影していけば、自然と陰面消去がなされた2次元画像が得られるという特徴をもっている¹⁹⁾。そこで、同じフィールド値をもつ積み木だけを積み重ねていけば、等値面表示に近い効果が発揮できる。逆に興味ある部位 (ROI=Region of Interest) を指定し、その積み木だけを描けば、ROI表面のフィールド値の分布を確認することもできる。また、皮剥き (peeling) と呼ばれる操作で、積み木を一つずつ除去していき、ROI内部の構造を対話的に確認することもできる。欠点は、空間解像度が高くないときに生じる階段状のエイリアシング (aliasing) であるが、これを回避する種々のシェーディング手法が近年開発されてきている⁵⁾。

図-3(a)は、本アプローチを用いて表示したものである。同図(b)には、後述の専用半透明表示法が適用されている。

6. ダイレクトアプローチ

6.1 原理

ダイレクトアプローチでは、等値面表示アプローチのようにボリュームデータの幾何的構造は仮定しない。むしろ空間内に漂う微小粒子からなる半透明ゲルを可視化の根拠としている。すなわち、フィールド値が粒子の密度を、フィールド値の勾配 (gradient) が粒子が構成する仮想的な微小サーフェスの法線をそれぞれ表現するといった独特の物理モデルを想定するのである。

まずボリュームモデリングの分類プロセスでは、ボクセル集合の各ボクセルに対し、この物理モデルに基づいて、与えられたフィールド値が、不透明度や RGB 値のような光学的なフィールド値に変換される。特に、Drebin らのアルゴリズム³¹⁾では、複数の含有物の含有比とおおのこの光学的性質を考慮するような確率的ボクセル分類の考え方が示されている (3.1(2)項参照)。

次のボリュームレンダリングのプロセスでは、通常各ピクセルごとに視点から伸びた射影光線に沿って、一定間隔で光学的フィールド値や別に再生しておいた微小サーフェスの法線ベクトルなどが再サンプリング (resampling) される。再サンプリングとは、前述したように、光線が通過するセルの頂点ボクセルにおける定義値を用いた3重線形補間にほかならない。これを不透明度が1になるまで反復し、各点のシェーディング結果をブレンディングすることによって対応ピクセルの最終値を決定する。このような原理を、ボリューム光線追跡 (volume ray-tracing/casting)⁶⁾と呼ぶ。ボリュームの場合、サーフェス指向の光線追跡とは異なり、通常光線の反射・屈折までは考慮しない。しかし、各再サンプリング点におけるシェーディング計算には、立体感の創出を目的として、旧来の照明モデルの種々の拡張が考案されている⁵⁾。

6.2 アルゴリズム

ボリューム光線追跡の原理に基づく具体的なアルゴリズムとしては、ケースAに対応する Sabella のアルゴリズム³²⁾、ケースB, Cに対する Levoy のアルゴリズム³³⁾、V-バッファアルゴリズム³⁴⁾などが有名である。ケースAに対応する前述の Drebin らのアルゴリズム³¹⁾と併せて、これらはす

べて1988年に発表されている。

Levoy⁶⁾によれば、サザランドらが隠面処理アルゴリズムを分類するために設定したビューイングの分類指標³⁵⁾を用いて、ボリュームレンダリングアルゴリズムを3種類に分類することができる。すなわち、ボクセル集合全体をスキャンし、各ボクセルをピクセルに射影する後方 (backward) 射影アプローチ (オブジェクト順アプローチ)、逆に各ピクセルに対し、ボクセル集合内のどのボクセルが射影に関係するかを見ていく前方 (forward) 射影アプローチ (画像順アプローチ)、あるいは両者の組合せ (ハイブリッドアプローチ) の3種類が存在する。

Drebin らのアルゴリズム以外の上記のアルゴリズムはボリューム光線追跡の原理に基づいているので、すべて画像順アプローチに属する。一方、Drebin らのアルゴリズムは光線追跡の代わりに、視線に合わせたボクセルスライスの幾何変換 (オブジェクト順) とスキャンライン法に基づくカラーブレンディング (画像順) を行うので、ハイブリッドアプローチに属する例である。また、並列計算に適した完全なオブジェクト順アプローチをとるアルゴリズムとしては、ケースBに対応する Westover の splatting³⁶⁾が知られている。

