

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 本武陽一

学位論文として提出された本武陽一さんの論文は、深層ニューラルネットワーク(DNN)の学習のメカニズムを明らかにすることを目的とし、それが「多様体学習」として理解できるかどうか、に挑戦したものである。つまりは、DNNの学習は入力データをより次元の小さな多様体へと写像していることを提案し、数値的に示したものである。また入力データの持つ階層的な幾何構造が、DNNの階層を登るごとに、多様体が折りたたまれるように学習が進む、という描像が提案されている。

本博士論文は全6章から成っている。第1章では、手短かに本論文の特色についてまとめ、データサイエンスという新しい分野についても解説している。

第2章では、まず本論文の主題である「多様体仮説」について解説し、つづいて本研究の手法であるDNNの学習が説明されている。多様体仮説は、「実世界のデータセットの分布は低次元の多様体上に分布している」というものである。その構造をDNNによって見出すというのが本論文の目的である、という解説が行われている。データを圧縮したり特定の確率モデルへ当てはめたりせず、できるだけありのままにDNNの振る舞いを調べている点が、まず本論文のオリジナルな論点であると考えられる。

第3章から第5章までが本論文の中心となる章である。ここでは多様体仮説の正しさを、人工データと実践的なデータセットを用いて数値的に解析している。特に多様体仮説が成立するかどうかについて、球面上の点の学習、手書き文字画像データの学習、DNNの階層間の相互作用のヤコビアン行列を使った特異値解析、などを用いて詳細に解析している。可視化されたパターンを見るだけではなく、数値解析的にDNNの学習の特徴を研究している点を審査委員会では評価している。

第4章では、階層的な意味的カテゴリ構造を持った大規模な画像データセットが、DNNにおいてどのように学習されるかを扱っている。特に、同じような階層性を持った入力画像は、層間相互作用のヤコビアン行列の特異値分布に同じような対応関係が見えると仮定する。その仮説の検証を具体的なデータセットとDNNを用いて、いろいろな角度から検証している。入力イメージの意味カテゴリ構造は、DNNによって階層を登るごとに折りたたまれるように学習が進むという描像を数値的に追求している。これらの解析は本論文のオリジナルなものであり、さらなる実験は必要であるものの、DNN学習研究のひとつの成果として高く評価できる。

第5章では、DNNを用いて大自由度力学系のデータセットの解析を行なっている。具体的には、鳥の群れを作るモデルであるボイドモデルを用いてGPUプログラミングにより、100万匹オーダーのボイドのシミュレーションを行った結果が報告されている。特に群れの同定がDNNを用いて他の手法に比して精度よく行われていることは、この手法の正しさを裏付けている。また巨大スケールの群れのシミュレーションを通じて、群れの複

雑さの増大や、群れ同士の相互作用による群れ構造の維持など、いくつも新しい発見がなされている点は高く評価される。実際このスケールのシミュレーションの解析は、世界的にも例が少ない。

最後に第6章において詳細な総合考察が行なわれている。ここでは論文の解析・シミュレーション結果が、これまでの他の研究結果を参照しながら論じられている。

まとめると本論文はDNNを用いた学習実験をもとに、データセットの幾何構造（多様体仮説）を理解するための手段になりうるかを、追求したものである。DNN学習においては階層をひとつ登るごとに多様体が折りたたまれるという描像が、少なくとも提示された例題においては、示されている。こうした問題を具体的な例で数値的にも計算している研究は新しく、これは今後のDNNによる学習のメカニズムを明らかにする重要なステップとなり、今後新しく分野を切り拓くものと期待される。

以上、当博士論文の研究は、DNNを用いたデータ解析において、その学習機構の解明に関して独創的な提案をなしていると考えられる。以上の点から本論文は、博士（学術）の学位を与えるのにふさわしい内容であると、審査委員会は全員一致で判定した。