汎用グラフィクスカードを用いた並列ボリュームレンダリングシステム

丸山悠樹[†] 中田智史[†] 高山征大[†]
篠本雄基[†] 五島正裕[†] 森眞一郎[†]
中島康彦[††] 富田眞治[†]

本稿では汎用グラフィクスハードウェアを用いて，並列ボリュームレンダリングを行うシステムの実装について報告する．実装したシステムでは大規模かつ高速な描画を行うために，適応的サンプリングによるデータの圧縮と，中間画像の圧縮による通信時間の削減を行った．この結果，$512 \times 512 \times 1024$ のボリュームデータに対し，ほぼ実時間でのレンダリングが可能となった．

A Parallel Volume Rendering System with Commodity Graphics Hardware

Yuki Maruyama,[†] Satoshi Nakata,[†] Motohiro Takayama,[†]
Yuki Shinomoto,[†] Masahiro Goshima,[†] Shinichirou Mori,[†]
Yasuhiko Nakashima[††] and Shinji Tomita[†]

In this paper, we report the implementation of parallel volume rendering systems using commodity graphics hardware. In order to render large volume data with high frame rate, we have also implemented two kinds of data compression schemes: volume data compresson based on adaptive sampling technique and intermediate-image compression to reduce communication time. Consequently, we could realize real time rendering of $512 \times 512 \times 1024$ volume data using four commodity graphics hardwares.

1. はじめに

近年の計算機処理能力の向上による大規模シミュレーションシステムの実用化にともない，より大規模な 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．このような大規模な 3 次元データの解析を支援する可視化方法の 1 つとしてボリュームレンダリング[1)] があげられる．ボリュームレンダリングを用いることにより，複雑な 3 次元構造の理解が容易となるため，工学，医学等の分野で幅広く利用されている．しかし，膨大な計算量が必要とされるため，専用ハードウェアを用いる場合を除き，リアルタイムに可視化することは一般に困難であった．しかし，汎用グラフィクスハードウェアの機能の向上とともに，その機能を利用してボリュームレンダリングを行うことが可能となってきており，これを並列化して用いることで大規模なデータの可視化が可能となった．

本稿では，このような汎用グラフィクスカードを用いた並列ボリュームレンダリングシステムを ATI 社の RADEON9700PRO ならびに NVIDIA 社の GeForceFX5950Ultra を用いて実際に構築し，その評価を行った結果を報告する．

以下，2 章で研究の背景となるボリュームレンダリングについて説明し，3 章で汎用グラフィクスハードウェアによるボリュームレンダリング手法について述べる．4 章では並列化手法について述べ，5 章で具体的な実装について述べた後，6 章で評価結果を示す．7 章でシステムの実装および評価結果をふまえた考察を行ったのち，8 章で関連研究について言及し，9 章で結論を述べる．

2. Volume Rendering

我々が対象としているボリュームレンダリングは 3

† 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University
†† 京都大学大学院経済学研究科/JST
Graduate School of Economics, Kyoto University/JST

次元のスカラー場をボクセルの集合として表現し，2次元平面へ投影することにより，複雑な内部構造や動的特性を可視化する手法である．ボリュームレンダリングは大別して，すべてのサンプル点の寄与を計算して全体を表示する直接法と，前処理によって表示する情報を抽出してデータの一部分を表示する間接法の2種類に分類され，通常ボリュームレンダリングという場合は直接法のことを指す．直接法によるボリュームレンダリングでは対象空間内のボクセルすべての寄与を計算して2次元平面へ投影する．このため表示像が正確であり，はっきりとした境界を持たない雲や炎といった自然現象やエネルギー場の可視化に適用できるという特徴を持つ．このようにボリュームレンダリングを用いると，複雑な3次元構造の理解が容易となるため，工学，医学等の分野で幅広く利用されている．しかし，膨大な計算時間と記憶容量が必要とされ，大型計算機や特殊ハードウェアを用いる場合に利用が限られており，リアルタイムに可視化☆することは一般に困難であった．

3. Texture Based Volume Rendering

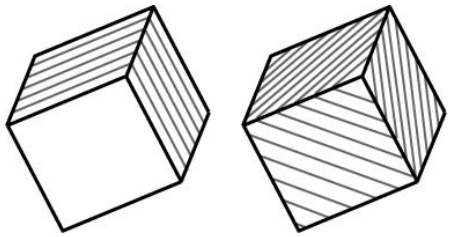
ボリュームレンダリングは描画面の各画素から視線方向に沿ってボクセル値の持つ色情報を積分していく．これを離散化すると，スクリーン上の各ピクセルごとに発生する視線に沿って，視線と交差するボクセル値のサンプリングを視線上のボクセルがなくなるまで繰り返し，ピクセル値を求めることになる．この方法は視点から近い順にサンプリングする方法（front to back）と，視点から遠い順にサンプリングする方法（back to front）に分けられる．back to front の場合，ボクセルの値を視点に近い順から，$v_0, v_1, \cdots, v_n$ とし，RGB の各色情報 c_k と不透明度 α_k がボクセル値 v_k の関数で表されるとすると，ピクセル値は

$$P = \sum_{i=0}^{n} \alpha(v_i) c(v_i) \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \alpha(v_j)) \qquad (1)$$

と表される．このピクセル値計算式は累積値 C_k を用いて次式のような漸化式に変形される．

$$C_{k-1} = \alpha(v_{k-1}) c(v_{k-1}) + (1 - \alpha(v_{k-1})) C_k \quad (2)$$

ここで $P = C_0$ である．式 (2) はボリュームのサンプリングを視線方向に従って一定のサンプリングで行い，描画面に遠い方から順に RGB 値を α ブレンディング[2] することでボリュームレンダリングができることを示している．α ブレンディングとは2枚の画像の持つ RGB 値を，α 値の示す比率で線形内挿して，合成画像の RGB 値を算出する方法である．ボリュームをある軸に対して垂直なスライスの重ね合わせで表現する．そのスライスをテクスチャとしてポリゴンにマッピングし，それらを視点から遠い順に順次 α ブレンディングすることでボリュームレンダリングを行う．この手法を用いることで，汎用グラフィクスハードウェアの機能を利用した高速処理が可能である[3]．グラフィクスハードウェアが3次元テクスチャをサポートしている場合には，視線に対して垂直な面を用意し，ボリュームデータを3次元テクスチャとして扱う方法が可能である（**図 1** (b)）．3次元テクスチャが利用できない場合は，ボリュームデータを各座標軸に対して垂直なスライスとして3つ用意し，視線方向とスライスの法線のなす角が一番小さい軸のスライスに対して，2次元テクスチャとしてマップする方法を用いる（図 1 (a)）．本稿で用いるグラフィクスハードウェアはともに3次元テクスチャをサポートしており，ボクセル値を 32 bit の RGBA データ（各要素 8 bit）として描画した場合，$256 \times 256 \times 256$ のボリュームデータをリアルタイムに描画することができる．したがって，本稿では3次元テクスチャによるボリュームレンダリングを扱うことにする．



(a) 2 次元テクスチャ (b) 3 次元テクスチャ

図 1 テクスチャベースのボリュームレンダリング
Fig. 1 Texture-based volume rendering.

