

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280043

研究課題名(和文)大規模データ可視化のための統合粒子レンダリング環境の構築

研究課題名(英文)Construction of integrated particle rendering environment for large scale data visualization

研究代表者

小山田 耕二 (KOYAMADA, Koji)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：00305294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、大規模シミュレーション結果に対する対話的ボリュームレンダリングを実現するために、拡張性の高い統合粒子レンダリング(Particle-Based Rendering: PBR)技術を開発する。その有効性を検証するために、画像ベースPBRとオブジェクトベースPBRとから構成される統合PBR環境を構築した。この統合PBR環境の有効性を検証するために、IPBRとOPBRがシームレスに接続されることを確認した。次に、伝達関数の変更に対してスムーズにレンダリング結果が表示されるかどうかを確認した。最後に、大規模並列環境におけるレンダリング処理の拡張性に関して確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a scalable integrated particle rendering (PBR) technology to realize interactive volume rendering for large scale simulation results. In order to confirm its effectiveness, we have constructed an integrated PBR environment consisting of image-based PBR(IPBR) and object-based PBR(OPBR). In order to verify the effectiveness of this integrated PBR environment, we confirmed that IPBR and OPBR are connected seamlessly. Next, it was confirmed that the rendering result was displayed smoothly for the change of the transfer function. Finally, we confirmed the scalability of the rendering process in large scale parallel environment.

研究分野：可視化

キーワード：ボリュームレンダリング

1. 研究開始当初の背景

高性能計算機から生成される大規模シミュレーション結果は格子単位にその格子点でスカラデータが定義されていることが多い。このようなボリュームデータに対して、多くの情報を重畳して表現できるボリュームレンダリングを用いて半透明可視化する場合、視点からの距離の順で格子をソートし、奥から順に格子を画像平面に投影する手法(格子投影法)が多く用いられてきた。このソート処理は視点変化ごとに必要であり、可視化計算のボトルネックになることが指摘されており、ソート不要の技術開発が期待されていた。

この期待に対して、我々は、これまでオブジェクト空間での粒子生成に基づく PBR (OPBR) を提案した。不透明粒子を用いるのでソートは不要となる。OPBR では、不透明度から粒子数密度関数を導出し、この関数に従った粒子群の生成・投影を複数回繰り返し、アンサンブル平均により最終画像を得る。OPBR の描画速度は格子数ではなく粒子数に比例するため、適切な数の粒子が生成できれば、膨大な格子数から構成されるシミュレーション結果を効率よく可視化できる。OPBR は、高性能計算機からの大規模シミュレーション結果の可視化に用いられるようになったため、国際的に高い評価を受けている(小山田・坂本が IEEE PacificVis 2008, 2012 で優秀ポスター賞受賞)。また、京コンピュータにおける可視化ライブラリとしても採用されている¹⁾。しかし、ズーム時には粒子形状が目立つ場合があり、生成画像の画質の観点で問題があった。また、粒子を格子ごとに生成するために、この粒子生成に要する計算時間が膨大になる。

この問題を解決するために、我々は、格子投影法を基本に、ソート不要の新しいボリュームレンダリング手法を開発する。格子投影法では、格子の投影像を画素展開する際に、画素毎に不透明度と色値を評価し、これらを用いてアルファ合成処理を行い、画素値を計算する。このアルファ合成処理が格子のソート必要性和強く関係する。このソートを不要にするために、我々は、アルファ合成では半透明として扱っていた画素を「生成確率が不透明度となる不透明粒子である」と仮定する。この仮定のもとでは、視点から最も近くの不透明粒子の色値をそのまま画素値にするだけでよい。本手法は、画像空間での粒子生成に基づくので、OPBR に対して IPBR と呼ぶ。ボリュームレンダリングでは、ある区間におけるサンプル点の個数がポアソン分布に従うものとしており、この場合、その区間で 1 個以上の不透明粒子が生成する確率が不透明度となるので、この仮定は妥当である。この計算を多数試行し、そのアンサンブル平均をとることにより、大数の法則にしたがって、その平均値が本来の画素値に漸近するものと期待する。これが本提案を着想するに至っ

た経緯である。

2. 研究の目的

本提案では、確率的描画処理を使った PBR 技術を開発し、その技術を使って対話的ボリュームレンダリング技術を実現し、大規模並列環境で計算されたシミュレーション結果に適用してその有用性を確認する。研究期間内で、以下のことを明らかにする。

