

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「Society 5.0を支える革新的コンピューテ  
ィング技術」  
研究課題「エッジでの高効率なデータ解析を実現  
するグラフ計算基盤」

## 研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者: 近藤 正章  
(慶應義塾大学 理工学部 教授)

## §1 研究実施の概要

### (1)実施概要

Society5.0 が目指す社会の実現には、エッジで生成される大量かつ多様、そしてタイムリーなデータを、ヒトやモノが搭載するエッジデバイス、あるいは地理的空間に紐付けられたエッジサーバがローカル蓄積して解析処理を行い、社会にリアルタイムでフィードバックを行うための情報基盤が求められる。ヒト・モノ・位置情報などのデータ間の関連を表現可能なグラフデータやその解析処理は、その実現に重要な役割を果たすと期待されるが、処理の重いグラフ処理をエッジ側で高効率行う計算基盤の創出が、今後のスマート社会実現に向けた最重要課題の一つと考えられる。

本研究課題ではエッジグラフ処理フレームワークの開発を目指し、研究構想段階で定義した以下の研究項目に従って、システムの各階層で要素技術を開発した。

- 【研究項目 A】エッジ環境向けグラフ処理アクセラレータの開発
- 【研究項目 B】エッジ環境向けグラフ処理ソフトウェア基盤の開発
- 【研究項目 C】エッジ環境向けグラフアプリ・システムコデザイン
- 【研究項目 D】産業界との連携によるオープンイノベーションの推進

エッジ環境向けグラフ処理アクセラレータ技術として、メモリ近傍計算や近似ベクトル乗算器、Gain-Cell DRAM 構造に基づくスタンダードセルメモリ、省エネルギー化のための DVFS 仮想化技術などを開発した。また、エッジ環境向けグラフ処理ソフトウェア基盤として、エッジデバイス向け軽量グラフ処理ライブラリや、グラフ構造を用いた時系列データ選択手法、強化学習によるグラフ上での経路スケジューリングなどが実装されたソフトウェアフレームワークを構築した。コデザインによるグラフアプリケーションの構築として、時間拡大グラフを用いたマップマッチングやグラフ埋め込みを用いた関係データ表現手法などのアルゴリズムを開発した。産学連携と応用展開では、Yahoo! Japan やロート製薬、パナソニック、ソフトバンク、豆蔵といった企業と連携して様々な成果が創出され、一部は実用化もされた。

さらに、これら要素技術を連携させることで、全体のフレームワークを構築した。図 1 に研究開発したエッジグラフ処理フレームワークの全体像を示す。

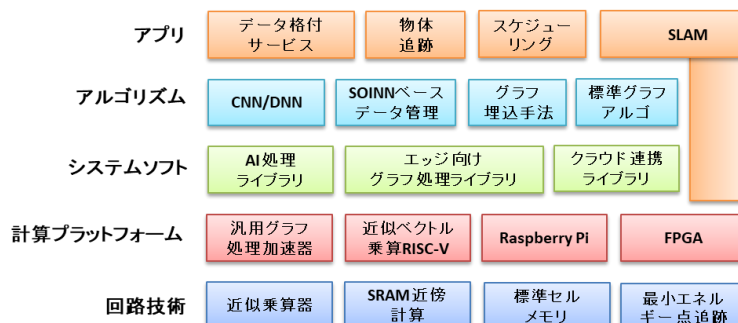


図 1: 研究開発したエッジグラフ処理フレームワークの全体概

フレームワーク内の個別要素技術を融合したシステム、またその社会展開の一つとして、本研究課題の後半では自動搬送車の移動経路最適化の応用に注力した。スマート工場などでは多くの搬送ロボットが稼働しているが、時に 100 台規模になるロボットの混雑を避けつつ移動経路の最適化を行うことは重要である。そこで、台数に対してスケラブルに、かつ新しい受注などの動的な状況変化にも対応しながら経路最適化を行う必要が生じる。また、バッテリー駆動のロボットにおける計算処理には高速性だけでなく、省電力性も求められる。そこで、本研究課題で開発したグラフ処理と AI を用いたスケラブルな移動経路最適化アルゴリズムを、メモリ近傍計算手法によるグラフ処理向けアーキテクチャ、近似乗算とベクトル命令拡張、および Gain-Cell DRAM による低電力・小面積回路技術を組み合わせることで高速化・省電力化し、スマート工場における搬送ロボット最適化応用に結び付ける統合システムを検討した。一例として、CPU あるいは GPU による処理と比較した場合、統合システムを活用することで、同一消費エネルギーのもと 2 倍以上の高速化が達成できることが示された。

