



Title	イジングマシンを用いた最適設計およびロバスト最適化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	丸尾, 昭人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15555号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89858
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Akito_Maruo_review.pdf, 審査の要旨



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 丸尾 昭人

審査担当者 主査 教授 五十嵐 一
副査 特任教授 小笠原 悟司
副査 教授 北 裕幸
副査 准教授 野口 聡

学位論文題名

イジングマシンを用いた最適設計およびロバスト最適化に関する研究
(Study on Design Optimization Using Ising Machines and Robust Optimization)

本学位論文では量子アニーリングを半導体回路でエミュレートするイジングマシンを用いた電気電子機器の最適設計と、それらのロバスト最適設計について論じている。これまでイジングマシンとしてはデジタルアニーラ等が開発され、循環セールスマン問題などの組み合わせ最適化に実用化されている。しかし、電気電子機器を始めとした機器・システムの最適設計にイジングマシンを活用した例はほとんどなかった。量子コンピュータやイジングマシンで最適化問題を解くためには、問題を二値最適化問題 (QUBO: Quadratic Unconstrained Binary Optimization) として表現する必要がある。著者は永久磁石の最適配置に関する問題、および磁性体材料の最適形状を求める問題を QUBO で表現できることを初めて示した。特に著者は前者の問題を解くことにより、従来のハルバッハ配列を2次元に拡張した新しい配列を見出した。これらのことより、将来使用が広がると期待される量子コンピュータが機器設計に有効活用できることを明らかにした。

機器設計においては材料の特性ばらつきや、製造公差、経時変化、環境変化による特性変化を考慮することが求められる。最適設計において、これらを考慮せずに最適解を求めた場合、変動やばらつきにより、機器の特性が大きく損なわれる可能性がある。したがって、優れた特性を有しつつ、変動・ばらつきに強いロバスト最適解を求めることが望まれる。この背景から、遺伝的アルゴリズムを用いてロバスト解を求める方法が使用されていた。一方、近年、共分散行列適応進化戦略 (CMA-ES: Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategy) が開発され、遺伝的アルゴリズムと比べ、優れた探索能力と低い計算コストを有することが明らかになってきた。そこで著者は CMA-ES によりロバスト最適化を行う方法を新たに提案し、磁気設計問題に適用することで、その有効性を明らかにした。

1章では、研究背景と目的および論文の構成について述べている。

2章では、イジングマシンを用いて磁気デバイスの設計最適化を扱うために、基本となる磁石配列の最適化問題を議論している。このために振動発電機の設計をベースとし、与えられた点の磁束密度を最大化するような2次元の磁石配列を求める最適化問題を考えた。本問題は QUBO 形式で定式化され、イジングマシンを用いて磁石配列を最適配置が求められている。最適化の結果、上に述べたようにハルバッハ配列を2次元に拡張した新しい永久磁石配置を見出した。また観測点と2次元永久磁石面との距離により、最適配置が異なることも見出している。

3章では、2章で提案したイジングマシンを用いた磁石配列最適化手法を、コイルと磁石配列の同

時配置最適化に拡張している。提案手法を振動発電デバイスの最適化に適用することで、提案手法の有効性が示されている。

4章では、2章で提案したイジングマシンを用いた磁石配列最適化手法を拡張し、磁石形状と磁性体形状のトポロジー最適化を実現する方法について述べている。トポロジー最適化は、対象物体を穴の生成・消滅を含めて自由に変形して最適形状を求める。与えられた点の磁束密度を最大にするような3次元の永久磁石配置を求めるために、最適化問題を QUBO で表し、イジングマシンで最適化している。またコイルの磁界をシールドするための磁性体形状を本手法で求めている。この問題を QUBO で表すために、まず磁性体中の磁化ベクトルを仮定し、目的関数を最小にするような磁性体形状をイジングマシンで求める。つぎに有限要素法による磁界解析により磁性体中の磁化ベクトルを求める。さらにこれら磁化ベクトルの最適配置をイジングマシンで求める。この過程を繰り返すことで、所望の磁気シールド形状を得た。

5章では、インダクタを構成する磁性材料の磁気特性を同定する新しい手法を提案している。提案手法では測定されたインダクタの直流および交流インダクタンス特性から、磁性材料のヒステリシス曲線を同定する。このために、BH 曲線をプライザッハモデルで表すことでヒステリシス曲線を決定する。さらに、測定されたヒステリシス曲線とプライザッハモデルから求めたヒステリシス曲線の差が最小となるように、プライザッハモデルのパラメータを決定する。本手法をテスト問題に適用することにより、その有効性を数値的に示している。

6章では、CMA-ES を用いた磁気デバイスの新しいロバスト設計最適化手法を提案している。提案手法では、計算量の増加を招くことなくロバスト性を評価するために、前の世代の個体群から現世代の個体に近い個体を数個体選び、それらの評価値の平均値から変動を考慮した個体の評価値を得ている。提案手法を材料ばらつきを考慮した磁気シールド最適化問題に適用し、手法の有効性を数値的に示している。

これを要するに著者は、永久磁石および磁性体の最適化問題を初めて QUBO で表現できることを示し、イジングマシンおよび量子コンピュータによる最適化を可能とした。さらに材料ばらつきや製造公差、経時変化、環境変化による特性変化に対して頑健な最適解を得るための新しいロバスト最適化手法を開発している。これらの研究は、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。