大規模シミュレーション結果の CAVE 装置による 対話的可視化*

—興味領域の抽出と自動詳細度設定—

大野 暢亮**

Visualization of Large Scale Data by the CAVE VR System — Extracting ROI and Automatic LOD —

Nobuaki OHNO

1. 緒 論

従来よりコンピュータシミュレーションの結果の解析に、Virtual Reality (VR) 装置が利用されている¹⁾。立体視を可能とする VR 装置を利用すれば、3次元データを“3次元のまま”解析することが可能で、効率が上がるからであるが、費用などの理由から、ユーザは限られていた。しかしながら、最近の VR 装置の低価格化により、予算が限られている大学の研究室でさえ、VR 装置は十分に手の届く範囲にある。10万円以下のヘッドマウントディスプレイ (HMD) でも、立体視のみならず、ユーザのトラッキングや音響などが実現され、さらに VR 空間などを操作するのに使用できるコントローラも付属する本格的な機種も存在している。

一般的に、VR 装置はステレオ画像 (右目用と左目用の2枚の画像) により立体視を実現している。つまり1フレームに2枚の画像が必要である。また、トラッキングなどでリアルタイムに視点が変化する状況では、スムーズな視点変更の実現には少なくとも毎秒10フレーム以上は必要であろう。結果として、立体視を行わない通常のディスプレイを利用する場合と比較して、VR 装置用の描画コンピュータにはより高いスペックが要求される。

VR 装置を利用した可視化解析が威力を発揮するのは、複雑な空間的構造を持つデータである。しかし、そのようなデータは、大規模シミュレーションの結果であり、先に述べた理由から、VR 可視化には不向きである。

本稿では、大規模シミュレーション結果を VR 装置で可視化する1つの方法を紹介する。本研究は著者が海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター (現地球情報基盤センター) 在籍時に、地球シミュレータにより出力

される大規模なデータを CAVE 装置で可視化することを目的として実施した。単純な仕組みで実現されており、CAVE 装置に限らず HMD 装置でも十分実装可能である。

2. VFIVE

VFIVE とは、没入型の VR 装置である CAVE 装置用の対話的可視化ソフトウェアである。本章では、CAVE 装置および VFIVE の説明を行う。

2.1 CAVE 装置

CAVE 装置²⁾は没入型の VR 装置であり、基本的な構成は4つのスクリーン (正面、床面、右面、左面)、立体画像投影用のプロジェクタ、トラッキング装置、ワンド、立体メガネ、立体映像生成用計算機である。立体映像生成用計算機は、グラフィックスワークステーションや PC クラスタで構成される。ワンドは3つのボタンとジョイスティックで構成されるが、現在はゲーム用のコントローラなどが使用される場合が多い。Fig. 1 に兵庫県立大学大学院に設置された基本構成の CAVE 装置を示す。立体メガネおよびコントローラについている球体は、トラッキング用のマーカーである。

ユーザは使用時には CAVE 装置内に入るのので、立体

Fig. 1 The CAVE system of University of Hyogo. (a) the CAVE system with 4 screens. (b) the liquid shutter glasses for stereoscopic vision. (c) the controller for interaction.

* 原稿受付 2018 年 10 月 10 日

** 正会員 兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究科
(〒650-0047 神戸市中央区港島南町 7-1-28,
E-mail: ohno@sim.u-hyogo.ac.jp)

映像が表示されているスクリーンに囲まれ、その中に没入する。さらに、トラッキング装置で取得した立体メガネの位置や視線方向のデータを基に、CAVE 内の立体映像は角度や大きさが常に更新されるので、ユーザはあたかも映像の世界に入り込んだ感覚を覚える。また、ワンドあるいはコントローラにより、描画用コンピュータに指示を出すことができるので、VR 空間や表示されているオブジェクトなどに対話的な働きかけをすることが可能である。トラッキング装置は、立体メガネだけではなく、ワンドの位置や方向も常に取得する。

