

ReVolver/C40 を用いた時系列ボリュームデータの実時間可視化

原瀬史靖[†] 山内 聡[†], 森 眞一郎[†]
津 邑 公 暁[†] 五 島 正 裕[†] 中 島 康 彦[†]
北 村 俊 明[†], 富 田 眞 治[†]

本稿では、これまで我々が開発してきた、主軸等間隔サンプリング法による単純化、バンクコンフリクトのないメモリ構成、三重化メモリによるあらゆる方向からの可視化への対応といった特徴をもつ、ボリュームレンダリング専用並列計算機 ReVolver/C40 アーキテクチャの、可視化対象データのサイズに対するスケーラビリティを生かし、大規模ボリュームデータに対するリアルタイム可視化を実現するシステムの構想を述べ、その予備実験環境として構築した時系列ボリュームデータの実時間可視化システムの評価を行う。

Real-time Volume Visualization on ReVolver/C40

FUMIYASU HARASE,[†] SATOSHI YAMAUCHI,[†] SHIN-ICHIRO MORI,[†]
TOMOAKI TSUMURA,[†] MASAHIRO GOSHIMA,[†]
YASUHIKO NAKASHIMA,[†] TOSHIAKI KITAMURA,[†]
and SHINJI TOMITA[†]

This paper presents a concept of real-time parallel volume rendering system for time-varying scientific visualization of 4000³ volumetric datasets based on the scalable architecture of ReVolver/C40. A preliminary experimental environment using the rendering pipeline of ReVolver/C40 and newly designed DataProbe which is an additional hardware for parallel volume data transfer is also presented.

1. はじめに

大規模シミュレーションシステムの実用化に伴ない、4000³程度の大規模な3次元データの解析を支援する可視化システムの実用化が求められている。しかし、科学技術計算結果の可視化を支援するシステムの多くは、最終結果の可視化に主眼がおかれており、計算の途中経過を観測・解析してシミュレーションの継続の判断基準とする等の用途には向かない。そこで我々は、これまで開発してきたボリュームレンダリング専用並列計算機 ReVolver/C40 のアーキテクチャを基に、シミュレーションによって得られる大規模な3次元データをリアルタイムに可視化し、さらに解析・診断を対話的に支援するシステムを提案する。

以下、2章で研究の背景となる ReVolver/C40 について延べ、3章で、リアルタイム可視化システムの構

想について延べ、4章でシステムの実装可能性について考察した後、5章でまとめる。

2. ReVolver/C40 の概要

我々は、ボリュームレンダリング専用並列計算機 ReVolver¹⁾の開発を行っており、その成果として TI 社の DSP TMS320C40 を用いて構成した ReVolver/C40 と呼ぶプロトタイプハードウェアを開発しその評価を行ってきた²⁾。ReVolver/C40 では、主軸等間隔サンプリング法とこれに対応した3重化メモリ構造の採用により、可視化の際の視線方向や視点の位置に関する制限を一切設けることなくバンク数に比例するメモリバンド幅を提供することでリアルタイムな可視化を実現している。

ReVolver/C40 は、図1に示すように、システムコントロールユニット(SCU)、視線生成ステージ(RCS)、ピクセル値計算ステージ(PCS)、シェーディングステージ(SS)からなる。

ReVolver/C40 の3次元メモリでは、1) 与えられたボリュームデータを X, Y および Z の3つの主軸に対応して3重化し、2) 各々を主軸に添った N 個のサブボ

[†] 京都大学

Kyoto University

現在、(株)東芝

Presently with Toshiba Corporation

現在、広島市立大学

Presently with Hiroshima City University

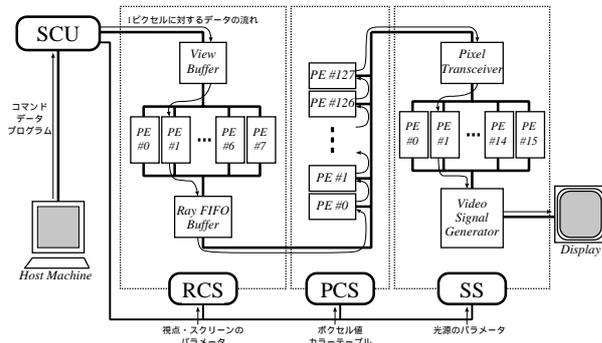


図1 ReVolter/C40の全体構成

リウムに分割する。3) 次に、3種類のサブボリュームセットから i 番目のサブボリュームを i 番目のメモリバンクに格納する(図2参照)。各メモリバンク (VM $_i$) には1つのピクセル値計算ユニット (PCU $_i$) が対応づけられている(図1のPCSを構成するPE $_i$ はVM $_i$ とPCU $_i$ を含んでいる)。

PCU $_{i-1}$ またはRCSから、視線情報とピクセル値計算の途中結果が与えられるとPCU $_i$ は自分のメモリバンクVM $_i$ 内で視線と交差するボリュームデータをサンプリングしピクセル値の計算を行う。 N 個のPCUでこの処理をパイプライン処理することで、ボリュームレンダリング処理を高速化する²⁾。

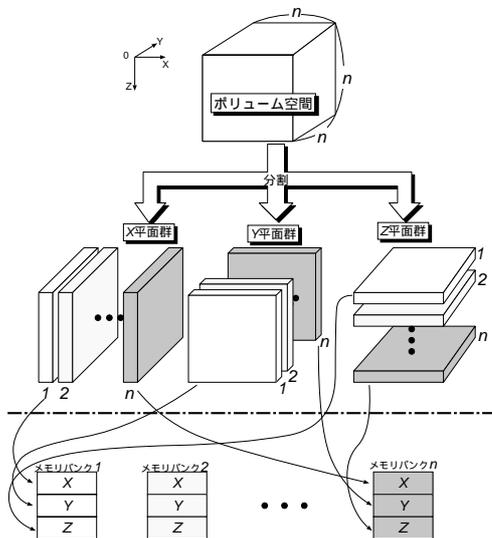


図2 Volume Dataの三重化

3. 実時間可視化システムの構想

我々が目標とする可視化システムは、 X^3 規模のシミュレーション結果から、 N^3 のボリュームデータが得られ、その可視化結果を $S \times S$ のスクリーンに表

示する場合を考え、 N の値としては4096、 S の値としてはSuper High Definition規格相当の2048を当面の目標とする。また、本システムでは、後述の2つの利用形態への対応を目指す。4000³程度の大規模な3次元データの可視化について考えると、従来のAVS等に代表される汎用計算機を用いた可視化では、使用する計算機のメモリ性能の制限からリアルタイム応答性が低い、もしくは非常に大規模な汎用計算機が必要となるなど、設置面積だけを考えてもコストパフォーマンスに問題がある。また、メモリの大容量化の恩恵を受け、ワークステーション・パーソナルコンピュータのアドオンボードとして、256²程度のボリュームデータを可視化するシステムは既に開発がなされているが、リアルタイム表示をする際には視点や視角などに制限がある。更に、4000³程度の大規模なボリュームデータを扱うにはメモリ容量、メモリバンド幅共に不十分である。そこで、ReVolter/C40で採用した3次元メモリ構造とキャッシュシステムの併用により、4000³程度のボリュームデータに対するリアルタイム可視化を実行できるシステムを開発する。

