

論文審査の結果の要旨

氏名 大坪 洋介

本論文は、確率的情報処理に量子揺らぎの効果を取り入れた復号法（QMPM 推定）を考え、統計物理の手法を用いて理論的に性能評価を行ったものである。量子揺らぎを用いたアルゴリズムは、基底状態探索を行う量子アニーリングが近年注目されているが、本研究では、量子揺らぎに別の有効性を見出すものである。また、量子揺らぎを制御してアニーリングを行おうとするプロセッサが開発されていることから本研究は意義深い。第1章では、このような研究の背景が書かれている。

第2章では、量子アニーリングの数理的な枠組みと確率的情報処理に関する先行研究の詳細なレビューが行われている。本研究の核となる、熱揺らぎと量子揺らぎの類似した性質や、確率的情報処理とスピングラス理論との関係なども具体的に付記されている。特に、確率的情報処理における従来の推定法である有限温度（MPM）推定についても詳細に述べられている。以下の章では、代表的なデジタル確率的情報処理課題である、白黒画像修復、誤り訂正符号、CDMA（符号分割多元接続、Code-Division Multiple Access）マルチユーザー復調に関して、量子揺らぎを用いた復号の解析が行われている。

第3章では、白黒画像修復の QMPM 推定の性能評価が行われている。画素にイジングスピンを対応させ、事前確率にマルコフ確率場と呼ばれる画素間のスムーズネスを設定すると、ランダム磁場を持つ一様相互作用のスピンのモデルとして扱うことができる。このとき温度は、画素間のスムーズネスに対応する。量子揺らぎを起こす横磁場を系に導入し、イジングスピンをパウリスピンと読み替えることで QMPM 推定が可能となる。このような研究は Inoue によって行われているが、本研究では、横磁場を温度と独立に入れることを提案し、先行研究と異なった定式化において解析及び考察が行われている。その結果、QMPM 推定は上手く機能し、従来の MPM 推定と同様に、最適な復号を与える量子揺らぎの大きさが存在することが示された。さらにこのような最適修復性能は、従来の MPM 推定によって得られた性能とほとんど変わらず、極低温においてもこのような修復は可能であることも示された。

第4章では、誤り訂正符号の QMPM 推定に焦点が当てられている。誤り訂正符号は、原情報を冗長化する操作によって、受信者がメッセージを復号することができる符号である。代表的な誤り訂正符号の一種であるソーラス符号は、ランダムな相互作用をする平均場スピングラスモデルで記述できる。この系に量子揺らぎを導入し、レプリカ法を用いて系の秩序変数の鞍点方程式を数値的に解いた結果、真の通信路ノイズの SN 比によって復号可能領域とそうでない領域の相転移があることが示された。復号可能領域では性能のピークが存在し、従来の推定法で達成された最適性能とほぼ同等の性能を示すことが示された。しかし、低温になるに従って僅かに悪くなることから、量子揺らぎは熱揺らぎを補完することができるが、熱揺らぎが極めて小さくなると補うことが困難になると考察された。

第5章では、CDMA の QMPM 推定の性能評価が行われている。CDMA マルチユーザー復調とは、無線通信方式の一種であり、拡散符号を基地局が各ユーザーに割り当てることで、複数のユーザーの干渉を回避するシステムである。通信路をガウス型であると仮定すると、ランダム磁場を持つスピングラスモデルとして記述できる。復調性能評価の結果、ほぼ従来の最適復調を実現するが、やはり低

温領域では悪くなることが示された。拡散符号のチップ数を大きくしていくと、量子揺らぎによって解構造が変化することも示された。

第6章では、以上3つのモデルから得られた結果をまとめ、量子揺らぎを用いた確率的情報処理の一般的な性質が議論及び考察されている。以上の全てのモデルで、復号性能を決定する鞍点方程式が導出されており、数值的に解析が行われている。また、不等式の理論的な導出によって QMPM 推定の評価も行われている。いずれのモデルでも、量子揺らぎによる確率的情報処理が可能であるということが示された。また最適復号性能に注目すると、低温領域で僅かに性能が落ちるものの、従来の推定とほぼ同等の性能が達成できるという結論を得た。これは、量子揺らぎが熱揺らぎを補完し、確率的情報処理を行うことができることを示している。また、量子アニーリングを行うプロセッサである量子アニーレーは超伝導量子ビットによって構成されているため、熱揺らぎの効果がほとんど考慮されない。本論文の結論は、量子アニーレーがアニーリングだけではなく、確率的な推定を行えることを示唆している。

なお、本論文の第3章、第4章、第5章は井上純一、永田賢二、岡田真人との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上 1987 字