

特集

コンピュータ データ ビジュアリゼーション

藤代 一成 (お茶の水女子大学)

茅 暁陽 (山梨大学)

1 はじめに

高性能計算機を利用した数値シミュレーションは、さまざまな分野で先端的な役割を果たし続け、既に必要不可欠な方法論として定着している。一方、計測装置の高度化に伴い、直に観察することのできない現実の対象に関する数値データを、計算機に取り込んだ上で解析するという方法論も日常化してきている。この両者の統合は、理想的には、計算機上での理論と実験(観察)の対置(juxtaposition) [23] を可能にする。特に、大量の数値データから対象の定性的な特徴を効果的かつ直感的に理解するには、「百聞は一見に如かず」の諺どおり、数値データを視覚的な形式に変換して比較するのが最良の方法の一つであると考えられる。この目的のために頻繁に利用される CG 応用技術が、コンピュータデータビジュアリゼーション (Computer Data Visualization. 以後、CDV, ビジュアリゼーション, あるいは可視化と略す) に他ならない。なお、科学技術目的の CDV を、サイエンティフィックビジュアリゼーション (scientific visualization) と称することも多いが、本稿ではこの用語に統一する。

CDV は、かつて天体望遠鏡や顕微鏡が、肉眼では見ることのできない現実の対象の視認を可能にしたのと同様に、計算機が作り出す仮想のデータ世界に存在する対象を、視覚的に捉えようとする技術である。CDV には、現実の対象を直接的に取り扱う手法にはない、以下のような特長がある：

- 時空間独立性 (対象の時空間のスケールに依存しない)
- 第一人称性 (個々の好きな見方で対象を観察できる)
- 非侵襲性 (対象を壊さずにその内部を探れる)
- 再現性 (得心のゆくまで繰り返し対象を視ることができる)

その可能性と社会的インパクトの大きさを如実に語り、関連研究開発の火付け役となったのは、87 年に ACM SIGGRAPH から刊行された通称 ViSC (ViSC: Visualization in Scientific Computing) レポート [16] と呼ばれる調査報告書である。以来、CDV の適用分野は、宇宙物理学、気象学、構造力学、医学・生物学、量子物理化学、等のあらゆる領域に広がり [14]*, それに合わせて関連市場も確実に CAD に次ぐ規模を形成してきていると言われている [1]。

CDV を純粋な CG から技術的に差別化できる本質は、与えられた数値データを抽象化し、その性質を考慮して、最も効果的な視覚的形式へのマッピング方式を考案することにある。その目的のために、特定の適用分野によらない、横断的 (interdisciplinary) な CDV 手法が数多く確立されつつある。こうした立場から見た、90 年代前半までの CDV 研究開発の経緯の概略は、例えば文献 [1] を参照してほしい。またその詳細に関しては、紙数の都合からここでは、横断的技術としての CDV をトピックとして扱った良書として、[21, 20] を紹介するにとどめることにする。

2 ビジュアリゼーションパイプラインと MVE システム

CDV の手順は、一般に 4 つのステップから構成される。計算/計測による「データ獲得」に始まり、必要に応じて「フィルタリング」が施された後、対象データの性質を最も良く反映できると考えられる表示プリミティブへの「マッピング」が行われ、最後に結果の画像が「レンダリング」される。このデータフローの概念を最初にシステム化したのは、Conman [10] であり、後にビジュアリゼーションイディオム (visualization idioms) [9] あるいは情報フローモデ

* 本年 10 月から日経サイエンス誌で、国内外の可視化の最新事例を紹介する連載コラム「ビジュアルフロント」(藤代 監修) がスタートする。

ル (Information flow model)[19] としてパラダイム化されている。

ここで、各ステップに相当する具体的な処理機能を、モジュールとして独立させれば、可視化プログラムはモジュールをノードとする、ある種の有向グラフ (ネットワーク) で表現できる。MVE (Modular Visualization Environments) と呼ばれる汎用可視化ソフトウェアシステムでは、この考え方に沿って、大多数の可視化問題に適用可能と考えられる標準モジュール群が各ステップごとに予め用意され、画面上で必要なモジュールに対応するアイコンを選択・接続するだけで、可視化プログラムをビジュアルに編集・実行できる環境が提供されている。これにより、科学技術者ユーザが個々の応用に適した可視化プログラムを、面倒なグラフィックスライブラリの習熟を必要とせず手軽に開発できるようになった。「データを獲得した時こそ視たい時」を満足する、この利便性故に、MVE は現在、可視化システムの事実上の標準と認められるまでになった。知名度の高い MVE には、国内外での累計出荷本数が 14,000 本にも達すると言われる AVS[3] を筆頭に、apE, Iris explorer, IBM Data Explorer, Khoros 等がある。MVE の統一的解説として文献 [6] を薦める。