しかし，さらに大きいサイズのボリュームデータを描画する場合，演算速度，メモリバンド幅，メモリ容量の制限等がボトルネックとなり，描画速度が低下する．RADEON9700PRO の場合，Core Clock: 325 MHz, Pipeline Unit: 8, Memory Pipeline: 310 MHz DDR, Memory: 256 bit 128 MB という仕様である．一番のボトルネックはメモリ容量で $256 \times 256 \times 256$ のボリュームデータを描画することが限界であるが，仮にメモリ容量の制限がなかったとしても，演算速度は 2.6 Gpixel/sec，メモリバンド幅は 19.8 GB/sec

☆ 本稿では 30 FPS のフレームレートを仮定しているが，1 GB を超えるような大規模ボリュームデータに対しては 10 FPS 程度でもリアルタイムと呼ぶことが多い（cf. IEEE Visualization 会議録等）．

であるため，1024^3 のボリュームデータの場合，たかだか 5 fps 程度しか描画できないということが分かる（7.1.1 項参照）．このように，現状の汎用グラフィクスハードウェアの性能は大規模なボリュームデータの描画を行うにはまだまだ性能が不足しており，複数の汎用グラフィクスハードウェアを用いた並列化を行う必要がある．

4. 並 列 化

汎用グラフィクスハードウェアのテクスチャマップ機能と α ブレンディングを用いることにより，ボリュームレンダリングの高速処理が可能になる．しかし，テクスチャを保持するグラフィクスハードウェアのメモリ容量には制限があるため，メモリ容量を上回るサイズのデータを描画することはできない．描画するデータがグラフィクスハードウェアのメモリ容量を超えない大きさのテクスチャに分割して描画させることにより，そのままでは描画できない大きなサイズのデータを描画することが可能となる．しかし，保持しているテクスチャデータのサイズがグラフィクスメモリの容量を超える場合，テクスチャデータはメインメモリに格納され，テクスチャは描画に使われるたびにグラフィクスカードに転送される．このため，テクスチャデータの転送時間がボトルネックとなり描画速度が急激に低下する．そこで複数の汎用グラフィクスハードウェアを用いて並列化を行う．これによりデータサイズの大きなボリュームデータを扱うことができる[20]．

4.1 基 本 方 針

まず，$N_x \times N_y \times N_z$ のボリュームデータを x，y，z 方向に d 等分に分割し，P 台のノードそれぞれで発生させた d^3/P 個のプロセスにそれぞれを割り当てる☆．各サブボリュームをそれぞれのグラフィクスカードに与えてボリュームレンダリングを行い，中間画像を生成する（**図 2**）．このようにして生成された d^3 枚の中間画像を 2 次元テクスチャとして扱い，視点からの距離の遠いものから α ブレンドして 1 つの画像にまとめることにより最終結果を得る．**図 3** にシステム構成図を示す．図の構成では Master ノードからの視線情報を基に 4 台の Slave ノードで構成する PC クラスタで中間画像を生成し，その結果をマスタに集めた後に最終合成が行われる．今，ボリュームデータの分割数 d を 2 とすると，図 3 のシステム構成では，各 Slave ノードが 2 つのサブボリュームを担当することになる．各スレーブノードの動作を**図 4** に示す．なお，現在の実装では描画処理と通信処理のオーバラッ

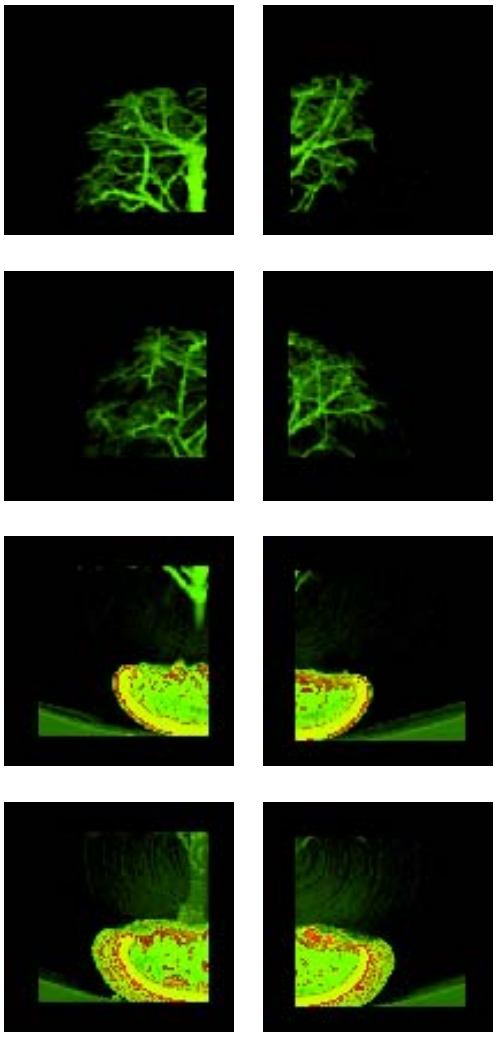


図 2 中間画像（$d = 2$）
Fig. 2 Intermediate images ($d = 2$).

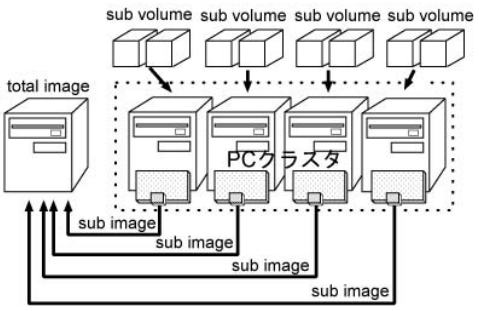


図 3 並列化
Fig. 3 Parallel implementation.

☆ 本稿の評価実験においては特に断らない限り，ノード数とは無関係に d=2 としている．

図 4 Slave ノードの一連の動作
Fig. 4 Rendering sequence on Slave nodes.

プは行っていない．

4.2 適応的サンプリング

並列化により大きなデータを扱うことができるが，さらに大きなデータを扱う方法として，ボリュームデータをブロックで分割し，ブロック内のデータの局所性を利用して，データ量を削減することでメモリ利用の効率化を行う適応的サンプリングという方法が提案されている[4]．この手法を用いることにより，ほとんど画質を劣化させることなく，データ量を大幅に削減することができる．

そこで，ボリュームデータの局所性を利用してデータ量を削減することにより，メモリ利用の効率化を行うことを考える．他にもグラフィクスハードウェアのメモリ容量を上回るサイズの大きなデータを描画する方法として，テクスチャデータをメインメモリに保持しておき，グラフィクスメモリに容量を超えない量だけデータを転送させる方法が考えられるが，今回使用する GeFoece4 Ti4600 の場合でも 1 MB あたり 1.85 msec 程度の転送時間を必要とすることが分かっている．この方法を用いる場合，1 回の描画ごとにグラフィクスハードウェアにテクスチャデータを転送する必要があるため，$256 \times 256 \times 256$ のボリュームデータの場合，1 フレームあたりの描画に少なくとも 116.4 msec はかかってしまうため，高速な描画処理を行うことはできない．リアルタイムに可視化するためには，つねにすべてのデータをグラフィクスメモリに収まりきる形で保持しておくほうが望ましい．そこで，データを固定解像度のブロックで表現し，ブロック内の局所性を利用して，データ量を削減することでメモリ利用の効率化を行う．[4]

$N_x \times N_y \times N_z$ のボリュームデータを x，y，z 方向それぞれに b 等分に分割した場合を考える．ただし，N_x/b，N_y/b，N_z/b は，OpenGL の制約上，2 のべき乗である必要がある．このようにして分割された各ブロックに対して，x，y，z 方向それぞれのデータサイズを 1/2 のサイズとすることで解像度を順に 1 段階ずつ減少させ，その際に生じる元のデータとの誤差を計算していく．解像度を下げる前の各ブロックのサンプル点のうち，解像度を 1 段階下げたときの各ブロックのサンプル点に含まれるボクセル値の平均値を，解像度を 1 段階下げたときのボクセル値と定義する．また，誤差はサンプリングした値との自乗誤差と定義する．このようにして解像度の変更された各ブロックを視点からの距離の遠いブロックから順に描画していく．**図 5** に 2 次元平面に対して行った適応的サンプリングの例を示す．ブロック全体の誤差が 0 の場合には画質をまったく変えずに，データ量を削減することができる．すべてのブロックで誤差計算を行い，誤差が許容値以下であるブロックの解像度を下げていく．この操作を繰り返すことで，全体としてデータのサイズを減少させていき，グラフィクスハードウェアで使用するメモリを最小限に抑えることができる．

