

近藤 正章

国立大学法人東京大学大学院情報理工学系研究科
准教授

ポストペタスケールシステムのための電力マネージメントフレームワークの開発

§ 1. 研究実施体制

1) 「システムソフトウェアグループ」グループ

- ① 研究代表者: 近藤 正章 (東京大学大学院情報理工学系研究科、准教授)
- ② 研究項目
 - ・電力制約適応型システムでの性能最適化のための基盤システムソフトウェア開発
 - ・動的ノブ制御用ミドルウェアの設計と開発
 - ・電力制約適応型ジョブ管理技術の設計とプロトタイプ作成

(2) 「最適化コード生成」グループ

- ① 主たる共同研究者: 三吉 郁夫 (富士通株式会社次世代テクニカルコンピューティング開発本部、部長)
- ② 研究項目
 - ・電力性能最適化アルゴリズムの開発

(3) 「電力性能予測技術」グループ

- ① 主たる共同研究者: 井上 弘士 (九州大学大学院システム情報科学研究院、教授)
- ② 研究項目
 - ・電力性能挙動プロファイリングに基づくプログラム・チューニングと電力性能評価
 - ・電力性能推定／評価環境の構築

(4) 「システムアーキテクチャ」グループ

- ① 主たる共同研究者: 三輪 忍 (電気通信大学大学院情報システム学研究所、准教授)
- ② 研究項目
 - ・アーキテクチャトレンドの調査
 - ・電力性能ノブのモデリングと制御アルゴリズムの検討

§ 2. 研究実施の概要

本研究では、限られた電力資源を各アプリケーションに、各ハードウェア要素に適応的に配分することで性能やシステムの電力効率を向上させる「電力制約適応型システム」をコンセプトとし、電力資源を真に有効利用できる電力マネージメントフレームワークを開発している。本年度は各種ツール群の実装やコード整備を行い、主として電力性能最適化パッケージ、複数ジョブ間での電力資源管理を行う資源管理ツール（ジョブスケジューラ）をオープンソースソフトウェアとして公開した。また、動的ノブ制御を行うミドルウェア、ノード間の電力特性ばらつきを考慮した電力性能最適化手法、ネットワークと CPU の電力配分手法、電力性能予測ツールの設計と実装、標準電力観測・制御 API の拡張検討も行った。

電力性能最適化パッケージは、電力配分最適化プロセスを自動化するもので、1)オリジナルコードに対しプロファイルと電力ノブ制御のための API 呼び出しを挿入するコード解析、2)得られたコードによるプロファイリング、3)その情報を利用し電力分配最適化アルゴリズムにより各制御ポイントでの電力配分決定、4)電力配分に従い API により電力ノブを制御しつつ実行、を行う部分から構成される。ほぼ自動で電力制約下での性能最適化を行うことができ、最大で約 2 倍の性能向上が得られることを確認している。また、本ツールへの組み込みを目指し、他の電力性能最適化戦略の開発も行った。例えば、計算ノード間で生じる電力性能特性ばらつきを考慮した電力制御アルゴリズムを開発し、均一に電力制約を適用する従来法に比べて電力制約下での性能を最大 5.4 倍向上させることに成功した。また、スケルトンコードを用いてネットワークの電力使用状況を高速プロファイリングし、それをもとに CPU へと電力を適応的に配分する手法を開発し、最大で 1.23 倍の性能向上が得られることがわかった。これらの成果は、高性能計算分野における最高峰の国際会議の一つ SC'15 に採択され発表を行った。

電力資源管理を行うスケジューラとミドルウェアとしては、システムの電力供給と使用状況やアプリケーションの特性に応じた電力資源管理を行うためのスケジューラを、資源管理ツールとして広く利用されている Slurm をベースに開発した。第一段階として各ジョブの電力制約はユーザがジョブの実行要求時に与える実装とした。電力制約条件下において、システムの電力制約を守りつつジョブ実行が可能であることを確認した。また、より適用的な電力管理を行うべく、各ジョブの電力消費要求を把握しつつ、性能が低下しない範囲で、あるいは性能低下を設定以内に抑えつつ電力制約を動的に設定し、余剰電力でその他ジョブを動作させるためのミドルウェアを開発し、機能検証と有効性評価を行った。

電力性能予測ツールに関しては、CPU/DRAM 電力モデリングやアプリケーションのスケラビリティ予測に基づいて、電力制約を施した際のアプリケーションの実効性能がどの程度低下するかを推定するためシステム性能推定フレームワークを検討した。

さらに、大規模システムにおける複数ノードに跨った統一的な電力観測・制御を行うための、種々のシステムに対応、かつ恒久的に利用可能な API 構築を目指し、東京工業大学 学術国際情報センターとも議論をしつつ、Sandia National Laboratory (SNL) の標準電力 API をベースに、システム全体の電力制御に必要な API 拡張の検討も行った。

本研究で得られた成果を国際的に展開するべく、米国ローレンス・リバモア国立研究所やアリゾナ大学との国際連携体制を構築し、積極的に技術交流や議論をしながら研究を遂行している。

【代表的な原著論文】

- Shinobu Miwa and Hiroshi Nakamura, “Profile-Based Power Shifting in Interconnection Networks with On/Off Links”, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC15), 2015.
- Yuichi Inadomi, Tapasya Patki, Koji Inoue, Mutsumi Aoyagi, Barry Rountree, Martin Schulz, David Lowenthal, Yasutaka Wada, Keiichiro Fukazawa, Masatsugu Ueda, Masaaki Kondo, Ikuo Miyoshi, “Analyzing and Mitigating the Impact of Manufacturing Variability in Power-Constrained Supercomputing”, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC15), 2015.
- 黄巍, 岩澤直弘, カオタン, 和遠, 近藤正章, 中村宏, “エネルギー効率を考慮した電力制約下でのスルーポイント指向ジョブスケジューリング”, 2015年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム, 2015.