3 CDV 技法の実例

3.1 可視化技法の分類学

個々の可視化技法に関して、提案時における特定の応用に限定せず、その適用可能性を明確に定め、技法の体系化を図っていくことは、可視化技術全体を独立した学問領域に育て上げていく上で重要な役割を果たす。こうした目的をもつ可視化技法の分類学 (taxonomy) が数例知られるようになった。ここでは、その中の一つである Hesselink, Post, van Wijk による分類 [11] を紹介する。

彼らの分類は、大きく 3 つの視軸から構成される。まず、適用可能な対象データのオーダに注目し、物理場を構成するスカラー量、ベクトル量、テンソル量の 3 種類を考える。次に、描画する空間領域を考える。3 次元の場合、点、線、面、ボリュームの 4 つが考えられる。そして、対象データからどのようなレベルの情報を抽出して描画するかを工夫する。これには 3 通りあり、彼らは、サンプル点に与えられたデータそのものを描画する基本 (elementary) レベル; サンプル点

周囲の局所情報を導出・加味して描画する局所 (local) レベル; そして、より広範囲の領域の情報の解析結果に基づいて描画する大局 (global) レベルを挙げている。これらの総組み合わせは 36 通り存在することになるが、そのすべてが可視化する上で等価値であるとは主張していない。しかしながら、彼らは既存の技法によってそれらの中の重要なセルのすべてが埋め尽くされているわけではなく、そこに技法開発のヒントがあるとしている。以下の 2 項では、3 次元のスカラー場を基本レベルで描くボリュームビジュアライゼーション手法と、3 次元のベクトル場を、基本あるいは局所レベルで描く流れの可視化手法を紹介する。

3.2 ボリュームビジュアライゼーション

昨今の計算資源の急速な進展は、3 次元的に中身の詰まったボリュームを、対象データとすることを可能にしてきた。少し数学的に記述すれば、元々連続なボリュームデータ f は、以下のような写像として定義できる：

$$f: R^3 \rightarrow R \quad (R: \text{実数空間})$$

2 次元ディスプレイ上でこの写像 f を表示し、解析する場を提供することはなかなか難しい。なぜならば、 f を幾何学的に描きスクリーンに投影すれば、視点に最も近い情報だけが残り、その一部しか見せることができないからである。こうした部分的可視化の手法としては、大別して 2 種類の方式が知られている。一つは、定義域 R^3 の R^2 への制約の一種である断面表示、他方は、値域から特定の値を選び、そこに写像される定義域の部分集合を描く等値面 (isosurface) 表示である。等値面は、等高線の 3 次元化であると言えば、納得してもらいやすいであろう。ボリュームから等値面を抽出することを、サーフェスフィッティング (surface fitting) とも呼ぶ。

Fig.1a(口絵参照) に水素分子の周りの定常的な電子の等電荷密度面の例を示す。このようなサーフェス表示は、同データのようにスカラー場に相関 (coherency) があれば、既存の幾何学的レンダリングエンジンを利用して、時空間両面にわたって効率良く描くことができる反面、描画に対して選択されなかった領域の情報は伝えられないという欠点をもつ。

一方、3 次元スカラーデータの可視化の別法として、視線方向に重なったデータ値の混合を行い、ボリューム全体を半透明に表示するボリュームレンダリ

ング (volume rendering)[13] も知られている。厳密な値を見せることを断念する代わりに、ボリューム全体のデータ分布を直感的に見せる手法であるが、一般にデータ点数に比例する計算時間を要する高価なアルゴリズムを必要とする (Fig.1c: 口絵参照)。

