

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

H25 年度 実績報告

藤澤 克樹

中央大学理工学部経営システム工学科
教授

ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤

§ 1. 研究実施体制

(1) 「大規模最適化」グループ

① 研究代表者: 藤澤 克樹 (中央大学理工学部、教授)

② 研究項目

- ・超大規模データを伴う最適化問題に対する高速計算システムの構築と評価
- ・高速グラフ探索アルゴリズム開発
- ・超並列スレッドを用いた数理計画問題に対する高性能ソルバの開発
- ・実グラフデータを用いた実証実験

(2) 「大規模グラフ処理系」グループ

① 主たる共同研究者: 鈴木 豊太郎 (アイルランド国立大学 University College Dublin、
客員准教授)

② 研究項目

- ・リアルタイム大規模グラフストリーム処理系及びグラフ最適化ライブラリの開発
- ・X10 言語上の大規模グラフ処理ライブラリ的设计・開発
- ・大規模グラフストリーム処理系设计・開発
- ・高速グラフ探索アルゴリズム及び数理計画問題の高性能ソルバの X10 による実装
- ・実グラフデータを用いた実証実験及び性能最適化

(3) 「大規模グラフストア」グループ

① 主たる共同研究者: 主たる共同研究者: 佐藤 仁 (東京工業大学学術国際情報センター、特
任助教)

② 研究項目

- ・大規模グラフ処理向けデータストアの開発
- ・大規模グラフストア設計、プロトタイプ実装
- ・グラフ I/O ライブラリ開発 (X10 ベース)、グラフ I/O 最適化アルゴリズム開発
- ・性能最適化・安定化
- ・他コンポーネントとの統合

(4)「対話型閲覧システム」グループ

① 主たる共同研究者: 脇田 建 (東京工業大学大学院情報理工学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・超大規模グラフ向けの対話型閲覧システムの開発

§ 2. 研究実施の概要

新しいスーパーコンピュータの応用として大規模なグラフ解析が注目を集めている。グラフ解析の応用分野としては大規模災害等での避難誘導計画、社会公共政策や企業経営等のためソーシャルネットワーク等の大規模データの有効活用等が想定されているが、非常に計算量やデータ量さらに電力使用量などの規模が大きく従来の手法では処理が困難である。そのため次世代ポストペタスーパーコンピュータでの大規模グラフ解析を想定した場合、アルゴリズム的及びシステムの解決すべき課題の特定とそれらの解決策の提案が急務とされている。本研究で重点的に取り組む課題は以下の二つとなる。

1: 並列数の爆発的増大及び不均質化や高密度化による性能向上の困難性

2: 記憶装置の多階層化・大容量化への対応

平成25年度は以下の研究に対して重点的に取り組み、多くの成果を上げた。

1: アクセラレータ等による大規模かつヘテロな環境下における世界最高性能の大規模グラフ解析及び数理最適化システムの開発と評価

- Green Graph500 (<http://green.graph500.org>) は並行探索、最短路探索をはじめとする最適化、極大独立集合などのグラフ解析、などの複数のグラフ処理カーネルからなるベンチマークであり、単位電力あたりのグラフ探索の性能 (TEPS/W) を評価しランキングを行う。今回非常に高性能かつ低消費電力なグラフ探索のプログラムの開発に成功して、以下の**第1回**と**第2回 Green Graph500** ベンチマークにおいて**世界1位**にランキングされた。
第1回 Green Graph500: 国際会議 ISC13 : 6.119MTEPS/W (Small Data 世界 1 位)
第2回 Green Graph500: 国際会議 SC13 : 6.72MTEPS/W (Big Data 世界 1 位),
153.17MTEPS/W (Small Data 世界 1 位)

- 半正定値計画問題(SDP)は組合せ最適化、システムと制御、データ科学、金融工学、量子化学など非常に幅広い応用を持ち、現在最適化の研究分野で最も注目されている最適化問題の一つとなっている。多数 GPU の活用や計算と通信のオーバーラップ技術を応用することによって、世界最大規模の SDP を高速に解くことに成功した。(世界記録更新:233 万制約 ; 1.713PFlops) 東工大スパコン TSUBAME 2.0 & 2.5 における疎&密データ複合並列計算(24,480CPU コア & 4080GPU)

