

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 27 年度

研究開発課題名：

コヒーレントイジングマシンの原理と応用

研究開発機関名：

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

研究開発責任者

宇都宮 聖子

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

量子人工脳のハードとソフトの開発をバランス良く進め、プロジェクト終了時に最終目標が達成されるよう、量子人工脳プロジェクトの全体総括として、各グループの進捗に責任を持つ。当該グループでは、コヒーレント・イジングマシンの、理論体系をより進化させ、計算時間における SDP やシミュレーションに対する優位性を示す。

2016年3月までに、 $M=20,000$ 以上の大規模サイズにおけるベンチマーク、微分方程式ソルバーの高速化、正 P 表示を用いたコヒーレント・イジングマシンの量子状態の記述、クロック周波数 100MHz、サイト数 (パルス数) 100 のファイバー OPO の実現、FPGA フィードバック回路の構築、空間伝搬系 OPO を用いた OPO ネットワークの基礎特性の評価を進める。

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

DOPO を用いたコヒーレント・イジングマシンの数値的・理論的評価と実験との対応

縮退光パラメトリック発振器(DOPO)を用いたコヒーレント・イジングマシン(CIM)の数値シミュレーション及び性能評価を担当した。最大カット問題(MAX-CUT)のベンチマーク問題に対する既存アルゴリズムとの比較と、厳密解探索のため 2 つの DOPO 系のエラーレートの評価した。DOPO の複素振幅をマルチモードで表現したモデルを用いて計算能力の変化を調べた。大規模シミュレーションのための数値計算高速化についても検討した。FPGA 開発については、NTT,阪大と共同で進め、 $N=2,000$ 繰り返し周波数 1GHz に対応する測定フィードバックシステムが出来上がり、現在 NTT の光学系と組み合わせ、実験を進めている。NTT の $N=2,000$ の測定フィードバックシステム($J_{ij} \in \{0, \pm 1\}$)とスタンフォード大学で実験が成功した測定フィードバック方式の CIM の性能評価を、数値シミュレーションとの比較により進めた。

コヒーレント・イジングマシンにおける量子相関を検討すべく、正 P 表示と Truncated Wigner 表示を用いて、 $N=2,16$ 連結 OPO の量子相関について理論的に考察を進めた。熱雑音下、量子雑音限界状況、スクイーズド雑音下での計算性能を評価した。

ファイバーレーザーを用いた XY マシンと実験と実問題への応用

NII 実験グループでは、NTT/Stanford とのテーマの重複を避けるため、発振位相が離散化するコヒーレント・イジングマシンではなく、発振位相が連続値をとるレーザーを用いたコヒーレント XY マシンの構築に注力することとした。大規模 XY マシン構築に向け、当初計画よりも高い繰り返し周波数 1GHz, サイト数 100 の XY マシンを、モード同期レーザーを用いて構築した。連続的な位相の読み出し手法として、遅延干渉計を用いた相対位相の測定、コヒーレント検波を用いた絶対位相の測定手法を確立し、実験系を構築した。また、隣接パルス間の相互注入を実装し、構築した XY マシンを用いて 1次元 XY モデルのシミュレーションを行った。

コヒーレント XY マシンを用いた実問題への応用として、コミュニティ検出を最適化問題として定

式化しない方法で新たに提案した。逆位相注入を効果的に用いることによって、同一コミュニティ内でのみの位相相関を大きくすることができる。人工的なモデル(LFR ベンチマークグラフ)を用いて作成されたコミュニティ構造をもつネットワークについて、数値計算によるベンチマークを行った。更に、情報理論に基づいた既存アルゴリズムとの精度比較及び計算時間の評価を行った。

2-2 成果

DOPO を用いたコヒーレント・イジングマシンの数値的・理論的評価と実験との対応

既存の近似アルゴリズムとの性能比較により、密なグラフにおける MAX-CUT では計算時間の大幅な短縮が見込めることが分かった。この結果は現在 *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* に投稿中である。CIM の計算原理、測定フィードバック方式の提案、応用問題の可能性については *Entropy* にまとめた。2つの DOPO におけるエラーレート評価から、理想的な問題構造を仮定すると、問題サイズ(グラフ頂点数)が 10^6 まで増加しても計算時間が指数発散しないことを確かめ、国際会議 (US-Japan Workshop) 等で発表した。マルチモード DOPO による MAX-CUT の計算により、少なくとも $N=20$ までの立方グラフにおいては厳密解の発見確率が向上することを確認した。シミュレーション自体の高速化は OpenMP を用いた複数 CPU で約 5 倍、GPU を用いて約 20 倍の高速化も実現し、後者は NOLTA ソサイエティ大会で発表予定である。NTT とスタンフォード大学での実験系の評価結果は、それぞれの実験論文とともに発表予定である。