図-1(b), 2, 5にボリューム光線追跡によるボリュームデータの半透明表示の例を示す。これらの可視化にはすべて、V-バッファ法をケースBからEまでに対応できるように拡張した Garrity のアルゴリズム³⁷⁾を用いた。

6.3 利害得失

ダイレクトアプローチは、幾何構造が仮定できないような複雑なボクセル集合の可視化に有効である。また、上述の等値球の解釈の問題でも、光学的パラメータを調節することによって、ダイレクトアプローチは反転現象を抑制した自然な可視化を可能にする。ただし、最適な画像を得るために複数の光学的パラメータ値をチューニングし、適当な照明環境を設定するにはかなりの経験と手間が必要である。

一方、ボクセル集合の記憶量からくる処理時間の長さは、現在のダイレクトアプローチの大きな問題点である。そこで、ダイレクト/インダイレクト双方のアプローチが利用可能な場合には、あらかじめインダイレクトアプローチを用いて可視

化のための環境（ビューイングパラメータなど）の大枠を対話的に設定しておき、その後ダイレクトアプローチを用いて本格的な可視化を行えば、作業全体の効率の向上が果たせると考えられる¹¹⁾。

7. VV の高速化

本章では、ボリュームデータ処理の時空的オーダを克服するための高速化手法を2種類示すことにする。

7.1 適応的 VV

シミュレーションに使われる適応的 (adaptive) な (現象の振舞いが緩慢なところは粗く、急激なところは細かい) 計算格子生成と同様に、適応的なボリュームデータ構造を採用し、そのうえで高速なアルゴリズムを開発することが考えられる。一般に、画像処理やCGにおいてこのような divide and conquer アプローチをとるアルゴリズムは、同原理に基づく最初の隠面/隠線処理手法の開発者の名にちなみ、ワーノック (Warnock) 型と呼ばれている³⁸⁾。

すでに上述の三つのアプローチごとにワーノック型アルゴリズムの具体例が知られている：

- dividing-cubes 法³⁹⁾ (等値面表示アプローチ)
- G (Gray-scale)-octree 法⁴⁰⁾ (Cuberille アプローチ)
- pyramid 構造を利用したボリューム光線追跡⁴¹⁾ (ダイレクトアプローチ)

図-3(a)は、G-octree 法によるもので、等フィールド値の隣接キューブが階層的にマージされ、ボクセル集合全体は八進木構造により効率的に表現されている。同図(b)は、階層的な立方体構造が等角投影によって階層的な正三角形構造に射影される特徴を活かして視点に近いほうから順に階層的ボクセル集合を走査し、三角形の射影面ごとにボリュームレンダリングを行う高速化手法を用いて得られた半透明表示の例である²³⁾。

7.2 疑似ダイレクト VV

たとえば図-1における電荷密度分布のように、空間コヒーレンスが高いボリュームデータに対しては、計算量の多いボリューム光線追跡を行うよりも、密度値の異なる半透明の等値面を何枚か重ねて表示すれば、等値面の精密さとダイレクトア

プローチの直感性の両面を同時に兼ね備えた画像が得られると考えられる。図-9は、図-1と同一のデータに対し、4枚の等値面を半透明表示して重ねたものである。同様の考え方は文献42)でも提唱されている。また、こうした等値面をより多く重ねれば、原理的にはボリューム光線追跡で得られる画像により近いクオリティの画像が効率よく求まることが期待される⁴³⁾。

また、比較的解像度の高いボリュームデータでは、ボクセル内部を光線が通過する際の減衰の線積分を計算する手間を少なくするため、ボクセル断面を厚さのないピクセル平面とみなし、各断面の半透明画像を混合していくことも考えられる。これは不透明度 (α) プレンディングと呼ばれる手法で、いくつかの商用システムでも実際に採用されている簡易 VV 方式の一つである。

