

氏名(本籍)	佐野 健太郎 (宮城県)		
学位の種類	博士(情報科学)		
学位記番号	情博第138号		
学位授与年月日	平成12年3月23日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程) 情報基礎科学専攻		
学位論文題目	High-Performance Volume Rendering (高性能ボリュームレンダリングに関する研究)		
論文審査委員	(主査)		
	東北大学教授	中村 維男	東北大学教授 牧野 正三
	東北大学教授	出口 光一郎	東北大学助教授 小林 広明

## 論文内容要旨

### 1. Introduction

近年、様々な科学分野において、三次元直交格子点における数値データ(ボリューム)を可視化する技術としてボリュームレンダリングが注目を集めている。特に、医療分野においては、CT(Computed Tomography)技術等により得られた一連の断層写真から患部のボリュームを生成し、これに基づき手術計画や診断を行う試みが検討されている。

このような応用では、視線の向き等のパラメータの入力後、瞬時に応答可能である対話的な可視化が求められる。しかし、膨大な計算量のために、対話的な可視化が要求される分野でのボリュームレンダリングの応用は制限されてきた。また、最終的な診断を下す際には、誤診を避けるために可視化精度が重要となる。一般に、数値データの可視化過程で生じる誤差と計算コストの間にはトレードオフが存在し、誤差を抑えるには高い計算コストが必要となる。これまで、計算コストの制限により高い精度を伴う可視化は実用的ではなかった。

ボリュームレンダリングにおける光線の輝度計算には高い並列性があり、これを利用することによって処理の高速化が期待できる。また、可視化誤差はデータにも依存し、局所的な計算処理においてある精度を達成するのに必要最低限の計算コストは一様ではないため、目標とする精度に対して無駄な計算を省くことにより計算コストを低減できる可能性がある。本論文では、対話的可視化及び実用的な計算コストでの高精度可視化のための、処理速度または計算精度の点で高性能な可視化技術の確立を目的として、以下の2つのアルゴリズムを提案し実験によりその有効性を評価する。

1. 現存する汎用並列計算機において実時間における可視化を可能とし、さらに計算処理要素数に対して高い台数効果を有する並列ボリュームレンダリングアルゴリズム
2. ボリュームデータ中の局所的な冗長性を利用することにより、従来よりも低い計算コストで高い精度を達成するボリュームレイキャスティングアルゴリズム

## 2. Data-Parallel Shear-Warp Volume Rendering Algorithm

これまでに、ボリュームレンダリングの持つ並列性に着目し、並列処理により処理高速化する試みがなされている。特に、汎用並列計算機における並列ボリュームレンダリングは、専用のハードウェアによる並列処理と比べて開発費用と実装の柔軟性の点で有望である。このような中で、最適化により効率の良い処理を行うシア・ワープボリュームレンダリングアルゴリズムが並列化されている。しかし、既存の並列シア・ワープアルゴリズムには以下の問題がある。

1. 共有メモリ型並列計算機における並列処理のために、共有資源の競合により処理要素 (以下、PE) の増加に伴い並列処理効率が低下する。
2. 画素並列性や動的負荷分散のために、PE 間においてボリュームデータの通信が発生する。三次元データであるボリュームは大量の数値データを含むため、その通信は並列処理に対する大きなオーバーヘッドとなり並列処理効率を低下させる。

本章では、既存の並列アルゴリズムの持つ問題点を回避し、高い台数効果を得ることが可能である並列シア・ワープボリュームレンダリングアルゴリズムを提案する。

図 1 に示すように、シア・ワープボリュームレンダリングアルゴリズムは、三次元透視変換をせん断 (shear)、中間画像への投影、2次元アフィン変換 (warp) に分解し、それぞれを効率良く実行する。また、このような分解によりレンダリングにおけるデータ参照がボクセルと呼ばれる三次元格子点の配置順に行われるため、可視化に影響のない透明なボクセルの処理をまとめて効率良く省略することが可能である。

