

本村 真人

北海道大学大学院情報科学研究科  
教授

## 「学習/数理モデルに基づく時空間展開型アーキテクチャの創出と応用」

### § 1. 研究成果の概要

本プロジェクトは、アーキテクチャ、機械学習、社会応用アルゴリズム、数理科学の4グループ体制で、相互に協力しながら研究開発を遂行している。以下では、各グループの視点で今年度の研究成果を概説する。

#### アーキテクチャグループ

数理科学グループが研究を進めている確率セルラオートマタ(SCA)動作モデルに準拠したアニメーリングマシンのアーキテクチャ検討とシミュレーション評価を進めた。全結合型及び疎結合型に関しそれぞれ基本的なアーキテクチャを提案し、特に全結合型についてその詳細化を進めた。

#### 機械学習グループ

時空間展開型・エッジ知能コンピュータの中核技術の一つであるアンサンブル・オンライン学習エッジアクセラレータの技術確立には、時空間展開アーキテクチャに適した新しいアンサンブル学習とオンライン学習アルゴリズムと、その効率良いハードウェア上の実装法が重要である。FPGA実装におけるHW量の削減に関して、ランダムフォレスト識別器における分岐比較テストの削減手法を提案し、従来手法に比較して70%以上のテスト数の削減に成功した。アンサンブル学習器のオンライン化技術に関しては、適応的な基底学習法 HAT と統合法を組み合わせることで、データの時系列的変動であるコンセプトドリフトに対応したストリーム木アンサンブル手法を提案し、既存手法より高い予測精度を達成することを実証した。オンライン学習の基盤技術に関する成果が、機械学習分野のトップジャーナルに掲載決定している [3]。さらに、システムの実運用や社会応用に関する研究項目として、頑健かつ自律的な実運用を可能にするために、多腕バンディット法を用いたブラックボックス関数の能動的探索アルゴリズムといった適用的学習技術や、列挙や整数計画法等の離散計算を予測精度に加えて信頼性や、安全性・公平性等の制約を考慮した予測を可能に

する機械学習手法の研究開発を行なった。

### 社会応用アルゴリズムグループ

アニーリングマシンで組合せ最適化問題を解く際、定式化されたイジングモデルからハードウェア上に実装可能なスピン構造に変換するためのグラフ変換アルゴリズムが、計算処理上のボトルネックとなっていた。このため、日立北大ラボでは、北大情報科学科・理学部数学科と連携し、産学連携初となるプログラミングコンテストを開催するなど、グラフ変換アルゴリズムの強化を推進してきた。18年度は、本コンテストを通じて考案された、PSSA(Probabilistic-Swap-Shift Annealing)アルゴリズムを CMOS アニーリングマシンに適用し、従来アルゴリズムに対して 50%以上の埋め込み性能の向上を確認した[1]。また、アニーリングマシンで組合せ最適化問題を解く技術を機械学習の最適化問題に応用し、学習処理の高速化を実現するために、CMOS 回路の機能拡張性を活用し、ハイパーパラメータ探索を高速化するブースティング手法を提案し、FPGA プロトタイピングにより、既存の QBoost 法を上回る高速性を実証した[2]。さらに組合せ最適化問題の実社会応用の可能性を探るため、電力の配電ネットワークや、化学反応の構造などに関する第一線の専門家との意見交換を実施した。

### 数理科学グループ

[数-1] King's グラフ  $K=K(N,N)$  の Hadwiger 数を小さな  $N$  で実際に計算して、一般の  $N$  で成り立つ下からの評価と上からの評価の改善を確認した。

[数-2] 1 回の更新で複数のスピンを同時に反転しうる MCMC の一つである SCA を考察し、それが許容誤差の範囲で Gibbs サンプラーとして機能するための十分条件を得た。また、1 更新当たりの反転スピン数の期待値が従来の Glauber ダイナミクスのそれよりも大きくなるための十分条件を求め、それが前者の十分条件と高温相で両立することを証明した。

[数-3] ハミルトニアン の結合定数を桁落ちさせた場合、或いは強結合極限を有限の値で打ち切りにした場合、スピン配位間順位が許容誤差の範囲で変動しないための十分条件を求めた。

[数-4:] 昨年度コンテストの優勝者と PSSA (probabilistic-swap-shift-annealing) というグラフ埋め込みアルゴリズムを開発し、King's graph に関しては D. Wave 社で標準的に使われている Cai のアルゴリズムを上回る性能を示すことを示した。今年度は多体相互作用を含むイジングモデルをスピン変数を追加することで高々 2 体相互作用を持つイジングモデルに変換するためのアルゴリズムをテーマにプログラミングコンテストを開催した。800 名の登録者、うち 110 名がコードを提出し大きな反響があり、優勝者のコードは先行研究の結果を大きく上回る性能を示した。

[1] Y. Sugie, Y. Yoshida, N. Mertig, T. Takemoto, H. Teramoto, A. Nakamura, I. Takigawa, S. Minato, M. Yamaoka, and T. Komatsuzaki: "Graph Minors from Simulated Annealing for Annealing Machines with Sparse Connectivity," In Proc. of 7th International Conference on the Theory and Practice of Natural Computing (TPNC 2018), (LNCS 11324, Springer), pp. 111-123, Dec. 2018.

[2] T. Takemoto, M. Normann, M. Hayashi, S. Susa-Tanaka, H. Teramoto, A. Nakamura, I. Takigawa, S. Minato, T. Komatsuzaki, and M. Yamaoka, "FPGA-Based QBoost with Large-Scale

Annealing Processor and Accelerated Hyperparameter Search,” 2018 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig 2018), Cancun, Mexico, December 3-5, 2018.

## § 2. 研究実施体制

### (1) アーキテクチャグループ

① 研究代表者: 本村 真人 (北海道大学大学院情報科学研究科 教授)

#### ② 研究項目

- ・ アンサンブル・オンライン学習エッジアクセラレータ
- ・ 多目的エネルギー最小化エンジン

### (2) 機械学習グループ

① 主たる共同研究者: 有村 博紀 (北海道大学大学院情報科学研究科 教授)

#### ② 研究項目

- ・ 高精度アンサンブル・オンライン学習
- ・ 高信頼性・安全性の学習アルゴリズム
- ・ 時空間展開型-機械学習応用

### (3) 社会応用アルゴリズムグループ

① 主たる共同研究者: 湊 真一 (京都大学情報学研究科 教授)

#### ② 研究項目

- ・ アニーリング計算の応用展開・評価
- ・ 次世代アニーリング計算モデル
- ・ 時空間展開 HW-SW 統合アルゴリズム
- ・ 時空間展開型-最適化問題応用

### (4) 数理科学グループ

① 主たる共同研究者: 坂井 哲 (北海道大学大学院理学研究院 准教授)

#### ② 研究項目

- ・ 最適グラフ埋め込み指導原理
- ・ 確率セルラオートマタ(SCA)型高速サンプリング理論
- ・ 対結合ゆらぎ基底状態安定性理論
- ・ 数理モデル社会展開