

【論文審査の要旨】

本論文は、エネルギー関数の形状に着目した焼きなまし法の適用方法について提案したものである。ボルツマンマシンや焼きなまし法等、現在利用されている機械学習や最適化問題の解法は統計物理学に基づくものが主流となっており、これらはいずれも物質を構成する分子の微視的状态を記述するボルツマン分布をもとに定式化されている。ニューラルネットワークの事前学習などにも用いられるボルツマンマシンでは、与えられた分布に適したエネルギー関数を学習により決定する。焼きなまし法は、ボルツマン分布に従う系では、エネルギー関数の値が低い状態が高い出現確率を持ち、温度が低いほどその傾向が強くなる性質を利用したものであり、代表的な探索手法として様々な最適化問題に適用されている。

焼きなまし法は、計算量の多さや温度変化過程の与え方が自明でないことなどが欠点として指摘されている。この他、深層ボルツマンマシンの事後分布推定に対して効果的でないこと、巡回セールスマン問題 (TSP) に対しても問題の規模が大きくなるとマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法における棄却率が高まり、効率が低下するといった問題点があることも本論文で示している。これらの問題について、本論文ではエネルギー関数の形状に着目することで解決するアプローチを提案している。従来手法では最適化問題の目的関数をそのままエネルギー関数として用いるのに対し、提案手法では、問題ごとに適切なエネルギー関数と、棄却率の低い提案分布を構築している。具体的な例として、ボルツマンマシンと観光経路推薦問題に提案手法を適用し、有効性を示している。

本論文で得られた成果を以下に示す。

(1) ボルツマンマシンに階層構造を持たせた深層ボルツマンマシンに対しては、現在一般に用いられているギブスサンプリング法を適用しただけでは、層数の増加に伴い事後分布の推定が困難となることが知られている。本論文ではさらに、従来の焼きなまし法を適用しても精度を改善できないことを明らかにした。推定精度向上のため、深層ボルツマンマシンのエネルギー関数を層ごとに分割し、各層に対応した関数に異なる温度を割り当てることで温度分布を表現可能とする手法を提案した。さらに、入力側から温度を低下させることで、種結晶から金属の単結晶を得る手法であるフローティングゾーン法と同様の効果が得られることを理論的に示し、評価実験により事後分布を高精度に近似できることを示した。

(2) 実社会における代表的最適化問題の一つである観光経路推薦問題で従来用いられてきた選択的 TSP では、節点と辺を用いて定式化するため、解法が複雑になり経路も推薦対象に含むような大規模問題への適用が困難という

欠点が存在した。この問題に対し、本論文では辺のみを用い、さらに自己ループ辺を導入し次元数を固定とすることで、確率場として定義可能な定式化を提案した。

(3) 上記定式化に対する、焼きなまし法を用いた効率的な解法を提案した。具体的には、経路長に対する制約をエネルギー関数として表現する方法、棄却率の低い提案分布を用いて MCMC 法を構築する方法を提案し、探索効率の改善を実現した。人工データセット及び観光客の位置情報から作成されたデータセットを用いて、提案手法の有効性を示した。

以上のように、本論文は多種多様な最適化問題に利用されてきた焼きなまし法の適用において、エネルギー関数の形状が重要であることを示し、その性能向上を実現したものであり、理論的考察及び評価実験により有効性を評価している。得られた成果は、焼きなまし法の探索効率を向上させるだけでなく、その適用範囲をさらに拡大するものであり、データ駆動型知的情報処理技術に支えられた現代社会において、工学的に重要な意義があると考えられる。よって、本論文は博士（工学）の学位を授与するに十分な価値があるものと認められる。

（最終試験又は試験の結果）

本学の学位規則に従い、最終試験を行った。公開の席上で論文発表を行い、学内外の教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員により本論文及び関連分野に関する試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、専門科目についても十分な学力があるものと認め、合格と判定した。