

審査の結果の要旨

氏名 吉田 雄紀

本論文は6章からなる。第1章ではニューラルネットの理論解析の動機について述べられている。第2章から第4章では様々な条件下での三層ニューラルネットの学習ダイナミクスの統計力学的解析について述べられており、それぞれ、**Weight Normalization** を用いた場合、出力素子数が複数の場合、そして入力信号の統計性が一般化された場合が取り扱われている。第5章では信号がニューラルネットを伝播するダイナミクスの数値的解析法について述べられている。第6章ではこれらの研究が総括されている。

第2章から第4章のテーマであるニューラルネットの統計力学的解析は、90年代後半に行われたソフトコミットマシンおよび三層ニューラルネットの学習ダイナミクスの解析に端を発する。当時は計算資源および最適化技法に限られ、小規模なネットワークを用いて低次元なデータセットあるいはトイタスクを学習することが一般的であった。また、ニューラルネットの学習を顕著に遅滞させるプラトー現象が問題となっており、関連研究が多く発展した。一方、現在ではニューラルネットの学習を取り巻く状況が90年代から激変している。多数の素子数および多数の層、多様な構造を持つ大規模なネットワークを用いて、特徴抽出されていない高次元のデータセットを学習することが一般的となった。また、多数の最適化技法が登場した。そして、プラトー現象が観察されることは近年では稀である。

本論文の第2章から第4章で考察されている設定は、いずれも現代的な文脈を取り入れたものといえる。第2章では、近年様々な勾配法の亜種が登場していることに留意して、2016年に提案された勾配法の改良手法である **Weight Normalization** を用いた場合が解析されており、従来の勾配法とは学習ダイナミクスが変化すること、また **Weight Normalization** が学習を高速化するメカニズムが明らかとなった。第3章・第4章では、プラトー現象に関する理論と実際の不一致に着目して、この不一致がネットワーク構造の違いに起因する可能性、および入力信号の統計性の違いに起因する可能性が吟味されている。いずれも、現代のニーズと過去の解析手法を適切に組み合わせて新規な知見を得ることに成功している。なお、上記の各章の研究は対外的にも高く評価され、第2章の研究内容は *Journal of the Physical Society of Japan* に、第3章の研究内容は *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* に採録され、第4章の研究内容は **NeurIPS** の本会議に採択されている。とりわけ第4章の研究内容は国際的にも大きな注目を浴びている。本研究の発表に前後してフランスのチームからも統計力学的解析の論文が複数発表され（本研究を引用するものも含まれる）、いわば、90年代の手法であった統計力学的計算のリバイバルがこの1年程度で生じているが、本研究がこの盛り上がりを引き起こす一端となっている。

第5章のテーマであるニューラルネットの信号伝播ダイナミクスは、前述の統計力学的解析とは対照的に、深層ニューラルネットを前提とした比較的新しいアプローチである。2017年頃より様々な単純な構造の深層ネットに対して進められてきた信号伝播ダイナミクスの解析が、本研究では単純とは限らない実務的な深層ネットへ拡張される。本章もまた、理論と実際のギャップを埋めているという点できわめて有意義である。

以上の通り、第2章から第5章で述べられている個々の研究はそれ自身で意義深いものであるが、それらは決して個別的研究に終始するものではない。第一に、これらの研究は本論文のタイトルにもある「巨視的ダイナミクスの理論」という共通項を持つ。すなわち、ニューラルネットを解析する上で多数の微視的変数を少数の巨視的変数に帰着させるというアイデアはこれらの研究群で共通しているが、それぞれ異なる側面に着目しており、これらを融合することでさらに発展的な巨視的理論が得られる可能性を秘めている。第二に、これらの研究は「ニューラルネットの学習が成功する条件の探究」という統一的なテーマの中で相補的な複数の知見を与えるものと位置付けられる。本テーマ、より一般にニューラルネットの学習挙動を理論的に理解することは、深層学習の経験的手法が乱立している現況において明らかに重要であるが、ニューラルネットの学習挙動を支配する三つの要素である「最適化手法」「ネットワーク構造」「データ統計性」の全てに本論文ではアプローチがなされており、このことは、これらの研究群が本テーマを俯瞰的に捉えられていることを意味する。

なお、本論文第2章・第3章は唐木田亮氏・甘利俊一氏および岡田との共同研究、第4章は岡田との共同研究、第5章は高木志郎氏・長野祥大氏および岡田との共同研究であるが、いずれについても論文提出者が主体となって理論解析・実験検証・論文執筆を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1990 字