A. 確率的描画処理を使った PBR 技術の開発

格子投影像の画素展開において、評価される不透明度を確率として、その画素を描画するかどうか決定する GPGPU プログラムを開発し、格子数・画像解像度と描画時間の関係を明らかにする。

B. PBR 技術を使った対話的ボリュームレンダリング技術の開発

全体表示には OPBR を、詳細表示には IPBR を使った統合 PBR 環境を構築し、格子数・画像解像度に対して、対話性がどの程度確保されるのかを明らかにする

C. 大規模並列環境における PBR 高速化手法の開発

82499 ノードが 6 次元メッシュトラスネットワークポロジで接続されている京コンピュータのような大規模並列環境向けに PBR 技術を使った効率的な画像重畳法を開発を行い、プロセス数の増加に伴い、データ通信を含む描画速度がどう変化するのかを明らかにする。

当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義について、述べる。ボリュームレンダリングによる可視化については拡張性の観点で問題があり、対話性の確保が困難であるとされてきた。特に高性能計算機等で計算されることの多い大規模有限要素シミュレーション結果については、視点からの距離に応じた格子のソート計算のオーバーヘッドによりその傾向が強かった。OPBR は、この問題を解決する画期的な方法として認識され、粒子数が GPU のメモリに格納されるサイズであれば、数億格子から構成される有限要素シミュレーション結果のボリュームレンダリングにおいて、ノート PC であっても対話的速度での回転・移動・拡大縮小が可能となった。ただ、ズーム時の画質の劣化や伝達関数変更時の反応時間の遅さが指摘されていた。

本研究成果による OPBR と IPBR の統合環境により、大規模ボリュームデータの可視化において、以下の機能が実現可能となる。

(ア) 全体表示から詳細表示に渡っての高い対話性

従来では見落とししたかもしれない重要な特徴について気付きを促進する可能性が高まり、高いコストをかけて得られた大規模ボリュームデータの有効利活用が可能となる。

(イ) 複数ボリュームデータの統合可視化

異なった格子で表現された実験計測データとシミュレーションデータとの効果的な比較表示を行えるようになり、シミュレーションモデルの妥当性を検証するための新しい有効手段を提供することが可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の三項目について研究を行う。

A. 確率的描画処理を使った PBR 技術の開発
格子投影像の画素展開において、評価される不透明度を確率として、その画素を描画するかどうか決定する GPGPU プログラムを開発し、格子数・画像解像度と描画時間の関係を明らかにする

B. PBR 技術を使った対話的ボリュームレンダリング技術の開発

全体表示には OPBR を、詳細表示には IPBR を使った統合 PBR 環境を構築し、格子数・画像解像度に対して、対話性がどの程度確保されるのかを明らかにする

C. 大規模並列環境における PBR 高速化手法の開発

82499 ノードが 6 次元メッシュトラスネットワークポロジで接続されている京コンピュータのような大規模並列環境向けに PBR 技術を使った効率的な画像重畳法の開発を行い、プロセス数の増加に伴い、データ通信を含む描画速度がどう変化するのかを明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、以下の三項目

A. 確率的描画処理を使った PBR 技術の開発

B. PBR 技術を使った対話的ボリュームレンダリング技術の開発

C. 大規模並列環境における PBR 高速化手法の開発

について、有用性を検証するための検証実験を行った。以下に詳細を述べる。

A. 確率的描画処理を使った PBR 技術の開発
格子投影像の画素展開において、評価される不透明度を確率として、その画素を描画するかどうか決定する GPGPU プログラムを開発し、格子数・画像解像度と描画時間の関係を明らかにする

A-1. GPGPU を使った線分・三角形の確率的描画処理の実装

IPBR は、各頂点で色・半透明値が定義されたあらゆるグラフィックスオブジェクト（線、三角形、四面体など）に適用可能である。グラフィックスの基本形状である線分や三角形を対象とした確率的描画処理プログラムを GPGPU で実装した。GPGPU で多く用いられレンダリングパイプラインでは、機能を追加する可能性がある部分がプログラム可能になっており、バーテックスシェーダ・ジオメトリシェーダ・フラグメントシェーダにより実行されているが、IPBR では、このうちフラグメントシェーダのみに対して、確率的描画

を実施し、結果画像とテクスチャ保管画像を適切な比で加算し、テクスチャへ保管するプログラムを実装した。線分や三角形の個数を変化させながら、描画時間を計測する。また、繰り返し数と画素値の変化に関しても、これらを計測した。