2.2 VFIVE

VFIVE (Vector Field Interactive Visualization Environment) は、CAVE 装置用の対話的可視化ソフトウェアであり、VFIVE の初期のバージョンは、90 年代後半に、当時核融合科学研究所に在籍していた陰山 (現在は神戸大学) が開発した³⁾。スカラーデータおよびベクトルデータを CAVE 装置内で可視化することができる。VFIVE の主要な可視化手法を Table 1 に示す。可視化手法の詳細や VFIVE の開発の詳細は参考文献³⁻⁶⁾にまとめられているので、本稿では概略を述べる。

VFIVE は、対話性を重視した可視化ソフトウェアである。可視化するデータ・可視化手法は、VR 空間内に浮かぶメニューからワンドで選択することができる。また、等値面レベルなどの可視化パラメータも CAVE 装置内にいながらにして、ワンドを利用して設定することができる。例えば、Field Lines (流線) の出発点はワンドの先から出るビームの先端で決定される。ワンドの位置・方向はトラッキング装置により常時取得されているので、ユーザは自分の思い通りの位置を流線の出発点に選ぶことができる。また、等値面レベルは、ワンドを上下することで決定することができる。Isosurface などの可視化結果のオブジェクトは、すべてポリゴンを用いて表示しているが、ボリュームレンダリングは 3 次元テクスチャを利用して実現⁷⁾されている。

VFIVE の基本バージョンは公開されており、海洋研究開発機構の WEB サイト⁸⁾から自由にダウンロードすることができる。

3. CAVE による大規模データの可視化

大規模データを対話的に可視化するにあたり、解決すべき大きな課題は 2 つある。1 つは等値面作成などの可視化の処理時間、もう 1 つは等値面などの可視化オブジェクトのポリゴン数の増大によるフレームレートの低下である。本章では、VFIVE の並列化と、興味領域

(ROI: Region of Interest) の対話的抽出とその大きさに応じた詳細度 (LOD: Level of Detail) の自動設定機能の実装により、CAVE 装置内で大規模データの対話的可視化を実現した方法⁹⁾を紹介する。この方法は、情報可視化分野で有効な Ben Shneiderman の情報可視化のマントラ、“Overview first, zoom and filter, then details-on-demand.”¹⁰⁾の思想のサイエンティフィックビジュアライゼーションへの応用の 1 つである。

3.1 並列化

可視化手法やデータ処理に要する時間を短縮するために、VFIVE の可視化手法の並列化を行った。VFIVE を実行するグラフィックスワークステーションが共有メモリ型の並列計算機であったので、OpenMP を用いて並列化を行った。その際、描画部分と可視化計算を行うプログラムを分離した。描画部分と計算部分は、共有メモリを介して通信を行う。これは拡張性を考えてのことで、通信のインターフェイスを作成すれば、CAVE 装置用のグラフィックスワークステーションとネットワークで接続されているより強力な計算機を可視化処理に利用することができるからである。

3.2 ROI の抽出と自動的な LOD 設定

いくら大きな 3 次元データでも、興味のある領域を抽出し、それがリーズナブルな大きさであれば、そのデータの可視化は、十分実用的な処理時間とポリゴン数 (つまり実用的なフレームレート) で行うことができる。しかしながら、未知のデータを解析する場合、ROI を決め打ちすることはできない。上述したマントラのごとく、まずはデータ全体を俯瞰し、興味のある領域に徐々にズームして、データの内容を理解するべきである。これを実現するため、ROI 抽出機能と自動的な LOD 設定機能を VFIVE に実装した。以下、その機能の仕組みを述べる。なお、ROI の選択・抽出は、ワンドを利用して、CAVE 装置内で直感的に行うことが可能である。

