HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トポロジー最適化と人工知能技術を融合したモータ設計の高度化に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	佐藤, 駿輔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16021号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92447
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hayaho_Sato_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (情報科学)　氏名　佐藤 駿輔

審査担当者　主　査　教　授　五十嵐 一
副　査　教　授　野口 聡
副　査　教　授　北 裕幸
副　査　教　授　近野 敦

学位論文題名

トポロジー最適化と人工知能技術を融合したモータ設計の高度化に関する研究
（Research on advanced motor design by integrating topology optimization and artificial intelligence techniques）

本学位論文では, トポロジー最適化と人工知能技術を融合した新しいモータ設計法について述べている. トポロジー最適化は対象機器の材料分布を穴の生成消滅を含めて自由に変化させ, 所望の特性を有する構造を見出す方法である. 従来のトポロジー最適化においては有限要素解析を多数回実行するため, 大きな計算コストが必要であった. 著者はこの問題を解決するために, 有限要素解析に代わる代替モデルを最適化過程で適応的に構築することで, 有限要素解析の回数を減らし, 全体の計算速度を増加させる方法を開発した. 代替モデルとしてはニューラルネットワークを用いている. また従来の最適設計においては, 機器の全体構造・構成を設計者が決めた上で, 部分構造をコンピュータにより最適化していたが, 自動設計を実現するためには, 全体構造と部分構造を同時に最適化する必要がある. そこで著者はモンテカルロ木探索を用い, 永久磁石モータの全体構造・部分構造の同時最適化法を開発し, これにより自動設計を実現できることを示した.

第 1 章では, 研究背景, 研究目的および本学位論文の構成について述べている.

第 2 章では, 本論文の基礎的事項についてまとめている. まずモータの有限要素解析の定式化を行い, つぎにパラメータおよびトポロジー最適化法, 多目的最適化法について述べている. さらに永久磁石モータにパラメータ最適化およびパラメータ・トポロジー同時最適化法を適用し, 後者の方が優れた解を与えることを示している.

第 3 章ではモンテカルロ木探索による統合設計について述べている. まずモンテカルロ木探索の概要を述べ, つぎに本手法による多目的最適化法を提案している. モンテカルロ木探索による永久磁石モータの最適設計では, モータの極数, 永久磁石配置パタンなどの全体構造を木構造で表す. そして最下部にある葉ノードにおいて, 葉ノードの上位ノードで既定される全体構造の下で, パラメータ・トポロジー同時最適化を行い, 永久磁石の位置・寸法, フラックスバリアの形状を決定する. さらに葉ノードで得たパレート解を親ノードに逆伝搬させていく. 各親ノードにおいて子ノードのパレート解を集約し, そのランキングを行い, 親ノードのパレート解を求める. そして親ノードのパレート解に含まれる各子ノードのパレート解の個数によって, 子ノードのスコアを付ける. 最上部の根ノードから探索する際は, 各ノードのスコアと探索回数を基に, 訪問する子ノードを決定し, 葉ノードに至る. この探索過程を繰り返すことにより, 全ノードのスコアが収束すると共に, 葉ノードで最適解が得られる. 著者は本手法を永久磁石モータの最適設計に適用し, 異なる永久磁石パタンか

らなるパレート解を一度の最適化で得られることを示した. 本手法を用いることで, 永久磁石モータを始めとする機器の自動設計が可能となる.

第 4 章では, ニューラルネットワークを有限要素法の代替モデルとするトポロジー最適化法について述べている. 従来, 有限要素法によるトポロジー最適化法を高速化するため, 予め有限要素解析を多数回行って学習データを用意し, それにより深層ニューラルネットワークなどの代替モデルを構築していた. しかしトポロジー最適化のように最適化変数が多い問題においては, 代替モデルの精度を十分に高めることが難しく, その結果, 代替モデルによる最適解が期待通りの特性を発揮しないことがあった. 著者はこの問題を解決するため, 予め代替モデルを構築するのではなく, 最適化過程で代替モデルをアダプティブに構築する方法を提案した. 本手法では, 常に代替モデルの精度が保たれるため, 得られる最適解の質が保障される. また著者は各モータ形状に対して d 軸および q 軸電流の関数として鎖交磁束関数を求める必要がある場合,d 軸および q 軸電流のサンプリング (有限要素解析) を 1 度行うのみで, 十分精度の高い予測器 (モータ形状と d 軸および q 軸電流値から d 軸および q 軸磁束を予測する予測器) が構成できることを示した. これにより, モータを駆動するインバータの最大電流および最大電圧を考慮した高速なトポロジー最適化を可能とした. 著者は本手法を永久磁石モータのトポロジー最適化に適用し, 約 5 倍の高速化が実現できることを示した.

第 5 章では, 変分オートエンコーダ (VAE: Variational Autoencoder) を用いたトポロジー最適化について述べている. これまで, パラメータ最適化で得た学習データ (モータ形状と性能の列) を VAE に学習させることで, 潜在空間における最適設計を実現する方法が提案されていた. この場合,VAE への入力はモータの幾何パラメータベクトルであり, 潜在空間の点は幾何パラメータベクトルに対応する. 著者はこの方法を拡張し, トポロジー最適化で得た最適解を VAE に学習させ, 潜在空間におけるトポロジー最適化を可能とした. この場合,VAE への入力はモータ断面画像であり, 潜在空間の点はモータ断面画像に対応する. また著者は, モンテカルロドロップアウトを用いることで予測器の精度を評価し, 代替モデルによる誤誘導を防ぐ方法を開発している. 著者は本手法を永久磁石モータのトポロジー最適化に適用し, 信頼性の高いパレート解が得られることを示している.

これを要するに, 著者はトポロジー最適化と人工知能技術を融合した新しいモータ設計法を提案し, これにより設計要求を満たす永久磁石モータを自動設計できることを示した. 本手法はモータ以外の機器・システムの設計にも広く適用可能である. さらに著者はアダプティブ代替モデルを用いることで, トポロジー最適化の質を保ちつつ計算速度を約 5 倍高速化できることを示した. 著者による本研究は情報科学, 電気工学に寄与するところ大なるものがある. よって著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格ある者と認める.