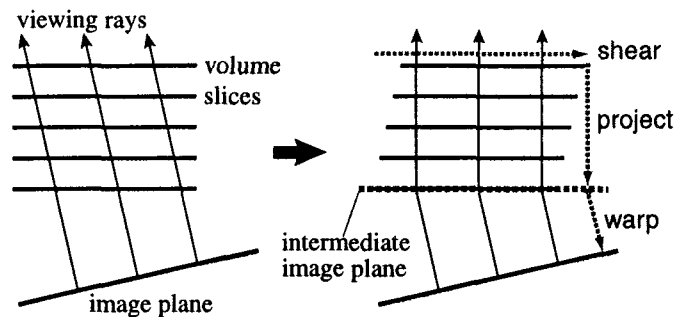


図 1: 三次元透視投影のシア・ワープ分解

提案する並列アルゴリズムでは、データ並列性に着目し、共有資源の競合を避けるためにボリュームを複数の部分ボリュームに分割し静的に各 PE に割り当てる。また、PE 間における通信データサイズを小さく抑えるために、画像合成法に基づき部分ボリュームの処理結果を統合し、最終画像を得る。提案する並列アルゴリズムは前処理と 4 ステージからなる。前処理では、ボリュームを分割し部分ボリュームを各 PE に割り当てる。並列シアステージでは、各 PE は割り当てられた部分ボリュームを可視化し、部分ボリューム画像を並列に生成する。続く合成ステージでは、バイナリスワップアルゴリズムにより PE の高い稼働率を保ちながら各 PE の部分ボリューム画像を合成する。並列ワープステージでは、バイナリスワップ画像合成により得られた中間画像の断片を各 PE が並列に変換し、最終画像の断片を生成する。最後のマージステージでは、1 つの PE に最終画像の断片を統合する。

計算量解析の結果、合成ステージの処理時間は PE が増加するにつれて単調に増加し、ある定数

に漸近することが判明した。PEが増加しても処理時間の減少しないステージは、台数効果低下の原因となる。このため、高い台数効果を得るには並列シアステージにおける負荷分散と共に合成ステージの処理時間を短縮する必要がある。本章では、並列シアステージの負荷分散と合成ステージの処理時間短縮のために、適応ボリューム分割手法を提案する。適応ボリューム分割では、並列シアステージの処理時間が部分ボリューム中の不透明ボクセル数にほぼ比例することに着目し、不透明ボクセル数が均一となるようなボリューム分割を行う。また、合成ステージにおいて通信、及び合成が行われる、部分ボリュームの投影領域が縮小するような分割を行う。

32台のPEを有する分散メモリ型汎用並列計算機SP2における性能評価実験の結果、本並列アルゴリズムにより、現在の標準的サイズのボリュームデータを0.1秒以内に可視化できることが確認された。この処理時間は、対話的な可視化を十分実現可能なものである。また、提案する適応ボリューム分割により、従来のスラブ分割と比べて台数効果が改善されることが確認された。合成ステージの処理時間はPEが増加するにつれ全体の処理時間に対し支配的となるため、本ステージの処理時間を短縮する適応ボリューム分割手法は、多数のPEを用いる大規模な並列レンダリングに対してさらに有効であると期待される。

### 3. An Adaptive Resampling Algorithm for Accurate Volume Ray-Casting

本章では、局所的な計算処理において目標とする精度を達成するのに最低限必要な計算コストの不均一性に着目し、必要な計算処理のみを行うことにより従来よりも低い計算コストで高精度な可視化を実現するアルゴリズムを提案する。

ボリュームレンダリングでは、輝度と不透明度から成る被積分関数を視線に沿って積分することにより、画素に到達する光の輝度を計算する。この積分はボリュームレンダリング積分と呼ばれる。任意の被積分関数に対する一般解は存在しないため、ボリュームレンダリング積分は中点則に基づく数値積分を用いて計算される。

ボリュームは三次元格子点上におけるボクセル値の集合として与えられるため、輝度、及び不透明度は、それぞれ陰影付け関数、及び分類関数によりボクセル値とその勾配から求められる。数値積分のための再標本点における被積分関数値を求める方法には、以下の2種類がある。

#### 1. R(SC) 法: Reconstruction before Shading and Classification

ボクセル値、及びその勾配をフィルタ関数との畳み込みにより再構成し、これを陰影付け、及び分類することにより再標本点における輝度、及び不透明度を求める。

#### 2. (SC)R 法: Shading and Classification before Reconstruction

あらかじめボクセル位置において輝度、及び不透明度を求めておき、これをフィルタ関数との畳み込みにより再構成することにより再標本点における輝度、及び不透明度を求める。

本論文では、これらの方法を輝度、及び不透明度の再構成方法と呼ぶ。R(SC)法で再標本点毎に必要な陰影付け、及び分類は、(SC)R法では陰影付け及び分類関数が増えない限り一度のみ行われる。このため、可視化精度よりも処理速度を優先するボリュームレンダリングアルゴリズムの大半は(SC)R法に基づいている。

ボリュームレンダリングの精度は、数値積分における誤差と、輝度、及び不透明度の再構成方法に左右される。数値積分の誤差は、被積分関数の2次の微分係数と再標本点間隔に依存する。再標本点間隔を狭めることにより数値積分における誤差を小さく抑えることは可能であるが、同時に数

値積分に要する計算コストが増加する。一方、(SC)R法により再構成された輝度、及び不透明度には、ボクセルの標本化周波数が輝度及び不透明度関数のナイキスト率を越えないか、あるいは輝度及び不透明度関数が帯域制限されていない場合に誤差が生じる。R(SC)法を用いる場合にはこのような誤差は発生しないが、再標本点毎の陰影付け、及び分類処理のために、(SC)R法を用いた場合よりも計算コストは高くなる。

