

Evolutionary Design of Electromagnetic Systems Using Topology and Parameter Optimization

(トポロジー最適化とパラメータ最適化による
電磁システムの進化論的設計)

学位論文内容の要旨

電気工学におけるコンピュータ支援設計 (CAD) は、電磁システムの設計を自動化し効率化するための計算ツールとして定義することができる。この設計支援では、まずシステムに要求される事項の定義を行い、つぎにシステムの仕様を設定し、その物理的特性をシミュレーションできる計算モデルの構築を行う。そして設計変数値により決まるアウトプットを高めるシステムの最適形状・配置を探索し、得られた解の評価を行い、さらに製造の観点からの見直しを行う。

工学機器の CAD による設計が成功するかは、多数の因子に依存している。例えば、設計されたシステムの特性を精度良く計算できるモデルや、許容される時間内に解を得ることができる最適化アルゴリズムが存在することが必要である。しかし、たとえ最適解が見出されたとしても、それが製造上許容される基本レイアウトを満足しない場合もある。このような問題を回避するために、工学的に適切な最適解を得るための初期レイアウトを慎重に設定することが必要である。

トポロジー最適化は初期レイアウト定義を必要としない形状最適化手法である。設計変数をまず決め、それらを変化させるパラメータ最適化とは異なり、トポロジー最適化では決められた設計領域中の材料分布を自由に变化させて最適化を行う。このときパラメータ最適化と異なり、最適化のための初期形状を与える必要もない。また材料分布を変化させることにより、穴が材料に存在する多重連結領域や多数ブロックからなる形状を得ることができ、設計者が予想できないような斬新な最適形状を得ることができる。トポロジー最適化は、設計者の経験によらない斬新な形状を得るための強力なツールとして、これまで特に機械工学や構造工学において用いられてきており、また電磁機器設計においても活用が増えつつある。

このようにトポロジー最適化は有望な手法であるが、つぎのような難点もある。まずトポロジー最適化により得られた最適解はしばしばチェッカーボードのような複雑な形状を有しており、製造上の観点からこれらを除かなければならない。また最適解を得るまでに非常に多くの計算ステップが必要なことがあり、各計算ステップの目的関数評価に長い計算時間が必要な場合には、全体としてあまりに長い計算時間が必要になってしまう。またトポロジー最適化では設計領域を有限個の微小要素に分割して、その要素に材料が存在するかしらないかで最適化を行うため、よい最適解に収束したとしても、その形状をより詳細に決めることが難しい。また得られる最適形状の境界は階段状になっているため、最終形状を得るためにはスムージングなどが必要である。

これらの欠点は、高速に動作するトポロジー最適化アルゴリズムにより概略の形状を得て、さらに

それを初期解として通常のパラメータ最適化を行うことにより解決することができる。実際、多くの構造工学または電気工学の応用において、トポロジー最適化は設計のための概略設計案を得るために非常に有効であると考えられている。しかし、トポロジー最適化結果からパラメータ最適化のための初期解を得るためには、チェッカーボード状の解や小さな部品に分かれた解ではなく、十分滑らかな解を得る必要がある。

本論文の主な目的は以下である。(a) 任意の設計問題に対して十分滑らかな解を得るために、トポロジー最適化のための進化論的最適化手法を提案し、その評価を行うこと。(b) トポロジー最適化により得られた形状を自動的に有限個の設計パラメータにより表し、パラメータ最適化問題を得る統合的手法を開発すること。(c) 提案する統合的手法を電磁機器の最適化に適用してその有効性を確認すること。以上の研究の遂行により、設計問題を解くための一貫した手法を実現することを目指した。

本論文の第一章では電気工学におけるコンピュータ支援設計の役割について述べている。また本研究で扱う設計過程についても述べ、さらに本研究の目的、スコープおよびオリジナリティを示している。

第二章ではトポロジー最適化の応用が構造工学から始まり、現在の広い分野に広がる過程について述べている。また現在用いられているトポロジー最適化手法について詳述するとともに、問題設定、アルゴリズム、応用例について述べている。

第三章では、進化論的アルゴリズムのトポロジー最適化への応用について述べている。本研究では局所探索と大域探索を効率的に行うために、進化論的アルゴリズムの一つである人工免疫アルゴリズムを用いている。またトポロジー最適化により工学的に有用な滑らかな解を得るためのいくつかの処理を提案している。さらに本論文では材料のあるなしを表す2値化された微小要素からなる設計領域において、形状の滑らかさの数学的な定義を与え、またこの定義を基礎として定量的に滑らかさを表す係数の性質について述べている。これらの概念をトポロジー最適化アルゴリズムにおいて導入するスムージング処理の挙動を評価するために用い、また本処理がトポロジー最適化過程に与える影響について調べている。

第四章ではトポロジー最適化により得られた形状からパラメータ最適化のためのモデルを生成するための完全な枠組みを与え、そのために必要な形状境界モデリングのための手続きについて詳細に記述している。提案するパラメータ化手法ではモデルを表すために線分とベジェ曲線を用いた。ベジェ曲線の端点におけるC0およびC1連続性を満足させるための、反復計算が不要なく計算効率のよい実装容易な方法を提案した。パラメータモデルの変数制限や固定点を定義するためのガイドラインも示した。これを用いることでトポロジー最適化により得られた形状からパラメータ最適化問題を得るための操作を完全自動化できた。

