

|         |   |
|---------|---|
| 氏名      | かわだ なおき<br>河田 直樹  |
| 所属      | システムデザイン研究科情報通信システム学域   |
| 学位の種類   | 博士（工学）  |
| 学位記番号   | シス博 第62号  |
| 学位授与の日付 | 平成27年3月25日  |
| 課程・論文の別 | 学位規則第4条第1項該当  |
| 学位論文題名  | GPU実装によるインタラクティブ波動伝搬シミュレーションに関する研究  |
| 論文審査委員  | 主査 准教授 大久保 寛<br>委員 教授 福本 聡<br>委員 教授 田川 憲男<br>委員 准教授 鈴木 敬久<br>委員 教授 土屋 隆生(同志社大学) |

### 【論文の内容の要旨】

近年の計算機環境の向上と共に、時間領域の波動数値シミュレーションは重要な技術と  
なっている。従来、数値シミュレーションの高速化には、スーパーコンピュータやク  
ラスタなどの大型の計算機が利用されてきた。しかし、最近ではGPU（Graphics Processing  
Unit）を並列処理アーキテクチャとして用いて汎用的な数値計算を行うGPGPU（General  
Purpose computing on GPUs）という技術が様々な分野で用いられてきている。

現在のGPUの演算性能は数年前と比較して飛躍的に向上しており、最新のGPUボードは  
1機あたりに3000個程度のコアを搭載し、計算アクセラレータとしてCPUクラスタや小型ス  
ーパーコンピュータに匹敵する演算性能を秘めていると考えられる。すなわち、計算高速  
化を実現する手段において、GPUはコストパフォーマンスの高いアクセラレータとして位  
置づけられると言える。波動伝搬シミュレーションにおいても、生体内音波伝搬解析や建  
築音響・騒音解析、アンテナ解析、屋外電波伝搬解析、弾性体の音場特性解析などへの応  
用・実用化が期待されている。

時間領域の波動数値解析手法としては、FDTD（Finite-Difference Time-Domain）法が広く  
利用され、大型計算機によるベクトル化や並列化の研究も行われている。また、特性曲線  
法の一つであるCIP（Constrained Interpolation Profile）法を用いた数値解析の研究が進められ、  
成果が報告されている。CIP法は場の空間微分値の値も同時に計算することで、同様の離散  
化条件において、従来法に比べて数値分散性が非常に小さく位相情報の誤差が少ない手法  
であることが明らかになっている。しかし、CIP法はFDTD法と比較すると数値散逸誤差が

大きいことも明らかになっており、大規模領域を解析する際にはこの数値散逸誤差は非常に重要な問題となる。本論文ではCIP法の数値散逸誤差を改善する方法を検討し、その有効性を示すとともに、それらの特性曲線法を一般化したMM-MOC (Multi-Moment-Method of Characteristics) 法を提案し、GPU実装による高速化法も併せて考察している。

一方、計算機で数値解析と同時に解析結果の可視化を行う場合、特に、パーソナルコンピュータに代表される1ノード計算機において解析する場合には、3次元空間をモデル化するためのメモリ容量の問題や、メモリが確保できたとしてもその計算を行うための計算時間を考慮すると、現実問題として3次元解析は困難な場合が多かった。さらに、シミュレーションの実行中に、同時に解析結果を可視化する、いわゆるリアルタイム可視化を行う場合は、十分な描画スピードを維持するためには、3次元シミュレーションの実現は1ノード計算機ではほぼ不可能であった。

GPUはこの課題の解決に大きく貢献するアーキテクチャと言える。すなわち、GPUを用いた実装は単に計算速度が向上するだけでなく、ビデオメモリ (VRAM) 上に計算領域を確保することで、一般的な可視化のデータ転送とは異なり、PCIe (Peripheral Component Interconnect Express) バスの転送を回避してビデオカード上の描画用のVRAM領域へ情報を直接書き込むことができる。これは高速可視化を目指す上で重要な点である。これにより、GPU実装によるリアルタイム可視化シミュレーション、さらにこれを発展させたインタラクティブシミュレーションが可能となる。ここでインタラクティブシミュレーションとは、数値解析を行いながらリアルタイムに可視化を行い、その結果を確認しながらインタラクティブに解析パラメータ等を操作するシミュレーションのフレームワークを指している。

本論文は、GPU実装による波動数値解析のためのインタラクティブシミュレーションを実現し、応用するための研究成果を詳細に報告したものであり、全6章よりなる。

第1章は序論として、本研究の目的と意義、位置付けを示す。

第2章では波動伝搬解析における数値シミュレーション手法について述べる。初めに、音場・電磁場・弾性波それぞれの支配方程式に基づく、各手法の定式化を説明する。併せて、MM-MOC法の考え方及び定式化について述べる。さらに、FDTD法とMM-MOC法の精度比較評価を行い、第3章以降のGPU実装に向けた準備をする。

第3章では数値シミュレーションのGPU実装について述べる。初めに、GPUの概要について説明する。次に、FDTD法・MM-MOC法のそれぞれの手法に関して、解析手法に応じたGPU実装のためのアルゴリズムの検討を行い、それによる計算時間の短縮について考察する。最後に、マルチGPUを用いた更なる高速化の検討を行い、結果について考察する。

第4章では可視化手法について述べる。初めに、従来用いられてきた可視化手法について説明する。続いて、それらの問題点を踏まえた上で、新しい可視化手法としてPMCC (Permeable Multi Cross-section Contours) を提案し、この方法を用いた可視化の描画速度の比較評価を行う。さらに、マルチGPUを用いたより高速な可視化についても検討し、考察を行う。

第5章ではGPUを用いた高速並列計算とリアルタイム可視化を組み合わせたインタラクティブシミュレーションについて述べる。初めに、その概要について説明し、続いて3章及び4章において検討を行った解析手法と可視化手法を基盤とし、音場・電磁場・弾性波を対象としたインタラクティブシミュレーションの応用について検討を行う。

第6章は結論である。本研究で得られた成果をまとめると共に、残された課題と今後の展望について述べる。