そこで藤代らは、興味ある値域の一部を区間で緩やかに指定し、それに対応する定義域の部分集合を、区間型ボリューム (interval volume) と呼ばれるソリッドとして抽出するソリッドフィッティング (solid fitting) の考え方を提案してきた [7]。Fig.1b(口絵参照) を見ていただきたい。ソリッドフィッティングは、断面表示も組み合わせることで、幾何学的な手法ながら、かなりボリュームレンダリングに近い情報量の画像を生成していることがわかる。しかも描画のための計算量オーダーは、等値面表示の場合から変わっていない。換言すれば、ソリッドフィッティングは、両者の利点をもった、ブリッジ的役割を果たすことのできる手法と位置付けられる。実際、区間を目的のフィールド値に向けて狭めていくようなフォーカシング処理や、興味ある領域を指定する区間型ボリュームをバウンディングボリュームとして用い、不要な再サンプリングを避けてボリュームレンダリングを高速化するなど、三者を相補的に活用するハイブリッド型のボリューム探索環境が最も効果的であると考えている。

3.3 流れの可視化

3次元の大規模で複雑な流れ場の効果的な解析は、CDV の中でも長年に渡って多くの応用分野をもつ最重要課題として、数々の技法の研究開発に対し強力なインセンティブを与えてきた。一般に流れ場の各点には、ベクトル量だけでなく関連する複数のスカラー量も定義されているため、前項の記法を再利用すれば、3次元の流れのデータは以下のように定式化される。

$$f: R^3 \rightarrow R^n \quad (R: \text{実数空間}, n \geq 3)$$

値域の次元が高い分、限定された表示系では、ボリュームビジュアライゼーション以上にその効果的な可視化は難しく、基本的に3次元サーフェス上での可視化技法しか現在のところ開発されていない。

これまでに得られた流れの可視化技法は、大きく2種類に大別される。一つは、グリフ (glyph, アイコンとも呼ぶ) をベースとする技法で、最も簡単な例は、矢印の向きと大きさと空間の各点のベクトル量を、その色で関連するスカラー量をそれぞれ可視化するア

ロープロット (ヘッジホッグ) 法である。Fig.2a(口絵参照) は、超音速で進行する、先端に突起を有する円形オブジェクト表面上の流れのシミュレーション結果を同法により可視化した結果である。同図からも明らかなように、矢印の長さは視線の方向に依存し、観察の仕方によっては流れ場の特徴を見誤る危険性がある。また一般に細かい間隔で置かれた矢印同士の重なり合いによって、煩雑な画像が生成されやすく、場合によっては重要な流れの特徴を視覚的に捉えられないこともある。グリフは、その含意的な形状を工夫することによって、多変量を同時に可視化することも可能であるが [21, 1]、一般に表示できる量は、空間内のある点とその近傍に関連するものに限られ、適正なサンプリング結果が得られれば局所的な定量的解析には向くものの、大局的な流れの傾向等を直感的に把握することは不得手である。

そこで、もう一方のカテゴリーであるテクスチャをベースにする流れの可視化技法が相補的に利用されている。中でも 93 年に B. Cabral 他によって発表された、流線畳み込み法 (Line Integral Convolution: LIC)[5] は、そのアルゴリズムの簡潔さと相俟って、ベクトル場を効果的に可視化できる技法として大きな注目を集めてきている。LIC 法の包括的な解説としては、文献 [15] が知られている。

LIC 法はもともと 2次元のベクトル場の可視化技法として出発した。その計算原理はきわめて簡潔で、入力されたホワイトノイズ画像の各画素に対して、ベクトル場の局所流線に沿った 1次元フィルターカーネルを用いて畳み込みを行うだけである。これにより、ちょうど 2次元の流れ場の物理的な可視化手法の中でも代表的なアルミ粉懸濁法によって得られるのと同様なテクスチャ画像が得られる。1次元のカーネルを用いているために、大局的な流れの構造が理解できるのと同時に、渦中心のようなきわめて小さい構造の詳細も明瞭に可視化することができる。また、周期フィルターの利用によって、きわめて実感的な流れのアニメーションを容易に作成できるという特長も有している。

この LIC 法を 3次元サーフェス上の流れの可視化用に拡張するさまざまな研究開発例が知られている。しかし、従来法はどれも規則格子の計算空間で評価された LIC テクスチャを、それと 1対1対応が保証されている物理空間の 3次元構造格子サーフェスにテクスチャマッピングする方式を採用していたために、格

子の形状や大きさに応じて予期しないテクスチャの歪みが存在することが報告されていた。この歪みは、観察者に誤った流れ場の解釈を生ませる要因になりかねないため、極力排除する必要があった。そこで茅らは、2次元ホワイトノイズ画像の3次元版ともいえるランダムソリッドテクスチャを、三角形メッシュで与えられた任意の3次元サーフェスが横切る点で計算し、サーフェスに沿った局所流線上に定義されたフィルターカーネルと畳み込みを行う3次元 LIC 法を開発した [17]。