第五章では本手法の四つの適用例について述べている。そのうち三件については、三章で述べたトポロジー最適化アルゴリズムを適用したものである。具体的にはこれらは、磁気共鳴画像(MRI)システムに関する単目的関数と多目的関数最適化問題、三次元空間における垂直磁気記録用ヘッドの最適化問題である。さらにトポロジー最適化の実行、パラメータ最適化用パラメータモデルの生成、パラメータ最適化の実行からなる完全な手続きを、四番目の問題である粒子加速器における荷電ビーム偏向用C型マグネットの最適化に適用した。最適化の各ステップで得られた結果を詳細に検討したところ、本手法により高いパフォーマンスのマグネットが短い計算時間で得られたことがわかった。

第六章では本研究のまとめを行っている。さらに提案した手法の利点と今後の課題について述べている。

以上のように, 本論文ではトポロジー最適化とパラメータ最適化を統合した新しい最適化法を提案し, 電磁機器の最適化に対する本法の有効性を示した.

学位論文審査の要旨

主査	教授	五十嵐	一
副査	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

Evolutionary Design of Electromagnetic Systems Using Topology and Parameter Optimization

(トポロジー最適化とパラメータ最適化による
電磁システムの進化論的設計)

電気電子機器設計において、コンピュータ支援設計は不可欠なものとなっている。設計支援においては、設計対象の物理的特性を予測できるコンピュータモデルを構築し、さらに本モデルを基礎として、システムの形状・配置を最適化し、設計案を決定する。よって高度な設計を行うためには、優れた最適化手法が必要となる。

最適化手法のひとつであるトポロジー最適化は、初期レイアウトが不要な形状最適化手法である。設計変数をまず決め、それらを変化させるパラメータ最適化とは異なり、トポロジー最適化では決められた設計領域中の材料分布を自由に变化させて最適化を行う。したがって、トポロジー最適化により設計者が予想できないような斬新な最適形状を得ることができる。トポロジー最適化は、強力な最適化ツールとしてこれまで特に機械工学や構造工学において用いられてきており、また電磁機器設計においても活用が増えつつある。

このようにトポロジー最適化は有望な手法であるが、得られる最適解はしばしば工学的に有用とは言いがたい複雑な形状を有している。また最適解を得るまでに非常に多くの計算ステップが必要となることがあり、一般に長い計算時間が必要である。またトポロジー最適化では設計領域を有限個の微小要素に分割して形状を表すため、得られる最適形状の境界は階段状になり、最終形状を得るためにスムージングなどが必要である。

これらの難点は、高速に動作するトポロジー最適化により概略の形状を得て、さらにそれを初期解として通常のパラメータ最適化を行うことにより解決できる。しかし、トポロジー最適化結果からパラメータ最適化のための初期解を得るためには、前者により十分滑らかな解を得る必要がある。

本研究の主な目的は次である。(a) 任意の設計問題に対して十分滑らかな解を得るために、トポロジー最適化のための進化論的最適化手法を提案し、その評価を行うこと。(b) トポロジー最適化により得られた形状を自動的に有限個の設計パラメータにより表し、パラメータ最適化問題を得る手法を開発すること。(c) 提案する手法を電磁機器の最適化に適用してその有効性を確認すること。以上

の研究により、設計最適化問題を解くための一貫した手法を実現する。

本論文の第1章では電気電子機器設計におけるコンピュータ支援設計の役割について述べている。また本研究の目的と新規性を示している。

第2章ではこれまでのトポロジー最適化の応用事例について述べている。また現在用いられているトポロジー最適化手法について詳述している。

第3章では、提案するトポロジー最適化手法について述べている。本研究では局所探索と大域探索を効率的に行うために、新たに開発した人工免疫アルゴリズムを用いた。また本法により、工学的に有用な滑らかな解を得るためのいくつかの処理を提案している。さらに本論文では材料のあるなしを表す2値化された設計形状に対して、形状の滑らかさを表す指標を与えている。この指標を、トポロジー最適化アルゴリズムにおいて用いるスムージング処理の評価に用い、本処理がトポロジー最適化過程に与える影響について調べている。

第4章ではトポロジー最適化により得られた形状からパラメータ最適化モデルを自動生成するための新しい手法を与えている。提案するパラメータ化手法ではモデルを表すために線分とベジェ曲線を用いた。ベジェ曲線の端点における連続性を満足させるために、反復計算が不要なく計算効率のよい実装容易な方法を提案している。パラメータモデルの変数制限や固定点を定義するためのガイドラインも示した。これを用いることでトポロジー最適化により得られた形状からパラメータ最適化問題を得るための操作を完全自動化できた。

第5章では本手法の4つの適用例について述べている。そのうち3件については、3章で述べたトポロジー最適化アルゴリズムを適用したものである。具体的にはこれらは、磁気共鳴画像 (MRI) システムに関する単目的関数と多目的関数最適化問題、3次元空間における垂直磁気記録用ヘッドの最適化問題である。さらにトポロジー最適化の実行、パラメータ最適化用パラメータモデルの生成、パラメータ最適化の実行からなる完全な手続きを、4番目の問題である粒子加速器における荷電ビーム偏向用C型マグネットの最適化に適用している。この結果、本手法により短い計算時間で高いパフォーマンスのマグネットが得られた。

第6章では本研究のまとめを行っている。さらに提案した手法の利点と今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、電気電子機器設計のためのトポロジー最適化とパラメータ最適化を融合した新しい最適化手法を提案し、その有効性を実証しており、電気電子機器の最適設計の高度化に貢献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 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。