

学位論文題名

Accelerated Volume Rendering and
Fast Collision Detection of Volume Data

(高速化ボリュームレンダリングとボリュームデータの高速衝突判定)

学位論文内容の要旨

MRI、CT などから得られたデータから 3 次元形状を再構築し、ボリュームレンダリングを行なうことにより医療用画像を生成する手法が報告されているが、画像生成のために計算時間が多くかかるという問題を抱えている。そこで本研究は、このボリュームレンダリングの速度を向上し、医療用画像をより高速に生成することにより、医師が効率よく診断ができることを目指す。

また、最近リアルタイム性を追求したボリュームレンダリングの応用分野としてシミュレーションやテレビゲームなどが注目されているが、これらの分野のニーズにも応えるべく、複数の実時間変化を伴うボリュームデータのレンダリング手法とそれに伴う実時間変化を伴う複数のボリュームデータ同士のリアルタイム衝突判定の研究も行ったのでその概要を説明する。

まず、シングル CPU 環境でのボリュームレンダリング高速化アルゴリズムについて述べる。従来のボリュームレンダリング手法の場合、各ピクセルの値を決定するために膨大な線形補間が必要になってくる。この線形補間の大部分は等密度面 (isosurface) が存在するか否かを検出するための計算であり、実際にレンダリングを行うための計算ではない。したがって、レンダリングは効率的とはいえない。さらに、オブジェクト空間でのメモリアクセスはランダムであるので、ページフォルトやキャッシュミスが生じる可能性が高い。

そこで本研究では、オブジェクト順のアルゴリズムを用いて各ボクセル (直方体) の 8 つのデータ点の値を調べることにより、補間計算をしなくて isosurface の存在を調べることにした。Isosurface が存在するボクセルのみ線形補間を行ない、またレンダリングを行なう際、フォワードレイトレーシングを使用することを試みた。これにより、線形補間の回数を減らすことができ、またオブジェクト順にメモリアクセスしたのでページフォルトやキャッシュミスが生じる確率を低くできた。この手法を使うことにより、従来のイメージ順のレンダリングアルゴリズムの画質と同等な画像を 2 倍から 7 倍くらいの高速で生成することができた。

次に、並列計算機環境でのボリュームレンダリングについて説明する。画像のレンダリングの更なる高速化のため、並列ボリュームレンダリングのアルゴリズムを開発し、並列計算機上で実験を行った。この並列アルゴリズムはオブジェクト空間分割によるものである。したがって、各 PE 内でレンダリングされた部分イメージを合成する必要がある。この合成処理を composition 処理と言う。本研究はこの composition 処理の高速化を目標とした。この並列レンダリングアルゴリズムの基礎的な概念は composition 処理を行う時、PE をサブボリュームにインターリーブ方式で割り当てると PE 間の通信量を減らすことができ、全体のレンダリング速度を向上できることである。例えば、composition 処理の順序は以下のとおりだと仮定する (この順序は一つの例であり、他の順序も考えられる)。まず、x 軸方向に composition 処理ができなくなるまで binary composition を行う。次に、y 軸方向に同様に binary composition を行う。最後に、z 軸方向に同様に binary composition を行う。この順序を考えてみると、PE 間の通信量が最も多いのは x 軸方向に composition 処理を行う時である。したがって、x 軸方向の composition 処理時に通信量を減らすのが三方向の内、最も効果的である。そこ

で、通信量を減らすための手段として、サブボリュームへの PE の割り当てをインターリーブ方式で行うことができる。このように x 軸方向の composition 処理を重視してサブボリュームへの PE の割り当てを行うと通信量の削減が可能になる。結果として、インターリーブ方式を使わない場合と比べ、提案手法だと composition 処理の速度が 1.3 倍から 2 倍くらいになった。

次に、実時間変化を伴うボリュームデータのリアルタイムレンダリングのアルゴリズムについて述べる。このレンダリングアルゴリズムはハードウェアテクスチャマッピングを利用した既存のボリュームレンダリングアルゴリズムを更に高速化したものである。二つの手法を使うことにより、レンダリングの高速化を実現している。一つ目は、ボリューム空間をサブボリュームに分割して、ボリュームデータが存在しないサブボリューム内をレンダリングをしないことによりレンダリング効率を向上している。二つ目は、視点から各サブボリュームの距離に応じてそのサブボリューム内でレンダリングされるスライス状のボリュームデータの枚数を変更する。他のサブボリュームに比べ、視点から比較的近いサブボリューム内ではボリュームデータの枚数を多くする。また、視点から相対的に遠いサブボリューム内ではボリュームデータの枚数を少なくする。視点から比較的遠いサブボリューム内のデータの量を減らしてレンダリングしている。こうすることにより、テクスチャマッピングに必要とされるデータ量が減り、レンダリング速度の向上につながる。上の二つを行うことにより、従来手法の 1.5 倍から 3 倍の衝突判定速度を実現している。