3.2.1 スカラーデータ

等値面を例に説明する。ここでの目的は、データの全体像俯瞰と選択した ROI をそのサイズに依存せず、実用的なフレームレートや可視化処理時間を維持することである。データサイズ (格子数) が同じであれば、等値面生成時間と等値面を構成するポリゴン数はほぼ一定 (少なくとも大幅に増大することはない) と仮定し、以下のような仕組みを実装した。

1. オリジナルデータから、補間等により格子サイズ $N \times N \times N$ のデータを作成し、それを基に等値面可視化を行う (全体の俯瞰)
2. ユーザが CAVE 装置内で ROI を選択すると、オリジナルデータからその ROI 領域の格子サイズ $N \times N \times N$ のデータを作成し、それを基に等値面可視化を行う

ただし N^3 は利用する計算機で実用的な処理時間とフレームレートを維持できるサイズとする。

Table 1 Main visualization methods of VFIVE.

Scalar Data	Vector Data
Isosurface	Field Lines
Ortho Slice	Local Arrows
Local Slice	Snow in Spotlight
Volume Rendering

Fig. 2 Implemented procedure of data reduction for isosurface and volume rendering. The ROI data is created from the original data. ROI extraction can be repeated.

上記の手順 2. は繰り返し行うことが可能で、ROI を選択すればするほど、不要な部分が省かれて、その領域が詳細に可視化される。さらに実用的な処理時間やフレームレートを維持することもできる。ポリウムレンダリングの 3 次元テクスチャもこの方法で ROI が選択されるたびに作成される。スライス (Ortho Slice) については、等値面用のデータを基に、スライス 1 枚につき $(N-1) \times (N-1) \times 2$ 枚の 3 角形ポリゴンで表現するので、ポリゴン数はいつも一定である。手順を Fig. 2 にまとめる。

3.2.2 ベクトルデータ

ベクトルデータの可視化手法の計算コストは、さほど高くない。問題となるのは、可視化オブジェクトのポリゴン数である。本研究を実施した VFIVE には、流線を“線”だけでなくチューブで表示する機能が実装されており、ポリゴン数の削減は必須である。以下、流線の詳細度設定方法を述べる。

流線を求めるための Runge-Kutta 積分は、オリジナルデータを基に行う。流線の“線”やチューブの可視化オブジェクトは Runge-Kutta 積分で求めた点を全て使う（チューブであれば、全ての点を基にチューブの作成を行う）のではなく、間引いて利用する。ROI がオリジナルデータに近い大きさの領域の場合は多く間引き、小さい場合は間引く点を少なくする。Runge-Kutta 積分の回数が同じ場合、興味領域が大きいと流線は長くなり、小さいと短くなるので、興味領域の大きさによるポリゴン数の増減を抑えることができる。さらに、オリジナルデータを俯瞰するときには大きい構造が、ROI を抽出している場合は、ROI の大きさに応じて詳細な構造が浮かび上がる (Fig. 3 参照)。

Fig. 3 Data reduction of streamlines. The white circles are skipped, and black ones are used to draw streamlines or tubes.

3.3 可視化例

本研究で開発した機能を実装した VFIVE を用いて実際にデータを可視化した例を紹介する。

可視化したデータは、地球シミュレータで計算・出力された地球ダイナモのシミュレーション結果である¹¹⁾。球ジオメトリである Yin-Yang 格子¹²⁾上で計算されているが、VFIVE で可視化するために、カーテシアン座標のデータに変換した。入力データは、スカラーデータ $\times 8$ 、ベクトルデータ $\times 3$ である。それぞれが単精度浮動小数点型で格子サイズが 640^3 であるので、データサイズは約 1GB である。ベクトルデータは 3 成分あるので、合計で約 17GB である。

使用したグラフィックスワークステーションは、SGI 社 (現 HPE 社) の Onyx3800 (12CPU、メモリ 24GB、Infinite Reality4 $\times 2$ pipelines) で、本可視化を実行した当時でさえ、いくぶん旧式化していたが、十分なフレームレートを保ち CAVE 装置内で対話的な可視化を実行することができた。Fig. 4 および Fig. 5 にその様子を示す。本研究開発による VFIVE によるデータの可視化は、VR 可視化にありがちなアウトリーチ用の“見せる可視化”ではなく、実際のデータ解析に使用された¹³⁾。

