「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」
平成23年度採択研究代表者

H24 年度
実績報告

滝沢　寛之

東北大学大学院情報科学研究科・准教授

進化的アプローチによる超並列複合システム向け開発環境の創出

§1. 研究実施体制

(1)滝沢グループ(東北大学大学院情報科学研究科)
① 研究代表者:滝沢　寛之(東北大学大学院情報科学研究科、准教授)
② 研究項目
・システムの複合性を扱うためのプログラミングインタフェースの設計
・HPC アプリケーションのためのリファクタリングツールの開発

(2)高橋グループ(筑波大学)
① 主たる共同研究者:高橋　大介　(筑波大学システム情報系、教授)
② 研究項目
・超並列複合システムに向けた高速フーリエ変換(FFT)ライブラリおよび代数的多重格子法ライブラリの開発
・混合精度計算に対応した基本線形計算ライブラリの基本設計

(3)須田グループ(東京大学)
① 主たる共同研究者:須田礼仁　(東京大学情報理工学系研究科、教授)
② 研究項目
・ドメイン特化型ツールによる超並列複合システムの階層的抽象化に関する研究

(4)江川グループ(東北大学サイバーサイエンスセンター)
① 主たる共同研究者:江川　隆輔(東北大学サイバーサイエンスセンター、助教)
② 研究項目
・HPC のためのリファクタリングカタログの設計
・超並列複合システム向けのアプリケーション開発手法の確立

§2. 研究実施内容

従来、大規模高性能計算(HPC)システムを必要とする計算科学アプリケーションの開発においては、ハードウェアの持つ性能を最大限に引き出すことが最優先されてきた。特定のシステムやハードウェア構成を強く意識する低水準でのアプリケーション開発手法では、精緻な最適化によって高性能の達成を期待できる一方で、システムの変遷に伴って大幅なアプリケーションコードの書き換えが必要となる。本研究の目標は、世代を追って超並列複合化するシステムを適切に抽象化し、システムの性能を十分に活用できる計算科学アプリケーションの開発基盤を創出することである。研究開発にあたっては、既存のソフトウェア資産との親和性やソフトウェア開発の連続性を十分に考慮し、既存のコードが超並列複合システム向けの抽象度の高いコードへと段階的に進化していくことを支援する。このために、既存コードの想定するシステムと新世代の超並列複合システムとの差異をできるだけ隠ぺいするという観点から、抽象化技術を設計する。また、本研究では上記の階層的抽象化技術と組み合わせることでアプリケーションの段階的な進化を支援する、性能リファクタリング技術を研究開発する。さらに、アプリケーション開発者の視点からも超並列複合システム向けの開発環境の在るべき姿を考察し、それらの研究成果も統合することで革新性と実用性を兼ね備えた開発環境を構築する。

平成24年度の滝沢グループは、複合型計算システム向けプログラミング環境として急速に普及したOpenACCの実用性や有用性を評価し、現状の仕様で達成可能な実行性能とその限界について調査を行った。その結果、現在の仕様では記述することのできないスレッド間同期等を行うための指示行を作成し、その性能を評価した。その結果、OpenCL での実装と同等の最適化を行うことにより、OpenCLと比較してそん色のない性能をOpenACCでも達成できることを明らかにした。ただし、元のコードの動作を維持しつつスレッド間同期の指示行を活用することは困難であり、より柔軟なコード変換が記述可能なコンパイラ指示行の必要性も明らかになった。また、ソフトウェア進化のためのコード編集作業を支援するために、統合開発環境と連携して動作するリファクタリングツールを研究開発した。特に平成 24 年度には、プログラム中で性能可搬性の低下要因となっている箇所を特定してプログラマに提示することを目標とし、多種複数のシステム上での性能評価を自動的に行うシステムの構築を行った[A-4]。

GPU 向けの最適化技術の観点では、平成 24 年度に(1)GPU におけるキャッシュ最適化手法の開発、(2)ディレクティブによる自動ストリーム処理機構の検討、および(3)パラメータスイープ向け並列化手法の開発にも取り組んだ。(1)では、スレッドの実行単位であるワープに対して参照ストライドを最小化することにより、ボリューム可視化の性能をおよそ 2 倍に引き上げた。(2)では、OpenACC ディレクティブの仕様を拡張することにより、CPU および GPU をパイプラインステージとみなしてストリーム処理できる機構について検討した。(3)では、並列化の対象を単一タスクから複数タスクに拡げることにより、GPU に向くメモリ参照パターンを活用でき、グラフ処理ならびに文字認識応用の性能を 8.5 倍に向上できた[A-1][A-2]。