2: 各種グラフや最適化アルゴリズムのライブラリ化

- 並列分散並列言語 X10 を用いた大規模グラフ処理ライブラリ ScaleGraph のアーキテクチャ設計を刷新し、新たなアーキテクチャ設計、API 定義、およびその開発、リリースを行い、バージョン 2.2 を公開した。また、これらの高性能なグラフ解析手法に加えて、10 億レベルの枝から構成されるソーシャルネットワーク(Twitter) に関するグラフ解析を行い、ネットワーク成長のモデル化を行った。
- メモリ階層性を考慮した最適データ配置・管理技術や、グラフ処理向け I/O インターフェースの研究開発を推進した。平成25年度は、Graph500 ベンチマークを題材として、フラッシュデバイスなどの不揮発性メモリを補助的に利用することで、DRAM 容量を超える規模のグラフを処理するためのデータ管理手法の開発を進め、ホストのメモリ容量の 2 倍程度を超えるような大規模グラフサイズでも 10%~20%程度の性能低下に抑えられる手法を開発した。
- 超巨大グラフの高速処理、必要な情報の高速検索技術、大量のデータの分類技術、可視化処理、対話処理などさまざまな技術を開発し、相互に連携させることによって大規模グラフの可視化ツールの開発を推進した。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国内)

1. 小形 英史, 鈴木 豊太郎, 「大規模ネットワークに対するリンク予測の並列実装」, 情報処理学会 第 143 回 HPC 研究会, 2014 年 3 月.
2. 渡部 優, 鈴木 豊太郎, 「大規模ソーシャルネットワークにおける時間的構造変化の解析手法の研究」, 日本データベース学会年次大会 DEIM 2014 第 5 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (査読付き) 2014 年 3 月.
3. 池松 恭平, 村田 剛志. 3 部モジュラリティの改善とその最適化手法. 人工知能学会論文誌, Vol. 29, No. 2, 2014, 245-258, 2014 年 2 月 13 日. (DOI: 0.1527/tjsai.29.245)
4. 安井 雄一郎, 藤澤 克樹, 竹内 聖悟, 湊 真一, “ULIB ライブラリを用いた共有メモリ型並列

- アルゴリズムの高速化”, 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 2014, 2014 年.
5. 小形 英史, 鈴木 豊太郎, 「大規模ネットワーク解析のためのスペクトラルクラスタリング」, 情報処理学会 第 141 回 HPC 研究会, 2013 年 10 月 1 日.
 6. 石井 大輔, 鈴木 豊太郎, 「PGAS 言語 X10 による数値制約充足問題ソルバー-Realpaver の並列化」, 情報処理学会 第 141 回 HPC 研究会, 2013 年 10 月 1 日.
 7. 上野 晃司, 鈴木 豊太郎, 「Pregel グラフ処理系におけるメッセージ配送最適化に向けて」, 情報処理学会 第 141 回 HPC 研究会, 2013 年 10 月.
 8. 岩渕 圭太, 佐藤 仁, 安井 雄一郎, 藤澤 克樹, 松岡 聡: 不揮発性メモリを用いた Hybrid-BFS アルゴリズムの最適化と性能解析, 第 141 回 HPC 研究発表会予稿集, 2013 年
 9. 品野 勇治, Tobias Achterberg, Timo Berthold, Stefan Heinz, Thorsten Koch, Stefan Vigerske, Michael Winkler, “制約整数計画ソルバ SCIP の並列化”, 統計数理, vol. 61, No. 1, pp. 47-78, 2013 年.
 10. 鳥海 重喜, 高嶋 隆太 : 海上航路ネットワークとエネルギー資源の国際輸送におけるチョークポイント分析, GIS—理論と応用—, Vol. 21, No. 1, pp. 47-55, 2013 年.

論文詳細情報(国際)

1. Katsuki Fujisawa, Toshio Endo, Yuichiro Yasui, Hitoshi Sato, Naoki Matsuzawa, Satoshi Matsuoka and Hayato Waki, “Peta-scale General Solver for Semidefinite Programming Problems with over Two Million Constraints”, The 28th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS 2014), 2014 年. (in press).
2. Toyotaro Suzumura, Masaru Ganse, and Shunsuke Nishii, "Towards Graph Stream Processing Platform", Large-Scale Network Analysis Workshop in conjunction with World Wide Web 2014 (WWW'14), Seoul, Korea, 2014 年 4 月. (in press)
3. Hidefumi Ogata and Toyotaro Suzumura, "Towards X10-Based Link Prediction for Large-Scale Network", Large-Scale Network Analysis Workshop in conjunction with World Wide Web 2014 (WWW'14), Seoul, Korea, 2014 年 4 月. (in press).
4. Yuichiro Yasui, Katsuki Fujisawa and Yukinori Sato, Fast and Energy-efficient Breadth-first Search on a single NUMA system, International Supercomputing Conference (ISC 14), 2014 年. (in press).
5. Takuya Akiba, Yoichi Iwata, and Yuichi Yoshida. Dynamic and Historical Shortest-Path Distance Queries on Large Evolving Networks by Pruned Landmark Labeling. In Proceedings of the 23rd international conference on World Wide Web (WWW '14), 2014 年. (in press).
6. Sorn Jarukasemratana and Tsuyoshi Murata, and Xin Liu. “Community Detection Algorithm based on Centrality and Node Closeness in Scale-Free Networks,” 人工知

