

審査の結果の要旨

氏名 ジョルゼスク セルバン

連立一次方程式の解法は多くの数理学・工学分野における基礎となっている。現実世界の現象をモデル化すれば、解くべき連立一次方程式の規模は非常に大きくなり、数値解析の時間の大部分がその解法部分に占められることとなる。そして、大規模かつ疎な構造をもつ行列を扱う構造解析や数値流体の分野では、反復解法であるクリロフ部分空間反復解法が広く使われている。またそれらの行列は広帯域なバンド幅を持つ行列となるため、既往のプロセッサ上でクリロフ部分空間反復解法を加速化することが難しい。一方、GPU (Graphic Processing Unit) をはじめとする近年のメニーコア技術の目覚ましい発展によって約 10 倍の高速化が期待されている。GPU をはじめとするこうしたメニーコアプロセッサを用いた加速化手法を開発することは、近い将来において登場が期待されるメニーコア CPU へのポータビリティとスケーラビリティの確保にもつながる。

本論文は 9 つの章と付録から構成されている。第 1 章 (序章) では、背景として連立一次方程式の解法である直接法と反復法について述べ、クリロフ反復解法の加速化の必要性について明らかにした。ヘテロなメニーコアアーキテクチャ上でのクリロフソルバーの実用化を最終的な目標として本研究では 4 つの小目標に分けて段階的に議論を進めてゆく。これらについては後章で個々に取り上げる。

第 2 章では本論文で必要となる数学的な背景について説明した。クリロフ反復解法の概要について述べた後、本論文で扱う二つの具体的なクリロフ反復解法として CG 法と GMRES 法の導出について示した。次に、倍精度計算を擬似的に行うための反復精度修正法 (Iterative Refinement method) について述べた。

ヘテロなメニーコアプロセッサ環境として本研究が GPU に焦点を絞った理由を明らかにするため、第 3 章では 3 つの代表的なメニーコアアーキテクチャ環境である GPU, FPGA, そして CELL について個々のアーキテクチャの違いについて説明した後、それらを用いた線形代数演算についてこれまでに行われた研究についてレビューした。

第 4 章では、反復解法のベンチマークテストに用いた CPU と GPU について説明した。またここでは、スケーラビリティを計測する実験を実行するために構築した GPU クラスタの設定について説明した。

第 5 章では、より高速にそしてより低価格に、単精度のみを用いる、または単精度と倍精度の両方を用いることで高精度な演算を行う方法について示した。反復精度修正法 (Iterative Refinement method) を用いる上で、自動的に最適なパラメータを見つけ出す方法についても示した。

第7章では、前章の議論に基づいてクリロフ反復解法とヘテロなハードウェアをつなぐインターフェースやマルチコアCPUや複数のGPU上で実行可能な実証ソフトウェアの実装パッケージについて開発した。パッケージの詳細については付録に示す。また第7章では様々な種類の解析分野から集められた行列や、FrontSTRと呼ばれる大規模有限要素解析ソフトウェアから実際に得られた行列を用いてベンチマークテストを行いさらなるパフォーマンス検証実験を行った。一つ一つのカーネルを出発点として実験は複数のコア、複数のGPU、そして複数のGPUクラスタのノードへとスケールアップしてゆく。その結果、非常に大きな高速化が実現され、今日最速とされるCPU一台に対してGPU一台で平均7倍の高速化が得られた。さらに、パフォーマンスだけでなく、電力や価格の点からみてもGPUの性能はCPUに勝ることが示された。性能対費用を考えると、安価なグラフィックカード上で擬似倍精度を用いた場合、同価格のCPUに対して最大で2倍のパフォーマンスが得られることがわかった。

第8章では、前章でのパフォーマンス検証実験の結果を基にスケーラビリティの検証を行った。ウィークスケーリングとストロングスケーリングの両面から検証した。GPUのようなアーキテクチャをもつ場合、そのクラスタを用いた加速化はストロングスケーリングの意味ではスケーラビリティが低い。ノードの数を増やすためには計算と通信のオーバーラップや、GPUの大規模メモリや高速なネットワーク接続の活用が不可欠である。例えば、1ノード当たりGPUを4台持つ128ノードのGPUクラスタを想定したとき、512MBのメモリでGigabitEthernetの場合1TFlopsの性能が得られるが、オーバーラップを実装すると約2TFlops、メモリを4GBに増設するかネットワークをInfinibandを利用することで約5-6TFlopsまでスケールアップすることが示された。

最終章の第9章にて本研究から得られた知見についてまとめた。

実用的な見地からクリロフ反復解法の高速化を実現した本研究の功績は大きい。提案された手法は、マルチコア型のアーキテクチャを持つ演算処理装置に対して幅広い可搬性を有するため、そうしたアーキテクチャ上での反復解法の開発に役立つであろう。さらにそうしたアーキテクチャを持つ演算処理装置は複数のデータ形式を取り扱うことが可能であるため単精度・倍精度が混在する演算など、今後さらに効果的な利用が図られてゆくと期待される。

以上のように、本論文は計算力学の発展に大きく貢献するものであり、工学的応用分野を通じてシステム量子工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。