平成 24 年度の高橋グループでは、超並列複合システムに向けた高速フーリエ変換(FFT)ライ

ブラリ、代数的多重格子法ライブラリ、そして混合精度計算に対応した基本線形計算ライブラリの基本設計を行った。計算科学分野の大規模数値計算アプリケーションの多くは、何らかの数値計算ライブラリを呼び出しているが、これら既存の数値計算ライブラリは、今後主流になると考えられる超並列複合システムの高い性能を引き出すように設計されていない可能性がある。したがって、ポストペタスケールのシステムへのアプリケーションプログラムの移行に際して、GPU 等のアクセラレータ上で動作する数値計算ライブラリを開発することは必須である。そこで，超並列複合システムに向けた高速フーリエ変換（FFT）の実現方法について検討すると共に試験的な実装を行い、マルチコア超並列クラスタ上で性能評価を行った。また、マルチカラー法を用いたマルチ GPU における代数的多重格子法ライブラリについて実装および性能評価を行った。さらに、GPU における 3 倍・4 倍精度演算の実現および性能評価を行った。そして，この研究成果を用いて GPU における 4 倍精度演算を用いた疎行列反復解法の実装と性能評価を行うと共に，GPU における疎行列ベクトル積の自動チューニング手法について検討を行った。

平成 24 年度の須田グループでは、ポストペタ時代の計算科学のための手法開発と、ドメインに特化した並列化ディレクティブの研究開発を行った。ポストペタ時代の計算科学のための手法としては、最適化問題として TSP を例題として取り上げ、GPU 上での高性能化、マルチ GPU での超高並列実装について手法を提案した[C-1][C-4][C-5]。また，ポストペタ時代の 100 万コア以上のシステムを想定して、共役勾配法における集団通信回数を任意に削減でき、かつ従来手法の丸め誤差の問題を解決した手法 CBCG を提案した。また、強スケーリングで急速に問題となる OS 等のジッタについて、集団通信のアルゴリズムの中で解決する手法を提案した。また、既存のアプリを複数の新しいアーキテクチャに移行させるためのディレクティブベースの手法を提案した。このほか、分数階微分のための解法を提案し[C-6]、筑波大学の羽田野教授らと共同研究に進展し、原発事故に伴う放射性物質の拡散に応用されている。また次世代高性能計算に必須技術である GPGPU、自動チューニングについても多数の研究成果を挙げた。

平成 24 年度の江川グループでは、共同研究者や彼らの所属機関が有する既存のアプリケーションの解析と、超並列複合システムの構成要素となり得る、現存する複数のプラットホームに対する移植・最適化に取り組んだ。今年度は、これまでベクトル型計算機向けに開発されてきたコードの最適化、および解析をおこなった。ベクトル機向けに施されたループレベルの最適化に着目し、出現頻度解析、性能評価に基づき、最適化前後カーネル、及び最適化手順とその効果を最適化事例集として取りまとめ滝沢チーム内で共有できる環境を構築した。また、多様化が進む将来の計算環境への既存コードの移植を見据え、ベクトル機向けに最適化されたコードを複数のスカラマシンを用いた評価行い、性能可搬性を阻害する要因に関する調査を行った。その結果、ベクトル機のための最適化にはアプリケーションの性能可搬性を向上/低下させる特徴があることを明らかにした。

§3. 成果発表等

（3－1） 原著論文発表

●論文詳細情報

[A-1] Fumihiko Ino, Yuma Munekawa, and Kenichi Hagihara, ``Sequence Homology Search Using Fine Grained Cycle Sharing of Idle GPUs," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol.23, No.4, pp.751-759, April 2012. (DOI: 10.1109/TPDS.2011.239)

[A-2] Tomohiro Okuyama, Fumihiko Ino, and Kenichi Hagihara, ``A Task Parallel Algorithm for Finding All-Pairs Shortest Paths Using the GPU," International Journal of High Performance Computing and Networking, Vol.7, No.2, pp.87-98, April 2012. (DOI: 10.1504/IJHPCN.2012.046384)

[A-3] Alfian Amrizal, Shoichi Hirasawa, Kazuhiko Komatsu, Hiroyuki Takizawa, and Hiroaki Kobayashi, "Improving the Scalability of Transparent Checkpointing for GPU Computing Systems," IEEE Region 10 Conference (TENCON 2012), 2012.