- 能学会論文誌, vol. 29, no. 2, pp. 234-244, 2014年2月13日. (DOI: 10.1527/tjsai.29.234)
7. Keita Iwabuchi, Hitoshi Sato, Ryo Mizote, Yuichiro Yasui, Katsuki Fujisawa and Satoshi Matsuoka, "Hybrid BFS Approach Using Semi-External Memory", International Workshop on High Performance Data Intensive Computing (HPDIC2014) in Conjunction with IEEE IPDPS 2014, 2014年.
 8. Shigeki Toriumi, Azuma Taguchi and Teturo Matsumoto : "A Model to Simulate Delay in Train Schedule Caused by Crowded Passengers - Using a Time-Space Network -", International Regional Science Review, Volume 37, Issue 2, pp. 225-244, 2014年. (DOI:10.1177/0160017614526883).
 9. Takuya Akiba, Yoichi Iwata, Ken-ichi Kawarabayashi, and Yuki Kawata. Fast Shortest-Path Distance Queries on Road Networks by Pruned Highway Labeling. In Proceedings of the Sixteenth Meeting on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX'14), pp. 147-154, 2014年. (DOI:10.1137/1.9781611973198.14)
 10. Kyohei Ikematsu and Tsuyoshi Murata. "A Fast Method for Detecting Communities from Tripartite Networks," In Proceedings of the 5th International Conference on Social Informatics (SocInfo2013), pp. 192-205, Kyoto Japan, 2013年11月25日. (DOI: 10.1007/978-3-319-03260-3_17)
 11. Sorn Jarukasemratana and Tsuyoshi Murata. "Web Caching Replacement Algorithm based on Web Usage Data," New Generation Computing, Vol. 31, No. 4, pp. 311-329, 2013年10月1日. (DOI: 10.1007/s00354-013-0404-z)
 12. Sorn Jarukasemratana and Tsuyoshi Murata. "Recent Large Graph Visualization Tools: A Review," コンピュータソフトウェア, Vol. 30, No. 2, pp. 159-175, 2013年8月25日. (DOI: 10.11309/jssst.30.2_159)
 13. Ken Wakita, Ryo Kawasaki, and Masanori Takami. "Observation of Human Dynamics in Cote d'Ivoire Through D4D Call Detail Records," The 2nd When the City Meets the Citizen Workshop, Boston, MA, the United States, 2013年7月11日. (URI: <http://www.aai.org/ocs/index.php/ICWSM/ICWSM13/paper/view/6235>)
 14. Sorn Jarukasemratana, Tsuyoshi Murata, and Xin Liu. "Community Detection Algorithm based on Centrality and Node Closeness in Scale-Free Networks," in Proceedings of the 24th ACM Conference on Hypertext and Social Media (HT'13), pp. 258-262, Paris, France, 2013年5月1日. (DOI: 10.1145/2481492.2481527)
 15. Takafumi Saito, Kento Sato, Hitoshi Sato and Satoshi Matsuoka, "Energy-aware I/O Optimization for Checkpoint and Restart on a NAND Flash Memory System", In the Workshop on Fault-Tolerance for HPC at Extreme Scale 2013 (FTXS2013) in conjunction with the International Symposium on High Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC13), New York, USA, June, 2013年. (DOI: 10.1145/2465813.2465822)
 16. Koichi Shirahata, Hitoshi Sato, Toyotaro Suzumura and Satoshi Matsuoka, "A