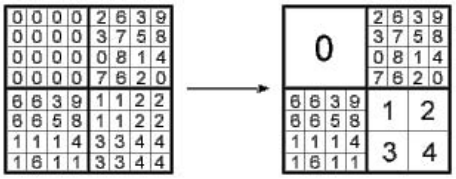


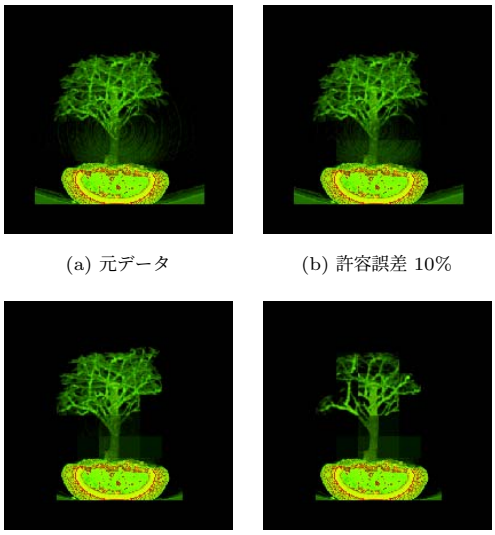
図 5 適応的サンプリング
Fig. 5 Adaptive sampling.

ブロックに分割されたボリュームを V とし，ブロック内の座標 (i,j,k) におけるボクセル値を $v_n(i,j,k)$，解像度を 1 段階下げたときのボクセル値を $v_{n-1}(i,j,k)$ とすると，各ブロックの誤差は

$$\sum_{(i,j,k)\in V} |v_n(i,j,k) - v_{n-1}(i,j,k)|^2 \qquad (3)$$

と定義される．

図 6 に実際のデータに対して誤差の許容値を変えながら，ブロック単位の適応的サンプリングを行い，データを削減したときの画質の変化を示す．ブロックの数は 8^3 である．このとき，元データのサイズに対する適応的サンプリング後のデータのサイズは許容誤差 10% で 47.5%，20% で 30.1%，40% で 18.2% にまで縮小できている．一般に，断層撮影等から得られるボリュームデータは全体の 70% から 95% が透明領域であり，この部分のデータ量をブロック化により効果的に削減でき，ブロック単位でこの手法を適用した場合，分割するブロック数に応じてデータを縮小することができる．シミュレーション結果の可視化に対



(a) 元データ (b) 許容誤差 10%

(c) 許容誤差 20% (d) 許容誤差 40%

図 6 適応的サンプリング
Fig. 6 Adaptive sampling results.

しても変化量の少ない領域に対して，この手法により効果的にデータ量を削減することができる．一般にボリュームの縮小化を進めるほど画質は劣化するが，この手法を用いるとほとんど画質の劣化なく，データ量を大幅に削減することができる．

我々の実装においては，前節で述べた d^3 個のサブボリュームごとに独立に適応的サンプリングを行う．また，適応的サンプリングにより 1 つのサブボリュームが複数のブロックに分割されるが（$d < b$ の場合），サブボリューム内のすべてのブロックの描画結果を 1 枚の中間画像に合成した後 Master ノードへ転送を行う．

4.3 中間画像の圧縮による高速化

一般に断層撮影等から得られるボリュームデータは全体の 70% から 95% が透明領域である．このことから，生成される中間画像には透明領域が多数含まれていることが多い．この透明領域では RGB の値はどのような値をとっても影響はない．したがって，不透明度 A が 0 であるピクセルの情報を圧縮することにより，通信データ量を削減することができる．生成された中間画像のデータはすべてのピクセルの RGBA 値（各 1 Byte）が順に並んだ 1 次元配列である．$A = 0$ となるピクセルがいくつか連続するとき，最初のピクセルの RGB 成分に相当する 3 Byte 分の情報を使って，連続するピクセルの個数を表し，4 Byte 目を 0 として圧縮することにより通信データ量の削減を行う（**図 7**）．たとえば，$A = 0$ となるピクセルが N 個続いた場合，$4N$ Byte から 4 Byte へデータを圧縮することができる．この手法を用いることにより，中間画像の通信によるオーバヘッドを低下させ，描画の高速化を図る．

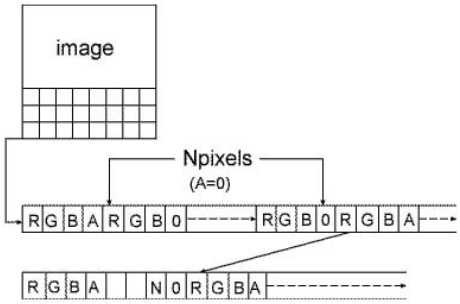


図 7 中間画像の圧縮
Fig. 7 Compression of intermediate images.

5. 実　　装

OpenGL1.2 グラフィクスライブラリを用いて PC クラスタ上に実装した．今回行った実装は 2 種類の環境で評価を行う．**表 1** に示す実装環境の PC クラスタをクラスタ 1，**表 2** に示す実装環境の PC クラスタをクラスタ 2 とする．なお，Master は生成された中間画像を 2 次元テクスチャとして扱い，α ブレンドして 1 つの画像にまとめるためのノード，Slave はサブボリュームのボリュームレンダリングを行うためのノードである．Slave ノード数は特に断りのない場合は 4 台で測定したデータを用いている．両表でのネットワークの実測性能は，簡単な pinpong プログラムを用いて，128^2 ピクセルの中間画像に相当するサイズ（64 KB）のデータを送受した場合の通信性能の実測値を示している．

OpenGL1.2 では，α ブレンディングを行う際に前後の 2 枚の画像が持つ RGBA 値に乗じる α 値を混合係数として設定する．色情報（source）が，バッファに保存されている色情報（destination）と，α ブレンドされて処理されるとすると，source と destination の RGB 値を C_s，C_d，α 値を A_s，A_d，混合係数（B_s, B_d）をとして，α ブレンド後のバッファの RGB 値と α 値は次式のように表される．

$$C = B_s C_s + B_d C_d \quad (4)$$

$$A = B_s A_s + B_d A_d \quad (5)$$

並列化を行う場合，スクリーンに対して後方にあるサブボリュームから生成した画像と，その前方にあるサブボリュームから生成した画像とを重ね合わせなければならない．そのため，各サブボリューム全体の不透明度を計算しておく必要がある．RGB 値と α 値の

表 1 クラスタ 1 の実装環境
Table 1 Specifications of cluster 1.

	Master
CPU	Pentium4 1.8 GHz
Memory	512 MB/PC133
Motherboard	DFI NB72-SC
Gfx Card	GeForce4 Ti4600
Gfx Memory	128 MB DDR
Gfx Driver	nvidia Ver.1.0-5328（2003/12/17）
OS	Red Hat Linux 8.0（kernel 2.4.18）
	Slave
CPU	Pentium3 1.0 GHz
Memory	512 MB/PC133
Motherboard	EPOX EP-3S2A5L
Gfx Card	RADEON9700PRO
Gfx Driver	fglrx（2003/09/23）
Gfx Memory	128 MB DDR
OS	Red Hat Linux 7.3（kernel 2.4.18）
NODE	4 台
Network	100 BaseTX Ethernet
（スイッチ）	PLANEX 社 FGX-08-TXS
（カード）	INTEL EXPRES-PRO-100 カード
（ライブラリ）	gcc+LAM6.5.9/MPI
（実測性能）	約 90 Mbps（64 KB 転送時）

表 2 クラスタ 2 の実装環境
Table 2 Specifications of cluster 2.

