D 3 0 1

球面サンプリング版ポリュームレンダラーの研究・開発

鈴木 喜雄[○] (日本原子力研究所), 齋 和憲 (日本原子力研究所),

大野 暢亮 (海洋研究開発機構), 小山田 耕二 (京都大学)

Research and Development of spherical sampling volume renderer
Yoshio SUZUKI, Kazunori SAI, Nobuaki OHNO and Koji KOYAMADA

ABSTRACT

An immersive type virtual reality (VR) system has been used as one of the visualization techniques for analyzing various complicated phenomena in a computational science. On the other hand, the volume rendering method is widely used for the intuitively understanding of 3-dimensionally distributed physical quantities. Thus, it is very useful to apply the volume rendering method to the immersive VR system. However, a plane slice sampling method conventionally used in the volume rendering method has a problem that the quality of visualized images deteriorates in the immersive VR system. In this research and development, a sphere slice sampling method is applied to resolve this problem. In this presentation, the comparison between these two methods about the quality of image and the display speed has been performed. Further, the comparison between the hardware volume rendering method and software volume rendering method has been performed.

Keywords: Visualization, Volume Rendering, Virtual Reality

1. 緒論

近年、スーパーコンピュータの進展に伴い、計算科学において様々な3次元の複雑現象を取り扱うことが可能となってきた。ここで、シミュレーションなどから得られた結果を解析するには、視覚的に分かるようにすること、すなわち可視化することが必須である。

そこで、より直感的に現象を理解するため、3次元結果を3次元のまま立体表示し、結果の内部に没入して可視化結果を見ることが可能な没入型バーチャルリアリティ(VR)装置が利用されている^{1, 2, 3)}。

また、結果の3次元的分布を分かりやすく表示する方法としてポリュームレンダリング法が広く用いられており、この方法での可視化結果を没入型VR装置で表示する試みも行われている^{4, 5)}。しかしながら、従来のポリュームレンダリング法で利用されている平面サンプリング法では、没入型VR装置へ適用した場合、特に没入して可視化結果を見た場合には視界の端で画質低下が著しいことが問題であった。そこで、本研究開発では、球面サンプリング法を適用することによりこの問題解決を図った。このため、これら二つの方法を用いた可視化を没入型VR装置で実現し、両方法における表示速度と画質を比較することによりそれぞれの方法の有用性について検討を行った。さらに、文献4, 5)に示されているソフトウェア(CPU)で並列にレンダリング処理を行う方法と、こ

こで行っているハードウェア(グラフィックパイプ)でレンダリング処理を行う方法について表示速度を比較し、それぞれの方法の有用性について検討を行った。

次章では、日本原子力研究所計算科学技術推進センターに導入されている没入型VR装置について、また、第3章でポリュームレンダリング法について簡単に説明を行う。第4章でポリュームレンダリング法の没入型VR装置への適用について、また、第5章で比較結果について記述を行い、最後に第6章でまとめを記述する。

2. 没入型バーチャルリアリティ(VR)装置

日本原子力研究所では、原子力分野における様々な計算科学研究を推進している。ここで実行されているシミュレーションや数値解析等の結果を表示する手段の一つとして没入型VR装置が用いられている。没入型VR装置の特徴としては、3次元の可視化結果を立体的に表示可能である点、可視化結果の内部に視点を置くことにより没入して可視化結果を見ることが可能である点などが挙げられる。日本原子力研究所計算科学技術推進センター(上野地区)では、平成14年度末に本装置を導入し、平成15年度より運用を開始している。プロジェクションシステムは、2.1m四方のスクリーン3面、プロジェクタ3台、ステレオシャッター眼鏡、磁気トラッカ、3次元マウス(WANDA)から構成される(Fig. 1)。また、計算機は、8CPU(MIPS R14000)、16GBメモリ、グラフィ

ックパイプ(IR3)3本を有する Onyx300 である。

Fig. 1 Immersive VR system at CCSE/JAERI.

