

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008-2009
 課題番号：20800011
 研究課題名（和文）
 静的解析と動的最適化による粒度混在の自動並列化
 研究課題名（英文）
 Multi-grain Parallelization with Static Analyzing and Dynamic Optimization
 研究代表者
 三好 健文（MIYOSHI TAKEFUMI）
 東京工業大学・大学院情報理工学研究科・産学官連携研究員
 研究者番号：70506732

研究成果の概要（和文）：

プログラム中の様々な粒度の並列性を有効に活用し効率良く実行することを目的とし、(1)静的な細粒度自動並列化、(2)動的最適化のためのタスクスケジューラ実現手法、(3)タスク間の依存制約の静的解析とプロファイル情報に基づく動的解析を組み合わせた共有リソースの有効利用手法、および、(4)実行する演算に対する動的最適化の負荷と効果の評価方法についての研究を行った。また評価環境としてシミュレーション手法の研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

The subject of this research is to exploit various grained parallelism in given programs. The followings were considered: 1) a static fine grain automatic parallelization scheme; 2) a task scheduler for dynamic optimization; 3) a scheme to employ shared resource with static analyzing dependency between tasks and profiling information; and 4) a method to evaluate the balance between computational cost and optimizing efficiency. Furthermore, a simulation environment was considered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：プログラム処理系，コンパイラ，マルチコアプロセッサ，並列化

1. 研究開始当初の背景

本研究課題では、与えられたプログラムを、様々な粒度の並列化を活用して効率良く実

行するために、コンパイル時の静的解析と実行時の動的最適化を適切に組み合わせた粒度混在の自動並列化を実現する手法を研究

する。粒度が混在する並列化では、各粒度において、効果の高い静的解析に基づく並列化と、低コストで高効果の動的最適化が必要であるが、これらの適切な組み合わせについては未解決である。本研究は、これを解決し、また実用的な自動並列化手法として実証する。

計算機システムに求められる処理能力が高まる一方で、消費電力やリソース量の削減が求められている。これらの相反する要求を解決するため SIMD や SMT, リコンフィギュラブルプロセッサなど細粒度の並列実行を実現するプロセッサや、それら複数の同種あるいは異種の組み合わせによるマルチプロセッサアーキテクチャが研究・開発されている。

これらのアーキテクチャの上で動くプログラムでは、個々の内部のプロセッサで SIMD/特化命令やキャッシュを有効に活用する細粒度並列化と、プロセッサやシステム全体に対する効率の良いプログラムの分割やデータ転送オーバーヘッドを考慮した粗粒度並列化の粒度が混在した並列化を考慮する必要がある。しかし、その一方でシステムを実現するソフトウェアは複雑化し、また短期間での開発が要求されている。そのため、マルチプロセッサアーキテクチャの上で、効率良く実行されるコードの生成が可能な自動並列化が強く望まれている。また、本研究課題の成果は、現在研究段階のメニーコアアーキテクチャをサポートするための自動並列化コンパイラを実現するためにも必要不可欠であり、学術的に現在、将来に渡って必要な研究である。

2. 研究の目的

先行研究をふまえ、提案研究課題では、静的な自動並列化と各プロセッサに合わせた動的な最適化手法を適切に組み合わせた自動並列化手法を考える。これは、実行時情報を用いて、低コストで高い効果を得る動的最適化を静的解析に基づく並列化、パラメタの抽出によって実現する。

マルチプロセッサアーキテクチャの上で効率良く実行され得るコード生成のため、コンパイル時の静的解析と実行時の動的最適化手法を組み合わせた高効率な自動並列化の実現手法を研究する。コンパイル時には、データ依存解析や制御依存解析の結果や事前のプロファイル情報を用いて、静的に決定可能な箇所の並列化を実現する。また条件分岐などに起因する静的に解決できないデータ依存やタスクの偏りなどには、プロファイル解析などによって実行時に動的に最適化する。

る。

しかし、細粒度並列化では、対象とする演算処理の負荷に比べ、動的最適化の負荷の比重が大きく、コスト高となる。逆に、粗粒度の並列化では静的に決定可能な変数が少なく、静的解析のみに基づいて並列化の効果を得ることが難しい。粒度混在で適切に並列化を行うためには、静的解析と動的最適化を適切に組み合わせる必要があるが、この境界は明らかになっていない。本研究では、これらの適切な組み合わせのバランスを明らかにし、粒度混在の自動並列化を実現する。

3. 研究の方法

プログラムを並列化するにあたり、静的あるいは動的に決定可能な点および手法を明確にし、対象となる演算粒度におけるコストを考慮して適切なバランスを求める。具体的な課題として、細粒度自動並列化である自動 SIMD 化と粗粒度自動並列化であるマルチプロセッサへのタスク分散を研究し、最終的に静的解析と動的最適化を組み合わせた粒度混在の自動並列化を実現する手法を明らかにする。