3.1 システムの利用形態と要求仕様

可視化システム全体を、データ生成系と可視化系にわけると次の2つの利用形態が考えられる。それぞれの要求仕様をまとめると以下ようになる。

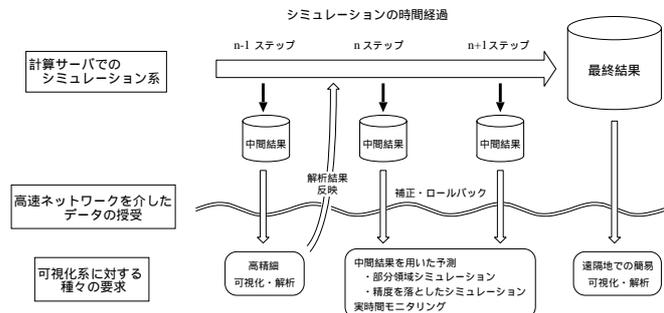


図3 シミュレーションと可視化の相互作用

3.1.1 オフライン可視化

これまでのReVolter/C40がターゲットとしていた分野で、医療画像の解析やシミュレーション結果の解析等、データ生成系と可視化系が比較的粗に連携している場合である。可視化系には高精細と高い実時間応答性、操作性が求められる。任意方向への連続した視点変化に追従するといった要求にも対応する必要がある。表1に主な要求仕様を示す。画像生成速度 R を秒間30枚とするとボリュームデータへのアクセススループットは約500GB/s、最も単純なサンプリング法を採用した場合の演算性能は6.5TOPS(16bit固定小数点演算)、フレームバッファの入力側スループットは504MB/sが要求される³⁾。

表1 可視化システム全体の要求仕様

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Volume Memoryのスループット | $S^2 \times N \times 1.05R$ |
| Volume Data 1個あたりの演算回数 | 13 |
| Frame Bufferの入力側スループット | $S^2 \times 4 \times 1.05R$ |

3.1.2 オンライン可視化

シミュレーションの途中経過の観察等に代表される利用形態である。例えば、一定間隔 T でシミュレーション結果が更新される場合、新しいボリュームデータを次のデータが来るまでに可視化できればよく、描画速度に対する要求はオフライン可視化ほどではない。その代り、データ生成系の処理を中断させないためには、 N^3 バイトのボリュームデータ更新処理と更新されたボリュームデータに基づいた描画を T 未満で実現しなければならず、レイテンシに対する要求が強い。また、表示結果を元にデータ生成系へのフィードバックをかけるといったステアリング機能や表示結果を残して後で再生するといったアーカイブ機能が求められている。

3.2 方針

これらの要求仕様を満たすべく、以下のような構成方針をとる。

3.2.1 ボリュームデータのローディング

オンライン可視化を考えた場合、データ生成系から可視化系へのボリュームデータの転送は大きな問題である。データ生成系と可視化系が独立したシステムの場合、PAVEMENT⁴⁾に見られるように両者の間のネットワークを強化し、ボリュームデータを圧縮して送る等の極めて直接的な解決策がある。一方、データ生成と可視化処理を一体化して同一のシステム内で可視化処理をソフトウェアで実現することで、ボリュームデータの転送自体をなくす方法⁵⁾も提案されているが、この方法ではオンライン可視化を行う場合のオーバーヘッドが高く操作性が劣るという欠点がある。我々も、データ生成系と可視化系を一体化するというアプローチをとるが、可視化処理を AGP あるいは PCI スロットへのアドイン型の専用可視化ハードウェアで実現することで、ボリュームデータの高速かつ並列転送を可能とし、実時間性と操作性を保証する。

3.2.2 描画速度

ボリュームレンダリング処理では、1つのボリュームデータ当りの演算量は比較的少なくパイプライン化が容易なため、描画速度を支配するのはボリュームデータへのアクセスバンド幅と考えると良い。今現在、 256^3 のボリュームデータを実時間で描画する PCI バス搭載のボリュームレンダリング専用ハードウェア VolumePRO⁶⁾が入手可能になったが、より大きなボリュームデータの実時間可視化ではメモリバンド幅の絶対的な不足のため、並列化によるメモリバンド幅の確保が必須である。VolumePRO を複数併用してより大規模なボリュームデータの実時間可視化を行うシ

テム VGcluster⁷⁾が提案されているが、VolumePRO 自体の制約から透視投影ができず、またボリュームデータの圧縮や負荷分散等への対応^{11),13)}が困難である。

提案するシステムは、我々が既に開発した Re-Volver/C40 で採用したアーキテクチャをベースにした物で、 $N \times N \times L$ のサブボリューム単位で並列化し、1ピクセル分のピクセル値計算をサブボリューム単位でパイプライン処理することで目標とする描画速度を得る。さらに、1) ボリュームデータの圧縮や 2) 不可視ボクセルのピクセル値計算の省略により、ピクセル値計算パイプラインの負荷を軽減する。またこの高速化によって生じるピクセル値計算負荷の不均衡を軽減するために、隣接ノード間で負荷分散を行うことで更なる高速化を図る。