最も一般的な三角形メッシュによるサーフェスを対象とできることによって、有限要素解析等で利用される非構造格子のベクトル場や関連するスカラー場から導出される等値面 (例: 大気の等圧面に沿った風速の可視化) や、流れの境界を与える各種 CAD データ (例: 空力特性のシミュレーションにおける、機体面上の空気の流れの観察) に対しても適用可能な点で、従来法に比べてその汎用性を向上させている。

Fig.2b(口絵参照) に同じデータを本法により可視化した結果を示す。突起を設けることによって、気流がボディにアタックする状況が微妙に変化している様子が、突起直後の表面周囲に描かれた歪みのない LIC テクスチャから理解できる。また、本例では LIC テクスチャでは考慮されない、物体表面の法線方向の流れの向きと速度を、それぞれ色相と彩度にマッピングして (緑: サーフェス内部に向かう向き 赤: サーフェスの外側に離れる向き)、より多くの情報を可視化している。

さらに最近では、要素サイズが劇的に異なる曲線格子データに対し、ノイズ画像の粒度を適応的に変化させる、流れのテクスチャの鮮明化 [18] や、非定常流への適用拡大 [22] 等の後続の研究成果が発表されている。

4 情報の可視化

CDV ならではの効能を活かし、コンピュータアルゴリズムの振舞い、時間的変遷を遂げる複雑なビジネスデータ、人間とのコラボレーションを含む情報システムの挙動や、人間の知的活動の所産としての文書の構造といった、拡大した応用を扱う新たなデータビジュアライゼーションの領域が確立しつつある。これをインフォメーションビジュアライゼーション (Information Visualization; IV. 情報の可視化) と呼ぶ。

この分野の牽引役の一人である米国 Xerox PARC の S. K. Card [8, 2] によれば、IV とは、「動的な3次元 CG 技術を利用して、科学技術分野に限定されない、多くの場合、空間的構造をもたないようなデータに潜む有用な情報をより迅速にかつ容易に理解するための技術」であると定義される。空間的構造をもたない抽象的なものを対象にすることから、IV は spatialization (空間化), envisioning (ビジョン化), visual data mining とも呼ばれている。

この情報の可視化の技術革新を強力にプッシュしているのは、エンドユーザ主導のデータベースに、利用機会の大きく増したインターネットを通じて、誰もが居ながらにして瞬時にアクセスできるようになってきたという事実である。確度は低くても鮮度の点で勝る個人データベースの山から、個々のユーザにとって真の価値が見出せる情報の鉅脈を、手軽に、しかも要領よく見つけ出したい。そう願うユーザたちが、複雑な対象を「机上」ではなく、実世界のフィールドを模した3次元の視覚系によって効果的に解釈できる新技術の確立を欲しているのである。自然科学という専門の垣根が取り払われた結果、ビジュアライゼーション人口は、旧来の1万人から1億人のオーダにまで増えるとも見込まれている [12]。

実際、WIMP (Windows-Icons-Menus-Pointers) スタイルの2次元 GUI を越え、大量データ群の全体像を見失わずに現在探索しているポジションを確認できるような “Focus+Context” 機能を有する新しいメタファとして、3次元樹形図、球面マッピング、3次元スプレッドシート、地形モデル等が提案され、その効果が具体的な適用例によって評価され始めている。

5 おわりに

紙数の関係から、バーチャルリアリティ技術との融合によるリアライゼーション [1]、知識増幅と人工知能の間であって、CDV が情報バドラー化していく方向性等、その他の重要な関連動向の説明を省かざるを得なかった。それらを含めて、より詳細な議論は文献 [4] にまとめる予定である。

「可視化技術者 Visineer (=Visual Engineer)」はゲーテンベルグにとどまるか、それともシェークスピアになり得るか? という論争が関連技術者の間で知られている。CDV が情報のわかりやすい、効率的な呈示の道具にとどまるか、それとも新発見や発明に

資する創造的道具となり、「ビジョンサイエンス」が確立するかという意味である。オゾンホールを始めとして、既にいくつかの分野で後者を支援する結果が報告されている。次の 10 年間に期待される、横断的な技法のさらなる研究開発と各分野におけるケーススタディに基づく追究による両面からのアプローチが、この問いかけに対して確実な答えを出してくれると考えている。