4. おわりに

シミュレーションの規模が本研究遂行時よりさらに大規模化し、かつ本格的な VR 装置が低価格で手に入る現在こそ、本研究の意義があると考え、可視化情報学会誌の貴重な紙面の一部をお借りして、少々古い研究を紹介させていただいた。実際、本研究で使用した SGI Onyx3800 を、演算性能・グラフィックス性能・メモリ搭載量いずれの面でも凌駕する高性能な PC もごく普通の大学研究室で手に入るので、3.3 で示した可視化例より巨大なデータを HMD で対話的可視化することは十分可能である。この紹介記事が VR 装置による大規模データの可視化を考えている方々の参考になれば幸いである。

Fig. 4 Repeated ROI extraction for scalar data. He continues extracting ROI, and observes more details of isosurface as ROI becomes smaller from (a) to (d).

Fig. 5 Repeated ROI extraction for vector data. Like Fig. 4, he can observe more details of data.

謝 辞

本研究を共同で遂行していただいた神戸大学大学院システム情報学研究科の陰山聡教授に感謝いたします。また、Fig. 4 および Fig. 5 の掲載を快く許可していただいた、海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野の宮腰剛広主任研究員に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 清川清：バーチャルリアリティ技術を用いた科学的可視化のメリット—様々な研究事例を通して—，可視化情報学会誌，Vol.37, No.146 (2017) pp.2-7.
- 2) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A.: Surrounded-screen projection-based virtual reality. Proc. of SIGGRAPH '93, (1993) pp.135-142.
- 3) Kageyama, A., Tamura, Y., Sato, T.: Scientific Visualization in Physics Research by CompleXcope CAVE System, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.4, No.4 (1999) pp.717-722.
- 4) 陰山聡，大野暢亮：バーチャルリアリティを用いた対話的3次元可視化ソフトウェアの開発とその応用，プラズマ核融合学会誌，Vol.84, No.11 (2008) pp.834-843.
- 5) Kageyama, A., Ohno, N.: Immersive VR Visualizations by VFIVE. Part 1: Development, Int. J. Model. Simulat. Sci. Comput., Vol.4, 1340003, 14 pages (2013).
- 6) Kageyama, A., Ohno, N., Kawahara, S., Kashiya K., Ohtani, H.: Immersive VR Visualizations by VFIVE. Part 2: Applications, Int. J. Model. Simulat. Sci. Comput., Vol.4, 1340004, 16 pages (2013).
- 7) Ohno, N., Kageyama, A.: Scientific Visualization of Geophysical Simulation Data by the CAVE VR System with Volume Rendering, Phys. Earth Planet. Interiors, Vol.163 (2007) pp. 305-311.
- 8) <https://www.jamstec.go.jp/ceist/aeird/avcrg/vfive.ja.html> (最終アクセス日 2018 年 10 月 3 日).
- 9) Ohno, N., Kageyama, A.: Region-of-Interest Visualization by CAVE VR System with Automatic Control of Level-of-Detail, Comput. Phys. Comm., Vol.181 (2010) pp.720-725.
- 10) 伊藤貴之：CG とビジュアルコンピューティング入門 (初版)，サイエンス社 (2006) pp.147-149.
- 11) Kageyama, A., Miyagoshi, T., Sato, T.: Formation of current coils in geodynamo simulations, Nature, Vol.454 (2008) pp.1106-1109.
- 12) Kageyama, A., Sato, T.: The "Yin-Yang Grid": An Overset Grid in Spherical Geometry, Geochem. Geophys. Geosyst., 5 (2004) Q09005.
- 13) http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20080828/index.html (最終アクセス日 2018 年 10 月 3 日).