

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(中央大学)

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ーの開発
- ・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(東京工業大学)

① 主たる共同研究者: 鈴木豊太郎 (東京工業大学情報理工学研究科、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の設計・開発
- ・大規模グラフストリーム処理系設計・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ーの 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(東京工業大学)

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(東京工業大学)

①主たる共同研究者:主たる共同研究者:脇田建 (東京工業大学情報理工学研究科、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
- ・ユーザインターフェース開発(フィルタリングなし)
- ・高次元レイアウトシステム
- ・グラフクラスタリング
- ・ユーザインターフェース開発(フィルタリングあり)
- ・信頼性解析システム
- ・スケーラブルなグラフ処理ライブラリ

§ 2. 研究実施内容

1. 大規模半正定値計画問題(SDP)に対する高性能汎用ソルバーの開発と評価

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、量子化学など非常に幅広い応用を持ち、線形計画問題と並んで最適化の理論と手法の中核をなしている。SDP に対しては高速かつ安定した反復解法である主双対内点法が最も強力な計算手法として知られているが、各反復での巨大な線形方程式系の係数行列の生成とその Cholesky 分解が大きなボトルネックとなっている。1995 年から研究代表者の藤澤らが中心となって主双対内点法ソフトウェア SDPA プロジェクトを推進している。SDPA は Northwestern 大学 Optimization Center の Neos Solver にも登録されており、世界中で広く使われている。疎性の有効活用、計算量やデータ移動量などを考慮した計算方法の自動選択などの技術を世界に先駆けて実現し、世界最大規模の SDP を高速に解くことに成功した。特に論文 18 では主要なボトルネックの一つである線形方程式系の Cholesky 分解に対して、多数(4080 個)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、制約式の数が 148 万以上の巨大 SDP の可解の世界記録の更新及び最大で 533TFlops の計算性能を達成した。また論文18は HPC 系最大かつ最難問の国際学会 ACM/IEEE Supercomputing 2012 (SC12)に採択されている(日本からの採択は4件のみ)。

2. ZDD を用いた高速なパス列挙アルゴリズムの高速化

ZDD は、組合せの集合を圧縮して表現するデータ構造とアルゴリズムからなる最近大変注目されている技術である。現在、JST 湊 ERATO プロジェクトと共同で YouTube 上でのお姉さん動画で有名な高速なパス列挙アルゴリズムの高速化に取り組み 16x16 のグリッドグラフで 290 億年(全列挙)→1 分以内(フロンティア法の並列化)まで高速化に成功している。

3. 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

本年度は、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 1.0 に向けたアーキテクチャ設計、API 定義、およびその開発、リリースを行った。初期のリリースでは、PageRank、RWR (Random Walk with Restart)、最短経路問題およびスペクトラルクラスタリング、媒介中心性を実装し、東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME 2.0 においてそのスケーラビリティを検証した。この結果は国際会議 HiPC 2012 で発表し、SourceForge にてオープンソースとして公開した。初期リリースの実装および性能検証において、更に大規模グラフ処理に対応するための X10 処理系の拡張ポイントが明らかになり、次リリースへの指針を得た。

4. Graph500 & Green Graph500

また、昨年度に引き続き、スーパーコンピュータにおける大規模グラフ処理の性能を競う Graph 500 では、東京工業大学の TSUBAME 2.0、東京大学の Oakleaf-FX 上にスケーラブルな幅

優先探索を実装し、スコアを提出した。2次元分割、通信の圧縮などの様々な最適化を施すことによって、2012年6月のランキングには世界3位、世界4位を獲得した。また、TSUBAME 2.0においては、GPUを活用したアルゴリズムを開発し、前回2011年11月のCPU実装の結果100.37 GE/sを大きく上回る462.25 GE/s (Scale 35)を達成した。また、Hybrid Searchを応用したアルゴリズムで1ノード版の高性能 Graph500用の実装も行い、2012年6月のランキングでは1ノードで世界1位、2012年11月のランキングでは1ノードでの世界2位(CPUのみでは1位)を達成した。さらに、これらの実装によって、単位電力量あたりのグラフ処理の性能を競う Green Graph 500においても、非公式ながら世界1位から5位を独占することができた。