## (2)顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

#### 1.

概要:グラフや知識ベースデータなどの離散的な対象に対し、適切な連続表現を獲得する研究として、グラフ埋め込み問題における包括的な枠組みと安定解法を提案した。表現学習の包括的フレームワークである Nested SubSpace (NSS) 配置を導入し、既存の埋め込み技術が NSS 配置の特殊ケースと考えられることを示した。また一般的なグラフの再現に特化した表現学習法である DANCAR 手法を実装した。機械学習分野のトップカンファレンスである ICML 2020 に論文が採択された。

#### 2.

概要:スマート社会では、環境に配置されるセンサデバイスも増大し、それらから取得されるデータを利用して社会を豊かにできると期待されるが、全てのデータを保存・転送・蓄積することは、性能や電力、ストレージコストの観点から現実的でない。本研究では、グラフ構造を利用した SOINN をベースに、データの密度分布を考慮した重要データ選択とそれをエッジデバイス上で高効率に実行する技術を開発した。ユビキタスコンピューティング分野のトップカンファレンスである PerCom2021 に論文が採択された。

#### 3.

概要:Mitchell 乗算アルゴリズムにもとづく独自の近似乗算を、各種グラフ処理アプリに適用して評価を行った結果、実行性能を維持したまま、近似による計算品質の劣化を無視できるレベルに抑えられることを確認した。正確な乗算と比較して実装面積が小さく、同じシリコン面積であればより高い並列度を活用できることから、本近似乗算アルゴリズムを用いた積和演算器を設計し実装面積も評価した。本成果は IEICE VLD Excellent Student Author Award for ASP-DAC2022 を受賞した。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

#### 1.

様々に蓄積されているデータの相互利用は重要になっているが、別組織が保有するデータは仕様や形式も異なり、データが利用に適した品質であるか不明であることも多い。そこで、データの品質を数理的に判定して明示する「データ格付け」の実現に向けた研究を実施した。グラフ構造を利用して、高速かつ省電力に数理的な知見からデータを選別して保存することで、有効なデータが蓄積されると期待される。

#### 2.

概要:ゲート型量子コンピュータの実現には、量子ビットのエラー耐性向上が重要であり、表面符号を用いる量子誤り訂正手法が活発に研究されている。量子誤りを検知・訂正する際に必要な復号化にはグラフにおける最小重み完全マッチング処理を行う必要があるが、処理が重く低レイテンシで実行するのは難しい。そこで、専用のハードウェア・エンジンを開発した他、脳型計算を利用した近似解法を考案した。計算機アーキテクチャ分野のトップカンファレンスである HPCA2022 に論文が採択された。

#### 3.

概要:本研究課題で開発したグラフ処理と AI を用いたスケーラブルな移動経路最適化アルゴリズムを、メモリ近傍計算手法によるグラフ処理向けアーキテクチャ、近似乗算とベクトル命令拡張各および Gein-Cell DRAM による低電力・小面積回路技術を組み合わせることで高速・省電力化し、スマート工場における搬送ロボット最適化応用に結び付ける統合システムを開発し、その効果を定量的に示した。

<代表的な論文>

1. Nozomi Hata, Shizuo Kaji, Akihiro Yoshida, Katsuki Fujisawa “Nested Subspace Arrangement for Representation of Relational Data”, Thirty-seventh International Conference on Machine Learning (ICML2020), July 2020.