また、本研究課題では、その成果を実際のアプリケーション開発へ適用することも目標とする。そのため、研究成果を GCC や COINS といった既存のコンパイラを用いて実装し、Cell B.E. や FPGA 上に構築するリコンフィギュラブルプロセッサを持つヘテロジニアスアーキテクチャといった実プロセッサの上で実証実験することで、評価する。

まず、細粒度並列化および粗粒度並列化の具体的な例に対して、静的解析と動的最適化による自動並列化手法を検討し、その結果の評価を行う。次に、得られた知見をもとに、並列化の粒度に対する静的解析と動的最適化のコストと効果の評価手法を一般化し、それらの適切な組み合わせを得る手法を求め、最終的に、研究の目的である自動並列化手法を実現する。

(1) 細粒度および粗粒度のそれぞれを対象として、様々な静的な手法と動的な手法による最適な並列化手法を試行し、それらの効果やコストを評価する。特に、静的解析に基づいた並列化に対して低コストで動的最適化手法を併用する手法と、負荷の少ない動的な並列化を実現するための必要最小限な情報セットを静的解析によって生成する手法を研究する。

(2) 静的解析と動的最適化を組み合わせた自動並列化を実現するための、より一般的な手

法を検討し、評価する。最終的には、細粒度と粗粒度のそれぞれの実験の評価結果をもとに、粒度混在の並列実行環境に対するコストと効果に関する一般的な評価関数を求め、自動並列化手法として実装する。実装した手法は、実際の大規模なプログラムに対して適用し、実プロセッサ上での動作によって、その効果を評価する。

4. 研究成果

静的な解析と動的な最適化の併用により、プログラム中の様々な粒度の並列性を有効に活用し効率良く実行するために、平成 21 年度は、要素技術である静的な細粒度自動並列化(1)、および動的最適化のための効率的なタスクスケジューリングの実現手法についての研究(2)を行なった。

静的な並列化と動的な最適化を組み合わせるために、平成 22 年度には、タスク間の制約の静的解析とプロファイリング情報による動的解析を組み合わせたマルチ/メニーコア内の共有リソースを有効的に利用する手法(3)および、実行する演算に対する動的最適化の負荷と効果について一般的な評価方法を解明することの研究(4)を行った。

特に、平成 22 年度では、最近提案されたマルチコア/メニーコアプロセッサの多くで共有資源の管理が SW に任せられる傾向にあることを踏まえ、自動並列化の実現の重要な鍵である(3)に重点をおいた。また評価環境としてシミュレーション手法の研究(5)を行った。

(1) 静的な細粒度自動並列化

[雑誌論文①][学会発表⑫, ⑬]

逐次プログラムの自動 SIMD 化を実現する手法について研究を行った。提案手法は、プログラムから得られるデータフローを解析することで現実的な時間で効果的な SIMD プログラムを得ることができる。Cell/B.E. プロセッサを対象に生成された SIMD プログラムの実行時間を評価し、トイプログラムに対しては期待通りの並列度を、また DSPStone ベンチマークでは、提案手法を適用しなかった場合と比べて 1.565 倍、gcc および XL-C でコンパイルした場合と比べて、それぞれ最大 1.529 倍、1.715 倍の実行速度の向上を実現した。

(2) 動的最適化の為のタスクスケジューラ

[学会発表⑩, ⑪]

動的最適化を実現するために、ヘテロジニアスプロセッサを対象とする軽量なタスクスケジューリング手法について検討しプロトタイプを実装した。検討した手法を用いるこ

とで、実行タスクのスケジュールを動的・静的に決定し、効率良く実行できることを確認した。

(3) 共有リソースの有効活用手法

[学会発表 4][学会発表④, ⑤]

共有リソースであるチップ内ネットワークを効率よく利用する手法を研究した。実行するタスクの配置を考慮することで、データ通信の衝突を削減する手法を検討し評価した。タスク配置の考慮により数%~数十%程度の速度向上の達成可能性を示した。さらに、パターンによる機械的なタスク配置決定手法を提案し、その有効性をシミュレーション実験により確認した。

(4) 実行する演算と動的最適化の負荷と効果の評価

[学会発表②, ③]

共有リソースへのアクセスの動的なモニタリングによるスケジューリング手法の負荷を HW/SW による実装の比較により、実行時間及びリソース量の点で定量的に評価した。また、並列して動作するプログラムのメインメモリへのアクセス頻度に応じて、ネットワーク資源や共有キャッシュ資源の各コアへの割当てを変更する手法を検討し、その有効性についての評価を行なった。

(5) シミュレーション環境

[雑誌論文②][学会発表⑦, ⑩]

種々のデバイスをシミュレーション可能なプラットフォームである MICS のインターフェイスを定義した。これは、シミュレーション精度を混在させることが可能であり、本年は特に機能レベルと HDL レベルのシミュレーション要素を混在させることができることを示した。また実装方法を改善することにより動作の高速化を実現した。このシミュレーション環境はオープンソースソフトウェアとして公開し[その他①]、今後も開発を継続する予定である。