5. 汎用グラフ処理モデル GIM-V の複数 GPU による大規模計算

MapReduce プログラミングモデルに基づく大規模グラフ処理手法である GIM-V アルゴリズムを既存の単一 GPU 向け MapReduce 処理系である Mars を複数 GPU 向けに拡張し、GPU アクセラレータを搭載した大規模ヘテロ型スーパーコンピュータ(スパコン)上で効率的に実行するための最適化を行った。その結果、10億枝を超えるグラフに対して、TSUBAME2.0上の256ノード、768GPUを用いてページランクアルゴリズムを実行し、CPUのみを用いる場合と比較して1.52倍の高速化を確認した(論文13)。また、これらの経験を元に、大規模計算環境へ適用や性能最適化、最新デバイス機能の適用を目的に、数千~数万のアクセラレータを搭載したスパコン上でのデータ並列処理を目指したソフトウェア基盤として Hamar(Highly Accelerated MapReduce)の開発を進めた。これらにより、高性能階層型データストアのプロトタイプ作成への指針を得た。

6. 不揮発性メモリを用いた大規模グラフ処理

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を提案し Graph500 ベンチマーク向けの開発を行った。近年、Graph500 上位の実装で採用されているハイブリッドアルゴリズムを対象にし、forward graph と backward graph で構成されるデータ構造のうち、参照の比較的少ない forward graph をフラッシュデバイスに退避し、アルゴリズムの切り替えを適切に行うことで、性能低下を抑えられることを確認した。また、予備調査として、不揮発性メモリにおいて消費電力あたりの性能(I/Oスループット、レイテンシ)に関する調査を進めたり(論文12)、PGAS言語X10への適用を進めたりし、大規模グラフ処理における高性能なI/O手法の実現やそのインターフェース開発に向けた指針を得た。

7. 大規模グラフ可視化

本研究では、交通管制システム、ソーシャルネットワークシステム、移動体通信などから収集される莫大な時系列データを俯瞰し、複雑化している社会を背景とした適切な判断指針が得られるシステムを提供することである。これによって大規模かつ複雑な社会に存する力学原理を把握することを可能とする。

本年度はすでに開発した超大規模グラフ向けの対話型閲覧システムの開発のプロトタイプシステムを利用して得た知見を元に、グラフクラスタリングについて分散並列処理を用いた大規模化、グラフレイアウト処理の分散処理システムの開発、グラフ操作システムのためのユーザインタフェースの開発の三点を中心に研究を行うことを計画していた。このうち、グラフクラスタリングについては、PGAS 言語 X10 を用いた開発にとりかかっている。昨年、WWW 国際会議で発表された、スーパーコンピュータ用のクラスタリング係数解析アルゴリズムの並列解析システムを X10 で記述し直し、性能評価を始める段階に至っている。グラフレイアウト処理に関する研究では、(論文 25)において、従来の可視化手法では辺と頂点が中心部に凝集してしまう欠陥を修正するために、Personalized PageRank アルゴリズムをラプラシアンに反映した可視化を施し、ネットワークのハブ成分を表示周辺野に配置することで凝集性を回避できることを示した(図1)。(論文 1)においては、評判ネットワークのような対立した意見を包含したネットワークにおいて、意見の対立を頂点の反発関係に組み入れることによって、ネットワークのクラスタ性を抽出するとともに、良好な可視化を行えることを示した。ユーザインタフェースの開発については、昨年度に Java で実装した超高次元可視化手法を C++に書き換え、計算ライブラリを利用することにより、10,000 ノードの規模のネットワークの対話的可視化が実現できることを示した。今年度は、本研究の有効性を実際の社会ネットワークへの応用によって評価する目的から、コートジボワールの携帯電話基地局間の通信履歴に対する解析を実施し、同国の土地利用分布を詳細に明らかにすることに成功した(図 2)。