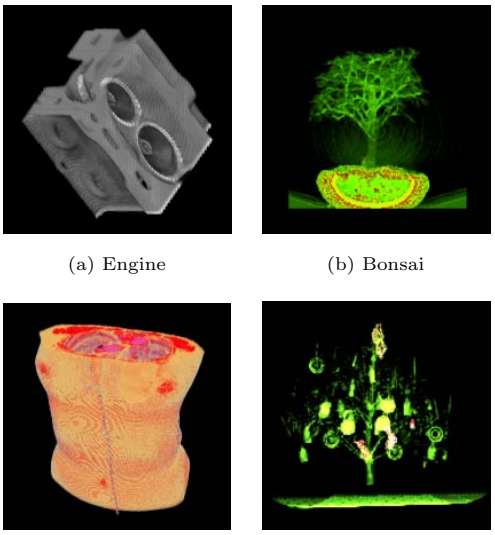
	Master
CPU	Pentium4 3.0 GHz
Memory	1.0 GB/DDR400
Motherboard	ASUS P4C800-E Delux
Gfx Card	GeForceFX5950 Ultra
Gfx Memory	256 MB DDR
Gfx Driver	nvidia Ver.1.0-5328（2003/12/17）
OS	Debian Linux（kernel 2.4.22）
	Slave
CPU	Pentium4 3.0 GHz
Memory	1.0 GB/DDR400
Motherboard	ASUS P4C800-E Delux
Gfx Card	GeForceFX5950 Ultra
Gfx Memory	256 MB DDR
Gfx Driver	nvidia Ver.1.0-5328（2003/12/17）
OS	Debian Linux（kernel 2.4.22）
NODE	4 台
Network	1000 BaseT Ethernet
（スイッチ）	Bufferlo LSW-GT-8W
（カード）	Onboard CSA-base GbE コントローラ
（ライブラリ）	gcc+LAM6.5.9/MPI
（実測性能）	約 700 Mbps（64 KB 転送時）

計算式は RGB 値の混合係数を $(A_s, 1-A_s)$ とし，α 値の混合係数を $(1, 1-A_s)$ として次式のように表される．

$$C = A_s C_s + (1-A_s)C_d \quad (6)$$

$$A = A_s + (1-A_s)A_d \quad (7)$$

OpenGL1.2 では混合係数は RGBA 値共通の値として設定され，RGBA の各要素ごとに異なる混合係数を設定することができないため，式 (6) の RGB 値と式 (7) の α 値を同時に求めることはできない．RGB 値と α 値を別々に求める方法も考えられるが，この方法だと α ブレンディングを 2 回行うことになるため処理速度が低下する．そこで，テクスチャデータが透明度を考慮したカラー値（intensity）を持つというモデルであると考え，各ボクセルの持つ RGB 値にあらかじめ α 値を乗じておくようにする．このように，テクスチャデータの RGBA 値を (AR, AG, AB, A) としておき，混合係数を $(1, 1-A_s)$ として計算することで正確な画像を得ることができる．



(a) Engine (b) Bonsai

(c) Chest (d) Tree

図 8 ボリュームデータ
Fig. 8 Volume data.

6. 評　　価

6.1 評価データの仕様と測定方法

評価では，サイズの異なる以下の 4 種類のボリュームデータを使用した．Chest 以外は，ボリュームレンダリング処理の評価によく用いられるデータセットである．

- Engine
  エンジンのボリュームデータでサイズは 256 × 256 × 128 である（**図 8** (a)）．3D テクスチャ表現では 32 MB となる．
- Bonsai
  盆栽のボリュームデータでサイズは 256 × 256 × 256 である（図 8 (b)）．3D テクスチャ表現では 64 MB となる．

- Chest
  人間の胸部のボリュームデータでサイズは $512 \times 512 \times 512$ である（図 8 (c)）．3D テクスチャ表現では 512 MB となる．
- Tree
  クリスマスツリーのボリュームデータでサイズは $512 \times 512 \times 1024$ である（図 8 (d)）．3D テクスチャ表現では 1 GB となる．

不透明度については各ボリュームデータともにボクセル値と等しい値をとっている．スクリーンのサイズは各ボリュームデータともに 256^2，中間画像を生成する各ノードのサブスクリーンのサイズは 128^2 とした．スライスの数はボリュームデータの各軸方向のサイズの最大値とした．

ボリュームレンダリングにかかる描画速度は視点を変更しながら 256 枚の描画を行い，それに要した時間から平均の描画速度を求めている☆．特に指定しない場合，視点はボリューム空間の中心を原点とし，原点を通る水平面上（z=0 の平面，z 軸は紙面の上下方向とする）の半径 R の円周上を $\frac{360}{256}$ 度ずつ移動するものとする．なお R はボリュームデータの各軸方向のサイズの最大値の 2 倍とした．

6.2 単純な並列化の効果

並列化を行わずに 1 台で実行させたときの描画速度と，適応的サンプリングも中間画像の圧縮も行わずに並列化を行ったときの描画速度を**表 3**，**表 4** に示す．一括は 1 つのサブボリュームを単一の 3 次元テクスチャとしてグラフィクスカードで描画させたときの描画速度を，分割は個々のサブボリュームをさらに 8 等分（元のボリュームデータを 4^3 個の 3 次元テクスチャに分割したものと等価）して描画させたときの描画速度を示している．表中の「-」は，3 次元テクスチャがグラフィクスカードのメモリに入りきらずに描画ができなかったことを示す．

クラスタ 1 では並列化による著しい通信時間のオーバヘッドが見られ，クラスタ 2 ではリニアではないものの並列化による速度向上がみられる．これはネットワークの通信性能の違いが原因である．4 章で述べたとおり，今回の実装では Slave ノードで作成された中間画像（128^2 ピクセル × 4B/ピクセル = 64 KB）をすべて Master ノードに送っている．1 回のボリュームレンダリング処理につき，Master ノードは 8 枚の中間画像を受け取ることになり合計で 512 KB のデータを受信する必要がある．クラスタ 1 およびクラスタ 2 の通信時間の実測性能（表 1 および表 2 参照）を元に計算すると，このデータ受信に要する時間は，それぞれ 44 ms および 5.7 ms となる．したがって，ネットワーク性能に起因する描画速度の上限は，22.5 FPS ならびに 175 FPS となる．これ以外にも，グラフィクスカードからの画像読み出し等のオーバヘッドが存在することから，4 台構成のクラスタ 1 での性能低下の原因は合成処理であることが分かる．

次に分割の効果を見ると，クラスタ 1 においては Engine，Bonsai のボリュームデータがグラフィクスメモリに入りきるサイズであるため，分割して描画処理が増加したことによる描画速度の低下が見られる．一方，Chest，Tree は一括の場合，描画が不可能であるが，分割することで低速度ながらも描画可能となった．さらに Chest は並列化によって使用可能なグラフィクスカードの総メモリ量が増えたため，Engine，Bonsai に近い描画速度を達成している．クラスタ 2 でも同様の特徴が見られるが，グラフィクスメモリがクラスタ 1 の 2 倍あるため，単純な並列化だけで Chest の高速描画が可能となっていることが分かる．

表 3 単純な並列化の効果 —クラスタ 1
Table 3 Effects of parallel implementation — cluster 1.