- Scalable Implementation of a MapReduce-based Graph Processing Algorithm for Large-scale Heterogeneous Supercomputers", 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), Delft, Netherlands, May, 2013. (DOI:10.1109/CCGrid.2013.85)
17. Yuichiro Yasui, Katsuki Fujisawa and Kazushige Goto, "NUMA-optimized Parallel Breadth-first Search on Multicore Single-node System", The proceedings of the IEEE BigData2013, 2013 年. (DOI: 10.1109/BigData.2013.6691600)
 18. Maho Nakata, Mituhiro Fukuda and Katsuki Fujisawa, "Variational Approach to Electronic Structure Calculations on Second-Order Reduced Density Matrices and the N-Representability" Problem, H. Siedentop (eds.), Complex Quantum Systems - Analysis of Large Coulomb Systems, Institute of Mathematical Sciences, National University of Singapore, pp. 163-194, 2013 年.
 19. Koji Ueno and Toyotaro Suzumura, "Parallel Distributed Breadth First Search on GPU", HiPC 2013 (IEEE International Conference on High Performance Computing), India, 2013 年 12 月
 20. Charuwat Hounkaew and Toyotaro Suzumura, "X10-Based Distributed and Parallel Betweenness Centrality and Its Application to Social Analytics", HiPC 2013 (IEEE International Conference on High Performance Computing), India, 2013 年 12 月
 21. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, Automatic Optimization of Stream Programs via Source Program Operator Graph Transformations, International Journal of Distributed and Parallel Databases, Springer, Volume 31, Issue 4, 57 pages, 2013 年12月.
 22. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "Graph Database Benchmarking on Cloud Environments with XGDBench", Springer Automated Software Engineering Journal, 2013 年11月.
 23. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "A Performance Analysis of System S, S4, and Esper via Two Level Benchmarking", 10th International Conference on Quantitative Evaluation of Systems (QEST 2013), 2013 年 8 月
 24. Koichi Shirahata, Hitoshi Sato, Toyotaro Suzumura and Satoshi Matsuoka, "A Scalable Implementation of a MapReduce-based Graph Processing Algorithm for Large-scale Heterogeneous Supercomputers", 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), Delft, Netherlands, 2013 年 5 月
 25. Masaru Watanabe and Toyotaro Suzumura, "How Social Network is Evolving ? A Preliminary Study on Billion-scale Twitter Network", The 2nd International Workshop on Large Scale Network Analysis (LSNA 2013) In conjunction with WWW 2013, 2013 年 5 月.

26. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "A first view of Exedra: A Domain-Specific Language for Large Graph Analytics Work Flows", The 2nd International Workshop on Large Scale Network Analysis (LSNA 2013) In conjunction with WWW 2013, 2013 年 5 月.
27. Bao Nguyen and Toyotaro Suzumura, "Towards Highly Scalable Pregel-based Graph Processing Platform with X10", The 2nd International Workshop on Large Scale Network Analysis (LSNA 2013) In conjunction with WWW 2013, 2013 年 5 月.
28. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "A Mechanism for Stream Program Performance Recovery in Resource Limited Compute Clusters", 2013/05, The 18th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA 2013), Wuhan, China, 2013 年 4 月.
29. S. Burer, S. Kim and M. Kojima, "Faster, but Weaker, Relaxations for Quadratically Constrained Quadratic Programs", To appear in Computational Optimization and Applications, 2013 年 4 月.
30. Takuya Akiba, Yoichi Iwata, and Yuichi Yoshida. Fast Exact Shortest-Path Distance Queries on Large Networks by Pruned Landmark Labeling. In Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'13), pp. 349-360. 2013 年. (DOI:10.1145/2463676.2465315)
31. Yosuke Yano, Takuya Akiba, Yoichi Iwata, and Yuichi Yoshida. Fast and scalable reachability queries on graphs by pruned labeling with landmarks and paths. In Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on information & knowledge management (CIKM '13), pp. 1601-1606, 2013 年. (DOI:10.1145/2505515.2505724)
32. Takuya Akiba, Yoichi Iwata, and Yuichi Yoshida. Linear-time enumeration of maximal K-edge-connected subgraphs in large networks by random contraction. In Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on information & knowledge management (CIKM '13), pp. 909-918, 2013 年. (DOI:10.1145/2505515.2505751)
33. S. Kim and M. Kojima, "A Continuation Method for Large-sized Sensor Network Localization Problems", Pacific Journal of Optimization Vol., 9117-136, 2013 年.
34. M. Kojima and M. Yamashita, "Enclosing Ellipsoids and Elliptic Cylinders of Semialgebraic Sets and Their Application to Error Bounds in Polynomial Optimization", Mathematical Programming Vol. 138 333-364, 2013 年.
35. N. Arima, S. Kim and Kojima, "A Quadratically Constrained Quadratic Optimization Model for Completely Positive Cone Programming ", SIAM Journal of Optimization Vol. 23, 2310-2340, 2013 年.

[proceedings]

36. Ryuichi Shibasaki, Toshio Azuma, Tomihiro Watanabe and Shigeki Toriumi: "A

container cargo assignment model on a real international maritime shipping network and application to the Suez Canal transit analysis", Proceedings of International Association of Maritime Economists Conference 2013, CD-ROM, 2013 年.