共有リソースの有効活用手法および、実行する演算と動的最適化の負荷と効果の評価は、研究課題提案時には想定していなかったメニーコアプロセッサ上でプログラムを並列実行するための手法として実験、評価を行い、その有用性を検証することができた。この知見は科学技術振興機構・戦略的想像研究推進事業(CREST)「アーキテクチャと形式的検証の協調による超ディペンダブル VLSI」の研究の遂行に、今後活用されていく予定がある。

また、(3)(4)に関連する研究発表は、平成 21 年度、平成 22 年度に開催されている国内外の関連学会で大きく扱われていて、注目すべ

きテーマである。本研究課題の成果をもとに論文等の執筆を行っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① 三好健文 杉野暢彦, "レジスタスロットを考慮した SIMD 向け細粒度自動並列化コンパイラ", 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (IPSJ Transactions on Advanced Computing Systems) 第 23 号, Vol.1 No.2, pp. 240-249, 2008, 査読有

② 三好健文 杉野暢彦, "MICS: システム設計のためのフレキシビリティの高いシミュレーション環境", 情報処理学会論文誌 (IPSJ Journal), Vol.49 No.10, pp. 3482-3492, 2008, 査読有

[学会発表] (計 13 件)

① 佐野伸太郎 佐野正浩 佐藤真平 三好健文 吉瀬謙二, "メニーコアプロセッサの性能向上を目指すタスク配置手法", 情報処理学会創立 50 周年記念(第 72 回), 全国大会講演論文, 2010 年 3 月 10 日, 東京大学

② 入谷優 三好健文 吉瀬謙二, "メニーコアプロセッサにおける効率的なキャッシュシステム", 情報処理学会創立 50 周年記念(第 72 回), 全国大会講演論文, 2010 年 3 月 10 日, 東京大学

③ 三好健文 入谷優 植原昂 笹田耕一 小林良太郎 吉瀬謙二, "Feature-Packing のためのソフトウェアによるメモリ管理手法の実装と評価", 情報処理学会アーキテクチャ研究会(2009-ARC-187), 2010 年 1 月 29 日, 東芝本社/東京

④ 佐野伸太郎 佐野正浩 佐藤真平 三好健文 吉瀬謙二, "メニーコアプロセッサのためのネットワークトラフィックに着目したタスク配置問題の解析と考察", 電子情報通信学会コンピュータシステム研究会 (CPSY2009-40), 2009 年 11 月 13 日, キャンパスプラザ京都

⑤ 三好健文 笹田耕一 植原昂 佐野伸太郎 森洋介 吉瀬謙二, "メニーコア向けタスクスケジューリングシステムの検討", 2009 年並列/分散/協調処理に関する『仙台』サマー・ワークショップ(SWoPP2009), 2009 年 8 月 4 日, フォレスト仙台

⑥ 三好健文, 加藤英樹, 竹内郁雄, "ハードウェアによるランダム囲碁プレーヤの実装と評価", 第 50 回プログラミングシンポジウム, 2009 年 1 月 13 日, 箱根ホテル小涌園

⑦ Takefumi MIYOSHI Nobuhiko SUGINO, "Cycle Based Architecture Simulation Environment Framework (MICS) and its Optimization", IEEE TENCON 2008, 21st

Nov.2008, Univ. of Hyderabad, Hyderabad, India

⑧ 三好健文 加藤英樹 竹内郁雄, "モンテカルロ碁シミュレーション専用ハードウェアの検討", The 13th Game Programming Workshop, 2008 年 11 月 7 日, 箱根セミナーハウス

⑨ 三好健文 笹田耕一 小林良太郎 植原昂 吉瀬謙二, "Feature-Packing のためのソフトウェアによるメモリ管理手法の検討", 第 172 回 計算機アーキテクチャ研究会, 2008 年 10 月 12 日, 福岡県筑紫野市湯町二日市温泉

⑩ 三好健文, "MICS による精度混在シミュレーションの RTL レベルにおける実証", 組込みシステム技術に関するサマーワークショップ (SWEST), 2008 年 9 月 4 日, 浜松市館山寺町遠鉄ホテルエンパイア

⑪ 三好健文 笹田耕一, "ヘテロジニアスマルチプロセッサのためのタスク分散手法", 2008 年並列/分散/協調処理に関する『佐賀』サマー・ワークショップ (SWoPP 佐賀 2008), 2008 年 8 月 5 日, 佐賀アバンセ

⑫ 三好健文 杉野暢彦, "レジスタスロットを考慮した SIMD 向け細粒度自動並列化コンパイラ", SACSIS 2008 - 先進的計算基盤システムシンポジウム, 2008 年 6 月 12 日, つくば国際会議場

⑬ 三好健文 杉野暢彦, "レジスタ内 Shuffle を考慮した Superword Level Parallelism を活用した SIMD プロセッサのための自動並列化", 電子情報通信学会 第 21 回回路とシステム軽井沢ワークショップ, 2008 年 4 月 21 日, 軽井沢プリンスホテル

[その他]

ホームページ等

① MICS is Cycle-based Simulator,
<http://mics.sourceforge.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好健文 (MIYOSHI TAKEFUMI)

研究者番号: 70506372

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし