

審査の結果の要旨

氏名 薦田 登志矢

本論文は「Compiler Optimizations for Energy-Efficiency of Heterogeneous Computing System」と題し、8つの章から構成されている。近年、計算機システムの大規模化・高性能化に伴う消費電力の増大が問題となっており、システムの電力効率を向上させることが重要なシステム設計上の課題である。このため、電力効率向上を目的としたさまざまなハードウェア機構が搭載されるようになった。本論文では、このような電力効率向上のためのハードウェア機構の中でも特に重要な、アクセラレータ(並列処理に特化したプロセッサ)およびプロセッサの電力管理機能、という2種類の機構に焦点を当てる。これらの新しいハードウェア機構を用いて、実環境で電力効率を向上させるためには、アプリケーションの並列化を容易にするプログラミング環境の整備および低電力モードのオーバーヘッドを考慮したプロセッサの電力モード制御、という二種類の問題を解決しなければならない。本論文では、コンパイラによってこれらの問題の解決を目指す。コンパイラではアプリケーションの大域的な情報を用いた最適化が可能になるとともに、追加ハードウェアによるコスト増加と電力増加を防ぐことができるからである。

第1章「Introduction」では、本論文の背景と目的、本論文で提案するコンパイラ手法の概略を述べている。アクセラレータ向けプログラミング環境の整備、プロセッサの低電力モードを適切に制御するための制御手法の確立が重要であることを述べたのち、これらの課題を解決する具体的な3つの提案手法について概略を述べている。続く、第2章「Background」では、本論文が対象とする電力効率のためのハードウェア機構についてまとめている。

第3章「Multi-Device Execution in a Directive Based Compiler」では、アクセラレータ向け並列プログラミングの生産性向上を目的とし、複数のアクセラレータを搭載するシステムを対象とした指示文ベースのプログラミングモデルとそのコンパイラシステムを提案している。提案手法は、OpenACCと呼ばれる従来の指示文ベースのプログラミング言語およびそのコンパイラを拡張し、複数のアクセラレータメモリ上のデータ管理を自動化することでプログラミングの生産性を高める。提案手法の核となるのは、アクセラレータメモリ上で動作するソフトウェア分散共有メモリと、その動作を最適化するためのメモリアクセス記述用のAPI拡張である。実システムでの評価の結果、生産性の非常に低いGPUプログラミング言語CUDAを用いた場合と比較して、提案手法では高い性

能を維持したまま、その実装に要するコード行数を大幅に削減できることが分かり、ソフトウェアによるアクセラレータ分散メモリの管理とメモリアクセスを記述するための指示文の有効性を明らかにしている。

第4章「Compiler Based Sleep Control in CPU Functional Units」では、プロセッサが消費する待機電力の削減を目的として、CPU演算器のスリープをコンパイラによって制御する手法を提案している。提案手法は、従来手法であるタイムアウトによるスリープ制御では原理的に削減することができない、タイムアウトするまでの待ち時間において消費される待機電力をも削減可能である。この手法を実現するため、プログラムを構成する命令列を解析し、CPU内の各演算器に生じる空き時間を詳細に予測するコード解析手法を提案している。シミュレーションを用いた評価の結果、従来手法を適用した場合と比べて大きな待機電力削減を達成できることが分かり、スリープ制御におけるコンパイラ手法の有効性を示している。

第5章「Cooperative DVFS and Heterogeneous Task Mapping」では、電力制約下におけるアクセラレータ搭載システムの性能最大化を目的として、異種プロセッサの周波数制御とタスク割当を協調決定する手法を提案している。並列処理においては異種プロセッサ間のロードバランスを実現することが重要である。このようなシステムに周波数制御を適用する場合、各プロセッサの周波数は、各プロセッサへのタスク割当とともに協調して決定しなければならない。異なる特性を持つプロセッサは、周波数を変えたときの性能および電力の変化率が異なり、負荷分散が崩れる可能性があるためである。提案手法では、少数のプロファイルデータと解析的モデルを用いて、異種プロセッサの周波数、タスク割当を決定する。実システムでの評価の結果、提案手法を用いることで、周波数制御とタスク割当を個別に行った場合と比較して、電力制約下におけるシステム性能を向上することができることが分かり、周波数とタスク割当の協調制御の有効性を明らかにしている。

第6章「Discussion」において、提案手法それぞれを同時に適用した場合について、および各手法の拡張可能性について議論を行い、各手法を独立に適用可能であることを明らかにしている。第7章「Related Work」では関連する先行研究をまとめ、第8章で本論文全体をまとめている。

以上を要するに、本論文はアクセラレータを含む計算機システムを対象とし、実効的な電力効率を高めるためのコンパイラ手法を提案し、その有効性を明らかにしたものであり、その成果は情報理工学の発展に大きく貢献すると考えられる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。