A-2. GPGPU を使った四面体の確率的描画処理の実装

A-1 で開発したプログラムを使って四面体の確率的描画処理の実装を行った。四面体を画像平面上で三または四つの三角形に分割し、これらの頂点に色・不透明度を割り当て三角形として描画する。三角形の画素展開において、評価される不透明度を確率として、その画素を描画するかどうか決定する。描画する場合、さらに、その画素の深さをデプスバッファに登録されている深さと比較し、視点に近ければ実際に描画し、その深さをデプスバッファに上書きする。四面体格子から生成された三角形の場合、その投影像から展開された画素には深さ方向に幅を持つ。その時、視線が四面体に切り取られてできる区間内の 1 点（多くの場合、中点）でサンプル点を生成する。個数を変化させながら、描画時間を計測した。また、繰り返し数と画素値の変化に関しても、これらを計測した。

A-3. 四面体の確率的描画処理の高精度化

A-1 で開発したプログラムを使って四面体の確率的描画処理の高精度化を行った。区間内でのサンプル点発生がポアソン分布に従うと仮定したとき、サンプル点間距離が指数分布に従う。このことを利用して、その区間内で最も視点に近いサンプル点を効率よく生成する。サンプル点を単純に区間中点で、そして指数分布を使って得られた点で、生成する場合について、複数ボリュームデータのボリュームレンダリングを実施し、画質にどの程度の違いが出るのかを明らかにした。

B. PBR 技術を使った対話的ボリュームレンダリング技術の開発

全体表示には OPBR を、詳細表示には IPBR を使った統合 PBR 環境を構築し、格子数・画像解像度に対して、対話性がどの程度確保されるのかを明らかにする

B-1 統合 PBR 環境の開発

全体表示には OPBR を、詳細表示には IPBR を使う統合 PBR 環境を構築する。両者をシームレスに接続するために、概要表示の際には、低解像度格子を使って、ユーザの指定した詳細表示領域に含まれる格子番号群を効率よく特定し、これらを IPBR に受け渡し、レンダリング処理を実現するプログラムを開発した。この処理による詳細度制御において、レンダリングの計算時間や画質がどの程度変化するのかを計測し、詳細表示対象の格子数とシームレス接続における滑らかさとの関係を明らかにした。

B-2 粒子径動的設定手法の開発

OPBR においてコストの高い粒子の再生成を行うことなく不透明度の変更を実現するための動的粒子径決定手法を開発する。不透明度と粒子径との間に成立する関係式を使って、粒子の再生成を行わず、粒子径のみを変更する手法の開発を行った。粒子径を適応的に変更する場合と一定に保って粒子数を再生成する場合、それぞれに対して、OPBR を実施し、その画質や計算時間を計測し、あらかじめ特徴を埋め込まれたボリュームデータを使って、その発見に要した時間との関係を明らかにした。

C. 大規模並列環境における PBR 高速化手法の開発

82499 ノードが 6 次元メッシュトラスネットワークポロジで接続されている京コンピュータのような大規模並列環境向けに PBR 技術を使った効率的な画像重畳法の開発を行い、プロセス数の増加に伴い、データ通信を含む描画速度がどう変化するかを明らかにする。

C-1 任意プロセス数に対応する画像重畳アルゴリズムの開発

N 個の部分空間を任意の M プロセスで並列レンダリングする場合の効率の良い重畳アルゴリズムを開発した。ここでは、PBR によるボリュームレンダリングを対象に、まず N 個のファイルを M プロセスに分散ロードする並列スケジューリングを実装した。その後、任意数の M プロセスに対して画像生成と重畳を行うアルゴリズムを開発し、ロードバランスと通信スケジュールとの関係を明らかにした。

C-2 PBR 技術を使った画像重畳法の開発

大規模並列環境において本手法を適用する場合、計算機アーキテクチャに応じた高速化手法が重要となる。例えば京コンピュータは、全 82499 ノードが 6 次元メッシュトラスネットワークポロジで接続されている。このような超並列計算機上で効率の良い並列ボリュームレンダリングでは、各ノードで生成された部分画像を集めて重畳する戦略がとられる。超並列環境で画像重畳を行う場合、一般的にノードの増加に伴い画像生成よりも画像データ通信のコストの方が高くなる。このため、PBR 技術を使った効率的な画像重畳法の開発を行い、プロセス数の増加に伴い、データ通信を含む描画速度がどう変化するかを明らかにした。

C-3 統合 PBR 環境を使った可視化アプリケーションのプロトタイプ開発

C-1 と C-2 で検討した手法の評価結果をもとに、大規模並列環境における粒子ベースレンダリングを実用化するため、動的負荷分散手法の開発および統合 PBR 環境を使った可視化アプリケーションの開発を行う。京コンピュータなど大規模並列環境を使って計算科学を実践する研究者を対象にしたヒアリング