3. ボリュームレンダリング法

ボリュームレンダリング法は、3次元空間に分布している物理量などを、任意の視線に沿って一定間隔でサンプリングし、その値を加算していくことで最終的に半透明な画像を生成する方法である(Fig. 2)。表示対象としては、3次元的に分布している物質の濃度や密度などを表す場合に用いられることが多い。特に、分布が滑らかに変化していたり、複雑な分布をしているなど表示対象の表面形状の決定が困難である場合に有効である。典型的な例として骨格や大気中の水蒸気などが挙げられる。

Fig. 2 Sampling for volume rendering method.

ここで、サンプリングを面で行い、OpenGLの3Dテクスチャ機能を用いれば、半透明画像生成のための加算を高速に実行することが可能となる⁶⁾。また、このサンプリング面を平面ではなく球面にすることにより、視界の端の方での画像の歪みを無くし、より高品質なボリュームレンダリングが実現される^{7,8)}(Fig. 3)。ここで、サンプリング面は三角形ポリゴンの集合で表される(Fig. 4)。

Fig. 3 Spherical surface sampling.

Fig. 4 Polygon division of spherical surface.

本研究開発では、この球面サンプリングボリュームレンダリング法を用いた可視化結果を没入型VR装置で表示可能とすることにより、没入して結果を見る場合の画質向上を図り、本方法の有用性について検討を行っている。

4. 没入型VR装置でのボリュームレンダリング法

球面サンプリングボリュームレンダリング法の没入型VR装置への適用のため、CAVE Libraryを使用し、主に以下の3つの開発を行った。

4.1 サンプリング面の最適化

ディスプレイで表示する場合、考慮すべき視線は一つでよく、また、視線の方向は考慮する必要がないため、サンプリング面は表示する視体積(表示対象の存在する3次元領域)にあわせておくだけでよい(Fig. 5(a))。しかしながら、没入型VR装置では、左目用と右目用に対する画像をそれぞれ生成し高速に交互に表示することにより立体視を実現しているため、左右両目の視線を考慮する必要がある。さらに視線方向の変化を磁気トラッカで検知しその方向に対する画像をリアルタイムに再生成しているため、サンプリング面を視線方向の変化に対応させる必要がある。従って、ディスプレイで表示する場合の方法をそのまま用いると、左右の目に対してそれぞれ別々のサンプリング面を描いてしまい、さらに、各スクリーンに対してそれぞれ独立したサンプリング面を描いてしまう。このため、左右の目に対して同じサンプリング面を用いるために左右両目の真中を中心としたサンプリング面を生成することとした。また、これにより、視点とサンプリング面の中心がずれてしまうため、ディスプレイで表示する場合の視体積をそのままサンプリング面を描く領域として用いると実際に見える領域よりも表示領域が狭くなってしまうことから、視体積を適用せず視線方向に対して垂直な半球面をサンプリング面として用いることにした(Fig. 5(b))。

Fig. 5 Setting of the spherical surface sampling for the display (a) and for the immersive VR system (b).

4.2 テクスチャカラーテーブルの利用

没入型VR装置では、視線変更に従って可視化結果を表示する必要があるため、高速化が重要な要素となる。その一つとして、テクスチャカラーテーブルを使用する方法を用いた。テクスチャカラーテーブルはOpenGLの

拡張機能であり、これを用いることにより、テクスチャ内部に(密度のような物理的量などの)色情報以外のものを記憶させ、それ(例えば密度)と RGB 色を、テーブルを使用することによりマップすることが可能である。本機能の利用により、フレームレート(1 秒間に表示できるフレーム数：単位 fps)にして最大 2.3 倍程度高速化が実現した。また、メモリ量についても、カラー表示する場合には一般に各テクセル(テクスチャの構成要素)に対して RGBA(A は不透明度)の 4Byte が必要であるが、この機能を利用すれば 1Byte で済む。

