

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐々木 広

本論文は「Run-time Optimization for Computer Systems based on Statistical Analysis」と題し、7つの章から構成されている。近年、コンピュータシステムにおけるプログラムの実行に関して、性能や消費電力などの観点からさまざまな最適化が強く求められてきているが、とりわけ実行時における最適化の重要性が増してきている。実行時の最適化を行うためには計算機の実行状況を解析・理解し、実行状況に応じて目標とする最適化を実現するためのモデル構築が必要となる。このモデルは、実行状況が与えられた時に、最適化可能な事項と、目標とする性能や消費電力などの対象とする指標との関係を表すものである。これまでの研究では一般的に定性的な知見によりモデルを構築する手法が用いられてきた。しかし、コンピュータシステムは年々加速的に複雑化してきているためコンピュータシステムの定性的な理解が非常に困難であり、モデルの構築に要する時間およびコストは増大する一方となっている。本論文は、このような問題を解決するために、コンピュータシステムの実行状況を定量的に解析することによってモデルを構築し、実行時にそのモデルに基づいた最適化を行う手法を提案している。また、提案手法を複数の最適化に適用し、その評価を実機のプラットフォーム上で行うことでその有効性を示している。

第1章「Introduction」では、本論文の背景と目的を述べ、本論文の構成を述べている。まず、本論文で焦点をあてている実行時最適化手法について、その特徴と利点を述べている。また、本論文における提案手法の概要を述べた上で、提案手法を用いた最適化について簡単に述べている。

第2章「Run-time Optimization Technique based on Statistical Analysis」では、提案手法である、コンピュータシステムの統計的なモデリング手法について述べている。プロセッサ内のハードウェアイベントの値は、パフォーマンスモニタリングカウンタと呼ばれる機構を用いることによって取得する。これらの値をオフラインで取得し、統計的な学習を行うことによってモデル化を行う。学習のための統計手法としては独立変数同士の交互作用を考慮した多変数の重回帰分析、および Restricted Cubic Splines (RCS) と呼ばれるスプライン関数による非線形なモデルを用いている。

第3章「Applications of the Proposed Technique」では、提案手法を複数の最適化へ適用する手法を論じている。具体的には、提案手法は(1)動的電源電圧制御(DVFS)による低消費電力化、(2)チップマルチプロセッサ(CMP)における効率的な実行制御、の2つの最適化に適用されている。前者の動的電源電圧制御を用いた低消費電力化は、実行時の情報をもとに電圧・周波数変更時の性能を予測し、性能低下を決められた範囲内に抑えた上

でなるべく低い周波数でプログラムを実行し消費電力を削減するものである。また、後者の CMP における効率的な実行制御は、実行時の情報をもとに CMP 上で実行している複数のプロセス同士のリソース競合による性能低下の割合を予測し、性能低下の割合の公平性 (Fairness) の改善や、トータルスループットの向上などの最適化を行うものである。CMP の実行制御に関しては、実行時に各プロセッサの速度を独立に制御することによって競合の影響を緩和する手法と、前もって実行するプログラムが複数与えられたときになるべく競合が発生しないような組み合わせを選択するタスクスケジューリング手法の提案を行っている。

第4章「Evaluation」では、第3章で述べた各種最適化について、それらを実際に適用するハードウェアのプラットフォームおよびソフトウェアを示し、モデル化の手段およびモデルを用いた評価の概要について述べている。

第5章「Evaluation Results」では、構築されたモデル式、変数としてモデルに組み込まれたパフォーマンスモニタリングカウンタの種類、およびそれらのモデルの寄与率などを提示している。また、導出したモデルの評価を Leave-one-out cross validation 法によって行い、高い予測精度を有していることを明らかにしている。次に、得られたモデルを適用し実際に最適化手法の評価を行っている。DVFS による低消費電力化手法に関しては、与えられた性能閾値を満たしつつ、大幅な消費電力を削減している。また、CMP における実行制御では、動的にプロセッサの速度を調整することにより、Fairness とトータルスループットを大きく改善できることを示している。タスクスケジューリング手法では、競合の生じにくい組み合わせを選択することにより性能の低下を抑制できることを示している。さらに、得られたモデルおよび最適化手法の評価結果に関して議論を行い、統計的な学習を用いた最適化モデルの構築による実行時最適化手法が実機のプラットフォーム上で有効であることを論じている。これは、実行時における最適化が重要な問題に対して、最適化のための効果的なモデルが、プロセッサ内のハードウェア情報を用いることによって統計的に構築することができたことを意味している。以上より、複雑化していくコンピュータシステムにおいて、統計的な学習を用いたモデル化による実行時最適化手法が有効であることを論じている。

第6章「Related Work」では、本論文で対象とした2つの最適化に関して関連する研究について述べ、提案手法との得失利害を論じている。

第7章「Conclusions and Future Work」では、以上の成果を要約した上で、今後の課題を展望している。

以上を要するに、本論文はコンピュータシステムの実行時最適化手法の確立を目的とし、プロセッサ内のハードウェアイベントの値を用いた定量的なモデルの構築手法と、モデルに基づく実行時最適化手法の有用性を、実際のコンピュータシステム上で複数の最適化に適用することで明らかにしたものであり、非常に意義がある研究であり、その成果は工学的に貢献するところが大きいと考えられる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。