概要: グラフや知識ベースデータなどの離散的な対象に対し、表現学習の包括的フレームワークである Nested SubSpace (NSS) 配置を導入し、既存の埋め込み技術が NSS 配置の特殊ケースと考えられることを示した。また一般的なグラフの再現に特化した表現学習法である DANCAR (Disk-ANCHor ARrangement) を実装した。DANCAR は R20 に WordNet を組み込むことに成功し、その構築タスクにおいて F1 スコア 0.993 を獲得した。DANCAR はグラフの特徴を理解するための視覚化にも適していることが示された。

2. Hiroki Oikawa, Masaaki Kondo, “Density-Based Data Selection and Management for Edge Computing”, 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom2021), March 2021.

概要: エッジで取得される全てのデータを保存・転送・蓄積していくことは、性能や電力、ストレージ容量の観点から非現実的である。そこで、グラフ構造を利用した SOINN アルゴリズムをベースに、データの密度分布を考慮した重要データ選択手法を考案した。機械学習を応用として選択データの妥当性を評価したところ、他手法よりも少ないデータで高精度なモデルを構築でき、またデータ選択処理の時間も高速であることが示された。

3. Keiichiro Yamamura, Haruki Sato, Nariaki Tateiwa, Nozomi Hata, Toru Mitsutake, Issa Oe, Hiroki Ishikura and Katsuki Fujisawa, “Diversified Adversarial Attacks based on Conjugate Gradient Method”, Thirty-ninth International Conference on Machine Learning (ICML 2022), July 2022.

概要: 深層学習モデルの脆弱性への攻撃として、入力に微小な摂動を加えることで出力を狂わせる Adversarial Attack が知られている。本論文では最適化問題として攻撃手法を定式化し、局所最適に陥るリスクを低減しつつ大域的最適解を効率的に探索する手法を提案し、既存手法を大きく上回る攻撃成功率を達成した。本手法をベースに、最適化手法によりロバスト性を評価することで、耐攻撃性を持つ学習手法の開発に繋がると期待される。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 近藤グループ

研究代表者: 近藤 正章 (慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目

- ・エッジ指向グラフ処理アクセラレータ・アーキテクチャ
- ・エッジ指向グラフ処理アクセラレータ向けソフトウェアスタックの開発
- ・グラフ・AI/アニーリング処理のシームレスな連携を実現するソフトウェアフレームワーク
- ・協力企業との連携と応用展開

#### ② 藤澤グループ

主たる共同研究者: 藤澤 克樹 (九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所 教授)

研究項目

- ・エッジ指向グラフ処理向けアルゴリズムの開発
- ・将来的なアニーリングアクセラレータ連携に向けた要件調査と性能解析
- ・協力企業との連携と応用展開

#### ③ 石原グループ (研究機関別)

主たる共同研究者: 石原 亨 (名古屋大学大学院情報学研究科 教授)

研究項目

- AI/AC 処理との連携が可能なグラフ処理システムアーキテクチャの開発
- エッジ指向グラフ処理アクセラレータ向け電力管理技術開発と実チップ検証
- 協力企業との連携と応用展開

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究課題では、成果の社会展開を図るべく積極的に企業との協力を実施した。以下に協力体制を構築した企業や研究機関とそれぞれの研究テーマについて、公開可能な情報を示す。なお、いくつかはすでに社会実装の実績もあり、プレス発表なども行われている。

1. 株式会社富士通(旧富士通研究所):グラフ・疎行列処理向けアクセラレータ機構
2. Yahoo! Japan:Web アクセス履歴によるユーザの潜在的興味度判定
3. パナソニック&ロート製薬:工場の CPS 化
4. NTT 物性科学基礎研究所:コヒーレントイジングマシンの性能評価
5. ソフトバンク株式会社:LP ガス配送サービス最適化
6. 理研&日本電信電話株式会社&株式会社フィックスターズ:Graph500 ベンチマーキング最適化
7. オープンストリート社(&ソフトバンク株式会社&Yahoo! Japan):バイクシェアリングにおける再配置最適化
8. ソフトバンク株式会社&株式会社豆蔵:データ格付サービス
9. ドイツ国立研究所 ZIB:格子暗号の安全性を検証する最短ベクトル問題に対する解読

また、本 CREST 領域内でのチーム間連携として、天野チームと連携して SLAM 向けアクセラレータ・エンジンを天野チームで開発した FiC システムである M-KUBOS に実装し評価を行った。これにより大規模な地図が必要な環境へ対応できることが期待される。