参考文献

- [1] 藤代, サイエнтиフィックビジュアリゼーション, シミュレーション (日本シミュレーション学会誌), Vol.14(3), (1995), pp.4-11.
- [2] 藤代, サイエнтиフィックビジュアリゼーションからインフォメーションビジュアリゼーションへ (招待講演), 第 28 回 3D 画像コンファレンス'97 論文集, (1997), pp.24-29.
- [3] 藤代, 竹島, AVS — ビジュアライゼーションソフトウェア, bit 別冊「インターネット時代の数学」(戸川, 中嶋, 杉原, 野寺 編), (1997), 3.8 節 (pp.236-245).
- [4] 藤代, 茅, コンピュータデータビジュアリゼーション, 朝倉書店, (1998), 刊行予定.
- [5] B. Cabral and C. Leedom, *Imaging vector field using line integral convolution*, ACM Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, (1993), pp.263-270.
- [6] G. Cameron (ed.), *Special focus: modular visualization environments (MVEs)*, ACM Computer Graphics, Vol.29(2), (1995), pp.3-60.
- [7] I. Fujishiro, Y. Maeda, H. Sato, and Y. Takeshima, *Volumetric data exploration using interval volume*, IEEE TVCG, Vol.2(2), (1996), pp.144-155.
- [8] N. Gershon and S. Eick (eds.), *Computer graphics and visualization in the global information infrastructure*, IEEE CG&A, Vol.16(2), (1996), pp.60-75.
- [9] R. B. Haber and D. A. McNabb, *Visualization idioms: A conceptual model for scientific visualization systems*, Visualization in Scientific Computing, G. M. Nielson, et al. (eds.), IEEE CS Press, (1990), pp.74-93.
- [10] *ConMan: A visual programming language for interactive graphics*, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Conference Proceedings), (1988), pp.103-111.
- [11] L. Hesselink, F. H. Post, and J. J. van Wijk, *Research issues in vector and tensor field visualization*, IEEE CG&A, Vol.14(2), (1994), pp.76-79.
- [12] M. Jern, *Information drill-down using Web tools*, In Proc. 8th Eurographics Workshop on Visualization in Scientific Computing, W. Lefer and M. Grave (eds.), Springer-Verlag, (1997), pp.9-20.
- [13] A. E. Kaufman, *Volume visualization*, Invited chapter in *Handbook of Computer Science and Engineering*, A. Tucker (ed.), CRC Press, (1996), pp.1319-1353.
- [14] P. R. Keller and M. M. Keller, *Visual Cues Practical Data Visualization*, IEEE CS Press, (1993).
- [15] K.-L. Ma (organizer), *Texture Synthesis with Line Integral Convolution*, ACM SIGGRAPH97 Course Notes, 8 (1996).
- [16] B. H. McCormick, T. A. DeFanti, and M. D. Brown (Eds.), *Visualization in Scientific Computing*, ACM Computer Graphics, Vol.21(6), (1987).
- [17] X. Mao, M. Kikukawa, N. Fujita and A. Imamiya, *Line integral convolution for arbitrary 3D surface through solid texturing*, In Proc. 8th Eurographics Workshop on Visualization in Scientific Computing, W. Lefer and M. Grave (eds.), Springer-Verlag, (1997), pp.57-69.
- [18] X. Mao, L. Hong, A. Kaufman, N. Fujita, M. Kikukawa, and A. Imamiya, *Multi-granularity noise for curvilinear grid LIC*, In Proc. Graphics Interface '98, (1998), pp.193-200.
- [19] G. M. Nielson, *Visualization in scientific and engineering computation*, IEEE Computer, Vol.24(9), (1991), pp.58-66.
- [20] G. M. Nielson, H. Hagen, and H. Müller, *Scientific Visualization Overview · Methodologies · Techniques*, IEEE CS Press (1997).
- [21] L. J. Rosenblum, et al. (eds.), *Scientific Visualization - Advances and Challenges*, IEEE CS Press (1994).
- [22] H.-W. Shen and D. L. Kao, *A new line integral convolution algorithm for visualizing time-varying flow fields*, IEEE TVCG, Vol.4(2), (1998), pp.98-108.
- [23] N. J. Zabusky, D. Silber, R. Pelz, and Vizgroup'93: *Visionetrics, juxtaposition and modeling*, Physics Today, (March 1993), pp.24-31.