

近藤 正章

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評価と改良

(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所、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理工学研究科、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、主として各種ツール群の拡張や新たな電力性能最適化手法の開発、新規電力性能ノブによる電力制御手法の検討を行った。

各ジョブの電力配分最適化プロセスを自動化する電力性能最適化パッケージは、1)オリジナルコードにプロファイル/電力ノブ制御用 API 呼び出しを挿入するためのコード解析、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ものである。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。本年度は様々な電力配分アルゴリズムが適用できるように、専用言語により本ツールの動作を制御できるように拡張を行った。ケーススタディとしていくつかの電力制御手法を組み込み評価した結果、所望の電力設定でジョブが実行されることを確認した。

電力資源管理を行うスケジューラとして、資源管理ツールとして広く利用されている **Slurm** をベースに電力使用状況やアプリケーション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開発中であるが、種々の電力資源管理・電力制約適応型ジョブスケジューリングが実装できるようにプラグインベースのインタフェースを実装した。また、空調の電力も含めた電力制約下でのジョブ間の電力配分最適化と、それに伴ったジョブスケジューリング手法を開発した。その有効性を評価した結果、従来のスケジューリングに比べてシステム全体のジョブ実行スループットを 1.4 倍向上することに成功した。

電力性能予測ツールに関しては、性能ばらつきを考慮した電力制約下での性能推定フレームワークと、インターコネクットの電力性能をシミュレートするためのツールを開発した。特にインターコネクト・シミュレータに関しては、米国ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) で開発中の **TraceR** へと移植中であり、今後ツールを公開予定である。

電力制約下でのノブ制御最適化アルゴリズムに関しては、大規模グラフ解析ベンチマークの **Graph500** を対象に CPU と DRAM の電力配分最適化の検討を行った。また、主記憶デバイスである DIMM の待機電力削減のためのメモリホットプラグ機能を応用し、DIMM のオン・オフ制御を将来的な電力ノブとして利用することを検討した。具体的には、運用中の大規模システムのメモリ使用状況の解析と、アプリケーション実行時に OS からメモリ仕様状況を監視しつつ DIMM のオン・オフ制御を行うアルゴリズムの開発を行った。メモリ使用量が少ない場合、DIMM 待機電力の半分程度を削減可能であることを確認した。

研究成果を広く展開するべく、本年度は他の研究グループと積極的に連携を図りつつ研究を実施してきた。本年度は特にグラフアプリケーションの電力性能最適化を同 **CREST**

の藤澤チームや遠藤チームと連携して行った。また、電力資源管理機能付きの **Slurm** 開発やスケジューリングアルゴリズム、インターコネクト・シミュレータの開発は LLNL との国際連携体制のもとで実施した成果である。

■代表的な原著論文3件

- Thang Cao, Yuan He, and Masaaki Kondo, “Demand-Aware Power Management for Power-Constrained HPC Systems”, The 16th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2016), pp.21-31, May 2016.
- Yuan He, Masaaki Kondo, Takashi Nakada, Hiroshi Sasaki, Shinobu Miwa, and Hiroshi Nakamura, “A Runtime Multi-Optimization Framework to Realize Energy Efficient Networks-on-Chip”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E99-D, No.12, pp.2881-2890, Dec. 2016.
- Satoshi Imamura, Keitaro Oka, Yuichiro Yasui, Yuichi Inadomi, Katsuki Fujisawa, Toshio Endo, Koji Ueno, Keiichiro Fukazawa, Nozomi Hata, Yuta Kakibuka, Koji Inoue, Takatsugu Ono, “Evaluating the Impacts of Code-Level Performance Tunings on Power Efficiency”, IEEE International Conference on Big Data (IEEE BigData '16), pp.362-369, Dec. 2016.