

氏名	金 喜 都
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第1774号
学位授与の日付	平成10年11月24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	工学研究科情報工学専攻
学位論文題目	超高速ボリュームレンダリングのための並列計算機アーキテクチャの研究 (主査)
論文調査委員	教授 富田真治 教授 田丸啓吉 教授 美濃導彦

### 論文内容の要旨

医療画像の生成と科学技術計算の結果解析の手法として、ボリュームレンダリングによる可視化が注目されている。しかし、ボリュームレンダリングには膨大な計算資源を必要とするため、高速化が困難であった。特に科学技術計算の結果の可視化には、遠近法による画像生成と、半透明表示が必要なため、高速化はさらに困難である。本論文は、超高速な可視化を目的としたボリュームレンダリング専用並列計算機のアーキテクチャについて提案を行ったものであり、序論と将来の展望を含め7章から構成されている。

第1章は序論であり、超高速ボリュームレンダリングを達成するためのボクセル並列処理とピクセル並列処理の基本的な設計目標及び主要な研究課題について述べている。

第2章では、ボクセル並列処理によるボリュームレンダリング専用並列計算機ReVolver/C40を提案している。従来のサンプリング方法では、視線の方向に対して等間隔にボクセルをサンプリングされてきた。この方法では、ボリュームデータをメモリバンクに分割して格納すると、同一視線上の複数のボクセルが同一メモリバンクに格納される状況が発生し、ピクセル値計算の並列実行を妨げ、高速化の障害となる。主軸等間隔サンプリングと3重系メモリ構成を統合した無競合の3次元メモリを採ることにより、任意方向の視線のボクセルの同時読み出しを可能にし、半透明ボリュームの表示、遠近法に基づく高速な画像生成などが行える専用並列計算機ReVolver/C40によって、超高速ボクセル並列処理によるボリュームレンダリングを達成できることを示した。

第3章では、妥当な視角制限により表示図形歪みを抑えるとともにボリューム空間をスライス群に写像することで主軸等間隔サンプリングによる視線群並列処理は、1重系画像メモリ構成だけで無競合に行えることを理論的に示した。この視角制限によって、ボリューム空間を走行している視線群がスライス断面に垂直な方向で同時にサンプリングする各隣接点間の距離はスライスの厚さより小さくないので、スライスを格納するバンクコンフリクトフリーな3次元メモリを構成できる。結局、平行投影および透視投影に関係なく、各 $N \times \Delta T$  ( $\Delta T$ は視線がボクセルを通過する時間間隔)ごとに、スクリーンの1行分の $N$ ピクセルを通過する新しい視線群がパイプライン的に $N$ の3乗のボクセルを持つボリューム空間に並列アクセスできる。ボリューム空間への視線群並列アクセスに応じる各視線上のピクセル値の再帰合成計算を超高速に行うため、同一構造をした $N$ プロセッサをスライスメモリバンクに1個ずつ1次元アレイ状に規則正しく配置し、直接隣接したプロセッサ間でのみ1ステップ(単位時間)で直接に同期通信できる構成を採用している。すなわち、視線群並列処理は、時間並列と空間並列の両立で行うように設計されている。

第4章は3章で構築した理論に基づき、視線群並列処理をステージとしたマクロパイプラインによる4次元の超高速動的ボリュームレンダリング並列計算機の全体構成について述べている。このマクロパイプラインは、視線群生成ステージS1、入射点情報ディスプレイステージS2、視線群並列処理ステージS3、色バッファと深さバッファ構築ステージS4、シェーディングステージS5、アンチエイリアシングステージS6から構成されている。また、離散モデルと連続モデルでは、実時

間データ更新に対応できる3次元メモリの様々な構成を提案している。

第5章は、各種のボリューム表示方法について述べている。ボリューム空間は抽出可能な境界面が存在しているという構造的性質を持つと仮定して、単純にボリュームの半透明表示に使う通常のレイキャスティング算式を拡張し、ボリューム内部に指定された境界面までに視線が前進した深さステップ数を求める再帰算式、及び指定した境界面までの、またはその境界面から始めた半透明表示などが行えるレイキャスティングの再帰アルゴリズムの16種を提案している。これにより、観察者のために、多種多様のボリューム表示を提供することができる。

第6章は視線群並列処理を行う1次元接続のプロセッサSPU (Slice-Process Unit) 群の実装設計と性能評価について述べている。SPUのすべての回路は、FPGA (Field Programmable Gate Array) XC4000系列のVLSIチップで作成している。SPUの基本構成は、前進点計算装置APCU、線形補間計算装置LICU、ピクセル値計算装置PVCUからなり、それぞれは、同期式演算パイプライン構成を採用している。プロトタイプシステムを設計した結果、512の3乗のボクセル空間と512の2乗のピクセル空間に対して、プロセッサのパイプラインサイクルが80nsに設計され、1秒間に48枚の動画が出力できることを確認している。

第7章は将来への展望であり、本研究のピクセル並列処理に対してさらに検討するテーマを明らかにしている。

## 論文審査の結果の要旨

医療画像の生成と科学技術計算結果の解析の手法として、ボリュームレンダリングによる可視化が注目されている。しかし、ボリュームレンダリングには膨大な計算資源を必要とするため、高速化が困難であった。特に科学技術計算結果の可視化には、遠近法による画像生成と、半透明表示が必要なため、高速化はさらに困難である。本論文は、超高速な可視化を目的としたボリュームレンダリング専用並列計算機のアーキテクチャについて提案を行ったものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

### 1. 主軸等間隔サンプリングと3重系メモリ構成を統合したボクセル並列処理方式の提案

主軸等間隔サンプリングと3重系メモリ構成を統合した無競合の3次元メモリ構成を採ることにより、任意方向の視線上のボクセルの同時読み出しを可能にした。また、半透明ボリュームの表示、遠近法に基づく高速な画像生成などが行える専用並列計算機ReVolver/C40のアーキテクチャを示し、超高速ボリュームレンダリングの一方式を提案している。

### 2. 視角制限による1重系メモリ構成に基づくピクセル並列処理方式の理論的枠組の確立

視角を制限することにより表示図形歪みを抑えるとともに、ボリューム空間をスライス群に写像することで、主軸等間隔サンプリングによる視線群並列処理は、1重系画像メモリ構成だけで無競合的に実行できることを理論的に示した。この方式では、平行投影と透視投影に関係なく、各 $N \times \Delta T$  ( $\Delta T$ は視線がボクセルを通過する時間間隔)ごとに、スクリーンの1行分の $N$ ピクセルを通過する新しい視線群がパイプライン的に $N$ の3乗のボクセルを持つボリューム空間に並列アクセスできる。

### 3. 視線群並列処理に基づくマクロパイプラインによるプロトタイプシステムの提案

視線群並列アクセスのための超高速の計算機構は、同一構造をした $N$ プロセッサをメモリバンクに1個ずつ1次元レイ状に規則正しく配置されている。これらの基本ステージにシェーディングステージとアンチエイリアシングステージを含めたマクロパイプラインによる4次元の超高速ボリュームレンダリング並列計算機の全体構成と実装設計を示し、超高速ボリュームレンダリング向きの実時間システムの性能評価を行っている。

以上、本論文は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成10年10月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。