4.3 陰影付け

陰影付けは、ボリュームレンダリング法を用いて可視化結果を表示する場合に、結果の 3 次元分布をより際立たせる上で重要な要素である。PC などでは、データテクスチャ、陰影用テクスチャ、光の方向を描画時に合成可能なマルチテクスチャ機能を用いて実現可能である。しかしながら、Onyx では本機能はサポートされていないため、これらを合成したテクスチャを予め作成する方法を用いた。本方法では、光の方向が変更されなければ描画速度へは影響を及ぼさない(逆に言えば、光の方向が変更された場合にはテクスチャの再生成が必要となるため影響を及ぼす)。

5. 性能評価

まず、平面および球面サンプリング法を用いた場合の表示速度と画質について比較を行った。次に、文献 4,5)の方法(ソフトウェア処理法)とここで行っている方法(ハードウェア処理法)について表示速度の比較を行った。

5.1 平面サンプリング法と球面サンプリング法の比較

表示対象としては、核融合研究で進められている先進核融合装置における磁場揺動発展シミュレーション⁹⁾でのある時刻の圧力分布を示している。本シミュレーションでは直交格子が用いられており、格子数は X,Y,Z 方向にそれぞれ 128 個である。速度計測に際して、観測者は没入型 VR 装置のほぼ真中に位置しており、サンプリング面の中心とシミュレーション領域の中心の間の距離は 1foot(0.3048m)とした。また、球面サンプリングでは 64 個の三角形ポリゴンを使用し、平面サンプリングでは 1 個の四角形ポリゴンを使用している。

図 6 に、サンプリング面が 256 枚の場合の両サンプリング法での表示画像を示す。これらの画像を比較すると、平面サンプリング法では視界の端でサンプリング面が目立つような画質低下(筋模様)が見られる一方、球面サンプリング法ではこのような画質低下は見られないことが分かる。

図 7 に、両サンプリング方法に対するフレームレートを示す。ここで、横軸にはサンプリング面数をとっている。本結果から、サンプリング面を平面とした場合にも球面とした場合にもサンプリング面数の増加に伴いフレームレートが減少していくが、サンプリング面数の増加

に伴い両サンプリング方法でのフレームレートの差は小さくなる(サンプリング面が 64 枚の場合で約 4fps から 256 枚の場合で約 1fps になる)ことが分かる。

これらの結果から、球面サンプリング法は平面サンプリング法と比べて、表示速度にそれほど大きな違いはなく、より高画質な表示が行えると結論付けられる。

Fig. 6 Comparison of image quality between plane sampling (a) and spherical surface sampling (b).

Fig. 7 Comparison of frame rate between plane sampling and spherical surface sampling.

5.2 ソフトウェアレンダリングとの比較

次に、没入型 VR 装置でボリュームレンダリング法を用いて表示する場合に、ソフトウェア処理法とハードウェア処理法でどちらがより有用であるかについて検討を行うため、文献 4,5)で行われたソフトウェア(CPU)によるレンダリング処理法と、ここで用いたハードウェア(グラフィックパイプ)によるレンダリング処理法についての比較を行った。

文献 4,5)で行われたソフトウェアによるレンダリング方法では、Shear-Warp 法をベースに、ボリュームレンダリングそのものの高速化のために連長符号化(RLE)¹⁰⁾を、また、ステレオ画像生成の高速化のために本画像の並行生成¹¹⁾を適用しており、さらにこれら 2 つのアル

ゴリズムを組み込んだ Shear-Warp 法の並列化を行っている。また、生成された 2 枚の画像をテクスチャとして貼り付けた 2 個の四角形ポリゴン(左右目に対して 1 個ずつ)を描画する方法を用いている。

図 8 に、両方法によるフレームレートを示す。表示対象は図 6 と同じである。ここで、横軸はサンプリング面の中心(観測者)と表示物の中心(シミュレーション領域の中心)の間の距離(単位: feet)を表している。ソフトウェアによるレンダリング処理法については、1CPU と 7CPU を利用した結果をそれぞれ示しており、ハードウェアによるレンダリング処理法については、平面サンプリングと球面サンプリングによる結果を両方示している。

Fig. 8 Comparison of frame rate between software rendering and hardware rendering.