Data	描画速度 [fps]			
	1 台		4 台	
	一括	分割	一括	分割
Engine	102	39.9	17.7	18.0
Bonsai	78.3	34.8	17.2	17.6
Chest	-	0.066	-	13.2
Tree	-	0.007	-	0.77

表 4 単純な並列化の効果 —クラスタ 2
Table 4 Effects of parallel implementation — cluster 2.

Data	描画速度 [fps]			
	1 台		4 台	
	一括	分割	一括	分割
Engine	34.8	31.1	106	97.4
Bonsai	28.5	24.5	92.4	84.1
Chest	0.49	0.77	31.8	27.9
Tree	-	0.05	0.73	10.7

6.3 適応的サンプリングの効果について

適応的サンプリングを行うブロックの大きさは，小さいと描画時のオーバヘッドや使用メモリが増加し，大きいとデータの局所性を利用しにくくなるため，最適値は処理系とデータに依存する．誤差の許容値を 5%，分割数を $d = 2$，slave マシンを 4 台とし，分割

☆ OpenGL の API を介してグラフィクスカードに送られた描画命令はパイプライン処理される．また，処理の終了を通知する手段も別段設けられていないため，1 枚の描画時間を計測することができない．そのためパイプラインが十分定常状態に落ち着く程度の連続描画を行い，それに要した時間から平均描画速度を求めている．

表 5 適応的サンプリングの効果 —クラスタ 1
Table 5 Effects of adaptive sampling — cluster 1.

Data	ブロック数	描画速度 [fps]	縮小率 [%]	前処理 [sec]
Engine	2^3	17.7	（非圧縮）	
	4^3	18.2	93.6	0.79
	8^3	16.9	50.2	1.14
	16^3	11.3	34.2	1.48
Bonsai	2^3	17.2	（非圧縮）	
	4^3	17.8	84.4	1.30
	8^3	15.8	53.9	1.66
	16^3	10.4	37.5	2.30
Chest	2^3	-	（非圧縮）	
	4^3	13.5	100	3.69
	8^3	15.8	77.2	6.03
	16^3	10.4	66.8	8.81
Tree	2^3	-	（非圧縮）	
	4^3	1.11	71.9	19.9
	8^3	12.7	44.9	20.9
	16^3	8.14	22.3	22.5

表 6 適応的サンプリングの効果 —クラスタ 2
Table 6 Effects of adaptive sampling — cluster 2.

Data	ブロック数	描画速度 [fps]	縮小率 [%]	前処理 [sec]
Engine	2^3	106	（非圧縮）	
	4^3	98.7	93.6	0.087
	8^3	106	50.2	0.260
	16^3	62.1	34.2	0.368
Bonsai	2^3	92.4	（非圧縮）	
	4^3	91.0	84.4	0.28
	8^3	100	53.9	0.47
	16^3	61.9	37.5	0.70
Chest	2^3	31.8	（非圧縮）	
	4^3	27.9	100	0.82
	8^3	33.6	77.2	2.02
	16^3	32.6	66.8	2.87
Tree	2^3	0.73	（非圧縮）	
	4^3	13.7	71.9	6.64
	8^3	19.2	44.9	8.11
	16^3	21.7	22.3	10.0

してできるブロックの数を変えながら，描画速度，元データに対する適応的サンプリング後のデータサイズの比率（縮小率），適応的サンプリングにかかった時間を比較した結果を**表 5**，**表 6** に示す．

クラスタ 1 においては，Engine，Bonsai はブロックの数が 4^3 のとき，Chest，Tree はブロックの数が 8^3 のときが最も効率が良いことが分かる．一方，クラスタ 2 においては，Engine，Bonsai，Chest はブロックの数が 8^3 のとき☆，Tree はブロックの数が 16^3 のときが最も効率が良い．

表からは，ボリュームデータがグラフィクスメモリに入りきらないデータ（Chest，Tree）に関してはデータを圧縮することにより高速描画が可能となること，また，ボリュームデータがグラフィクスメモリに入りきるデータ（Engine，Bonsai）に関しても，分割して描画処理が増加したことによる描画速度の低下はブロック数 16^3 の場合を除きほぼ見られないことが確認できる．また，Tree に関してはブロック数が 8^3 から 16^3 に変わるとボリュームデータが半分に圧縮されるにもかかわらず，グラフィクスメモリが少ないクラスタ 1 でブロック数 8^3 が最適であるのに対して，クラスタ 2 ではブロック数 16^3 が最適となっている．これは，クラスタ 1 では分割にともなう処理に起因する Slave ノードの CPU 負荷の増加が，データ量が半分になることの効果よりも大きかったためである．以上のように，適応的サンプリングを用いたデータ圧縮は，ブロック分割数を適切に設定することで良い効果が得られることが分かった．

しかし，今回使用しているボリュームデータは時系列によって変化の起こらない静的なデータを用いており，シミュレーション結果の実時間可視化のように時間変化する動的なデータ可視化の場合は適応的サンプリングにかかる時間を考慮しなければならない．このため，適応的サンプリングは静的なデータに対しては有効な手法であるといえるが，動的なデータに対してはデータの更新頻度との関係で必ずしも有効でない場合も存在する．

☆ Engine に関しては表では 2^3 と同じであるが，小数点以下まで見ると 8^3 がわずかに優れている．

表 7 中間画像の圧縮効果
Table 7 Effects of intermediate image compression.

Data	クラスタ 1 描画速度 [fps]		クラスタ 2 描画速度 [fps]		縮小率 [%]
	非圧縮	圧縮	非圧縮	圧縮	
Engine	18.2	34.6	106	116	48 ～ 79
Bonsai	17.8	38.1	100	105	37 ～ 64
Chest	15.8	27.5	33.6	33.4	42 ～ 82
Tree	12.7	14.4	21.7	21.6	41 ～ 73

6.4 中間画像の圧縮効果

中間画像の圧縮効果は，透明領域が多ければ通信データ量を減らすことができるが，透明領域が少ない場合は圧縮にかかる時間が逆にオーバヘッドとなってしまう．slave マシンを 4 台とし，中間画像の圧縮を行ったときと行わないときの描画速度の比較を行った結果を**表 7** に示す．縮小率は中間画像が最も小さなサイズに圧縮されたときと最も大きなサイズに圧縮されたときの縮小率を示している．分割数は $d = 2$，適応的サンプリングの誤差の許容値は 5%，ブロックの数

はクラスタ 1 で Engine，Bonsai が 4^3，Chest，Tree は 8^3，クラスタ 2 で Engine，Bonsai，Chest が 8^3，Tree は 16^3 とした．クラスタ 1 では中間画像の圧縮による描画速度の高速化が見られる．一方，クラスタ 2 では描画速度の高速化はほとんど見られず，むしろ低下してるものも見られる．

まずクラスタ 1 に着目すると，6.2 節で議論したとおり，Master ノードの受信データ量とネットワーク性能で決まる非圧縮時の描画速度の上限は 22.5 FPS であったのが，圧縮することで仮にデータ量が 50%になると上限が 45 FPS となる．表 7 の結果を見ると，Tree を除き，ほぼ圧縮率に比例した速度向上が得られており，このことから，クラスタ 1 ではグラフィクスカードの描画性能ではなく，合成処理の性能が全体の性能を支配していることが分かる．ただし，Tree に関してはメモリ容量に起因する描画速度の上限が支配的であり，圧縮率に見合った速度向上は得られていない．

次にクラスタ 2 に着目すると，ネットワーク性能に起因する非圧縮時の描画速度の上限は 175 FPS であった．したがってクラスタ 2 では非圧縮の状態でもネットワークの飽和状態は発生しない．しかしながら，描画速度が高くネットワークが高負荷状態になる Engine および Bonsai では，中間画像の圧縮により各々 10%および 5%の速度向上が得られている．一方，描画速度が低くネットワークが低負荷状態である Chest や Tree では，わずかではあるが圧縮/解凍処理のオーバヘッドに起因する速度低下が起こっている．