3.2.3 ユーザインタフェース

従来のオフライン型の可視化システムからの継続性を重視し、ユーザインタフェースとしては汎用可視化ソフトウェア AVS を利用し、AVS の組み込みモジュールを介して専用可視化ハードウェアとのインタフェースを行う。これは PAVEMENT や VisLink⁸⁾ と同様のアプローチである。この際、シミュレーション結果からボリュームデータへのマッピング処理が必要となるが、この処理自体も極めて高いメモリバンド幅を要求する処理である。そこで、規則的なマッピング関数が与えられる場合に、マッピング処理をハードウェアで行うアクセラレータを設けることで一連の作業の高速化を図る。

3.2.4 シミュレーションステアリング

シミュレーションの途中結果の実時間可視化が可能になることで、次なるステップとして、シミュレーション自体の制御を行うメカニズム^{8),9)}を提供する。ここでは、シミュレーションの一時停止、中断やパラメータの変更といった操作を実現する。

4. システム構成

4096³の 8bit ボリュームデータを、SHD 規格相当のスクリーン (2048²) に秒間 30 枚のフレームレートで出力することを目標とした、リアルタイム可視化システムの構成例を図 4 に示す。図は、128 ノード構成の PC クラスタに、ボリュームレンダリング向けアクセラレータ (Visa: Visualization Accelerator, 図 5 参照) を装備し、VisA 間を双方向高速リンクで接続する。計算結果は VisA 間リンクと同一規格のケーブルによりフレームバッファへ送られディスプレイへ表示される。生成された 2 次元画像に対して、さらに高度な後処理が必要な場合は、ピクセル毎の Z 値や方向等の付加的な情報とともにホスト PC に送り、画像のアーカイブや汎用のグラフィックスアクセラレータを利用した表示を行う。

並列度を P とすると $L = N/P$

ReVolver/C40 では、視線生成、ピクセル値計算、シェーディングの3ステージをそれぞれ専用のハードウェアで構成したが、今回提案するシステムではピクセル値計算のみを重点的に専用ハードウェア化し、その他のステージが必要であった処理は各 PC の CPU や汎用のグラフィックスカードを用いて実行する。以下、主なシステム構成要素について説明を行うとともに実装可能性について検討する。

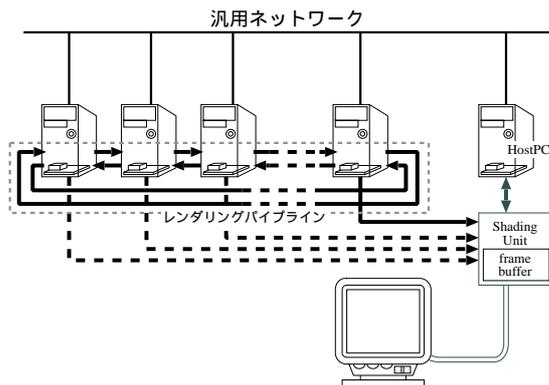


図4 実時間可視化システムの構成

4.1 PC クラスタ部

128 ノードの PC クラスタ部は、視線生成処理を行うとともに、オンライン可視化時にはシミュレーションを実行する。

4.2 VisA 間リンク

このリンクは、レンダリングパイプラインにおいて計算途中の色情報、透明度情報、Z 値を送るためのリンクであり、1008MB/s の転送速度が必要である。各ノードに隣接ノード間の双方向リンクと、フレームバッファへの出力ポートを設けることで、ReVolver/C40 で対応が困難であった種々のレンダリングアルゴリズムに対応する^{10)~14)}。具体的には、DVI 用 LVDS インタフェースを用いてネットワークを構成することを検討している。

4.3 ボリュームメモリ

ボリュームデータを格納するための容量 2GB のメモリで $4000^2 \times 32$ のサブボリュームを 4 セットまで格納可能とする。ノード内のピクセル値計算ユニットに対して 4GB/s のバンド幅を確保するため、PC800 規格相当の Rambus channel 4 チャンネル (合計 6.4GB/s) で構成する。

4.4 ピクセル値計算パイプライン

32 個のピクセル値計算ユニットをパイプライン接続して構成する。最も単純なサンプリングアルゴリズムを採用した場合、1 つのボリュームデータに対して、RGB それぞれに、乗算 2 回 + 加 (減) 算 2 回、透明度

