

## 審査の結果の要旨

氏名 宮原 英之

システムのパラメータ推定や数理的性質の解明は非常に重要な研究課題である。近年、機械学習の研究が盛んであり、多くのアルゴリズムが提案されている。中でもEMアルゴリズムや変分ベイズ法は基本的なアルゴリズムであり、広く利用されている。しかし、これらのアルゴリズムは初期値に依存して性能が大きく異なるという問題点が知られている。よって初期値に依存しないあるいは依存性が低いアルゴリズムの開発は重要である。他方で、システムの数理的性質、たとえば生物学や経済学などの応用と関連して、空間的に温度が変わるシステムや細胞増殖するシステムの数理的な性質を明らかにすることも重要な課題である。本論文は、量子統計力学に基づいたパラメータ推定手法の提案と古典統計力学に基づいた空間的に温度が変わるシステムや細胞増殖するシステムの数理的性質の解明を主な目的としている。

本論文は「A Study on Mathematical Informatics with Classical and Quantum Statistical Mechanics」(古典および量子統計力学を用いた数理情報学的研究)と題し、8章からなる。

第1章「Introduction」(序論)では、機械学習の研究や小さい系の統計力学の研究の概要を解説し、本研究の位置付けを示した。また、なぜ古典および量子統計力学的なアプローチを採用したかを説明した。

第2章「Learning algorithms」(学習アルゴリズム)では、EMアルゴリズム、変分ベイズ法の説明を行なった。EMアルゴリズム、変分ベイズ法は、機械学習における基本的かつ重要なアルゴリズムである。第4章、第5章では、これらの量子力学的なアルゴリズムへの拡張を提案するが、その数学的な準備を与えるものである。

第3章「Review of techniques developed in physics」(物理学で開発された手法のレビュー)では、物理学の分野で開発されたいくつかのアルゴリズム、統計力学的な定理について説明した。はじめに、計算アルゴリズムとして量子アニーリングについて説明した。量子アニーリングは量子力学に基づく最適化アルゴリズムである。続いて、統計力学の定理として揺らぎの定理について説明した。これらのアルゴリズムや定理は、第4章から第7章の研究における重要な基盤であり、本博士論文の研究にどのようにつながった

かを説明した。

第4章「Quantum annealing variational Bayes inference」（量子アニーリング変分ベイズ法）では、変分ベイズ法を量子力学的に拡張することで、“量子アニーリング変分ベイズ法”を提案した。数学的には変分ベイズ法の隠れ変数とパラメータを量子力学的に量子化することでアルゴリズムを拡張した。さらに、混合ガウスモデルを用いて、パラメータの更新式と数値計算結果を示した。数値計算では、提案アルゴリズムが通常の変分ベイズ法の性能を大幅に改善することを示した。さらに先行研究の問題点について言及した。

第5章「Quantum Expectation-Maximization algorithm」（量子EMアルゴリズム）では、量子EMアルゴリズムを提案した。第4章では古典計算機を仮定してアルゴリズム開発を行なったが、本章では量子計算機を仮定してEMアルゴリズムを高速化できるかを議論した。まず通常の変分EMアルゴリズムをランダム化し、そのランダム化されたEMアルゴリズムと同等の量子アルゴリズムを提案した。また、そのアルゴリズムの計算量を見積もり、アルゴリズムが高速化されることを示した。

第6章「Generalized information thermodynamics」（一般化された情報熱力学）では、情報熱力学を一般化することで、空間的に非均一な温度分布を持つシステムに関する情報熱力学を構築した。既存の研究では、空間的に均一な温度分布を扱い、測定を考慮することで情報熱力学を導いている。他方で、空間的に非均一な温度分布を持つシステムに関しては、同様の定理が成立するか明らかではなかった。そこで、空間的に非均一な温度分布を持つシステムに関して測定を導入し、揺らぎの定理を示した。さらに、導いた揺らぎの定理の意義について議論した。

第7章「Interacting population dynamics」（相互作用する細胞増殖系）では、細胞増殖する系を考え、揺らぎの定理を導出した。既存研究では相互作用がない細胞増殖系に対して揺らぎの定理が示されている。しかし、実際の細胞系を考えると相互作用の存在が想定され、一般に相互作用はシステムの性質に大きな影響を与える。よって、相互作用している細胞増殖系で揺らぎの定理が成り立つかどうかは明らかではない。本研究では、相互作用する細胞増殖系を摂動的に扱い、揺らぎの定理が成り立つことを示した。この結果は、先行研究では無視されていた効果を取り込んだ拡張であり、その意義について議論した。

最後に第8章「Conclusions」（結論）では、本論文の成果を簡潔にまとめると共に、今後の研究課題を提示した。

以上を要するに、本論文は古典及び量子統計力学的の観点から、数理情報学におけるいくつかの機械学習アルゴリズムやシステムの数理的特性を研究したものである。これらの成果は、数理情報学分野に寄与するものである。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。