6.5 並列化の効果

ここでは，適応サンプリングと中間画像の圧縮の両方を適用した場合における並列化の効果を評価する．並列化を行わずに 1 台で実行させたときの描画速度と並列ボリュームレンダリングを行ったときの描画速度を**表 8** に示す．分割数は $d = 2$，適応的サンプリングの誤差の許容値は 5%，ブロックの数は中間画像の圧縮効果の実験で使った値を用いる．Engine，Bonsai，Chest に関してはほぼリアルタイムに可視化できていることが分かる．データのサイズが大きくなると描画速度が著しく低下してしまうが，これはグラフィクスカードが保持するテクスチャデータのサイズがグラフィクスメモリの容量を超えてしまったためだと考えられる．逆に，$512 \times 512 \times 512$ のサイズ以下のボリュームデータは各ノードの汎用グラフィクスカードのメモリ容量以下であったため，高速な描画が可能であることが分かる．クラスタ 2 で 1 台構成の場合に，Tree が Chest よりも高速に描画ができるという逆転現象が起きているが，これは，適応サンプリングの結果 Tree のデータサイズが元のデータの 22.3%に圧縮されたのに対して，Chest では 77.2%にしか圧縮されておらず，圧縮後のデータサイズが逆転したのが原因である．同じ状況で 4 台構成の場合に逆転が起こらないのは，データサイズの逆転によるメモリアクセス時間短縮の効果が 1 台の場合に比べて少ないからである．

表 8 並列化の効果
Table 8 Overall effects.

Data	クラスタ 1		クラスタ 2	
	描画速度 [fps]		描画速度 [fps]	
	1 台	4 台	1 台	4 台
Engine	34.5	34.6	35.0	116
Bonsai	34.7	38.1	31.4	105
Chest	0.45	27.5	1.35	33.4
Tree	0.33	14.4	6.30	21.6

7. 考　　察

本章では，汎用グラフィクスカードを用いた並列ボリュームレンダリングシステムの実装をふまえたいくつかの考察を行う．

7.1 汎用グラフィクスカードの利用に関して

汎用グラフィクスカードを用いたボリュームレンダリング処理に関しては，すでに多くの報告があったが，並列システムとして実装を行った結果，グラフィクス環境（OpenGL，X Window 等ならびにカードのドライバ）と通信ライブラリ（MPI/PVM，LAM/MPICH 等ならびにカードのドライバ）との相性等，主にソフトウェア環境の整備に注意が必要であることが分かった☆．

また，今回の実験結果の中にはクラスタ 1 の方がクラスタ 2 より高速な場合が存在する．この原因は十分に解析できていないが，グラフィクスカードのドライバの影響が考えられる．ハードウェア仕様上はクラスタ 2 の方が本来高速であるが，クラスタ 2 で仕様したグラフィクスカードが 2003 年度末に市販されたもので，ドライバが十分に最適化できていないことが要因の 1 つとして考えられる．

次に，汎用グラフィクスカードを用いてボリュームレンダリングを行ううえで注目すべきグラフィクスカードの諸元について考察を行う．**表 9** は今回使用したグラフィクスカードの諸元である．

7.1.1 メモリ関係

今回の実験でも分かるとおり，まず第 1 に注目する必要があるのはビデオメモリの容量である．1 枚のグラフィクスカードが担当するボリュームデータのサイ

☆ 動作するが組み合わせ方によっては非常に遅い等．

表 9 グラフィクスカードの主な諸元
Table 9 Specifications of Graphics Cards.

	RADEON 9700PRO	GeForce FX5950Ultra
Core Clock	325 MHz	475 MHz
Pixel Pipeline Unit	8	8
ピクセル計算性能	2.4 G pixel/sec	3.8 G pixel/sec
Memory Clock	310 MHz DDR	475 MHz DDR2
Memory bit 幅	256 bit	256 bit
Memory バンド幅	19.3 GB/s	30.4 GB/s
Memory 容量	128 MB	256 MB

ズの合計がビデオメモリの容量を超えていると，著しい速度低下が発生する．現在の大半の汎用グラフィクスカードでは，ビデオメモリをフレームバッファ領域，一時的な作業領域，テクスチャ領域等の複数の用途で共有する構成をとっているため，メモリ容量すべてをボリュームデータの格納にあてることはできない．また，OpenGL の仕様では 3D テクスチャのサイズは 2 の巾乗の定数倍という制約があるため，立方体の 3D テクスチャを仮定すると，3D テクスチャの最大サイズはメモリ容量の約半分までと考えるのが妥当である．

次に，重要な要因はビデオメモリのメモリバンド幅である．1 ボクセルを 4 バイトで表現した 3D テクスチャでは，N^3 サイズのボリュームデータに対応する 3D テクスチャサイズは $4N^3$ バイトとなる．1 回のレンダリングでボリュームデータ全体に対して 1 回だけアクセスが起こると仮定すると，秒間 F 枚の描画性能を出すためには，$4FN^3$ [Byte/sec] のメモリバンド幅が最低限必要である．仮に N=1024 とした場合，秒間 5 枚の描画でも 20 GB/s のメモリバンド幅が必要である．

7.1.2 演算性能関係

サイズ NxN の T 枚のテクスチャを α ブレンディングし秒間 F 枚の画像を生成するには，$N^2 \times T \times F$ [pixel/sec] のピクセル計算性能が必要である．このとき，N および T を 512 とすると，32 FPS の描画性能を得るのには，4Gpixel/sec のピクセル計算性能が必要である．

7.1.3 視点依存性

3D テクスチャを用いたボリュームレンダリングでは，3D テクスチャをサンプリングしたスライス（2D テクスチャ）を一時的に作成しなければならないが（図 1），この際のメモリ・アクセスパターンは視点位置によって大きく変化する．したがって，メモリの実効転送速度が低下し，これによる描画速度の視点依存性が発生する．さらに，グラフィクスカード内には 2D テクスチャのアクセスに最適化されたプリフェッチ機構付きキャッシュが存在しており，これも視点依存性を助長する一因となっている．視点位置に依存した描画性能の大幅な変動が許容できないシステムにおいては注意を要する項目の 1 つである．しかしながら，メモリ関係の詳細仕様（HW，SW ともに）は公開されていないため事実上事前の評価はできない．

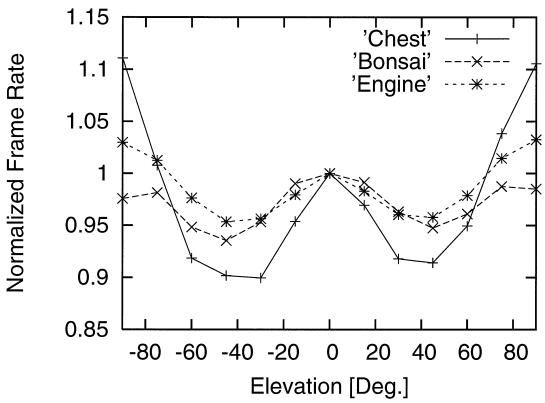


図 9 描画速度の視点依存性
Fig. 9 Viewpoint dependency.

