

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子人工脳

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 28 年度

研究開発課題名：

コヒーレントイジングマシンの産業利用に向けた

スパース性を用いた最適化手法の開発

研究開発機関名：

東北大学

研究開発責任者

大関 真之

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

平成 28 年度は、イジング型のハミルトニアンに帰着されるスパースな 0-1 信号の再構成問題や、連続最適化との併用により、スパースな連続値信号の再構成問題へコヒーレントイジングマシンを利用する方法論を確立する。NII 宇都宮氏、宮崎氏との連携により、実装に伴うボトルネックを回避する確実性のある問題の準備と、取り除くべき問題点の指摘を行うことにより、コヒーレントイジングマシンの進化の方向性を策定する。

また量子アニーリングや熱アニーリングと同様に、求めたい最適化問題の解への収束を示すために、対応するフォッカープランク方程式を利用して、断熱定理に由来する最悪評価に基づき、確実に最適解へ行き着く操作法の確立を目指す。

イジングマシンだけでなく XY マシンについても、その性能向上につながる理論的解析を行う。具体的には、XY マシンの最適化問題及びサンプラーとしての利用の要となる定常状態への収束の加速に集中する。特に、XY マシンのハードウェア上の制約を検討し、XY マシンに対応するフォッカープランク方程式の固有値に関する議論から、物理相で実装可能な加速法を選定、高速な量子演算装置の基盤確立を目指す。

また計算速度向上の別の角度からのアプローチとして、交換モンテカルロ法のランジュバン方程式の導出、およびそのフォッカープランク方程式の導出を行う。交換モンテカルロ法を用いた計算速度の向上に関して数理的側面から解決策を見出し、そのコヒーレントイジングマシンへの応用方法の確立を目指す。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

スパースな 0-1 信号の再構成問題については NII 宇都宮氏、宮崎氏との連携のもと、圧縮センシングに相当する最適化問題について実行可能であることが明らかとなった。さらに理論的な解析が急速に進み、当該モデルにレプリカ対称性の破れを考慮する必要があること、従来の最適化手法では解くのが難しいと考えられる状況証拠を得ている。一方で、コヒーレントイジングマシンによるシミュレーションを行うと、そのような困難さが見られず最適解へ収束していることから、コヒーレントイジングマシンの革新的な性能を示すベンチマークとして良好な問題であることが判明した。これらの成功を受けて、スピングラス理論を併用してダイナミクスについての解析を実施するという新たな目標を設定している。

XY マシンの定常状態への収束の加速については、XY マシンがパルス光の干渉を利用してしていることを考慮した結果、詳細釣り合いの破れを利用した定常状態への収束の加速には非常に高度なパルス光制御技術が必要であることが明らかとなった。パルス光の制御が可能であった場合の具体的な加速器の実装法をいくつか考案したが、いずれも克服すべき制御技術の課題が山積しており、物理相での実装よりも FPGA を

用いた擬似的な任意相互作用によって加速器を実装することが得策であるとの結論に至った。

交換モンテカルロ法を用いた計算速度向上については、玉手氏らの研究により、交換モンテカルロ法の実装が比較的容易に行えることがわかってきた。そこで、どのような交換レートを設計すべきかについて、確率論と最適化の面から交換レートの改善手法について取り組んだ。これにより計算速度を向上させるには最適フィードバック制御問題を解けばよいことが判明し、最適な交換レートを得るための最適化問題を設定し、それが制御系設計手法で解くことができることを示した。交換レートを得るための計算時間の低減化が当面の課題である。

2-2 成果

スパースな 0-1 信号の再構成問題については、圧縮センシングに相当する最適化問題について実行可能であることが明らかとなった。またコヒーレントイジングマシンの革新的な性能を示すベンチマークとして良好な問題であることが判明した。

XY マシンの定常状態への収束の加速については、物理相での実装よりも FPGA を用いた擬似的な任意相互作用によって加速器を実装することが得策であるとの結論に至った。

交換モンテカルロ法を用いた計算速度向上については、計算速度を向上させるには最適フィードバック制御問題を解けばよいことが判明し、最適な交換レートを得るための最適化問題を設定し、それが制御系設計手法で解くことができることを示した。

新しい発見が出てきたため、論文等の公表時期については遅れている。次年度以降、上記の進捗成果を公表する予定である。

2-3 新たな課題など

スパースな 0-1 信号の再構成問題である圧縮センシングに相当する最適化問題において、スピニングラス模型特有の困難さであるレプリカ対称性の破れを考慮する必要があることがわかった。理論的には解析が不可能となるわけではないため、その観点からの解析を引き続き行う。一方で実用面からはコヒーレントイジングマシンそのものはレプリカ対称性の破れに妨げられることなく性能を発揮しているため、量子アニーリングマシンをはじめとする他のアーキテクチャよりも優れた点が発見されつつある。この新たな課題は、コヒーレントイジングマシンの真価を問う重要な問題であるため、次年度以降集中的に取り扱うこととした。

定常状態への収束の加速については、FPGA を用いて加速器を実装する場合、パルス光間の相互作用に大きな自由度が出てくる。この自由度を利用することによって、様々な緩和の加速法を使用することができるが、どの加速法がより効果的かには議論の余地が残る。特に 2 次元 XY モデルの KT 相など通常べき的緩和を示すことが知られている問題に対していかに高速に定常状態への緩和を促すかは、計算困難とみなされていたあるクラスの最適化問題を実用的に解決するのに重要な課題である。

効果的な加速法を検討する中で、最適な加速アルゴリズムが満たすべき条件を得ることに成功しているが、具体的な最適アルゴリズム構築には至っていない。今後、既存の加速法であるハミルトニアンモンテカルロ法などを参考にしながら、最適アルゴリズムの構築を目指す。

交換モンテカルロ法における最適交換レートの問題は、双線形行列不等式 (BMI) の問題になるため、問題を緩和すると線形行列不等式 (LMI) の形に落とすことが可能である。双線形行列不等式は、一般にはNP困難な問題であるが、制御理論における知見より、あるクラスのBMIの問題は凸最適化であるLMIの問題を解くことと等価になることが知られている。コヒーレントイジングマシンにおける問題について、この最適交換レートがLMIで求められる条件の導出、あるいは知見を得ることは、実機への応用上重要であるため、実機における操作上の制約も含めてLMI等価条件の導出を目指す。

3. アウトリーチ活動報告

「量子コンピュータが人工知能を加速する」を西森秀稔氏と共著で日経BPから出版した。また「先生、それって量子の仕業ですか？」を大関が単著で小学館より出版した。