

氏 名	かわ ばた ひで ゆき 川 端 英 之
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3811 号
学位授与の日付	平 成 16 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Compiler Techniques for Large-Scale Numerical Computations (大規模数値計算のためのコンパイラ技術に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 島 崎 眞 昭 教 授 富 田 眞 治 教 授 小 山 田 耕 二

論 文 内 容 の 要 旨

近年の計算機ハードウェアの高性能化により、ますます大規模な科学技術計算が可能になりつつある。しかしながら大規模計算コードの開発環境については、現状では十分とは言い難い。システムソフトウェアであるコンパイラに関する技術の発展、とりわけ、ハードウェアの利用効率を左右するコンパイラの最適化技術や大規模計算コードの生産性を左右する抽象度の高い行列言語のためのコンパイラ技術の向上は、コンピュータシステム全体の利用効率向上の鍵であると考えられる。本論文は、大規模数値計算アプリケーション開発の効率化を目指して、ハードウェアとプログラマとの間に位置するソフトウェア階層の主要構成要素であるコンパイラの諸機能について、ハードウェアからの側面およびプログラマからの側面の両方から検討した結果をまとめたものであって、5章からなっている。

第1章は序論であり、先端的ハードウェアの性能を十分に生かすためのソフトウェアシステム、特にコンパイラの諸機能の重要性について、プログラム開発者とハードウェアとのインターフェースとしての位置づけを踏まえてまとめ、現状の問題点について整理している。最後に各章の内容説明を行っている。

第2章では、ベクトル計算機をターゲットとした一次回帰演算の高速アルゴリズムについてまとめている。まず単純なベクトル化や並列化が困難な一次回帰演算の性質についてまとめ、並列プレフィックスアルゴリズムをベクトル計算機で実行する場合の問題点を整理している。続いて、並列プレフィックスアルゴリズムの一種でもあるアンローリング手法の有効性について、現実的なベクトル計算機を踏まえたモデルによる定量的な解析に基づいて言及している。そしてアンローリング手法において問題となるコード量の増加と安易なストリップマイニングによる無駄なベクトルロード・ストアの量の多さについて、ベクトルレジスタ長に注目した注意深い命令スケジューリングにより高級言語レベルで問題点を解決する手順を示し、一次回帰演算の高速ベクトルアルゴリズムとしてまとめ、提案している。また、モデルによるシミュレーション、ならびに商用ベクトル計算機(NEC SX-4 および富士通 VPP800)を用いた実測により、提案手法の有効性を示している。加えて、マルチベクトルプロセッサを備える計算機向けのアルゴリズムについて考察し、実測結果を踏まえて得失をまとめている。

第3章では、並列計算機をターゲットとして複雑な依存関係のあるループの並列化手法について述べている。まず、単純な doacross 法や pipeline 法などのループ並列化手法が適用できないような依存のあるループのための並列化手法として、並列プレフィックスアルゴリズムの応用による一次回帰演算の並列化手法の適用について検討し、小・中規模の並列計算機においてプロセッサ数に比例した高速化が可能であることを示すとともに、より複雑なループに適用した場合の並列化効率の低下について議論している。そしてそれを踏まえて、ループ運搬依存エッジに着目したループ再構成や回帰成分のみを抽出するコード変換などによる計算量を減らす最適化により、台数効果を高く保った実行を可能とする並列化方式について提案し、自動並列化コンパイラに直接実装可能なかたちでまとめている。また、構成方式の異なる2種類の並列計算機(日立 SR2201 および富士通 GP7000F)を用いた実測に基づく評価により、その有効性を示している。

第4章では、疎行列データ構造に対応した行列言語コンパイラの設計および実装についてまとめている。行列言語は数値

計算アルゴリズムの記述に適した言語であるが、型宣言の無い言語として設計されることが多く、ランタイムライブラリを多用するインタプリタによる実行が一般的であり、大規模数値計算に利用するには速度的な面で難点がある。一方で、行列言語の実行速度の高速化のために C や Fortran などのコンパイル言語記述に変換する従来の研究では、疎行列データ構造を扱えるものが無かった。本章ではまずこうした背景をまとめ、抽象的な行列言語記述による大規模数値計算コード開発環境の実現を目的としたときの現状の問題点に対する解決策として、行列言語レベルでの最適化機能を備え、かつ疎行列データ構造の扱いが可能な行列言語コンパイラの設計方針を提案している。次に、開発した行列言語コンパイラ CMC の諸機能、すなわち、変数属性推定のための静的解析機能、複数の疎行列データ構造に対応させたコード出力機能、各種最適化機能などについて述べている。続いて、連立一次方程式のソルバである SOR 法や CG 法の行列言語 MATLAB による記述を用いた実測により、本システムが疎行列計算コード記述および密行列コード記述のいずれにも有効であることを示している。また、ターゲットマシンや用いるデータの特性などに応じてデータ構造を選択することの有効性と、そのデータ構造選択を容易に行うことのできる本システムの有用性について、実測データをもとに議論している。加えて、ソースレベル最適化機能や詳細な形状情報把握とそれに基づくコード生成機能により、オブジェクトコードの実行性能を大きく向上させることができることを実測により示している。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、大規模数値計算アプリケーション開発の効率化を目指して、ハードウェアとプログラマとの間に位置するソフトウェア階層の主要構成要素であるコンパイラの機能について、ハードウェアからの側面およびプログラマからの側面の両方から検討した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 現状の自動ベクトル化コンパイラでは十分高速な最適化が行われてこなかった一次回帰演算の高速ベクトルアルゴリズムを提案している。本手法では、アンローリング手法におけるコード量と性能とのトレードオフを、ベクトルレジスタ長に配慮した多重ループ構成の導入により効果的に解消している。また現実のベクトル計算機を踏まえたモデルに基づくシミュレーションおよび複数の商用ベクトル計算機を用いた実測により、アンローリング手法に対する提案手法の優位性を定量的に示している。加えて、マルチベクトル環境での実行のための考察が実測結果とともにまとめられている。

2. 単純な並列化手法が適用できないような依存のあるループの並列化手法について検討し、一次回帰演算の並列化手法を応用した処理手法の性質について議論している。そしてループがより複雑になった場合の並列実行効率低下を定量的に指摘し、それに対する改善策としてループ運搬依存エッジに着目したループ再構成や回帰成分に着目した並列化による計算量削減により台数効果を高く保った実行を可能とする新しい並列化方式を与えている。また構成方式の異なる 2 種類の並列計算機による実測に基づく評価により、提案方式の有効性を示している。

3. 疎行列データ構造に対応した行列言語コンパイラの設計と実現アルゴリズムを提案し、その方針を踏まえてシステムを実装し、抽象的な行列言語記述による大規模数値計算コード開発環境の可能性を実証している。実装されたシステムは複数の疎行列データ構造に対応しており、生成された疎行列コードの性能の高さが複数種類の計算機による実測で示されている。また、行列言語コンパイラにおけるソースレベル最適化機能や詳細な形状情報把握とそれに基づくコード生成が、オブジェクトコードの実行速度に大きく影響を与えることを実測により示し、開発した行列言語コンパイラの有用性を実証している。

以上要するに本論文は、ハードウェアとプログラマのインターフェースとしてのコンパイラの機能について検討し、オブジェクトコード生成の際の自動ベクトル化・並列化機能や、抽象的なアルゴリズム表現による大規模数値計算記述を可能にする行列言語コンパイラの諸機能について、シミュレーションおよび実測により検証し、その有効性を示したものであって、学術上、實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16年10月26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。