

内22-39

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

マルチプロセッサシステム上での  
マルチグレイン並列処理に関する研究

Study on Multigrain Parallel Processing  
for Multiprocessor Systems

申請者  
小幡 元樹

Motoki Obata

電気工学専攻 アドバンスド・コンピューティング・システム研究

マルチプロセッサアーキテクチャは、地球規模の気象変動解析やリニアモードが発生する電磁界解析などの処理の高速化のためスーパーコンピュータやハイエンドサーバで用いられるだけではなく、ミッドレンジサーバやワークステーションのような身近なシステムにおいても採用されるようになってきている。このようなマルチプロセッサシステム上では、従来よりループレベル並列処理が行われ、様々なデータ依存解析技術やプログラムリストラクチャリング技術を用いるループ並列化コンパイラが開発されてきた。例えば、イリノイ大学のPolarisコンパイラは、サブルーチンのインライン展開、シンボリック伝搬、アレイプライベートイゼーション、実行時データ依存解析によってループ並列性を抽出する。スタンフォード大学のSUIFコンパイラは、インタープロシージャ解析、ユニモジュラ変換などを用いてループを並列化している。

しかし、このような既存のループ並列化技術では、複雑なデータ依存や、ループ外へ飛び出す条件分岐などが存在する場合、効率的な並列処理ができないという問題点が存在し、今後の大幅な性能向上は見込めないと考えられている。また、メモリとプロセッサの速度差が年々拡大しており、並列化技術だけではなく、キャッシュ最適化などのデータローカリティ最適化に関する研究も重要である。

したがって、今後のマルチプロセッサシステムの実効性能及びコストパフォーマンスを向上させるためには、ループ並列性だけではなく異なる粒度の並列性を併用するマルチグレイン並列化、及びさらに高度なデータ依存解析やキャッシュ最適化を行うことが重要となっている。

以上のような背景より、本論文ではマルチプロセッサシステムの実効性能、コストパフォーマンス、使いやすさを向上させるためのマルチグレイン並列化手法の開発、共有メモリ型及び分散メモリ型マルチプロセッサシステム上でのマルチグレイン並列処理の評価について述べる。

本論文は、5章から構成される。以下に各章の概要を示す。

第1章「序論」では、本研究の目的と従来研究について述べる。マルチプロセッサシステムの性能を向上させるためにはマルチグレイン並列処理が必要であり、日本政府ミレニアムプロジェクトIT21の一部として、2000年秋より行っている官民連携プロジェクトMETI/NEDOアドバンスド並列化コンパイラ（APC）プロジェクトでは、マルチグレイン並列化コンパイラ技術の開発を行っている。本研究で開発したOSCARマルチグレイン並列化コンパイラは、このAPCプロジェクトにおけるコアコンパイラの一つであり、マルチプロセッサシステム上での実効性能、使いやすさ、コストパフォーマンスを改善することを目指している。

第2章「マルチグレイン並列処理」では、本研究の基本要素であるマルチグレイン並列処理手法について述べる。マルチグレイン並列化では、ソースプログラムをサブルーチンブロック、繰り返しブロック、基本ブロックの3種類の粗粒度タスクに分解後、粗粒度タスク間のデータ依存及び制御依存を考慮してタスク間

の並列性を抽出するための最早実行可能条件解析によって、各粗粒度タスク間の並列性を抽出し、マクロタスクグラフを生成する。生成されたマクロタスクグラフ上の粗粒度タスクがサブルーチンブロック、繰り返しブロックである場合は、階層的にその内部を粗粒度タスクに分割して階層的マクロタスクグラフ生成し、プログラム全域の階層的なマルチグレイン並列性を抽出する。次に、抽出された階層的マルチグレイン並列性を利用し低オーバーヘッドな階層的並列処理を実現するため、各階層のマクロタスクグラフの形状によって、マクロタスクのスケジューリング手法を選択する。条件分岐による実行時不確定性が存在せず、マクロタスクグラフがデータ依存のみで構成される場合はコンパイル時のスタティックスケジューリング、条件分岐が存在するマクロタスクグラフの場合はプログラム実行時のダイナミックスケジューリング手法を適用する。

