



Title	深層学習を用いた回転機のトポロジー最適化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	佐々木, 秀徳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14578号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81714
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hidenori_Sasaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 佐々木 秀徳

学 位 論 文 題 名

深層学習を用いた回転機のトポロジー最適化に関する研究
(Study on topology optimization for electrical machine using deep learning)

近年, 世界的な環境規制によりエネルギーの高効率化が求められ, 自動車, 鉄道, 船舶や航空機等の輸送機器や産業機器のエンジン機構及び油圧機構の電動化が図られている. 電動機器の多くはモータを有しており, 機器全体に占めるモータの消費電力が大きく, 高効率化が求められる. また, 機器の軽量化や小型化の要求も強く, 高効率, 高出力密度を両立した限界設計が必須となってきた. しかし, 複数の因子を考慮しながらの設計は容易ではない. 特に埋込型同期磁石 (IPM: Interior Permanent Magnetic) モータは設計の自由度が高く, より効率的な設計手法の確立が望まれている.

また, 計算機技術の向上により, 大規模計算が広く盛んに用いられている. それに伴い, 数値シミュレーション技術に関する研究が盛んとなり, 電磁界設計分野においても様々な解析技術が開発されている. 特に有限要素法 (FEM: Finite Element Method) はコンピュータ支援設計 (CAD: Computer aided design) との親和性も高く, 広く普及している. さらに, 最適化技術を FEM と連成することで, より効率的に適切な磁気構造を探索する手法が研究, 開発されている. 最適化手法として設計パラメータを変数とし, 遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いて所望の特性を有する形状を探索するパラメータ最適化が主流である. 本手法は製品開発の下流である詳細設計において有効な手段であるが, 上流である概念設計ではパラメータを設置できず, 適用しにくい. そこで, 設計パラメータを用いず, 適切な材料分布を物性の増減も考慮しながら最適化するトポロジー最適化が注目されている. しかし, 本手法は探索空間が多次元となり複雑になる場合が多い. そのため, 探索に必要な FEM による解析回数が膨大となり, 現実的な最適化時間で解が得られない場合がある.

そこで, 電気機器磁気特性を同定するために FEM の代わりに深層学習 (DL: Deep Learning) を用い, トポロジー最適化時間を短縮することに着目している. DL は自動的に特徴量を抽出することができ, 特徴量設計が困難なデータに対して有効である. 特に畳込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) は画像の特徴量抽出能力に優れており, 機械学習 (ML: Machine Learning) における物体認識精度向上の突破口となる技術で注目されている. しかし, 回転機の二次元断面材料分布とトルク特性の関係を CNN に学習させた場合の推定値は FEM をはじめとした電磁界解析に代わる推定精度を有してはならず, 更なる推定精度向上が求められる. また, 様々な回転機への適用が望まれるが, 形状汎化に関する検討は少ない. さらに, CNN を設計に適用するにあたり, 推定結果に対する根拠が明確ではないため, 最適化結果に対する信頼性が失われてしまう課題がある.

以上の背景から, 以下の三点に注目し検討を行った.

- (1) CNN のモータ磁気特性推定精度向上とトポロジー最適化への影響
- (2) CNN による推定可能モータ形状汎化と複数磁石配置を考慮した最適化手法の提案
- (3) CNN 推定根拠可視化技術のモータへの適用と新たな局所探索手法の提案

(1) として磁束密度分布を入力とした学習手法を提案した. 特に回転機の磁気特性は電磁鋼板の

磁気的非線形特性が大きく影響される。磁束密度を用いることで磁気的非線形特性を DL に学習させることが可能となり、二次元断面材料分布を学習させた場合よりも磁気特性の推定精度向上することを示した。また、CNN の推定精度は CNN を用いたトポロジー最適化の探索性能への影響があることを示した。

(2) として異なる磁石配置に対する汎化手法に関する検討を行った。IPM モータの場合、磁石配置が異なると磁気特性が大きく異なるため、同一 CNN へさせた際にトルク特性に対する特徴量抽出可能か不明である。そこで、様々な仕様のモータを同一 CNN へ学習し、形状汎化させる学習手法を提案した。その結果、同時学習によって異なる磁石配置を持つ形状の磁気特性を学習することが可能であることを示し、さらにその推定器を用いて複数磁石配置を考慮した新たなモータ形状トポロジー最適化手法の提案を行った。

(3) として説明可能な CNN の磁気特性への適用に関する検討を行った。説明根拠を可視化する技術として CNN へ入力した画像の推定要因となる領域を可視化する Grad-CAM が提案されている。本手法によりトルク特性に寄与する領域の可視化が可能であることを示した。さらにトポロジー最適化に本手法を適用した二段階最適化手法の開発し、従来の最適化に比べ有用性があることを示した。