フレームバッファの入力側スループットの約 2 倍

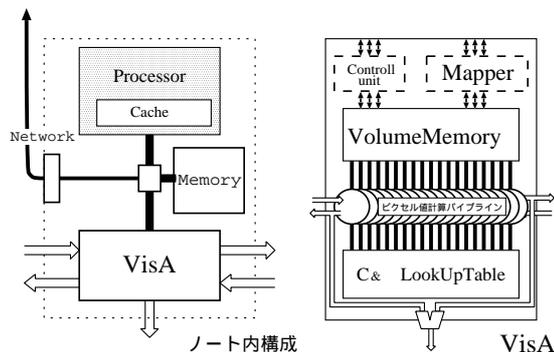


図5 内部構成

に対して乗算 1 回の演算が必要である。表示に必要な RGB は 8bit であるが、誤差伝搬の影響を軽減するため 16bit 固定小数点として色と透明度の演算を行う。パイプライン周波数は、画面サイズとフレームレートから 128MHz となる。

4.5 C & α LUT

RGB 各 8bit の色情報と、8bit の透過率を保持する 256 エントリのルックアップテーブルである。各ピクセル値計算ユニットが 1 ボクセルの演算を行う度に 1 回参照されるため、スループットのにはボリュームメモリの 4 倍の性能が要求されるが、小容量のメモリであるためマルチポート RAM を複数個用いて実装可能と考えられる。

4.6 制御ユニットおよび Mapper

制御ユニットは視線情報を始めとする描画に関する情報を CPU から受け取り、VisA 全体の制御を行う。Mapper は CPU 側からボリュームデータを受け取り、ボリュームメモリに格納する。アクティブレンダリングを行う場合において、シミュレーション結果からボリュームデータへのマッピング処理が定型的かつ簡易なものであれば、CPU 側でのマッピング処理を省略し Mapper に直接マッピング処理を行わせることで高速化を図ることができる。この目的のために Mapper には FPGA 的な機能を持たせる。

5. ReVolver/C40 を用いた実時間可視化

提案する可視化システムの実装に先立ち、予備実験環境として ReVolver/C40 を用いた時系列ボリュームデータの実時間可視化システムを構築した。前述の通り ReVolver/C40 はオフライン可視化を前提に設計されていたため、頻繁なボリュームデータの更新に対応できない。そこで、ボリュームデータの並列転送を支援するハードウェア (Data Probe と呼ぶ) を作成し、ReVolver/C40 の機能拡張を行い時変ボリュームデータの実時間可視化を実現した。

予備評価環境としては、P 台の PC からなる PC クラスタと N 個のピクセル値計算ユニット (PCU) から

なるピクセル値計算ステージ (PCS) を用いて実時間可視化を行うシステムを構築する。このとき、 N/P の PCU 毎に、Data Probe を介したポリウムデータ転送経路を設けることで、データ転送時間を $1/P$ にすることを旨とする。

5.1 システム構成

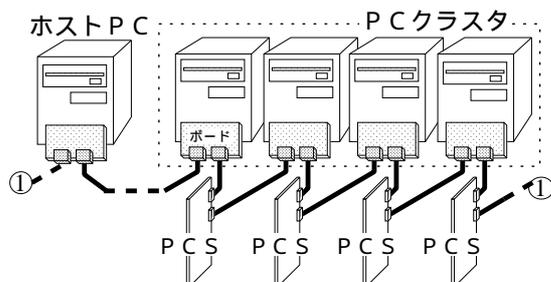


図6 プロトタイプシステムの構成

全体の構成は図6のように、PCIバスにDataProbeが挿さったパソコンとPCS基板(各基板に8個のPCU)からなる。PCクラスタでシミュレーションを実行し、その結果をPCSでレンダリングし、最終結果をホストPCで取り込みシェーディング等の処理を行ったのちディスプレイに表示する。

ホストPCは、この他にシミュレーションの実行開始・終了、データ転送の開始・終了、ポリウムレンダリングの開始・終了の全体の制御と、ポリウムレンダリング実行時の視線生成を行う。

