

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	畳み込みニューラルネットワークを用いた磁性薄膜上の磁区パターン解析に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	俣田直也
Author(English)	Naoya Mamada
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12911号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小野 功,瀧ノ上 正浩,山村 雅幸,関嶋 政和,井上 中順,青西 亨
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12911号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名		俣田 直也	
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	小野 功	教授	審査員	瀧ノ上 正浩	教授
	審査員	山村 雅幸	教授		青西 亨	特定教授
		井上 中順	准教授			
		関嶋 政和	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、磁性薄膜上の磁区パターンからその生成過程の物理パラメータを機械学習で推定するものであり、「畳み込みニューラルネットワークを用いた磁性薄膜上の磁区パターン解析に関する研究」と題し、5つの章から構成される。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べている。まず、複雑系におけるパターン形成の様々な事例について述べ、本論文で注目する磁性薄膜上の磁区パターン形成の機序と数理モデルを説明している。また、磁性薄膜の工学的応用の具体例を挙げ、使用目的によって磁性薄膜に求められる特性が異なることを説明している。次に、複雑系のパターン形成の研究には、パターンを再現する数理モデルの構築をする順方向の研究と、パターンからその背後にある生成過程の推定をする逆問題を取り扱う逆方向の研究が存在することを述べ、逆方向の研究の重要性を論じている。さらに、磁性薄膜特性を決定する物理パラメータの直接計測の困難さを論じた後、本研究の目的は直接測定が困難な物理パラメータを測定が容易な磁区パターンから推定する逆解析法を確立することだと述べている。最後に関連研究を一覧し、本論文の構成を説明している。

第2章「機械学習」では、本研究で用いた機械学習の手法を概説している。まず教師あり機械学習を概観し、モデル選択の概念と方法について述べている。さらに、本研究で用いた機械学習モデルであるカーネルリッジ回帰 (Kernel Ridge Regression: KRR) と畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を説明している。

第3章「磁気クエンチで生じる磁区パターンの解析」では、単結晶磁性薄膜での磁気クエンチ過程の磁区パターンから磁気異方性係数の推定を試みている。最初に、単結晶磁性薄膜での磁気クエンチ過程のシミュレーションモデルの詳細とデータセットの作成方法を説明している。また、本章で評価する mod モデルと名付けた小規模 CNN と、これと対比する KRR の構造とハイパーパラメータを説明している。次に、KRR と CNN に対して汎化性能の評価を行い、CNN は KRR と比べて推定精度が高いことを示している。さらに、これらの学習モデルに対して、クエンチ速度が異なるデータを用いたドメイン適応性テストを行い、CNN は KRR よりも適応性が高いことを示している。最後に、これらの結果を踏まえて、CNN は KRR と比べて推定精度で優位性があることを述べ、一方 KRR は磁気異方性係数の推定に必要な磁区パターンの幾何学的特徴が明確であり、物理学の観点から解釈性が高いことを論じている。

第4章「ヒステリシスループで生じる磁区パターンの解析」では、多結晶磁性薄膜でのヒステリシスループ過程の磁区パターンから、結晶粒ごとに異なるノイズ係数の検出を試みている。最初に、多結晶磁性薄膜でのヒステリシスループ過程のシミュレーションモデルとデータセット作成方法を説明している。また、本章で評価する3つの CNN モデルとして、小規模 CNN の mod モデル、reg モデルと名付けた大規模 CNN と、ImageNet で事前学習した reg モデルである reg_pret モデルを導入している。さらに、結晶粒ごとのパラメータの差異の検出を実現するため、スライディングウィンドウ法を導入している。次に、単結晶を想定した

パラメータが空間的に均一な条件での磁区パターンに対して、これらモデルの汎化性能を評価し、reg_pretモデルの有効性を示している。さらに、学習データ数や学習係数を変化させたときの推定精度への影響とノイズに対する頑健性を評価し、いずれの場合もreg_pretモデルが他のモデルより有効であることを示している。最後に、reg_pretモデルにスライディングウィンドウ法を適用して、2つの結晶粒からなる単純な多結晶を想定した磁区パターンから、結晶粒ごとのパラメータの差異の検出を行っている。受信者動作特性分析によりパラメータ推定値を評価し、本論文の条件においては結晶粒ごとのパラメータの差異の検出が実現できていると結論付けている。

第5章「総合討論」では、本論文を要約するとともに、関連研究と対比しながら本研究の位置付けを論じている。次に、本研究の課題として、シミュレーションデータで学習したモデルを実データに適用する際の問題点と、その解決策を論じている。最後に、本研究が磁性薄膜の開発の高度化に寄与すると主張するとともに、将来の展望と結論を述べている。

以上を要するに、本論文は直接測定が困難な物理パラメータを測定が容易な磁区パターンから推定する機械学習の手法を提案し評価したものである。本研究で提案した機械学習の手法は磁性薄膜の開発の高度化に貢献するとともに、様々な機能材料の形成パターンの解析に応用できる可能性があり、工学上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。