[A-4] 平澤将一，滝沢寛之，小林広明，″ソフトウェア進化のための自動性能追跡システム″, 2013 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, 2013 年 1 月.

[A-5] Hiroyuki Takizawa, Makoto Sugawara, Shoichi Hirasawa, Isaac Geladox, Hiroaki Kobayashi, and Wen-mei W. Hwu, "clMPI: An OpenCL Extension for Interoperation with the Message Passing Interface", Multicore and GPU Programming Models, Languages and Compilers Workshop, May 20th, 2013(accepted)

[A-6] Fumihiko Ino and Kenichi Hagihara, ``Fine-Grained Cycle Sharing of Idle GPUs for Homology Search," In Poster in the 4th GPU Technology Conference (GTC 2013), San Jose, CA, USA, March 2013.

[A-7] Muhammad Ismail Faruqi, Fumihiko Ino, and Kenichi Hagihara, ``Acceleration of Variance of Color Differences-Based Demosaicing Using CUDA," In Proceedings of the 10th International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS 2012), pp.503-510, July 2012.

[A-8] Kei Ikeda, Fumihiko Ino, and Kenichi Hagihara, ``Accelerating Joint Histogram Computation for Image Registration on the GPU," In Proceedings of Computer Assisted Radiology and Surgery: 26th International Congress and Exhibition (CARS 2012), pp.S72-S73, June 2012.

[A-9] Kei Ikeda, Fumihiko Ino, and Kenichi Hagihara, ``Accelerating Mutual Information Computation for Nonrigid Registration the GPU," In Poster in the 3rd GPU Technology Conference (GTC 2012), May 2012.

[B-1] 高橋光佑, 藤井昭宏, 田中輝雄:マルチカラー法を用いたマルチ GPU 上での AMG 法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No.3, pp.452--460 (2013).

[B-2] 椋木大地, 高橋大介:GPU における 3 倍・4 倍精度浮動小数点演算の実現と性能評価, 情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム, Vol. 6, No. 1, pp. 66--77 (2013).

[B-3] Hiroki Yoshizawa and Daisuke Takahashi: Automatic Tuning of Sparse Matrix-Vector Multiplication for CRS format on GPUs, Proc. 2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2012), pp. 130--136 (2012). (DOI: 10.1109/ICCSE.2012.28)

[B-4] Daichi Mukunoki and Daisuke Takahashi: Implementation and Evaluation of Triple Precision BLAS Subroutines on GPUs, Proc. 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW 2012), The 13th Workshop on Parallel and Distributed Scientific and Engineering Computing (PDSEC-12), pp. 1378--1386 (2012). (DOI : 10.1109/IPDPSW.2012.175)

[C-1] Kamil Rocki, Reiji Suda, "High Performance GPU Accelerated TSP Solver" (Electronic Poster), The International Conference for High-Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC12), 10-16 November 2012, Salt Lake City, USA.

[C-2] Kohei Shimane, Reiji Suda, "A Fast Tour Construction Algorithm for ACOTSP", The 4th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing(META'2012), Port El-Kantaoiui (Sousse, Tunisia) Oct 27-31, 2012.

[C-3] Ayumu Tomiyama, Reiji Suda, "Automatic Parameter Optimization for Edit Distance Algorithm on GPU", the seventh international Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT 2012) / VECPAR 2012, RIKEN Advanced Institute for Computational Science, Kobe, July 17th, 2012.

[C-4] Kamil Rocki, Reiji Suda, "Accelerating 2-opt and 3-opt local search using GPU in the Travelling Salesman Problem", The 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID 2012), Ottawa, Canada, 13-16 May 2012

[C-5] Kamil Rocki, Reiji Suda, "An efficient GPU implementation of the iterative hill climbing based TSP solver for large problem instances", ACM/SIGEVO GECCO 2012: Genetic and Evolutionary Computation Conference, Philadelphia, USA, July 07 - 11, 2012

[C-6] Yuki Takeuchi and Reiji Suda, "New numerical computation formula and error analysis of some existing formulae in fractional derivatives and integrals," The 5th IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications (FDA'12), Hohai University, Nanjing, China, May 14-17, 2012.