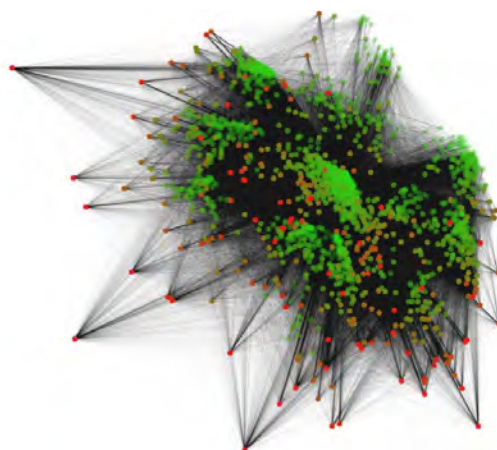


図 1 ネットワーク凝集性の回避

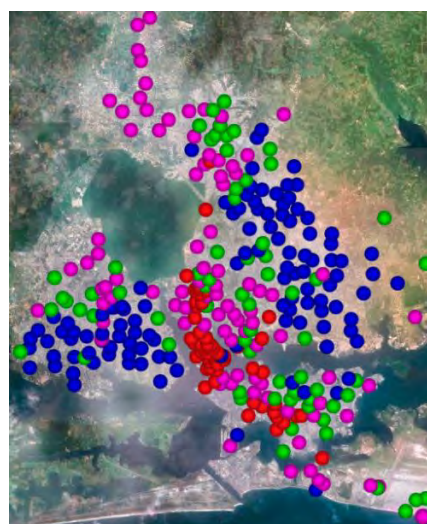


図 2 コートジボワールの土地利用

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. 杉原 貴彦、劉 欣、村田 剛志、Signed ネットワークからのコミュニティ抽出、人工知能学会誌 Vol.28、No.1、pp.67-76、2013 年
2. Andras Frank、Staoru Fujishige、Naoyuki Kamiyama、Naoki Katoh:

- “Independent Arborescences in Directed Graphs, Discrete Mathematics”, Vol.313, No.4, pp.453-459, 2013 年
3. 高松瑞代、田口東、服部優奈、太田雅文、末松孝司: PASMO データを用いた鉄道利用者の購買行動分析、オペレーションズ・リサーチ、vol. 58、no. 1、pp. 37-46、2013 年
 4. Sunyoung Kim, Masakazu Kojima, Hayato Waki and Makoto Yamashita: “SFSDP: a Sparse Version of Full Semidefinite Programming Relaxation for Sensor Network Localization Problem”, ACM Transactions on Mathematical Software Vo.38、4、2012 年
 5. J. Gotoh and K. Fujisawa: “Convex optimization approaches to maximally predictable portfolio selection、 Optimization”, A Journal of Mathematical Programming and Operations Research、2012 年
(DOI:10.1080/02331934.2012.741237).
 6. Thorsten Koch、Ted Ralphs、Yuji Shinano、 “Could we use a million cores to solve an integer program?”, Mathematical Methods of Operations Research、Vo.76、Issue.1、pp 67-93、2012 年(DOI: 10.1007/s00186-012-0390-9).
 7. 赤星健太郎、高松瑞代、田口東、石井儀光、小坂知義: 低頻度な公共交通網を有する地域の移動利便性の評価手法に関する研究—時空間ネットワークを用いた公共交通網と都市構造の関連分析、都市計画論文集、vol. 47、no. 3、pp. 847-852、2012 年
 8. J. S. M. Anderson、M. Nakata、R. Igarashi、K. Fujisawa and M. Yamashita: “The second-order reduced density matrix method and the two-dimensional Hubbard model”, Computational and Theoretical Chemistry、Available online 23、2012 年 8 月
 9. 上野晃司、鈴木豊太郎「データストリーム処理におけるGPUタスク並列を用いたスケーラブルな異常検知」 情報処理学会 SACSIS 2012 先進的計算基盤システムシンポジウム、2012 年 5 月
 10. 雁瀬優、西井俊介、鈴木豊太郎「インクリメンタル大規模グラフストリーム処理系 UNICORN の実装と評価」 情報処理学会 SACSIS 2012 先進的計算基盤システムシンポジウム、2012 年 5 月
 11. 西井俊介、鈴木豊太郎「データストリーム処理によるリアルタイム性を考慮した大規模グラフ処理基盤」 情報処理学会 SACSIS 2012 先進的計算基盤システムシンポジウム、2012 年 5 月
 12. 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 3rd International Workshop on Fault-Tolerance for HPC at Extreme Scale (FTXS 2013), 2013 年
 13. Koichi Shirahata, Hitoshi Sato, Toyotaro Suzumura, and Satoshi Matsuoka. “A