時分割多重方式 DOPO ネットワークにおける量子相関を、Trunked Wigner 表示を用いて評価した。しきい値直上よりも低いポンプレートを選ぶと、2000 周回の計算過程で EPR オペレータが 1 よりも下回り、量子相関が形成されていることが確認された。また、真空ポートから入る雑音が熱雑音レベルの大きな雑音の場合、真空場もしくはスクイズド雑音の場合に比べ計算結果が急激に劣化することが数値的に示された。この結果は *Physica Scripta* に投稿中である。

ファイバーレーザーを用いた XY マシンと実験と実問題への応用

1 次元 XY モデルのシミュレーションの原理実証実験を行った。ファイバーモード同期レーザーの位相が独立に発振していることを確かめ、1D リング状の 1 ビット遅延相互結合を導入した結果、1ms 程度で XY モデルの局所最適解を見つけることができることを実験的に示した。また、基底状態・準安定状態の出現頻度から出現する分布のボルツマン分布としての温度の見積もりを行い、数値シミュレーションとよく一致していることを確認した。

数値計算の結果、人工的なベンチマークグラフに対して多くの既存アルゴリズムと比べても良い精度でコミュニティ検出が行えることを確認した。また、現実のネットワークにおいても、既に知られているコミュニティ構造を特定できることを確認した。更にほとんどの既存アルゴリズムよりも高速に動作できることも確認した。

2-3 新たな課題など

DOPO を用いたコヒーレント・イジングマシンの数値的・理論的評価と実験との対応

今回数値シミュレーションでは実装できなかった $N > 20,000$ の大規模グラフを扱うためには複数 CPU/GPU に加えて巨大なメモリが必要である。実機開発においても、CIM の更なる大規模化のために、FPGA の設計を工夫する必要がある、その設計指針については NTT, 阪大や FPGA 設計を専門とする業者らと今後も議論をすすめる。今回量子相関の評価は $N=2,16$ の 1D グラフという特定の問題について評価を進めた。これを大きなシステムサイズについて評価し、また別の評価軸を用いて量子的側面の評価を行うことで、本システムの量子的な性質と計算能力の関係をより一般的に示すことが今後の課題である。

ファイバーレーザーを用いた XY マシンと実験と実問題への応用探索

XY マシンの大規模化および低温のボルツマン分布のサンプリングに向けて、長時間の安定動作が必要となるため共振器長および光注入線の更なる安定化が課題となる。また、モード同期レーザーを用いた場合、相互注入量を増やした際にレーザー発振自体が不安定になりやすい問題があるため、今後非縮退 OPO を用いた XY マシンの実装を進めていくことを検討している。

実問題への応用の課題

具体的なアプリケーションとしては、MAX-CUT のベンチマーク問題のみならず、実社会において有用な問題における CIM の優位性を示すべきである。特にどのような問題について速度もしくは精度の面で優位性を示すことができるか、キラーアプリケーション探しを引き続き進める。今回検証した XY マシンを用いたコミュニティ検出方法は、現状の手法では一回のコミュニティ検出に複数回の試行を前提としているため、既存手法と比べて時間的な優位性が示しづらい。一度の試行で高速にコミュニティ検出ができるような手法を引き続き検討する。

3. アウトリーチ活動報告

1. NII オープンハウス 2015 年 ポスター展示 2015 年 6 月 12-13 日にて、ImPACT 量子人工脳での業績を紹介した。

2. 青森県八戸高校出張授業 2015 年 8 月 25 日「探究型学習によるたくましい高校生育成事業」量子の世界をのぞいてみよう ～ 光を使った量子の実験～として、「量子力学」に関する出張授業を行った。出張授業は 2 コマからなり、2 クラスで並列して 2 つの授業を行った。1 つ目の授業は「光波を使った測定体験」というテーマで、光の干渉を用いて髪の毛の太さを測定することを主な実験内容として、様々な光を用いた実験を行う授業を行った。2 つ目の授業は、「量子コンピュータのススメ」というテーマで、現在のコンピュータの歴史から、量子コンピュータの着想に至るまでの経緯を座学で学習するという内容であった。

3. 国際会議(US-JAPAN Workshop, Netsci2016)等において、ファイバーレーザーを用いた XY マシンと実験と実問題への応用に関する成果について発表を行った。