5.2 DataProbe

DataProbeは、PCIスロットに挿入するPCIカードで、PCの主記憶上に置かれたシミュレーションの途中結果(ポリウムデータ)をPCS内のポリウムメモリに転送するためのインターフェースカードである。従来PCS基板間を直結していた通信リンク(ComPort)に直列に挿入する形でPCSと接続する。

DataProbeの基本動作モードは、1)シミュレーションのデータ等をPCクラスタからPCSへ転送するモード、と2)可視化処理実行時にPCS間の通信を中継する二つのモードがあり、VisAにおける「制御部およびMapper」の機能とVisA間リンク機能の両方を担当する。

現在は、Xilinx社のFPGA(XC4062XLA)を用いて構成しており、基本的な通信機能のみが実装を完了している。

5.3 シミュレーションと可視化処理の連携

ホストPCでのPCクラスタのシミュレーションの制御は以下の順序で行う(図7参照)。

- (1) 各PCは一定間隔シミュレーションを実行し、その結果をPCSに転送する。
- (2) 転送が終了したらホストPCに知らせる。全PCが転送を終了した時点でホストPCは各PCのDataProbeを、可視化のためのデータ転送モードにする。
- (3) ポリウムデータの三重化が必要であれば、全てのPCS間でデータを一巡させる。各PCUは送られてきたデータが自分のポリウムメモリに格納すべきデータであれば、そのコピーをつくって格納する。
- (4) ホストPCから視線データを送信し、PCSでレンダリング処理を行う。最終結果はホストPCが受け取り、自身のディスプレイに表示する。
- (5) 可視化条件を変更して可視化を続ける場合はそのまま繰り返し、可視化処理を終了する場合にはDataProbeをPCSへのデータ転送モードに変更し、1に戻って各PCのシミュレーション終了をまつ。

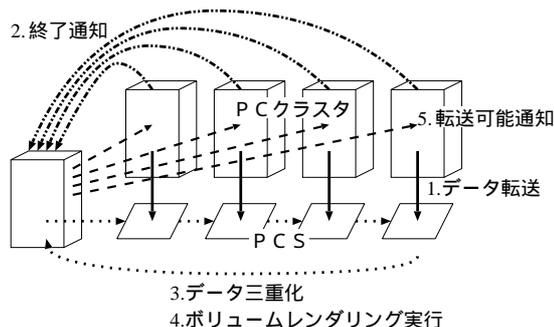


図7 ポリウムデータの転送と可視化処理

5.4 プロトタイプシステムの評価

5.4.1 評価環境

PCクラスタは、Intel PentiumIII 1GHz 主記憶512MBのPCが5台、OSはVine Linux 2.1.5(kernel 2.2.18)で構成している。ネットワークには100BASE-TXのイーサネットを用いており、与えられた境界条件の下で熱拡散方程式を解く簡単なプログラムをMPI通信ライブラリを用いて実装した。データの分割は、 256^3 の3次元データを $256^2 \times 64$ のデータに四分割し、それぞれのPCに割りあてている。この時、各PCが生成するポリウムデータのサイズは各々4MBとなる。

5.4.2 ポリウムデータ転送時間の評価と考察

PCSへの転送を並列に行う場合と行わない場合を実装し比較を行った。なお、可視化時間は両者とも同じであるので、可視化処理開始までに必要となる時間を実測した。表2は、データ転送時間の内訳である。

Gather処理は、逐次転送においてPCクラスタ側のネットワークでポリウムデータをHostPCに集

本来はAGPが望ましい。
現在はDSP TMS320C40の通信リンクに直結(20MB/s peak)

める時間であり、PCS 内巡回転送は並列転送時に、ボリュームデータの3重化を行う際に必要となる転送である²⁾。逐次転送の場合は、PCS へのボリューム転送と並行して3重化の処理が行われるため、別途 PCS 内巡回転送を行う必要はない。

表2 ボリュームデータ転送時間の内訳

| | 逐次転送 | 並列転送 |
|-------------|------|------|
| Gather 処理 | 4.7 | none |
| PC → PCS 転送 | 19.8 | 5.0 |
| PCS 内巡回転送 | none | 9.9 |
| 合計 | 24.5 | 14.9 |