参考までに，クラスタ 2 上で実際に測定した視点依存性のグラフを**図 9** に示す．いままでの測定では，z=0 平面上の半径 R の円周上で視点移動を行ったが，この円周を x 軸の回りに仰角 ϕ（$90 \geq \phi \geq -90$，15 度間隔）だけ回転し，その円周上で視点移動を行い描画時間を測定したものである．測定は 4 ノード構成のクラスタ 2 において，何ら最適化を行わない状態で行った．サブボリュームの分割も行っていない（表 4 の 4 台，一括に相当する構成）．

図の縦軸は仰角 0 度の場合の描画速度を 1 として正規化した描画速度である．Engine，Bonsai，Chest の 3 つのデータに対して計測を行っているが，いずれの場合も，±45 度付近で最も速度が低下している．このとき，最も高速な場合に比べて，Engine，Bonsai では 5%，Chest では 20%もの速度低下が起こっていることが分かる．

7.2 最適化に関して

今回の実装では，データ圧縮に関する最適化として，ボリュームデータの圧縮ならびに中間画像の圧縮を実装した．これらの最適化は本来レンダリング対象に依存するため，実用的なシステムで導入する場合にはレンダリング時のパラメータとして GUI で設定できるのが好ましいと考えられる．また，今回実装したアルゴリズム以外の圧縮法も多数存在するので，これらとの組合せに関しては今後の研究課題としたい．

今回実装していない最適化として，早期視線終端

(Early Ray Termination: ERT)[5] があるが，本来はピクセル単位の最適化であるため，スライス単位で処理を行うテクスチャマッピングベースのボリュームレンダリングへはそのままは適用はできない．しかしながら，我々が提案した ERT-table 法[6),7)] と，今回実装した適応的サンプリング法を組み合わせることで，テクスチャマッピングベースのボリュームレンダリングアルゴリズムへの適用が可能であると考える．

7.3 スケーラビリティに関して

テクスチャマッピングベースのボリュームレンダリング処理に必要なグラフィクスハードウェアに対する性能要求は前述のとおりであり，1 台のグラフィクスカードで不足する分は並列化により解決することが可能である．

スケーラビリティの障害になるのは，並列化によって生じる中間画像の合成処理のオーバヘッドである．今回の評価では，Slave ノードがたかだか 4 台であるため，合成処理に関する最適化はまったく行っていない．特に，サブボリュームごとの中間画像をすべて Master ノードに送り Master ノードで合成するという手法はまったくスケーラビリティがないことは自明である．

中間画像の合成処理の問題に関しては，並列計算機や PC クラスタでのボリュームレンダリング処理向けに提案されている最適化手法等[8),9)] を適用することでスケーラビリティを改善することは可能と考えられる．

大規模システムを構築する場合には，中間画像の合成処理時間も考慮したうえで並列度の決定を行う必要がある．

8. 関 連 研 究

ボリュームレンダリング処理は，計算量ならびにメモリバンド幅要求が高い処理であるため，従来より並列処理に関する多くの研究が行われている．1990 年代には共有メモリ/分散メモリを問わず汎用並列計算機向けの並列ボリュームレンダリングシステムが多く提案され（たとえば文献 10)，11)），最近では PC クラスタベースの並列ボリュームレンダリングシステムが多く開発されている（たとえば文献 12)〜14)）．文献 13) では，SIMD 命令を活用したアセンブリ言語レベルの最適化やキャッシュのプリフェッチ命令，医用画像向けの最適化技術等を駆使して，100 Mbps のイーサネットで接続した 8 台の PentiumIII（933 MHz）を用いて 512^3 のボリュームデータを 256×256 のスクリーンに秒間 12 枚の描画性能を得ている．文献 14) では ERT 最適化と静的負荷分散を行うことで 128 台の Pentium3（1 GHz）を Myrinet（2 Gbps）で接続したシステムを用いて，データサイズ $512 \times 512 \times 448$ のボリュームデータを 512^2 のスクリーンに秒間 5 枚レンダリングできたことが報告されている．これに対し，今回我々が実装したクラスタ 2 は汎用グラフィクスカードを登載した 4 台の PC で，512^3 のボリュームデータを 256^2 のスクリーンに秒間 30 枚以上の描画性能を得ている．

テクチャマッピングを応用したボリュームレンダリング手法自体 10 年近く前に提案されていたが[15)]，高価な専用グラフィクスアクセラレタを登載したハイエンドのシステムでしか利用できなかった．汎用グラフィクスカードにテクスチャマッピングや α ブレンディングの機能が登載され，かつ 3 次元テクスチャが扱えるようになった頃を契機に汎用グラフィックカードを用いたボリュームレンダリングシステムが多く開発/発表されるようになった（たとえば文献 3)，16)）．グラフィクスカードのメモリ不足問題に対して適応的サンプリング法を提案した文献 4) 等もその 1 つである．

PC クラスタの各ノードに汎用グラフィクスカードを登載したシステムも複数存在している（たとえば文献 17)〜19)）．文献 17) のシステムは我々同様，すべてを汎用部品で構成している．このシステムは 3 世代前のグラフィクスカード（GeForce3）を用いた 2D テクスチャを前提にした実装であり，当時の環境下で何が性能のボトルネックになるかを議論している．文献 18) では，サブボリュームのレンダリングノードへの割当てや部分合成の並列処理におけるスクリーンの分割法に関する議論を行っている．文献 19) は，ボリュームレンダリング専用アクセラレータを搭載したシステム[20)] のグラフィクスハードウェア部分を汎用グラフィクスカードに置き換えたものである．ただし，部分画像の合成に専用のネットワークと専用のハードウェアを別途用意している．いずれのシステムもボリュームデータや部分画像の圧縮と組み合わせた評価は行っていない．また，視点依存性に関する議論や OpenGL1.2 を用いた α ブレンディングを並列実装する場合の問題点の指摘はなされていない☆．

一方で，我々も含めボリュームレンダリング専用のハードウェアを用いて，描画速度の視点依存性や合成処理のオーバヘッドを軽減するボリュームレンダリング専用並列計算機の研究も継続して行われている[20)〜25)]．

☆ なお，OpenGL2.0 対応のグラフィクスカードでは，RBG 値の計算と α 値の計算で係数を独立に設定できる EXT_blend_func_separate 命令を用いることでこの問題を回避することができる．

9. 結　　論

本稿では汎用グラフィクスカードを用いた並列ボリュームレンダリングシステムの実装の報告を行うとともに，ブロック化による適応的サンプリング，ならびに中間画像の圧縮を用いたデータ圧縮技術を併用した場合の性能評価結果を示した．この結果，サンプルとして使用したボリュームデータを 4 台のクラスタを用いてほぼリアルタイムに描画することができた．しかし，時系列によって変化の起こりうる動的なデータの可視化には圧縮処理に時間がかかるため，適応的サンプリングによるボリュームデータの圧縮方法は向かない．また，中間画像の圧縮はネットワークが 100 BaseTX のクラスタでは効果があったものの，ネットワークが 1000 BaseT のクラスタでは効果が見られなかった．

現在の実装ではクラスタ 1 とクラスタ 2 で多くの構成パラメータが異なるため，両者の比較という形での議論は行わず，異なる 2 つのシステムでの実験結果の提示にとどめている．構成パラメータを変更した場合の比較に関しては今後，別論文としてまとめたいと考えている．

謝辞　日頃よりご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．

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（基盤研究（B）13480083 および（S）16100001 ならびに特定領域研究（C）「情報学」13224050）による．

本稿で用いた胸部のボリュームデータは，（株）ケイジーティー宮地英生氏よりご提供いただいたものである．また，エンジン，盆栽のボリュームデータは volvis☆から，クリスマスツリーのボリュームデータは The Computer Graphics Group XMas-Tree Project☆☆から利用させていただいた．