これらの疑似ダイレクトアプローチは、使用する状況さえ上手に選択すれば、ダイレクトアプローチの代替として十分に通用させることが可能であると考えられる。

8. VV のアーキテクチャとソフトウェア

本章では、VV に関連するアーキテクチャとソフトウェアの動向を簡単にまとめておきたい。

8.1 アーキテクチャ

一般にCGの高速化には、表示プロセスだけでなく、モデル計算プロセスの検討が不可欠である。たとえば、ダイレクトアプローチでは、上述のようなボリューム光線追跡で、光線とセルの交点計算や線積分計算をギガバイトオーダのボクセル集合に対して行う必要があるため、最低でも数GIPSの計算速度が必要なが実験的に確かめられている⁷⁾。この数値はVVの対話的環境を目指すうえでの現在の処理速度指標の一つとなっている。そこで、より高速な計算および大容量の通信が可能な処理/表示方式を目指したVV専用のハードウェアアーキテクチャが研究・開発されてきている⁵⁾。特に、高速3次元フレームバッファの開発とボクセル化などの基礎的な3次元ラスタ変換の並列化・ハードウェア化が急務である。

8.2 ソフトウェア

現在VVは、いくつかの商用可視化ソフトウェアシステムの機能の一部として提供されている。

Dyerの行ったシステムの機能検証⁹⁾によれば、

92年夏の時点で、ダイレクト/インダイレクト双方のアプローチをサポートしているシステムは以下の5つである:

- AVSIV (Advanced Visual Systems 社)
- apEIII (Tera Visual 社)
- Explorer (Silicon GRaphics 社)
- The Data Visualizer (TDV)
(Wavefront Technologies 社)
- VoxelView (Vital Images 社)

彼は、柔軟性で AVS と Explorer, 操作性で TDV, 効率性で VoxelView をそれぞれ推奨している。特に AVS¹⁷⁾は、豊富なボリュームビジュアライゼーション機能の提供にとどまらず、可視化におけるデータフローパラダイムの具現化、モジュール再利用性の追求、トラッキング(計算経過を可視化によって観測すること)/ステアリング(計算途中でパラメータ値を制御すること)などの基本的な可視化概念の実現を比較的初期から行っている点で、科学技術データのビジュアライゼーションソフトウェアの事実上の牽引役となっている。なお本稿の例は、図-3, 5, 6 を除いてすべて AVS を用いて作成された。

これまでのワークステーションの基本ソフトウェアは、UNIX をベースとして、マルチウィンドウシステム、GUI、ネットワークシステムなどの複数のサブシステムが比較的無造作に搭載されてきたような観がある。しかしここに来て、VV に代表される応用レベルでの高度なグラフィックス処理の高速化を実現するために、基本レベルに至るまで体系の抜本的な見直しが図られている。Xウィンドウ上にグラフィック標準 PHIGS による3次元グラフィック機能を構築し、標準的な分散グラフィックプロトコルを与える PEX (PHIGS-Enhanced X) はその典型的な例である⁴⁴⁾。VV システムもこうした基本ソフトウェア上に移値されていく傾向が窺える。さらに、ボクセル集合のようなデータ型をダイレクトにサポートするような VOS (Visual Operating System) の研究・開発にも関心が寄せられ始めている⁴⁵⁾。

9. 技術動向

本章では、VV に関する研究・開発の三つの主要テーマを示しておきたい。

9.1 動的 VV

単一のボクセル集合を表示の仕方を変更しながら高速にインダイレクト表示することにより、内部構造を見せながらも対象の概形を想起させるフリップブック (flip-book) 法が知られている⁴⁶⁾。計算資源が十分なレベルに達すれば、このような動的 VV は有力な手法になると考えられる。

9.2 非スカラーフィールドの VV

自然物象のモデル化によって生じるボリュームデータがベクトルやテンソルのフィールドをもつことは上でも述べた。これらをなんらかの方法でレンダリングすることは VV の中心テーマの一つである。

この解決策の一つとして期待されるのが、アイコン化 (iconification) である。すでによく知られている例としては、速度ベクトルを流線関数と渦度で表現することに対応する「リボン」がある。図-4には、カラーの等値面に加えて、流線と粒子による流体場のアイコン化の例が示されている。このように、時にデータ定義のスケールや表現法を一部変更しても科学的に説得力のある画像を生成することは、可視化の重要なポイントであり、ビジュアルインタフェース技術との接点領域でもある。

9.3 ボリューム CG との融合

上でも述べたように、ダイレクトな VV は元来、写実性の創出を目的としていた。現在まで、その種の目的を追求して、科学技術データの可視化とは独立に研究・開発が進められてきている領域が存在する⁸⁾。たとえば、形に付随する質感を扱う質感設計の問題²⁴⁾に不可欠な任意の3次元テクスチャを扱うテクセル (texel = texture element) と呼ばれる概念が提案されている⁴⁷⁾。

