

論文審査の結果の要旨

氏名 唐木田 亮

本論文は全6章からなり、第1章では、深層学習の名のもとに画像認識や音声認識といった様々な実応用で開発が進んでいるニューラルネットワークの学習手法の発展とその問題点が述べられている。より具体的には、深層学習では性能重視の手法開発が進んでおり、理論的には妥当性や最適性が保証されていないヒューリスティクスが多く存在している。アルゴリズムの性能を理論評価し、数理的に自然で最適なアルゴリズムを開発することが、深層学習のさらなる発展のために不可欠といえる。本章ではこの深層学習の問題点とヒューリスティクスの性能や挙動のメカニズムを数理的に解き明かす研究の必要性が議論されている。

論文提出者はヒューリスティクスの中で特に数理的な基盤が明らかになっていない2つの手法に着目して理論解析を行った。まず第2章では、連続値入力を持つ **Restricted Boltzmann Machine (RBM)** モデルのヒューリスティックな学習アルゴリズムとして知られている **Contrastive Divergence (CD)** 学習を解析した。CD 学習は最尤推定におけるサンプリングを途中で止める粗い近似手法で、経験的には短時間に最尤推定値に近い解が得られることが知られていた。本論文は、CD 学習によって厳密手法の最尤推定と同じ解が得られる場合を理論的に証明しており、CD 学習の妥当性を裏付けることに成功した。また、隠れ変数が連続値のモデルでは解が主成分分析に対応し、離散値のモデルでは独立成分分析に対応するといった情報処理との関係も具体的に明らかにしており、既存の理論解析にはない独創的な結果を与えている。

次に第4章では、通常のパラメータを動径と方位の座標成分に分解して最適化するヒューリスティクスとして知られる **Weight Normalization (WN)** に注目し解析を行った。WN は学習の収束を高速化することが経験的に知られている。本論文の解析では力学系における座標変換の一般論から、WN の勾配は通常勾配法を補正していることを示し、この補正の効果を数値実験と合わせて明らかにしている。具体的には、WN によって学習率の自動調整と勾配のスケール不変性が実現することで学習が高速化することが示された。なお、第2章と第4章の結果はどちらも、学習アルゴリズムの力学的解析に基づいており、この解析手法を拡張することで、ニューラルネットの学習の解析が今後さらに進むことが期待できる。

また論文提出者は既存のヒューリスティクスの理論解析にとどまらず、自ら効率的なアルゴリズムの開発を行い、その有効性を理論計算および数値実験で検証した。第2章で得られた結合行列パラメータの幾何学構造の知見に基づき、第3章では連続値 **RBM**

の結合行列に直交制約を課した最尤学習アルゴリズムを提案した。この手法は、直交性が勾配と尤度の解析計算を可能にしており、サンプリングを避けられる点で計算時間の観点から効率がよい。また提案手法は最尤推定値への収束が保証されている点で、CD 学習のようなヒューリスティクスよりも優れている。さらに、論文では直交制約下の勾配の中で最も評価関数を下げる方向に向かう測地線勾配を利用しており、数理的に最も効率的なアルゴリズムとなっている。

第5章では、第4章の **Weight Normalization** を自然勾配法と組み合わせたアルゴリズムを提案した。自然勾配法は勾配のスケールを調整し、学習の高速化を実現する手法であるが、この手法によって **WN** の動径勾配を補正することで、**WN** のさらなる高速化を実現した。また、**WN** の動径成分を自然勾配と組み合わせることは計算量を減らせる点で自然勾配の拡張としても意義深いといえる。論文中では、複数のデータセットで手法の有効性を実証するとともに、いくつかの理論計算によって手法が **WN** をさらに高速化するメカニズムを明らかにしており、十分な検証がなされている。

最後に第6章の結論にて論文提出者が述べるように、本論文の理論解析とアルゴリズムの提案はすべて結合行列パラメータの幾何学的な構造に立脚している。既存のヒューリスティクスの妥当性を明らかにした点、ヒューリスティクスに代わる新規手法を提案した点に本論文の貢献があるが、階層型ニューラルネットの学習を考える点で幾何学的な視点が有効なアプローチであることを指摘している点も、本論文の大きな貢献と考えられる。深層学習の数理を考えるうえで、本論文が解析とアルゴリズム開発の基礎となることが期待できる。

なお、本論文第2、3、4、5章は岡田 真人、甘利 俊一との共同研究であるが、論文提出者が主体となってすべての理論解析および数値実験を行ったもので、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1992字