参 考 文 献

1) Lichtenbelt, B., et al.: *Introduction to Volume Rendering*, Hewlett-Packard Professional Books, Prentice Hall PTR (1998).
2) Porter, T. and Duff., T.: Compositing Digital Images, *ACM Computer Graphics* (*SIGGRAPH '84*), Vol.18, No.3, pp.253–259 (1984).
3) Rezk-Salama, C., Engel, K., Bauer, M., Greiner, G. and Ertl, T.: Interactive Volume Rendering on Standard PC Graphics Hardware Using Multi-Texturesand Multi-Stage Rasterization, *Proc. Eurographics/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware*, 2000.
4) 山崎，加瀬，池内：PC グラフィクスハードウェアを利用した高精度・高速ボリュームレンダリング手法，情報処理学会 CVIM-130-10 (Nov. 2001).
5) Levoy, M.: Efficient Ray tracing of volume data, *ACM Trans. Graphics*, Vol.9, No.3, pp.245–261 (1990).
6) 高山征大：大規模非構造格子データの並列可視化における動的負荷分散，京都大学大学院情報学研究科修士論文 (2004).
7) 高山征大ほか：セル投影型並列ボリュームレンダリングへの Early Ray Termination の適用，Visual Computing シンポジウム 2004, pp.169–174 (2004).
8) Fuchs, H., Abram, G.D. and Grant, E.D.: Near real-time shaded display of rigid objects, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.65–72 (1983).
9) Ma, K.-L., et al.: Parallel volume rendering using binary-swap compositing, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.14, No.4, pp.59–68 (1994).
10) Ma, K.-L., et al.: A Data Distributed, Parallel Algorithm for Ray-Traced Volmue Rendering, *Proc. Parallel Rendering Symposium*, pp.15–22 (1993).
11) 板倉憲一ほか：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).
12) 原瀬史靖：並列ボリュームレンダリング処理の高速化，京都大学工学部卒業論文 (2001).
13) 吉岡政洋，森　健策，末永健仁，鳥脇純一郎：ソフトウェアによる高速ボリュームレンダリング手法の開発と仮想化内視鏡システムへの応用，医用画像工学会誌 Medical Imaging Technology, Vol.19, No.6, pp.477–486 (2001).
14) 松井　学，竹内　彰，伊野文彦，萩原兼一：累積不透明度の伝搬による並列ボリュームレンダリングの計算量削減，信学技報（CPSY2002-31），Vol.103, No.249, pp.13–18, 電子情報通信学会 (2003).
15) Cabral, B., Cam, N. and Foran, J.: Accelerated Volume Rendering and Tomographic Reconstraction Using Texture Mapping Hardware, *Proc. Symp. Volume Visualization*, pp.91–98 (1994).
16) 松田浩一，大田敬太，藤原俊朗，土井章男：普及型 PC における 2 次元テクスチャを用いた 3 次元画像の任意断面表示手法，電子情報通信学会論文誌 D-II，Vol.J85-D-II, No.8, pp.1351–1354 (2002).
17) Magallon, M., Hopf, M. and Ertl, T.: Parallel Volume Rendering Using PC Graphics Hardware, *Proc. Pacific Graphics* (2001).
18) Garcia, A. and Shen, H.-W.: An Inter-

☆ http://www.volvis.org/
☆☆ http://ringlotte.cg.tuwien.ac.at/datasets/XMasTree/

leaved Parallel Volume Renderer with PC-Clustes, *Proc. Eurographics Workshop on Parallel Graphics and Visualization*, pp.51–59 (2002).
19) Muraki, S., et al.: A PC Cluster System for Simultaneous Interactive Volumetric Modeling and Visualization, *Proc. IEEE Symp. on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*, pp.95–102 (2003).
20) Muraki, S., Ogata, M., Ma, K., Koshizuka, K., Kajihara, K., Liu, X., Nagano, Y. and Shimokawa, K.: Next-Generation Visual Supercomputing using PC Clusters with Volume-Graphics Hardware Devices, *Proc. IEEE/ACM Supercomputer Conference* (2001).
21) 生雲公啓，高山征大，丸山悠樹，津邑公暁，五島正裕，森眞一郎，中島康彦，富田眞治：実時間インタラクティブシミュレーションのための並列ボリュームレンダリング環境，平成 14 年度情報処理学会関西支部大会，pp.121–124 (Nov. 2002).
22) Mori, S., et al.: ReVolver/C40: A Scalable Parallel Computer for Volume Rendering — Design and Implementation, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E86-D, No.10, pp.2006–2015 (2003).
23) 森眞一郎ほか：大規模ボリュームデータの並列可視化環境の構築—専用ハードウェアを用いた実装，先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2003 論文集（ポスターセッション），pp.165–166 (May 2003).
24) Meissner, M., et al.: VIZARD II:A Reconfigurable Interactive Volume Rendering System, *Proc. Graphics Hardware Workshop*, pp.137–146 (2002).
25) Lombeyda, S., et al.: Scalable Interactive Volume Rendering Using Off-the-Shelf Compornents, *Proc. Symp. on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*, pp.115–121 (2001).

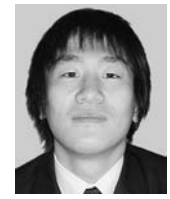
(平成 16 年 1 月 31 日受付)
(平成 16 年 5 月 29 日採録)

丸山　悠樹（正会員）

1979 年生．2002 年京都大学工学部電気電子工学科卒業．2004 年京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻修士課程修了．現在，松下電器産業（株）勤務．音響情報処理等に興味を持つ．

中田　智史

1980 年生．2004 年京都大学工学部情報学科卒業．現在（株）菱化システム勤務．画像処理認識，CG 等に興味を持つ．



高山　征大（正会員）

1979 年生．2002 年京都大学工学部情報学科卒業．2004 年京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻修士課程修了．現在，(株）東芝勤務．

篠本　雄基

1980 年生．2004 年京都大学工学部情報学科卒業．現在，京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻修士課程在籍．

五島　正裕（正会員）

1968 年生．1992 年京都大学工学部情報工学科卒業．1994 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了．同年より日本学術振興会特別研究員．1996 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程退学，同年より同大学工学部助手．1998 年同大学大学院情報学研究科助手．博士（情報学）．高性能計算機システムの研究に従事．2001 年情報処理学会山下記念研究賞，2002 年同学会論文賞受賞．IEEE 会員．

森　眞一郎（正会員）

1963 年生．1987 年熊本大学工学部電子工学科卒業．1989 年九州大学大学院総合理工学研究科情報システム学専攻修士課程修了．1992 年九州大学大学院総合理工学研究科情報システム学専攻博士課程単位取得退学．同年京都大学工学部助手．1995 年同助教授．1998 年同大学大学院情報学研究科助教授．工学博士．並列/分散処理，可視化，計算機アーキテクチャの研究に従事．電子情報通信学会，可視化情報学会，IEEE CS，ACM，EUROGRAPHICS 各会員．

中島 康彦（正会員）

1963 年生．1986 年京都大学工学部情報工学科卒業．1988 年京都大学大学院修士課程修了．同年富士通入社．スーパコンピュータ VPP シリーズの VLIW 型 CPU，命令エミュレーション，高速 CMOS 回路設計等に関する研究開発に従事．工学博士．1999 年京都大学総合情報メディアセンター助手．同年同大学院系座員学研究科助教授．現在に至る．2002 年より（兼）科学技術振興機構さきがけ研究 21（情報基盤と利用環境）．計算機アーキテクチャに興味を持つ．IEEE CS，ACM 各会員．

富田 眞治（フェロー）

1945 年生．1968 年京都大学工学部電子工学科卒業．1973 年京都大学大学院博士課程修了．工学博士．同年京都大学工学部情報工学教室助手．1978 年同助教授．1986 年九州大学大学院総合理工学研究科教授．1991 年京都大学工学部教授．1998 年同大学大学院情報学研究科教授，現在に至る．計算機アーキテクチャ，並列処理システム等に興味を持つ．著書『並列コンピュータ工学』（1996），『コンピュータアーキテクチャ（第 2 版）』（2000）等．電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM 各会員．