VV の理論の体系化やツールの標準化を進めるうえで、両者の歩み寄りには是非とも必要である。

10. むすび: ボリュームリアライゼーションへ向けて

ボクセル指向3次元データ表現とその表示技術である VV について概説してきた。

現在、複数の科学技術者同士が交換するデータや知識を統合的に管理し、個々の科学技術者の思考サイクル全体を支援するようなシステムの考え方が提案されてきている⁴⁸⁾。アイディアの検証に

可視化が大きな役割を果たすことは言うまでもない。今後の中長期的課題の一つは、この科学技術者支援システムの中に VV を組み込み、可視化結果の科学技術へのフィードバック系を構築することである。

このフィードバック系の実現に向けて期待されるインタフェース技術が、任意の方向から、サーフェスだけでなく3次元ボリュームの高速な表示と操作も可能にする仮想/人工現実感 (virtual/artificial reality)⁴⁹⁾ である。ここでは、科学技術データの理解を聴覚的に助けるもう一つの技術 sonification (可聴化)⁴⁵⁾ や触覚情報なども含めた科学技術者のためのマルチメディア環境が実現される。これによって調査研究の対象をより正確に理解できるようになることを期待して、ビジュアライゼーションの代わりに「リアライゼーション」(realization) なる用語も最近登場してきた^{50), 51)}。

リアライゼーションがもたらす応用上のインパクトの大きさは比肩するものが存在しない。たとえば、医学における人工患者を使った手術・治療シミュレーションは、社会的なコスト・倫理問題の解決、研究上の再現性、教育上の機会均等化、個別化の実現など優れた面を数多くもっている。また、基本構想段階から都市の景観を予測し、評価する景観シミュレーションにおいては、被験者が仮想的に散歩する街並みに大気汚染状況を示す有害物質の濃度分布を VV を駆使して作成し重ねて表示すれば、環境に対する問題意識を住民に植え付けるための格好のツールとなるであろう。

こうした VV 技術の今後の進展の鍵を握るのは、間違いなく現実の問題に同技術を応用していく利用者自身である。

謝辞 本稿は、91年、92年夏2回の米国 CG 現状視察に基づく記述を少なからず含んでいる。藤代にその機会を与えてくださった(株)アーク情報システムの藤井悦郎社長に心より感謝の意を表します。

また常々可視化について貴重なコメントをくださるお茶の水女子大学理学部情報科学科の佐藤浩史教授、筑波大学電子・情報工学系の池辺八洲彦教授、クボタコンピュータ(株)のビジュアライゼーショングループの皆さまに感謝いたします。

最後に、図-5を作成していただいた(株)メデ

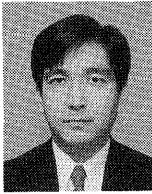
ィカルデザインの海野一則氏を始め、本稿の中で使用した画像データの提供を快諾して下さった方々にお礼申しあげます。

