

論文内容の要旨

博士論文題目 情報復元の統計力学的アプローチ

氏名 綴木 潤

(論文内容の要旨)

本論文は情報を通信路に送信し復元するという情報復元問題を取り扱う。通信路において何らかのノイズが付加されるが、このノイズをいかに削除できるかというのが情報復元問題である。情報の送信には符号化した上で送信する方法と何もしないでそのまま送信方法があるが、本論文ではそれら両方について考える。

まず符号化しない場合について議論する。この場合、手がかりになるのは送られてきたノイズ入りの情報のみであるので、我々はこの情報を基に元の情報を推定しなければならない。本論文ではこのような符号なしの情報復元問題として、特に画像修復問題を取り扱う。劣化画像から元の画像を推定する方法としてベイズ推定を用いる。これまでのベイズ推定に基づく画像修復の枠組では、画像に重畳されるノイズは画素毎に独立であると仮定されており、空間的相関を持つようなノイズを取り扱ったモデルは我々の知る限り存在しなかった。そこで本論文では空間的な相関をもつノイズによって劣化した画像の修復モデルを提案する。特に、提案モデルに対し統計力学的的手法を用いることで、どの程度の修復が可能であるかについての定性的な解析を行う。具体的には原画像の生成モデルとノイズの生成モデルが多次元ガウス分布に従うとし、さらに並進対称な相関行列を仮定することで、両方のモデルにフーリエ変換を用いることを可能にする。このフーリエ変換の利用により、修復誤差等の系の定性的な性質を解析的に計算をすることが可能になる。得られた解析結果と人工画像を用いたシミュレーション結果が一致することを示す。さらに、真のノイズモデルが空間的な相関を持つノイズモデルである場合に、空間的な相関のないノイズモデルを用いて修復する場合について議論する。このとき周辺尤度最大化によるハイパーパラメータ推定がうまく推定できず、解析的に得られた最も良い修復結果ほどうまく修復できないことを示す。

次に、情報を冗長化することで符号化した場合の情報復元として、特に Surlas 符号について解説する。そしてハミルトニアンに着目することで Hopfield 型の連想記憶モデルが Surlas 符号の拡張モデルと見なせることについて述べる。その上で連想記憶モデルについて解説する。さらに本論文では、連想記憶モデルの問題の一つである偽記憶問題に着目し、偽記憶に収束しにくいモデルとしてハイブリッド型連想記憶モデルを提案する。提案モデルでは、パターン表記部である可視部とは別に情報処理専用の隠れ部を付け加え、さらに可視部と隠れ部の間に線形写像を用いることで、ヘップ則と誤差逆伝播法の両方の学習法を併用したハイブリッド型の学習を可能にしている。一般に、連想記憶モデルでは偽記憶に収束する現象が多数生じうるが、本論文では、提案するハイブリッド型モデルがより広い引き込み領域を持ち、偽記憶に収束しにくいモデルであることをシミュレーション結果により示す。

氏名	綴木 潤
----	------

(論文審査結果の要旨)

この論文では、情報復元という立場から、情報を符号化しない場合と符号化する場合の両方の側面についての研究がなされている。いずれの場合も新しいモデルが提案されている。また、統計力学的な解析やコンピューターシミュレーションを用いることで、提案モデルの定性的な性質を調べており、それらの成果はいずれも評価できる。

論文の前半では、符号化しなかった場合の情報復元問題として画像修復問題について取り上げており、以下の点において新規性が伺われる。この論文では、ガウスモデルを用いたベイズ画像修復問題の性質について調べている。劣化画像と修復画像の平均二乗誤差の厳密な解や、フーリエ変換を用いた場合の周辺尤度などを導出している。また、論文では真のノイズ通信路と実際に用いるモデルが異なる場合に注目しており、その場合の解析を行っている。特に、真のモデルとして空間的な相関を持つガウスノイズを用い、実際に用いるモデルには空間的な相関のない単純なガウスノイズを用いている。この場合における修復誤差最小化基準による解析的な修復誤差を求めたあと、周辺尤度最大化基準による数値実験的な修復誤差を求めている。この数値実験では、画像を修復するのに必要なハイパーパラメータを求めるために周辺尤度最大化を用いているが、二つのモデルが異なる場合はハイパーパラメータがうまく推定できないことを示している。そのため、真のモデルと実際に用いるモデルが異なる場合において周辺尤度最大化基準を用いたときは、修復誤差最小化基準で解析的に得られた結果ほど修復誤差を小さくすることはできず、最高の性能が発揮できないことが発見されている。この論文ではさらに、人工画像と自然画像の両方に対してコンピューターシミュレーションを行っており、その結果はこの論文の解析結果を支援している。これらの全ての結果には新規性があり、画像の本質を突いた研究として画像修復や統計力学の研究分野に大きく貢献している。

次に、この論文では、符号化した場合の情報復元問題として Surlas 符号を取り上げ、その拡張モデルとして連想記憶モデルを取り扱っている。そして、連想記憶の学習の弱点を緩和するために、論文の後半ではハイブリッド型の連想記憶モデルを提案しており、以下の点において新規性が伺われる。この本論文では、既存のモデルである Hopfield 型の連想記憶モデル拡張し、隠れ部を付加した構造を持つモデルを提案しており、その有効性について議論している。特に、隠れ部を付加した連想記憶モデルにヘップ則と誤差逆伝播法の両方の学習を埋め込むことにより、誤学習が減り、記憶パターンの引き込み領域が大きくなることで偽記憶へ収束しにくくなるという特性を、コンピューターシミュレーションを用いることで示している。これらの結果には新規性があり、ニューラルネットワークの研究分野の発展に貢献している。

以上、この論文の研究成果は博士論文としての十分な業績と言える。よって、本論文は博士(理学)論文として価値あるものと認める。