

組み込み機器から PC、ハイエンドサーバに至るあらゆる情報機器においてマルチコアプロセッサの普及が進んでおり、並列ソフトウェア開発の生産性向上が大きな課題となっている。マルチコアプロセッサを含むマルチプロセッサシステムを用いて高性能・低消費電力を実現するためには、並列化を含む高度な最適化技術を駆使したソフトウェア開発が必須となる。しかしながら、このようなマルチコア用プログラミングは一般に難易度が高く、長期間の並列チューニングを要する。そのため、通常の逐次プログラムからコンパイラが自動的に並列性を抽出して、効率的な並列処理による高性能化と低消費電力化を可能とする自動並列化コンパイラの開発が強く求められている。

このような背景を踏まえ、本論文ではマルチコア・メニーコアプロセッサに対して、短期間で高性能な並列ソフトウェア開発を可能とするためのコンパイラによる自動並列化および低消費電力化技術について述べている。広く利用されている C プログラムを自動並列化するためにはポインタ解析が大きな課題となっており、自動並列化の特性を考慮した解析精度の向上やプログラム記述の工夫による実用的な対処が必要となる。さらには、近年コンピュータシステムの消費電力が大きな問題となっており、自動並列化による性能向上のみならず低消費電力化のための周波数・電圧制御やクロック・電源制御等も求められている。そして、集積されるコア数の増加に伴い、マルチコア・メニーコアプロセッサにおけるキャッシュコヒーレンシ制御機構のハードウェアによる実装が困難となっており、ソフトウェアによるコヒーレンシ制御手法が重要と考えられている。本論文ではこれらの問題を解決するために、自動並列化コンパイラを用いたポインタ解析、プログラム記述法、低消費電力化、およびソフトウェアコヒーレンシ制御手法を新たに提案している。

本論文は 7 章から構成されており、以下各章の概要を述べ評価を加える。

第 1 章「序論」は、本研究の背景、目的と共に本論文の概要を述べている。

第 2 章「OSCAR 自動並列化コンパイラ」では、本論文で開発された OSCAR 自動並列化コンパイラの機能と構成ならびにコンパイラの解析や最適化の処理フローについて述べている。OSCAR コンパイラは複数レベルの並列性を利用したマルチグレイン自動並列化、プロセッサ近傍のキャッシュやローカルメモリを有効利用するためのデータローカリティ最適化、及びソフトウェアによる消費電力最適化を特徴とする。並列コード生成には OpenMP の持つ 4 つの指示文に加えて、電力制御、メモリ配置、データ転送、グループバリア同期、時間管理をサポートする OSCAR API の指示文を利用する。この OSCAR コンパイラにより自動生成された OSCAR API を含む並列 C プログラムを API 解釈系と各マルチコアの単一プロセッサ用既存逐次コンパイラを用いて並列実行バイナリを生成する。これにより、既存の逐次コンパイラしかない様々なマルチコア上で自動並列化および低消費電力化を実現できる。

第 3 章「ポインタ解析」では、C プログラムを自動並列化する際に必要となるポインタ解析の解析精度向上手法について提案している。C プログラム

で頻出するデータ構造として、ポインタのポインタにより実現される擬似的な多次元配列があるが、従来のポインタ解析では解析できず自動並列化ができなかった。このようなデータ構造を解析して自動並列化を適用するために、ポインタの配列の各要素が指しているメモリ領域のエイリアス関係を解析する Element-Sensitive ポインタ解析を新たに提案している。この Element-Sensitive ポインタ解析は、従来のポインタ解析アルゴリズムの解析情報に 1 ビットのデータ構造を追加するだけの簡易な拡張であり、軽量な実装により頻出のデータ構造を用いたプログラムの自動並列化に必要な解析精度を得ることができる。従来のポインタ解析では自動並列化が不可能であった SPEC2000 equake および第 4 章で述べる Parallelizable C への修正を行った SPEC2006 hmmer について、Element-Sensitive ポインタ解析を利用することで自動並列化が可能となった。自動並列化結果について 8 コア搭載の IBM p5 550Q サーバにおいて性能評価を行ったところ、8 コア使用時に逐次実行時と比べてそれぞれ equake で 4.96 倍および hmmer で 6.06 倍の性能向上を得る等、提案ポインタ解析法の有効性が確かめられている。