この図から、ハードウェア処理法では、観測者が表示物に近い場合には、ソフトウェア処理法よりもフレームレートが小さくなるが、遠ざかるにつれてフレームレートが大きくなり、高速に表示できることが分かる。ここで、ハードウェア処理法において表示物が近い場合にフレームレートが小さくなるのは、ピクセル数の増加がサンプリング面数分起こるためである。従って、没入型 VR 装置において、より没入して観測する場合には、ソフトウェア処理法が望ましいことが分かる。しかしながら、ソフトウェア処理法では、投影法として平行投影が用いられており、サンプリング面が平面となるため、球面サンプリングを用いたハードウェア処理法の方が高画質である。また、本図からもハードウェア処理における平面サンプリング法と球面サンプリング法での速度の違いは小さいことが分かる。

6. まとめ

本研究開発では、ボリュームレンダリング法を没入型 VR 装置に適用した場合の表示速度と画質について、ハードウェア処理における平面サンプリング法と球面サンプリング法の比較、およびソフトウェア処理法とハードウェア処理法の比較を行った。これらの結果から、ハードウェア処理では、球面サンプリングが有用であることが明らかとなり、より没入した状態で表示速度を優先する場合にはソフトウェア処理法が有用であることを明らかにした。

これらの結果は、格子数 $128 \times 128 \times 128$ のデータをベースとしたものであり、より大規模な問題について検証を行うには、CPU 数やグラフィックパイプのメモリ量などの資源がより豊富にある環境が必要であり、今後の課題である。

謝 辞

本研究開発の一部は、VizGrid プロジェクト (<http://www.vizgrid.org/>) において実施されたものであり、ここに感謝の意を表します。また、データ提供いただきました核融合科学研究所の水口直紀先生に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Humphrey, W., Dalke, A., Schulten, K.: VMD-Visual Molecular Dynamics, *Journal of Molecular Graphics*, No. 14 (1996) pp. 33-38.
- 2) Turner, L., Levine, D., Huang, M., Papka, M. E., Kettunen, L.: Using the CAVE Virtual-Reality Environment as an Aid to 3-D Electromagnet Field Computation, *COMPUMAG-Berlin Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, Berlin, July (1995) pp. 10-13.
- 3) Kageyama, A., Tamura, Y.: Visualization of Vector Field by Virtual Reality, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No. 138 (2000) pp. 665-673.
- 4) 大野暢亮, 鈴木喜雄, 呉田昌俊: 没入型 VR 装置でのボリュームレンダリング, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集分冊 3, 平成 16 年電気学会全国大会 (神奈川 2004 年 3 月) (2004) pg. 106.
- 5) 大野暢亮, 鈴木喜雄, 呉田昌俊: 没入型 VR 装置における並列ボリュームレンダリング, 本誌
- 6) LaMar, E., Hamann, B., Joy, K. I.: Multiresolution Techniques for Interactive Texture-Based Volume Visualization, *The Joint Eurographics and IEEE TVCG Conference on Visualization*, May29-30 (2000) pp. 105-114.
- 7) Koyamada, K., Uno, S., Doi, A., Miyazawa, T.: Fast Volume Rendering by Polygonal Approximation, *Journal of Information Processing*, Vol. 15, No. 4 (1992) pp. 535-544.
- 8) Koyamada, K., Ito, T.: Fast generation of spherical slicing surfaces for irregular volume rendering, *Visual Computer*, Vol. 11, No. 3 (1995) pp. 167-175.
- 9) Hayashi, T., Mizuguchi, N., Miura, H., Kanno, R., Nakajima, N., Okamoto, M.: Nonlinear MHD Simulations of Spherical Tokamak and Helical Plasmas, 19th IAEA-FEC, Lyon (2002) IAEA-CN-94/TH/6-3.
- 10) Lacroute, P., Levoy, M.: Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation, *Proc. 1994 Symposium on Volume Visualization*, ACM SIG-GRAPH, Orlando, USA (1994) pp. 451-457.
- 11) T. He, T., Kaufman, A.: Fast Stereo Volume Rendering, *Proc. IEEE Visualization '96*, San Francisco, USA (1996) pp. 49-56.