

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 2 9 年 度

研究開発課題名：

統計力学による CIM 実装アルゴリズムの最適設計

研究開発機関名：

国立大学法人 東京工業大学

研究開発責任者

青西 亨

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

コヒーレントイジングマシン(CIM)は、組み合わせ問題などの計算をスケーラブルかつ高速に処理できるイジング計算アーキテクチャとして、大きな期待を集めている。現在、CIM を実用化するにあたり、問題となっている事項の一つとして、実装アルゴリズムの最適設計のための数理的基盤が十分に整備されていないことが挙げられる。これまで当該研究プログラムにおいて、CIM への実装を目的としたイジング計算モデルに関する研究は、数値実験を中心に行われてきた。情報統計力学の体系では、これまで当該プログラムで研究対象とされてきた多くのモデルを包含しており、原理的にこれらを統計力学的方法により解析することが可能である。我々は、当該プログラムで研究対象としてきたモデルを含むイジング計算の標準モデルに注目し、これらを CIM に実装したときの性能を評価するための統計力学的方法を確立することを最大の目的としている。以下に示す研究課題で取り扱うモデルは、統計力学や理論計算機科学の標準形であり、情報理論や計算機科学の多くのモデルと関連が深い。統計力学を用いて CIM に実装したこれら標準モデルの描像を明らかにすることにより、広いクラスのモデルやアルゴリズムを CIM に実装する際の最適設計指針を与えることができる。

当該年度においては、H28 年度に開発した統計力学的解析手法をフラストレーションがある系へ拡張することを第一目標とした。まず、無限ローディング Hopfield モデルの解析手法の開発を行う。この系は、H28 年度に研究対象としたモデルと共通した数理的構造を持っており、フラストレーションがある系へ理論を拡張する際の解析対象として適切である。次に、山本 ImPACT 全体の動向を鑑み、応用の観点で重要な CDMA マルチユーザー復号器に着目し、その巨視的性質を明らかにした。また、これらモデルを CIM に実装する際には、FPGA などのハードウェア的な制約を受ける。この制約が系性能へ与える影響を評価することは、ハードウェア開発の観点からも重要である。当該年度においては、離散シナプスを持つ Hopfield モデルに着目し、シナプスの量子化が系性能に与える影響を評価するための手法を開発した。

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

無限ローディング Hopfield モデルの解析

無限ローディングとは、システムサイズに対して記憶パターン数がほぼ同じ割合の場合である。この状況での Hopfield モデルは、フラストレーションを持ち、強磁性モデルや有限ローディング Hopfield モデルの解析方法をそのまま適用できない。我々は、H28 年度に開発した解析方法を、Self-consistent signal-to-noise analysis (SCSNA) と呼ばれる解析方法へ拡張し、フラストレーションを持った CIM 実装 Hopfield モデルの解析を行なった。研究開発責任者の青西は、強磁性相互作用をもつ蔵本振動子の統計力学の解析手法を、フラストレーションを持つ Hopfield 型モデルに拡張している。同様の方法により、CIM で構成した無限ローディング Hopfield モデルの巨視的方程式を導出した。

CIM に実装した Hopfield モデルの臨界記憶容量の理論値を巨視的方程式より求め、通常のイジングスピンの場合と比較した。特にポンプレートと相互作用の強度に着目し、これらのパラメータを調節することにより、通常のイジングスピン系に漸近することを確認した。

CDMA マルチユーザー復号器の解析

上記の無限ローディング Hopfield モデルの解析方法を確立した後、次の解析目標として、山本 ImPACT 全体の動向を鑑み、応用の観点で重要なイジング計算モデルである CDMA マルチユーザー復号器に着目した。

SCSNA は、Hopfield モデル以外にも多くのモデルを取り扱うことが可能である。無限ローディング Hopfield モデルで確立した解析方法は、その他の CIM に実装したイジング計算モデルの解析に適用可能である。我々は上記研究で開発した解析手法により、CDMA マルチユーザー復号器の巨視的方程式を導出した。相図を作成し、通常のイジングスピン系と比較した。

離散シナプスを持つ Hopfield モデルの解析

イジング計算モデルを CIM に実装する際には、FPGA などのハードウェアの制約を受ける。現時点の CIM の実機では、シナプスが-1、0、+1 の離散値しか取れず、この量子化が系の性能にいかに関与を及ぼすか明らかでない。我々は、離散シナプスを持つ Hopfield モデルに着目した。シナプスの量子化は等価なガウスノイズに置き換えることができることが先行研究で示されている。この解析手法と我々が開発した解析手法を組み合わせ、CIM に実装した離散シナプスを持つ Hopfield モデルの巨視的方程式を導出した。連続値のシナプスのモデルと比較し、シナプス量子化の影響を定量的に評価した。

2-2 成果

無限ローディング Hopfield モデルの解析

- ・ 巨視的方程式の導出に成功した。数値的検証により、導出した巨視的方程式の妥当性を確認した。
- ・ CIM に実装した無限ローディング Hopfield モデルの臨界記憶容量を理論的に示した。
- ・ CIM に実装した無限ローディング Hopfield モデルの相図を作成した。ポンプレートを上昇、相互作用の強度を下げると、通常のイジングスピン系に臨界記憶容量が漸近することを示した。

CDMA マルチユーザー復号器の解析

- ・ CDMA マルチユーザー復号器の CIM への実装方法を考案した。
- ・ 巨視的方程式の導出に成功した。数値的検証により、導出した巨視的方程式の妥当性を確認した。
- ・ この系の相図を作成した。ポンプレートを調整すると、系の性能が最大化し、通常のイジングスピン系と性能が一致する場合があることを示した。

離散シナプスを持つ Hopfield モデルの解析

- ・ 巨視的方程式の導出に成功した。数値的検証により、導出した巨視的方程式の妥当性を確認した。
- ・ シナプス量子化による性能劣化を定量的に評価した。連続値シナプスと比較して、記憶容量が約 3 割減少することを示した。

2-3 新たな課題など

連続値シナプスと同等な性能を得るのに、シナプスを何 bit で表現すれば十分なのかを検討する。

3. アウトリーチ活動報告

該当事項なし