第 4 章「Parallelizable C」では、コンパイラによる自動並列化が可能なプログラム記述法として Parallelizable C を提案している。コンパイラの解析精度、特にポインタ解析精度を考慮して、ポインタ演算等を制限するようなプログラム記述のガイドラインを設定することで、C プログラム自動並列化支援の枠組みを構築する。実際にこのガイドラインに沿ってプログラムの書き換えを行ったところ、市販コンパイラでは全く並列化できなかった SPEC2000 art, equake は書き換えが不要であり、SPEC2006 lbm で 1.8%、hmmer で 0.03% の書き換えにより自動並列化可能となった。Parallelizable C で記述した 6 つの逐次プログラムに対して OSCAR コンパイラによる自動並列化を適用し、マルチコアシステム上での処理性能の評価を行った。その結果、逐次実行時と比較して、2 コア集積のマルチコアである IBM Power5+ を 4 基搭載した 8 コア構成のサーバ IBM p5 550Q において平均 5.54 倍、4 コア集積のマルチコアである Intel Core i7 920 プロセッサを搭載した PC において平均 2.43 倍、SH-4A コアベースの情報家電用マルチコア RP2 の 4 コアを使用した SMP 実行モードにおいて平均 2.78 倍の性能向上を得る等、ParallelizableC の実用性の高さを実証している。

第 5 章「低消費電力化制御」では、マルチコアの消費電力削減のために、最速実行時とリアルタイム実行時におけるコンパイラによる低消費電力化手法を提案している。併せて各社のマルチコア上で低消費電力化を利用するための OSCAR API の提案を行い、自動並列化コンパイラで逐次プログラムから OSCAR API で記述された並列プログラムを自動生成することで、各社マルチコア上でコンパイラによる自動並列化と低消費電力化が利用可能となった。NEDO “リアルタイム情報家電用マルチコア” プロジェクトにおいて新たに開発した 8 コア集積の情報家電用マルチコア RP2 において、マルチコア

におけるコンパイラによる消費電力制御を世界で初めて実現し、4 コアを用いた場合の最速実行モードにおいて消費エネルギーが SPEC2000 の art で 13.06%、equake で 3.99%、メディア処理の AAC エンコーダで 3.84%、MPEG2 デコーダで 9.01%削減できることを示している。また、8 コアを用いた場合のリアルタイム制約モードにおいて、平均電力が AAC エンコーダで 87.9%、MPEG2 デコーダで 76.0%削減できることを示している。このコンパイラによる電力削減は他に類を見ない成果であり高く評価できる。

第 6 章「ソフトウェアコヒーレンシ制御」では、今後のメニーコアプロセッサにおける重要技術となる、コンパイラによるソフトウェアコヒーレンシ制御手法を提案している。コンパイラによる自動並列化と併せて、OSCAR API を用いたソフトウェアによるキャッシュ制御、および変数配置のアライメントを指示することで、ソフトウェアによる自動コヒーレンシ制御を実現した。科学技術計算およびメディア処理の 4 つのアプリケーションプログラムを用いて上述の RP2 において 4 コア使用時の自動並列化性能の評価を行ったところ、ハードウェアコヒーレンシ制御で 1 コアの逐次実行と比較して平均 3.03 倍、提案するソフトウェアコヒーレンシ制御においても同様の平均 3.13 倍の性能向上が得られることを示した。さらに、ハードウェアではコヒーレンシ制御できない 8 コア使用時に平均 4.88 倍の性能向上が得られることを示しており、このコンパイラによるソフトウェアコヒーレントキャッシュ制御の実現も世界初であり、非常に優れた成果と評価できる。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本論文では、並列化コンパイラによるより高度な自動並列化を可能とするポインタ解析手法の提案、自動最適化が簡単に行える実用的かつ簡潔なコーディングガイドライン Parallelizable C の提案、マルチコアプロセッサにおける消費電力最適化技術と将来のメニーコアプロセッサに向けたソフトウェアコヒーレンシ制御技術の提案を行っている。さらに、これらを世界で広く利用されているベンチマークプログラムやメディアアプリケーションに適用し、その性能をマルチコアサーバ、マルチコア PC、情報電用マルチコア上で確認した。これらの成果は、今後のマルチコア及びメニーコアプロセッサのソフトウェア生産性向上、スケーラブルな処理速度の向上を可能とし、情報理工学分野の発展に大きく寄与するものである。よって本論文は博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2011 年 2 月

審査員

(主査)	早稲田大学准教授	博士（工学）早稲田大学	木村啓二
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	笠原博徳
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	小林哲則
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	戸川望