数値積分における誤差と再構成された輝度、及び不透明度における誤差はボリュームデータにも依存するため、ある精度を達成するのに必要な再標本間隔、及び輝度と不透明度の再構成方法は局所的に異なる。本章で提案するアルゴリズムでは、必要最低限の計算コストで目標とする精度を達成する再標本間隔、及び再構成方法を、ボリュームデータに応じて局所的に決定する。

輝度と不透明度が近似的に一定である領域では(SC)R法による再構成でも正確な輝度、及び不透明度が得られるため、このような領域では積極的に(SC)R法を用いて再構成の計算コストを低く抑える。それ以外の領域では正確な再構成のためにR(SC)法を用いる。また、被積分関数の2次の微分係数を評価し、与えられた許容誤差を満たしつつ計算コストが最低となるように局所的に再標本点間隔を決定し、数値積分を行う。本論文では、再構成方法や再標本点間隔をボリュームデータに応じて局所的に決定するアルゴリズムを、適応再標本化アルゴリズムと呼ぶ。

レンダリング処理中の適応再標本化のためのオーバーヘッドを低減するために、輝度と不透明度の評価は前処理として行われ、その結果はボクセルの属性としてボリュームデータに付加される。適応再標本は、ボクセルの属性を参照することにより簡単に行われる。輝度と不透明度が一定である領域と被積分関数の2次の微分係数は、ボクセルの解像度よりも高い解像度で再標本化した輝度、及び不透明度のウェーブレット係数から近似的に求められる。

提案する適応再標本化アルゴリズムの有効性を評価するために、本アルゴリズムに基づくボリュームレイキャスティングの処理時間と可視化精度を実験により測定した。その結果、提案するアルゴリズムは、R(SC)法に匹敵する精度の画像をR(SC)法を用いた場合よりも短い処理時間において生成可能であることが確認された。

#### 4. Conclusions

本論文では、処理速度、または計算精度の点で高性能なボリューム可視化技術の確立を目的として、データ並列シア・ワーブボリュームレンダリングアルゴリズムと適応再標本化アルゴリズムを提案した。また、実験により、処理速度、または計算精度の点で提案したアルゴリズムは従来のアルゴリズムよりも高性能な可視化を実現することを明らかにした。

## 論文審査の結果の要旨

近年、医療画像や科学技術計算結果などの高度可視化技術として、ボリュームレンダリングが注目されている。ボリュームレンダリングでは、ボクセルと呼ばれる三次元直交格子状に配置された数値データを可視化する。しかし、大量のボリュームデータに起因する膨大な計算量のために、実時間・高精度なボリュームレンダリング技術は未確立であり、医療現場に必要な、高精度画像を用いた対話処理が不可能であった。そこで著者は、ボリュームレンダリングのための実時間処理技術、及び低コストかつ高精度計算手法の確立を目的として、研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので、全編4章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、ボリュームレンダリングのデータ並列性に着目し、処理要素間通信コストの低い画像合成法に基づく、並列ボリュームレンダリング手法を提案している。本手法では、各並列処理要素の計算負荷の均一と、並列要素間で必要な画像通信量を最小にする適応ボリューム分割法を開発している。そして、分散メモリ型汎用並列計算機を用いた実験により、本並列処理手法は処理に用いたCPU数に比例した性能を達成できることと、実用的な規模のボリュームデータに対して実時間可視化が可能であることを明らかにしている。これらは、実時間ボリュームレンダリング実現のための有用な成果である。

第3章では、ボリュームレンダリングの可視化精度と計算コストの関係を明らかにするとともに、低い計算コストで高精度の可視化を実現するための処理手法として、適応再標本化アルゴリズムを提案している。本アルゴリズムは、ボリュームデータにおいて、高精度の可視化に必要な計算コストの分布に偏りがあることを利用し、データ中の必要計算コストを局所的に評価することにより冗長な計算処理を省いている。さらに、必要計算コストの局所的評価の大部分は可視化処理と独立していることに着目し、これを前処理として独立に行うことにより、可視化時における適応再標本化のオーバーヘッドを可能な限り低減している。実験により、適応再標本化アルゴリズムを導入したボリュームレイキャスティングアルゴリズムは、従来のボリュームレイキャスティングアルゴリズムよりも低い計算コストで高可視化精度が得られることを明らかにしている。これらは、実用上有益な結果である。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、処理時間、及び低い計算コストで高精度が得られるボリュームレンダリングの基本アルゴリズムを提案し、その有効性を理論と実験の両面から示したものであり、情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。