第3章「共有メモリ型マルチプロセッサ上でのマルチグレイン並列処理」では、開発を進めてきた OSCAR 自動マルチグレイン並列化コンパイラ、及び共有メモリ型マルチプロセッサ上での性能評価について述べる。OSCAR コンパイラは、逐次 Fortran プログラムを入力とするフロントエンド、マルチグレイン並列化を行うミドルパス、そして OpenMP と呼ばれる共有メモリ型マルチプロセッサ用の標準的並列化 API (Application Interface) などを用いて様々なマルチプロセッサシステム用に並列化されたプログラムを出力するバックエンドから構成されている。ミドルパスにおけるマルチグレイン並列性抽出部では、逐次プログラムから生成されたマクロタスクに対して、マクロタスク間データ依存解析、制御フロー解析、プログラムリストラックチャリングを適用後、最早実行可能条件解析を行い、プログラム中の階層的マルチグレイン並列性を抽出する。この後、各階層のマルチグレイン並列度を推定し、階層的マクロタスクグラフに対するプロセッサの割り当てを決定する並列処理階層自動決定手法や、同じデータにアクセスするマクロタスクを連続実行するキャッシュ最適化技術を適用する。並列処理階層自動決定手法においては、まず生成された階層的マクロタスクグラフ中の各マクロタスクの逐次処理時間を算出し、マクロタスクグラフの逐次処理時間と出口マクロタスクからの最長パス長であるクリティカルパス長を求める。次に、求めた逐次処理時間とクリティカルパス長を用いて各階層の並列度を推定し、プログラムの上位階層から各階層の並列度に応じてプロセッサを割り当て、階層的マルチグレイン並列性を自動的かつ効果的に利用する。

ミドルパスにおいてマルチグレイン並列性を抽出した後、各種の共有メモリ型マルチプロセッサシステムにおいて性能評価を行うため、OSCAR コンパイラが持つ並列化プログラム生成バックエンドの一つである OpenMP バックエンドを用い、マルチプロセッサシステム上の標準並列化 API である OpenMP を用いた並列化プログラムを出力する。この OpenMP API は、共有メモリ型マルチプロセッサシステム上の各社のコンパイラが対応しているため、OpenMP バックエンドが出力した

OpenMP プログラムはポータビリティに優れている。また、OpenMP バックエンドによるマルチグレイン並列処理では、シングルレベルスレッド生成手法を用いることにより、特別な拡張を行うことなく低オーバーヘッドなマルチグレイン並列処理を実現している。提案する自動マルチグレイン並列処理の性能評価を、共有メモリ型マルチプロセッサシステムであるハイエンドサーバ IBM pSeries690 regatta 上で行った .16 プロセッサを用いた性能評価では、SPEC95FP ベンチマークの mgrid では逐次処理に対して 10.6 倍、swim では 10.3 倍、hydro2d では 8.6 倍、tomcatv では 5.9 倍、su2cor では 3.3 倍、turb3d では 2.2 倍の性能向上が得られた。また、本システム上のネイティブ自動ループ並列化コンパイラ IBM XL Fortran for AIX Version 7.1.1 の最高性能を、mgrid では 5.7 倍、hydro2d では 5.4 倍、tomcatv では 4.1 倍、swim では 4.1 倍、su2cor では 2.9 倍、turb3d では 2.2 倍、それぞれ向上させることができ、開発した OSCAR 自動マルチグレイン並列化コンパイラの優れた性能を示すことができた。

第 4 章「分散メモリ型マルチプロセッサ上でのマルチグレイン並列処理」では、有限要素・境界要素併用法を用いた電磁界解析アプリケーションプログラムのマルチグレイン並列性を抽出し、分散メモリ型マルチプロセッサシステム上で性能評価した結果について述べる。本電磁界解析アプリケーションは、磁性体内部の電磁界とその周辺部にあたる空気領域中の電磁界を、非線形性を自然に扱うことができる有限要素法と無限領域の解析を得意とする境界要素法を組み合わせることによって効果的に求めるアプリケーションである。有限要素・境界要素併用法により生成される線型方程式の係数行列は、4 つの異なる特徴を持つ部分行列から構成される。係数行列生成においては、解析領域を分割するサブストラクチャ法を適用し、有限要素領域及び境界要素領域を分割して、それぞれの領域内の係数をまとめることにより、粗粒度並列処理に適した対角ブロック行列が得られる。この係数行列内の各ブロックはそれぞれ並列に求解することができ、さらにブロック内部の求解処理では従来のループ並列性を利用することが可能である。このようにして抽出された粗粒度並列性及びループ並列性を用い、MPI ライブラリを用いたマルチグレイン並列処理を行った。分散メモリ型マルチプロセッサシステムとして、NEC Cenju-3 を用いた評価の結果、「磁性体の芯を持つコイル」モデルにおいて、逐次処理時間 201.9 秒に対して、8 プロセッサで 30.1 秒となり、6.7 倍の性能向上が得られるなど、使用プロセッサ数に対してスケーラブルな性能向上を得ることができ、分散メモリ型マルチプロセッサシステム上でもマルチグレイン並列処理手法が有効であることが確認された。

第 5 章「結論」では、本研究により得られた成果と今後の課題について述べる。