最後に、実時間変化を伴う複数のボリュームデータ同士のリアルタイム衝突判定について説明する。リアルタイムの衝突判定を行うには三つの手段を使用している。一つ目は、各ボリュームデータを囲むバウンディングボックスを使うことにより、ボリュームデータが明らかに衝突していない場合を検出し、その時衝突判定の処理を行わない。二つ目は衝突可能なボリュームデータが存在しないボクセル平面を衝突判定の対象から外す。三つ目はボリュームデータの奥行き方向の衝突可能なボクセル位置の最小と最大 z 値を使うことにより、重なり合う可能性のないボリュームライン領域を衝突判定の対象から外す。上の三つを行うことにより、従来手法の 2 倍から 3 倍の衝突判定速度を実現している。

上で述べたシングル CPU レンダリングアルゴリズム、composition 処理高速化アルゴリズム、複数の実時間変化を伴うボリュームデータのレンダリング手法、とそれに伴う実時間変化を伴う複数のボリュームデータ同士のリアルタイム衝突判定の基本的な概念について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 強
副 査 教 授 青 木 由 直
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

Accelerated Volume Rendering and Fast Collision Detection of Volume Data

(高速化ボリュームレンダリングとボリュームデータの高速衝突判定)

近年、MRI、CT などから得られた 3 次元データからボリュームレンダリングにより画像再構成を行なう技術が各方面から注目されている。最近ではリアルタイム性を追求した応用分野としてシミュレーションやテレビゲームなども注目されているが、これらの分野では複数の実時間変化を伴うボリュームのレンダリング手法とボリュームのリアルタイム衝突判定といった新しい高速処理技術が必要になる。本研究はボリュームレンダリングの速度向上技術を提案するとともに時間変化するボリュームデータのレンダリング技術の新しい手法を提案するものである。

第 2 章ではシングル CPU 環境でのボリュームレンダリング高速化アルゴリズムについて述べている。従来のボリュームレンダリング手法の場合、各ピクセルの値を決定するために膨大な線形補間が必要になる。この線形補間の大部分は等密度面(isosurface)を検出するための計算であり、実際にレンダリングを行うための計算ではない。さらに、オブジェクト空間のアクセスがランダムとなるため、ページフォルトやキャッシュミスが生じる可能性が高い。本論文ではオブジェクト順のアルゴリズムを用いて各ボクセル(直方体) 8 頂点の値を用いて補間計算をせずに isosurface の存在を調べる手法を提案している。その後、isosurface が存在するボクセルのみ線形補間を行い、フォワードレイトレーシングを使用することで線形補間の回数を減らすことができることを提案している。また、ボリューム空間をオブジェクト順にアクセスするため、ページフォルトやキャッシュミスが生じる確率を低くできる。この手法を使うことにより、従来のイメージ順レンダリングアルゴリズムと同等な画像を 1/2 から 1/7 の時間で生成している。

第 3 章では並列計算機環境でのボリュームレンダリングの高速化手法を提案している。提案している。オブジェクト空間分割による並列レンダリングでは各 PE 内でレンダリングされた部分イメージを合成する処理(composition)が必要になる。本章で提案する並列レンダリングアルゴリズムの基礎的な概念は composition 処理を行う時、PE をサブボリューム

にインターリーブ方式で割り当てると PE 間の通信量を減らすことができ、全体のレンダリング速度を向上できることである。本論文では PE 間の通信量が最も多いのは x 軸方向に composition 処理を行う時であることを示し、x 軸方向の composition 処理時に通信量を減らすのが三方向のなかで最も効果的であることを提案している。そして x 軸方向の composition 処理を重視してサブボリュームへの PE の割り当てを行うと通信量の削減が可能になることが明らかにしている。結果として、インターリーブ方式を使わない場合と比べ、提案手法だと composition 処理時間が 1/1.3 から 1/2 程度ですむことが示されている。

第 4 章では実時間変化を伴うボリュームデータのリアルタイムレンダリングのアルゴリズムについて提案している。提案しているアルゴリズムはハードウェアテクスチャマッピングを利用したアルゴリズムを高速化したものである。まずボリューム空間をサブボリュームに分割して、ボリュームデータが存在しないサブボリュームをレンダリングしないことにより速度を向上している。また、視点から比較的近いサブボリューム内ではボリュームデータの枚数を多くし、視点から相対的に遠いサブボリューム内ではボリュームデータの枚数を少なくする。これによりテクスチャマッピングに必要とされるデータ量が減り、レンダリング速度の向上につながる。上の二つを行うことにより、従来手法の 1/1.5 から 1/3 の時間で衝突判定処理が実現できている。

第 5 章は実時間変化を伴う複数のボリュームデータ同士のリアルタイム衝突判定アルゴリズムに関する提案である。本論文ではリアルタイムの衝突判定を行う以下の 3 手法を提案している。1. 各ボリュームデータを囲むバウンディングボックスを使うことにより、ボリュームデータが明らかに衝突していない場合を検出し、その時衝突判定の処理を行わない。2. 衝突可能なボリュームデータが存在しないボクセル平面を衝突判定の対象から外す。3. ボリュームデータの奥行き方向の衝突可能なボクセル位置の最小と最大 z 値を使うことにより、重なり合う可能性のないボリュームライン領域を衝突判定の対象から外す。これにより従来手法と比較して 1/2 から 1/3 の時間で衝突判定が可能となっている。

これを要するに、著者はボリュームデータのレンダリングおよび衝突判定処理の高速化について新知見を得たものであり、画像工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。