参考文献

- 1) Frenkel, K. A.: Volume Rendering, *CACM*, Vol. 32, No. 4, pp. 426-435 (1989).
- 2) Shirley, P. and Neeman, H.: Volume Visualization at the Center for Supercomputing Research and Development, *Proc. the Chapel Hill Workshop on Volume Visualization*, pp. 17-20 (1989).
- 3) Herr, L.: *Volume Visualization—State of the Art*, ACM SIGGRAPH Video Review Issue 44 (1989).
- 4) 実用化が始まるボリューム・レンダリング, 日経 CG, 1989年3月号, pp. 101-107 (1989).
- 5) Kaufman, A.: *Introduction to Volume Visualization*, in *Volume Visualization*, Kaufman, A. (Ed.), IEEE Computer Science Press, Ch. 1 (1991). (邦訳) 藤代一成: ボリュームビジュアライゼーション概論, *PIXEL*, No. 116, pp. 146-157 (1992).
- 6) Levoy, M.: *Introduction to Volume Visualization*, SIGGRAPH '91 Course Notes C7 (1991).
- 7) Hanrahan, P.: *State of the Art in Volume Visualization*, SIGGRAPH '91 Course Notes C8 (1991).
- 8) Inakage, M.: *Photorealistic Volume Modeling and Rendering Techniques*, SIGGRAPH '91 Course Notes, C27 (1991).
- 9) Kaufman, A.: *Introduction to Volume Visualization*, SIGGRAPH '92 Course Notes C8 (1992).
- 10) 藤代一成: 第4世代 CG: ボリュームビジュアライゼーションの本質, *PIXEL*, No. 116, pp. 144-145 (1992).
- 11) 藤代一成, 茅 暁陽: ボリュームビジュアライゼーションの基本アルゴリズム, *PIXEL*, No. 119, pp. 127-132; No. 120, pp. 130-135; No. 121, pp. 130-137 (1992).
- 12) Blinn, J.F.: Light Reflection Functions for Simulation for Clouds and Dusty Surfaces, *Computer Graphics*, Vol. 16, No. 3, pp. 21-29 (1982).
- 13) Kajiya, J. T. and Von Herzen, B. P.: Ray Tracing Volume Densities, *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, pp. 165-174 (1984).
- 14) McCormick, B. H., DeFanti, T. A. and Brown, M. D.: Visualization in Scientific Computing, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 6 (1987).
- 15) 小特集: コンピュータビジョンにおける手法, 情報処理, Vol. 30, No. 9 (1989).
- 16) 大特集: コンピュータグラフィックス, 情報処理, Vol. 29, No. 10 (1988).
- 17) 茅 暁陽: 画像処理とコンピュータ・グラフィックスの統合ソフトウェア—AVS, 映像情報, Vol. 23, No. 1, pp. 51-57 (1991).
- 18) 藤代一成, 国井利泰: ビジュアルコンピューティングとは?, カラーエイジ, No. 8, pp. 14-17

- (1992).
- 19) 國井利泰, 藤代一成: CAD における階層化ソフトウェアとそのツール, ソフトウェア工学ハンドブック (榎本 肇編), 第14章, オーム社 (1986).
 - 20) *Show Diary*, Computer Graphics World, 7/31, p. 15 (1991).
 - 21) Wang, S.: The Problem of the Normal Hydrogen Molecule in the New Quantum Mechanics, *Physical Review*, Vol. 31, pp. 579-586 (1928).
 - 22) 石川民子, 佐藤真理子, 戸田直美, 吉垣聡子, 藤代一成, 佐藤浩史: Volume Visualization のイオン・原子衝突問題への応用 (1)—Volume Modeling—/(2)—Volume Rendering—, 第44回情報処理学会全国大会講演論文集, pp. 2-371-372/pp. 351-352 (1992).
 - 23) Mao, X., Fujishiro, I. and Kunii, T.L.: A, Translucent Display Algorithm for G-Octree Represented Grey-Scale Images, *Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 1, No. 1, pp. 22-25 (1990).
 - 24) 藤代一成 (編著): CAD/CAM, 丸善 (1990).
 - 25) Lorensen, W.E. and Cline, H.E.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169 (1987).
 - 26) Nielson, G.M. and Hamann, B.: The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes, *Proc. IEEE Visualization '91*, pp. 83-91 (1991).
 - 27) Koide, A., Doi, A. and Kajioaka, K.: A Polyhedral Approximation Approach to Molecular Orbital Graphics, *J. Molecular Graphics*, Vol. 4, pp. 149-160 (1986).
 - 28) Christiansen, H. N. and Sederberg, T. W.: Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Meshes, *Computer Graphics*, Vol. 12, No. 3, pp. 187-192 (1978).
 - 29) Fuchs, H., Kedem, Z.M. and Uselton, S.P.: Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours, *CACM*, Vol. 20, No. 10, pp. 693-702 (1977).
 - 30) Shinagawa, Y. and Kunii, T.L.: The Homotopy Model: A Generalized Model for Smooth Surface Creation from Cross Sectional Data, *The Visual Computer*, Vol. 7, No. 3, pp. 72-86 (1991).
 - 31) Drebin, R. A., Carpenter, L. and Hanrahan, P.: Volume Rendering, *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 64-75 (1988).
 - 32) Sabella, P.: A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields, *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 51-58 (1988).
 - 33) Levoy, M.: Display of Surfaces from Volume Data, *IEEE CG & A*, Vol. 8, No. 5, pp. 29-37 (1988).
 - 34) Upson, C. and Keeler, M.: V-BUFFER: Visible Volume Rendering, *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 59-64 (1988).
 - 35) Sutherland, I. E., Sproull, R. F. and Schumacker R. A.: A Characterization of Ten Hidden-Surface Algorithms, *ACM Computing Surveys*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-55 (1974).
 - 36) Westover, L.: Footprint Evaluation for Volume Rendering, *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 367-376 (1990).
 - 37) Garrity, M.P.: Raytracing Irregular Volume Data, *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 5, pp. 35-40 (1990).
 - 38) Rogers, D.F.: *Procedural Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill (1985).
 - 39) Cline, H. E., Lorensen, W. E., Ludke, S., Crawford, C.R. and Teeter, B.C.: Two Algorithms for the Three-Dimensional Reconstruction of Tomograms, *Medical Physics*, Vol. 15, No. 3, pp. 320-327 (1988).
 - 40) Mao, X., Kunii, T. L., Fujishiro, I. and Noma, T.: Hierarchical Representations of 2D/3D Grey-Scale Images and their 2D/3D Two-Way Conversions, *IEEE CG & A*, Vol. 7, No. 12, pp. 37-44 (1987).
 - 41) Levoy, M.: Efficient Ray Tracing of Volume Data, *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 9, No. 3, pp. 245-261 (1990).
 - 42) 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 26, No. 1, pp. 181-188 (1985).
 - 43) Doi, A.: *The Tetrahedral-Cell Subdivision Method for Visualization of Scientific Data*, Doctoral Thesis, University of Tsukuba, Japan (1992).
 - 44) Hess, M.: X3D-PEX (PEX): *Three-Dimensional Graphics in a Distributed Window System*, SIGGRAPH '91 Course Notes C16 (1991).
 - 45) NICOGRAPH '91 セミナー: サイエンティフィックビジュアルイゼーション, セミナー5 (1991).
 - 46) Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K. and Hughes, J.F.: *Computer Graphics—Principles and Practice*, 2nd Ed., Addison-Wesley (1990).
 - 47) Kajiya, J.T. and Kay, T.L.: Rendering Fur with Three Dimensional Texture, *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 271-280 (1989).
 - 48) *Forefronts (Cornell Theory Center 所内報)*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-2 (1991).
 - 49) Krueger, M. W.: *Virtual Reality II*, Addison Wesley (1990).
 - 50) Rosenblum, L. J. and Brown, B. E.: Guest Editors, Introduction: Visualization, *IEEE CG & A*, Vol. 12, No. 4, pp. 18-20 (1992).
 - 51) 藤代一成: ビジュアルイゼーションからリアライゼーションへ, *PIXEL*, No. 122, pp. 83-86 (1992).

