

氏名	太田 望		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第 10799 号		
学位授与年月日	令和 5 年 3 月 24 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	理工情報生命学術院		
学位論文題目	入力の変化を捉える深層学習モデルの定量化指標とその構造の提案		
主査	筑波大学 教授	博士（工学）	延原 肇
副査	筑波大学 教授	博士（工学）	古賀 弘樹
副査	筑波大学 助教	博士（工学）	澁谷 長史
副査	筑波大学 助教	博士（工学）	河合 新
副査	筑波大学 助教	博士（理学）	高安 亮紀

## 論文の要旨

本論文は、入力画像の変化を捉えることのできる深層学習の構造を明らかにすることを目的としている。

カプセルネットワークと呼ばれる、入力画像の微小変化を捉えることのできる深層学習モデルに着目し、モデルの中間出力であるカプセルの一部に集中して分布する、学習時間が長いといった問題を解決するため、距離学習手法とカプセルネットワークを組み合わせることを提案している。複数のデータセットにおいて提案手法と従来手法による精度比較実験や学習時間比較実験を行い、提案手法の優位性を明らかにしている。さらに「入力画像が変化すると出力がどのように変化するか」を定量化する指標を新たに提案し、その指標が中間出力間の正準相関分析から導かれることを示している。また、自己教師あり学習とカプセルネットワークにおいて、提案指標とクラス分類精度との関係について考察し、分類精度を上げるために提案指標を調整するためのモデル構造が必要であることを示唆している。

本論文は 5 章より構成されている。第 1 章では深層学習研究、特に畳み込みニューラルネットワークの歴史的経緯に言及するとともに、本研究の位置付けおよびリサーチクエスチョンについて述べている。第 2 章では従来の入力画像の変化を捉える深層学習について関連研究を分析し、本論文との関係について述べている。

第 3 章ではカプセルネットワークと呼ばれる、入力画像の状態についてカプセルの形で情報を保存する深層学習モデルに着目し、カプセルが一部に集中して分布する、すなわち、入力画像の変化を捉えられないために分類精度が低下する問題に対して、距離学習手法を導入する改良を提案している。提案手法の検証のため、MNIST, fashion-MNIST, EMNIST, SVHN, CIFAR-10 データセットと、それに対応するアフィン変換されたデータセットを用いて、提案手法とオリジナルのカプセルネットワークの精度と学習時間を測定している。提案手法の精度は CIFAR10 データセットで 8.91%向上し、学習時間は各データセットで 19%以上短縮できることを確認している。また、主成分分析を用いて従来手法と

提案手法のカプセルの分布を可視化し、提案手法による効果を示している。

第4章では、入力画像に対するモデルの中間出力である特徴マップの変化を同変性という概念を用いて分析している。具体的には、正準相関分析と呼ばれる複数のデータ間の共通成分を抽出する手法を応用して、モデルが同変性の定義にどれくらい当てはまるかを示す同変性誤差と、入力画像が変化した場合に特徴マップがどれくらい変化するかを示す同変性感度の2つの指標を提案している。提案する同変性指標を検証するため、MNIST、fashion-MNIST、CIFAR-10という3つのデータセットにおいて、回転予測タスクを疑似タスクとして用いた特徴抽出器の学習を行い、後続タスクの分類精度と特徴抽出器から得られた同変性指標と比較している。また、主観評価として特徴マップをt-SNEによって低次元可視化し、提案指標との整合性を確認している。最後に第3章提案手法を第4章提案指標によって分析し、距離学習手法のハイパーパラメータがモデルの同変性を制御していることを示している。

第5章では本論文の結論、今後の課題について述べている。

## 審査の要旨

### 【批評】

本論文では、入力画像の微小変化を捉えることのできるカプセルネットワークに着目し、モデルの中間出力であるカプセルの一部に集中して分布する、学習時間が長いといった問題を解決するため、距離学習手法とカプセルネットワークを組み合わせることを提案し、複数のデータセットを用いた実験を通して、提案手法の優位性を明らかにしている。さらに、入力画像の変化と出力の変化を定量化する指標を新たに提案し、その指標が中間出力間の正準相関分析から導いている。分類精度を上げるために提案指標を調整するためのモデル構造が必要であるのは課題であるが、本論文で得られた知見は、深層学習の発展に非常に大きなインパクトを与えるとともに、有用な学術資料ともなり、博士論文に値するものと考えられる。

### 【最終試験の結果】

令和5年2月9日、理工情報生命学院において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。この結果とシステム情報工学研究群知能機能システム学位プログラムにおける達成度評価による結果に基づき、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。