PC から PCS への転送時間が 1/4 になっていることが分かる。視点に若干の制約をつけてボリュームデータの3重化を行わずに可視化を行う場合は¹⁰⁾、約5秒で全ての処理が完了する。この時間は DataProbe を挿入した PC の台数に反比例して単純に減少する。一方、逐次転送に要する時間は、PC の台数に関わらずほぼ一定である。ボリュームデータの3重化を行う場合においても、並列転送の有効性が確認できた。

現在、PC 内巡回転送時には、PCU 内の DSP がプログラム転送を行っており、実効転送速度が 1.5MB/s 程度しか得られていないが、VisA では専用の転送エンジンと高速 VisA 間リンクを併用することで、大幅な高速化が期待できる。

さらに、描画時の詳細度制御¹³⁾を併用して、3重化処理と描画処理を同時進行させることで、可視化システムの描画停止時間を最小にすることが可能と考えられる。

6. おわりに

本稿では、これまで我々が開発してきた ReVolver/C40 を応用し、4000³規模の科学技術計算結果の実時間可視化を可能とするシステムを提案し、その実装可能性を示した。また、ReVolver/C40 で時変ボリュームデータの可視化を支援する DataProbe を紹介し、その性能について考察を行った。

謝 辞

日頃より御討論いただく京都大学大学院情報学研究科富田研究室の諸氏に感謝します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)課題番号 13480083 ならびに 特定領域研究(C)(2)「情報学」課題番号 13224050)による。

参 考 文 献

1) 對馬 雄次 他, “ボリューム・レンダリング専用並列計算機 ReVolver のアーキテクチャ”, 情報処理学会論文誌, 第 36 巻, 第 7 号, pp.1709-1718, 1995.

2) 吉谷直樹 他, “ボリュームレンダリング専用並列計算機 ReVolver/C40 の性能評価”, 情処研報告, 99-ARC-132, pp.79-84, 1999.

3) Digital Visual Interface 仕様書 (Rev.1.0), Digital Display Working Group, 02 April 1999 (<http://www.ddwg.org>).

4) 板倉 憲一 他, “並列データ流に対する並列可視化”, 並列処理シンポジウム JSPP2001 予稿集, pp.189-196, 2001.

5) S.Doï et al., “RVSLIB: A Library for Concurrent Network Visualization of Large Scale Unsteady Network Visualization of Large Scale Unsteady Simulation”, SPEEDUP journal 11, pp.59-65, 1997.

6) Hanspeter Pfister, et. al., “The VolumePro Real-Time Ray-Casting System”, ACM SIGGRAPH 99, pp.251-260, 1999.

7) 村木 茂 他, “VG クラスタ: スケーラブルビジュアルコンピューティングシステム”, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2001 予稿集, pp.85-90, 2001.

8) 小西, 小笠, “リアルタイム可視化ツール VisLink の紹介”, 京都大学大型計算機センター広報, Vol.34, No.4, pp.209-222(2001).

9) 助村 俊一 他, “バーチャルマイクロスコプの制御手法の開発”, 情報研報 99-HPC-66(HOKKE'97), Vol.97, No.37, pp.25-30, 1997.

10) 金 喜都 他, “ピクセル並列処理によるボリューム・レンダリング向きの超高速専用計算機アーキテクチャ”, 情報処理学会論文誌, 第 38 巻, 第 9 号, pp.1668-1680, 1997.

11) 藤原雅宏 他, “階層格子ボリュームデータの実時間可視化”, 情処研報告, 98-ARC-128, pp.7-12, 1998.

12) 山内, 他, “透視投影ボリュームレンダリングにおけるサンプリング方式の評価”, 第 29 回 画像電子学会年次大会予稿集, pp.33-34, 2001 年 6 月.

13) 原瀬 史靖, “並列ボリュームレンダリング処理の高速化”, 京都大学工学部情報学科 特別研究報告書, Feb. 2002.

14) Kevin Kreeger, et. al, “Adaptive Perspective Ray Casting”, Proc. of 1998 Symp. on Volume Visualization, pp.55-62, Oct. 1998.