

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 針原 佳貴

現代の科学技術において、数理的最適化が様々な分野を支える基盤となっており、近年ハードウェアを用いた計算の高速化も重要性を増している。最適化のためのアクセラレータとして、GPU、FPGAやASIC等に加えて、最近、組合せ最適化問題などへの応用を目的として、イジング問題のための専用マシンの研究・開発が活発に行われている。本論文は、イジング問題に対するアクセラレータとして光パラメトリック発振器(optical parametric oscillator; OPO)とFPGAを併用した光電子計算アーキテクチャを提案し、数理モデリングによるシミュレーション、実験結果との比較による数理モデルの検証、さらには組合せ最適化問題に関して既存アルゴリズムとの比較による性能評価を報告している。

本論文は「Realization and Evaluation of Measurement Feedback Coherent Ising Machines for Combinatorial Optimization Problems」（組合せ最適化問題のための測定フィードバック型コヒーレント・イジングマシンの実現と評価）と題し、8章からなる。

第1章「Introduction」（序論）では、現在の計算機アーキテクチャと計算複雑性理論の概要を述べ、本研究の位置づけを示している。まずプロセッサ性能の変化と関連する技術についてまとめている。次に、NP困難である組合せ最適化問題と計算複雑性理論についての導入を行い、NP困難問題に対するアクセラレータの意義を述べている。さらに、物理系を用いた新たな計算手法を紹介し、イジング問題に特化した専用マシンの関連研究についてまとめている。特に、その一つとして光学系を用いたコヒーレント・イジングマシン(coherent Ising machine; CIM)に関連した先行研究を紹介し、その課題とともに本論文の意義を述べている。

第2章「Maximum Cut Problem」（最大カット問題）では、本論文の主な対象問題であるグラフの最大カット問題(maximum cut problem; MAX-CUT)を定義し、近似アルゴリズムとヒューリスティクスを概観している。まず基礎的なグラフの定義からはじめ、次にMAX-CUTの定義とこれに対する既存手法について簡潔にまとめている。具体的には、半正定値計画(semidefinite programming; SDP)緩和、焼きなまし法(simulated annealing; SA)、ニューラルネットワークを用いた手法などのアルゴリズムを解説している。また、効率的に計算可能なクラスとMAX-CUT問題の近似可能性についても言及している。

第3章「Degenerate OPO」（縮退OPO）では本論文で用いられる縮退OPO(DOPO)と定式化について説明している。系のハミルトニアン、マスター方程式を経てFokker-Planck方程式により表現される位相空間における主要な定式化を説明した後、DOPOのTruncated Wigner表示に基づく確率微分方程式の定式化を導入している。また、DOPOの分岐など基本的な性質についても述べている。

第4章「Coherent Ising Machine」（コヒーレント・イジングマシン）では測定フィードバックCIMの数理モデルを提示している。先行研究での欠点であったスケラビリティの問題を解消する具体的な実装方法が提案され、確率微分方程式を用いた数理モデルにより定式化されている。また、測定フィードバックに用いられるFPGAの設計も述べている。

第5章「Numerical Simulation」(数値シミュレーション)では前章のモデルに基づく数値計算により実機の計算性能・計算時間が予測されている。数値計算手法とパラメータについて述べた後、具体的な問題を与えた際のDOPO時間発展を例示している。ランダムなベンチマークグラフセットを用いて、頂点数 $800 \leq n \leq 20000$ のスパースなグラフで既存手法と比較してほぼ同等な解が得られることを示している。また、CPUの単一コア・単一スレッド上で動作する半正定値計画緩和や焼きなまし法と比較し、グラフが十分密である時の提案システムの有効性が予測されている。

第6章「Experimental Results and Validation」(実験結果と検証)では頂点数 $n \leq 100$ の問題が実装可能な実機に関して、数値シミュレーションとの比較において実機の計算性能が検証されている。単一試行の時間発展はシミュレーション結果とよく一致する。実験結果より、最適解付近にピークを持つ分布が得られることが示されている。また、立方グラフでのスケール評価、厳密解正答率の分布、パラメータの一致が確認されている。

第7章「Performance Evaluation with Larger Problems」(大規模問題での性能評価)では前章より大規模な問題($n=2000$)において、近似アルゴリズム及びヒューリスティクスとの比較を中心として解析されている。CPUの単一コア・単一スレッド上で実装されたSAと比較し、 $n=2000$ の場合に平均ケースで12倍高速であるという結果が得られている。

最後に第8章「Conclusion」(結論)では、本論文の成果を簡潔にまとめると共に、関連した実装の可能性、実用上の課題、物理的性質について議論し、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文は組合せ最適化問題のための光電子計算システムを提案し、数値シミュレーション解析や実機との比較によってMAX-CUT問題における有効性を確かめ、組合せ最適化問題への物理系を用いた新たな計算システムの可能性を示すことにより数理情報学分野に寄与した。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。