- Scalable Implementation of a MapReduce-based Graph Processing Algorithm for Large-scale Heterogeneous Supercomputers” In Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid (CCGrid2013), 2013 年
14. Miyuru Dayarathna, Charuwat Hounkaew, Toyotaro Suzumura, "Scalable Performance of ScaleGraph for Large Scale Graph Analysis", HiPC 2012 (IEEE International Conference on High Performance Computing), Pune, India, 2012 年 12 月
 15. Koji Ueno and Toyotaro Suzumura, "GPU Task Parallelism for Scalable Anomaly Detection", HiPC 2012 (IEEE International Conference on High Performance Computing), Pune, India, 2012 年 12 月
 16. Hidefumi Ogata, Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "Highly Scalable X10 Based Spectral Clustering", ParGraph'12 Workshop, HiPC, Pune, India, 2012 年 12 月
 17. Miyuru Dararathna and Toyotaro Suzumura, "XGDBench: A Benchmarking Platform for Graph Stores in Exascale Clouds", IEEE CloudCom 2012 conference, Taipei, Taiwan, 2012 年 12 月
 18. K. Fujisawa, T. Endo, H. Sato, M. Yamashita, S. Matsuoka and M. Nakata: "High-Performance General Solver for Extremely Large-Scale Semidefinite Programming Problems", Proceedings of the 2012 ACM/IEEE conference on Supercomputing, SC'12, 2012 年 11 月 [DOI: 10.1109/SC.2012.67]
 19. Koichi Shirahata, Hitoshi Sato, Toyotaro Suzumura, and Satoshi Matsuoka. A GPU Implementation of Generalized Graph Processing Algorithm GIM-V” In Proceedings of the 3rd International Workshop on Parallel Algorithm and Parallel Software (IWPAPS 2012), pp.07—212, 2012 年 9 月 [DOI: 10.1109/ClusterW.2012.34]
 20. Sorn Jarukasemratana, Tsuyoshi Murata, Visualizing Web Structure based on Browsing Sessions, Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI2012), 2pages, 2012 年 8 月 28—31 日.
 21. Miyuru Dayarathna, Charuwat Hounkaew, and Toyotaro Suzumura, "Introducing ScaleGraph : An X10 Library for Billion Scale Graph Analytics", PLDI X10 Workshop, Beijing, China, 2012 年 6 月
 22. Koji Ueno and Toyotaro Suzumura "Highly Scalable Graph Search for the Graph500 Benchmark" HPDC 2012 (The 21st International ACM Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing), Delft, Netherlands, 2012 年 6 月
 23. Hidetoshi Shimodaira, Haruhisa Nagata, A Laplacian for the personalized

- PageRank of undirected graph, 9th Workshop on Algorithms and Models for the Web Graph (WAW2012), Halifax, Canada, 2012 年 6 月 22 日
24. Koji Ueno and Toyotaro Suzumura, "2D Partitioning Based Graph Search for the Graph500 Benchmark", IPDPS ParLearning Workshop 2012, 2012 年 5 月
 25. Hiroya Matsuura and Toyotaro Suzumura, "A Highly Efficient Consolidated Platform for Stream Computing and Hadoop ", IPDPS HPDIC Workshop 2012, 2012 年 5 月
 26. Miyuru Dayarathna and Toyotaro Suzumura, "Hirundo: A Mechanism for Automated Production of Optimized Data Stream Graphs", ICPE 2012 ,ACM/SPEC 3rd International Conference on Performance Engineering, Boston, 2012 年 4 月