等を通じて、研究活動における本可視化アプリケーションの有用性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 4 件)

1. Kun Zhao, Satoshi Nakada, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Voting-based Ensemble-averaging Visualization for Water Mass Distribution", *Journal of Visualization*, Vol. 18, No. 4, pp. 719-731, 2015,
2. Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "KVS: A simple and effective framework for scientific visualization", *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (JASSE)*, Vol. 2, No. 1, pp. 76-95, 2015,
3. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Adaptive Fused Visualization for Large-scale Blood Flow Dataset with Particle-based Rendering", *Journal of Visualization*, Vol. 18, No. 2, pp. 133-145, 2015,
4. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Time-Varying Volume Compression in Spatio-Temporal Domain", *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (JASSE)*, Vol. 1, No. 1, pp. 171-187, 2014

(学会発表)(計 12 件)

1. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, Satoshi Tanaka, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, "Volume Rendering for 3D Scattered data with Interactive Particle-based Rendering", In Proc. of International Conference on Systems Simulation (AsiaSim2015), 2015.11.6,
2. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Visualization of Large-scale Time-varying Unstructured Volume Data with Interactive Particle-based Rendering", In Proc. of International Conference on Simulation Technology (JSST2015), pp.12-15, 2015.10.13,
3. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Using Interactive Particle-based Rendering to Visualize a Large-scale Unstructured Volume with Mixed Cell Types", In Proc. of IEEE Pacific Visualization 2015 (Poster), 2015.4.16,

4. Koji Koyamada, "Particle-based Rendering and its Applications," Korea Society of Visualization, Invited Talk, 2014
5. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Fused Visualization for Large-scale Time-varying Volume Data with Adaptive Particle-based Rendering", In Proc. of International Conference on Systems Simulation (AsiaSim2014), pp. 228-242, 2014.10.26,
6. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Fused Visualization for Large-scale Blood Flow Dataset", The 2014 International Conference on Life System Modeling and Simulation (LSMS2014) and 2014 International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment (ICSEE2014), pp. 246-255, 2014.9.20,
7. Kun Zhao, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Adaptive Fused Visualization for Large-scale Blood Flow Datasets with Particle-based Rendering", China Visual Analytics 2014, 2014.7.20,
8. Kun Zhao, Satoshi Nakada, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Ensemble-Averaged Visualization for the Interannual Variability of Water Mass Dynamics for the Northwestern Pacific Near Japan", In Proc. of The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16), 2014.6.26, ISFV16 Selected Paper
9. Kawamura Takuma, Idomura Yasuhiro, Miyamura Hiroko, Takemiya Hiroshi, Sakamoto Naohisa, Koyamada Koji, "Remote visualization system based on particle based volume rendering," Visualization and Data Analysis 2015 (VDA 2015)
10. 高見円仁, 趙堃, 坂本尚久, 小山田耕二, "流体中を運動する球まわりの伝熱の可視化", 日本流体力学会, 第 28 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2014.12.11,
11. Kun Zhao, Satoshi Nakada, Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, "Visualization of Scallop Larva Distribution in Funka Bay", 可視化情報学会, 第 42 回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2014.7.22,
12. ノナカ ジョルジ, 小野 謙二, 藤田 将洋, 坂本 尚久, 小山田 耕二, "大規模可視化向け並列 PBVR の考察", 可視化情報学会, 第 42 回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2014.7.22,

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称：粒子レンダリング処理装置及びコンピュータプログラム

発明者：小山田耕二, 坂本尚久

権利者：小山田耕二, 坂本尚久

種類：特許

番号：2015-019288

出願年月日：2015/2/3

国内外の別：国内

名称：粒子レンダリング処理装置、粒子レンダリング方法及びコンピュータプログラム

発明者：小山田耕二

権利者：国立大学法人京都大学

種類：

番号：PCT/JP2016/52954

出願年月日：2015/2/3

国内外の別：国外

取得状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/html/research01-01.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山田 耕二 (KOYAMADA, Koji)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：00305294

(2) 研究分担者

坂本 尚久 (SAKAMOTO, Naohisa)

神戸大学・システム情報工学研究科(系)・講師

研究者番号：20402745

小野 謙二 (ONO, Kenji)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・チームリーダー

研究者番号：90334333

野中 丈士 (ONO, Kenji)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・研究員

研究者番号：80437293

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者