

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Chaotic-Amplitude-Controlled Coherent Ising Machines: Extensions to Quadratic Unconstrained Binary Optimisation and Simplified Models
著者(和文)	MASTIYAGEDON SUDEERA HASARANGA GUNATHILAKA
Author(English)	Sudeera Hasaranga Gunathilaka Mastiyage Don
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第371号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:瀧ノ上 正浩,秋山 泰,小野 功,高安 美佐子,小野 峻佑,青西 亨
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第371号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名		MASTIYAGE DON SUDEERA HASARANGA GUNATHILAKA	
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	瀧ノ上 正浩	教授	審査員	小野 功	教授
	審査員	秋山 泰	教授		青西 亨	特定教授
		高安 美佐子	教授			
		小野 峻佑	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、Ising 型計算機の 1 つであるコヒーレントイジングマシン (Coherent Ising Machine: CIM) を 2 次制約なし 2 値最適化 (Quadratic Unconstrained Binary Optimisation: QUBO) に対しても適用できるように拡張するとともに、その有効な簡略化モデルを提案するものであり、「Chaotic-Amplitude-Controlled Coherent Ising Machines: Extensions to Quadratic Unconstrained Binary Optimisation and Simplified Models」と題し、英文 6 章から構成される。

第 1 章「Introduction」では、本研究の背景と目的を述べている。まず、組み合わせ最適化問題である Ising 最適化と QUBO について述べ、D-Wave などの量子アニーラーの原理を概説している。次に、本研究で焦点を当てる CIM の構造とその原理を説明し、CIM の数理モデルである Wigner 形式と Positive-P 形式の確率微分方程式を紹介している。また、CIM は各スピンの振幅が変化するソフトスピンであることを述べ、スピン振幅の変化が結合項と Zeeman 項のサイズの不一致を引き起こし、基底状態を変化させる可能性があることを指摘している。そして、この不一致の問題をカオス振幅制御によって解決した Inui モデル (Inui Model: IM) を紹介している。さらに、Inui モデルが QUBO を取り扱えないことや Wigner や Positive-P 形式であるための計算量の問題を指摘し、本研究の目的が、Inui モデルを QUBO に対しても適用できるように拡張することと、より計算量が低い簡略化モデルを構成することだと述べている。最後に関連研究を一覧し、本論文の構成を説明している。

第 2 章「QUBO-Extended IM CIM for Compressed Sensing」では、Inui モデルを QUBO に拡張し、QUBO の例である L0 正則化圧縮センシングにおいてその性能を評価している。まず、カオス振幅制御によりスピン振幅が目標値に均一化されることを利用して、Inui モデルを QUBO に拡張している。次に、先行研究で Aonishi らが提案した CIM-Classical Digital Processor アプローチと呼ばれる方法に基づき、QUBO 拡張 Inui モデルを L0 正則化圧縮センシングに適用している。まず、ランダムに生成した人工データを用いて QUBO 拡張 Inui モデルを評価し、カオス振幅制御がない Aonishi らのモデルと比べて統計力学で予測される基底状態により近づくことを示している。次に、磁気共鳴画像を用いた数値実験により、カオス振幅制御がない Aonishi らのモデルと比べて QUBO 拡張 Inui モデルは再構成精度が高いことを示し、カオス振幅制御による解探索が有効であると主張している。

第 3 章「Simplified IM CIM with Zeeman Terms」では、Inui モデルを計算量が低いモデルへ簡略化している。まず、先行研究で提案された CIM での量子雑音を無視する近似をした平均場モデルと呼ばれるモデルに、カオス振幅制御によるスピン振幅均一化を利用して適切なスケールの Zeeman 項を組み込むことで、Inui モデルの簡略化を行なっている。次に、Sherrington-Kirkpatrick 問題において、Inui モデルと簡略化 Inui モデルを比較し、両者に性能の差がないことを示している。また、先行研究で提案された Zeeman 項のスケールを制御する他の方法と比べて簡略化 Inui モデルの性能が高いことを示し、カオス振幅制御による解探索が有効であると主張している。

第 4 章「QUBO-Extension of the Simplified IM CIM for Compressed Sensing」では、第 2 章

と第3章の成果を組み合わせ、簡略化した Inui モデルを QUBO に拡張している。まず、第2章と同じ手法で簡略化 Inui モデルを QUBO に拡張している。次に、第2章と同様に QUBO に拡張した簡略化 Inui モデルを L0 正則化圧縮センシングに適用している。まず、ランダムに生成した人工データを用いて、QUBO 拡張した Inui モデルと簡略化 Inui モデルはほぼ同様に統計力学で予測される基底状態に近づくことを示している。次に、磁気共鳴画像を用いた数値実験においても、QUBO 拡張した Inui モデルと簡略化 Inui モデルはほぼ同等の再構成精度であることを示し、計算量が低い簡略化 Inui モデルの優位性を主張している。

第5章「Overall Discussion and Future Work」では、他の QUBO への提案モデルの適用可能性を論じている。また、簡略化 Inui モデルは大規模並列計算に適しており、Field Programmable Gate Array やスーパーコンピュータへの実装の試みがあることを述べている。さらに、本研究と関連研究の知見を対比しながら CIM における量子ノイズの役割について議論している。最後に、提案モデルの問題点を述べ、どのように改善すべきかを考察している。

第6章「Dissertation Summary and Conclusion」では、本論文を要約するとともに、結論を述べている。

以上を要するに、本論文は CIM を QUBO に対しても適用できるように拡張するとともに、その有効な簡略化モデルを提案し評価したものである。本研究で示した CIM 上での QUBO の実装方法は CIM の適用範囲を大きく広げるものである。また、その簡略化モデルは大規模並列計算で有用であるため、工学上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。