(平成4年5月20日受付)



藤代 一成 (正会員)

1960年生. 1983年筑波大学第三学群情報学類卒業. 1985年筑波大学大学院博士課程工学研究科電子・情報工学専攻修士号取得退学, 同年東京大学理学部情報科学科助手. 筑波大学電子・情報工学系を経て, 1991年よりお茶の水女子大学理学部情報科学科助教授, 現在に至る. 理学博士(東京大学). 種々の理工学問題に現れる大規模データの設計, 計算, 可視化および管理に関する研究に従事. 「CAD/CAM」(丸善)編著. IEEE, ACM, 情報知識学会各会員.



茅 暁陽

1962年生. 1983年中国復旦大学計算機学科卒業. 1990年東京大学大学院理学研究科博士課程情報科学専攻修了. 理学博士. 同年よりクボタコンピュータ(株)応用技術部に勤務. 1992年より(株)クボタソフトウェア研究開発第2部に出向中. 画像処理およびコンピュータグラフィックス関連のシステム研究開発に従事.



國井 利泰 (正会員)

学上, 修士, 博士号を化学分野で各々1962, 1964, 1967年に東京大学より受ける. 1969年東京大学理学部助教授. 1978年東京大学理学部教授. 現在に至るまでに執筆・編集した情報科学関係の単行本の数は45冊を越える. 審査済み学術論文も150余りを数える. 1984年コンピュータ・グラフィックス学会(CGS)を創設, 1984年より1988年まで会長. 学会誌「The Visual Computer」をSpringer-Verlag社より創刊(編集委員長). The Journal of Visualization and Computer Animation (John-Wiley & Sons, Chichester)編集副委員長. IEEE Computer Graphics & Applications, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 編集委員. IEEE フェロー.

