

氏名	鈴木藍雅		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第10263号		
学位授与年月日	令和4年3月25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	システム情報工学研究科		
学位論文題目	ニューラルネットワークに対する異種モデルからの知識転移に関する研究		
主査	筑波大学 教授(連携大学院) (産業技術総合研究所)	博士(工学)	坂無 英徳
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 教授(連携大学院) (産業技術総合研究所)	博士(工学)	村川 正宏
副査	電気通信大学 教授	博士(工学)	庄野 逸
副査	産業技術総合研究所 招聘研究員	修士(工学)	麻生 英樹

## 論文の要旨

本審査対象論文は、高性能かつ高汎用な手法として近年最も注目を集める深層ニューラルネットワーク(DNN)モデルにおける学習の困難性という課題を解決するための有力な技術体系である知識転移に関して、抽象代数学の一分野である圏論を用いて統計的機械学習について考察するための新たな枠組みを定式化するとともに、具体的な知識転移のアルゴリズムを複数提案して有効性を実験的に検証し、圏論による枠組みを適用してそれらの学習過程に関する普遍性の高い考察を行っている。

第2章では、統計的機械学習におけるデータ・モデル・学習が、圏論における重要な概念である圏・関手・劣自然変換と解釈して定式化することが可能であることを明らかにし、データに基づいてモデルが知識を獲得して推論を変化させる過程、すなわち学習のダイナミクスや、モデル間の知識転移について普遍性の高い考察が可能になることを示している。第3章では、テキスト構造をもつ医用画像の認識タスクに対して高い効果を発揮する手法として考案した二段階転移学習において、特徴表現の変容を定性的・定量的に解析し、知識転移の様態を明らかにしている。第4章では、哺乳類初期視野の人工モデルであるネオコグニトロンアルゴリズムを用いて、深層畳み込みニューラルネットワークのアーキテクチャを自動的に設計しながら学習を効率化する手法を提案している。第5章では、教師なし次元削減問題のためのDNNモデルである深層自己符号化器と古典的な線型モデルである主成分分析との関連性を考察し、主成分分析モデルからの知識転移により深層自己符号化器モデルの学習を効率化する手法を提案している。第6章では、分類タスクを処理する全結合型DNNと線型モデル関連性を考察し、種々の線形分類モデルからDNNへの知識転移アルゴリズムを提案するとともに、主成分分析からの知識転移と併せて、最新のDNNアーキテクチャであるgMLPへの知識転移アルゴリズムも提案している。第7章では本論文を総括し、将来展望について言及している。

## 審査の要旨

### 【批評】

本論文では、深層ニューラルネットワーク (DNN) を主たる対象として、確率的機械学習モデル間での知識転移により学習 (モデル内部パラメータの最適化) を効率化する新規な手法を提案するだけでなく、様々なクラスの数学的構造やそれらの間の関係を抽象的に扱う数学理論としての圏論に基づいて学習の過程を統一的に表現し、普遍的な考察を可能にする基盤を構築するという、非常に野心的な試みが行われている。

本論文の第2章では、統計的機械学習におけるデータ・モデル・学習を、圏論における主要な概念である圏・関手・劣自然変換に対応させることで、機械学習のプロセスの統一的な表現を可能にし、モデルの内部に知識が蓄積される過程を一般的に議論可能とする数学的基盤を与えている。

本論文の第3章以降では、モデル間の知識転移により DNN の学習を効率化する手法を複数提案し、実験的に有効性を検証するだけでなく、上記の基盤により一般的な表現を与えている。具体的には、独自に開発した下記の手法について、その振る舞いを形式的・定性的に解釈するとともに、有効性を実験的に検証している。

- 深層畳み込みネットワーク (DCNN) の段階的な転移学習 (第3章)
- 哺乳類初期視覚野から着想を得た手法であるネオコグニトロンからの知識転移による DCNN のモデル設計と初期値最適化 (第4章)
- 古典的な主成分分析モデルからの知識転移による深層自己符号化器の初期値最適化 (第5章)
- ロジスティック回帰等の線形分類モデルからの知識転移による DNN の初期値最適化 (第6章)

これらの手法は新規性や有用性が高く、単独でも学術的に価値の高い研究と認められる。さらに圏論を用いた定式化によって、データの性質やモデルの機構、内部パラメータ更新アルゴリズム等における違いに捕らわれず、それらの転移学習手法の構造を俯瞰的に表現し、考察することが可能となることを示している点も評価できる。

今後、データに関する多様体仮説に対応するようなモデルの内部パラメータに関する仮説や、劣自然変換における距離尺度の導入などによって、学習によるモデルの性能向上の量的な扱いを理論に組み込んでゆくなど、更なる展開が期待される。

### 【最終試験の結果】

令和4年2月7日、システム情報工学研究科において、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。その結果、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。