

論文の内容の要旨

論文題目 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)

氏名 針原 佳貴

計算機性能の向上に伴い、莫大なデータと数値最適化に支えられ洗練された現代社会が実現されてきた。組合せ最適化問題は様々な分野に現れ、物流の配送計画、無線通信のリソース割当、機械学習等に用いられるが、その多くがNP完全あるいはNP困難問題に含まれており効率的なアルゴリズムの構築はできないと信じられている。これらの問題に対しては様々な近似アルゴリズムやヒューリスティクスの構築が試みられてきた。一方、ムーアの法則の鈍化に見られる半導体集積化の限界は、計算機プロセッサのマルチコア・メニーコア化を加速させ、機械学習分野のディープラーニングや、計算科学でのシミュレーションの多くがGPUや専用プロセッサ上で計算されている。このような計算機アーキテクチャのトレンドを背景として、最近では複雑な物理現象を用いて計算困難な問題にアプローチするハードウェアヒューリスティクスとしての物理計算機の構築が盛んである。2011年より、レーザーや光パラメトリック発振器(OPO)を用いてNP困難な組合せ最適化問題であるイジング問題やグラフ最大カット問題(MAX-CUT)を解く一連の提案及び実装が行われている。このコヒーレント・イジングマシン(CIM)の実現の可能性が模索され、これまで小規模な問題を用いて実験のデモンストレーションが行われていた。

しかし、これら先行研究で提案されていたCIMでは光遅延線によるOPOの結合におけるスケーラビリティに問題があった。これは、 n 個のOPOパルス間の結合を実現するためには最大で $n - 1$ 本の光遅延線の実装と同時安定化が必要なためである。実社会における現実的なサイズの問題を解くことを考えた場合、大きな問題にスケールさせる必要があるが、現状の実験系の安定度では実現が難しいと考えられる。そこで、我々はスケーラビリティの問題を解決するため、光結合を測定と外部の演算回路で模擬する測定フィードバック方式を提案した。

この測定フィードバック型CIMの利点は、 n パルスのOPO間の最大 $O(n^2)$ 本の結合が1本の測定フィードバック回路で実現可能なこと、それにより応用問題として現実的なサイ

ズ($100 \leq n \leq 10^5$)が現実の実験系として実装可能なことである。

本論文ではまず、第1章において現在の計算機アーキテクチャと計算複雑性理論の概観を述べ、物理実装を用いたアプローチについて述べる。続く第2章では、本論文の主な対象問題である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示す。第3章では、OPOの位相空間におけるTruncated Wigner表示に基づく確率微分方程式の定式化を行い、第4章で、測定フィードバックCIMの数理モデルを提示する。このモデルは実機の計算性能を予測し、これにより実機を構築した際の計算性能・計算時間が見積もられることを第5章で示す。このシミュレーションに基づき、実験による実装と実機を用いたベンチマークが行われたため、第6,7章にその結果を示す。特に、第6章は数値シミュレーションとの比較、第7章は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構成されている。CPUの単一コア・単一スレッド上で実装された焼きなまし法(Simulated Annealing; SA)と比較し、 $n = 2000$ のMAX-CUTで10倍以上高速であるという結果が得られた。

これまでCIMと現代コンピュータとの性能比較は上述のスケラビリティの観点から困難であった。本論文ではそれを解決するための構成としてFPGAを用いた測定フィードバック手法を提案し、数値的・実験的に計算性能の向上を示したことが一つの大きな成果である。本研究成果は今後新たな計算機アーキテクチャの可能性を切り開く有用な知見となることが期待される。