

報告番号	甲 第 12510号
------	------------

主論文の要旨

論文題目 **A Study on Topology Optimisation of Electro-Magnetic Devices Based on Level Set Method and Boundary Element Method**

(レベルセット法と境界要素法に基づく電磁デバイスのトポロジー最適化についての研究)

氏名 中本 謙太

論文内容の要旨

本学位論文は種々の電磁デバイスのトポロジー最適化のための高精度・高速な感度解析手法の提案および設計感度に基づく新たな構造更新手法の提案を行うものである。本論文で提案する手法を用いることにより、計算精度・コストおよび最適化問題の多峰性の点から従来は困難であった複雑形状を有する電磁デバイスの最適構造を低コストで安定的に決定することが可能となる。

トポロジー最適化は工業製品の外形形状とトポロジーを同時に最適化することのできる最も設計自由度の高い構造最適化手法である。トポロジー最適化では通常、設計対象の構造を設計領域内で定義される適当な関数の分布として表現する。これにより、構造最適化問題は関数分布の最適化問題に帰着される。こうした構造の表現手法の中で、レベルセット法は近年最も広く研究されている手法の一つである。レベルセット法は、設計対象の境界を-1 から 1 の値を取る関数（レベルセット関数）の零等位面として表現する手法であり、境界形状を明確に表現可能であるという利点を有する。これまでに多くのレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法が提案されてきたが、これらの手法は、感度解析の性能や設計感度の取り扱いに関して問題点を有している。とくに電磁デバイスの設計では、無限遠を含む領域での感度解析が必要であることや設計対象の構造が複雑になることに伴う解析精度・速度の悪化、さらには最適化問題の多峰性などトポロジー最適化を行う上で多く

の困難が存在している。

本論文では、境界要素法と H マトリクス法による感度解析手法の高精度化・高速化および設計感度に基づく構造の更新方法の改善により、従来のトポロジー最適化法よりも高速で、かつ安定的に最適解を得ることのできる手法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。第一章ではまずトポロジー最適化の実行のために必要となる構造表現手法、解析メッシュ生成法、数値解析手法について、これまでに提案されてきた手法の原理、利点、欠点を明らかにした後、欠点の改善方策の概要を述べる。第二章では、レベルセット法に基づく電磁デバイスのトポロジー最適化問題の定式化について説明する。レベルセット法を用いた構造の表現手法およびレベルセット関数分布の更新手法についての説明は本章に含まれる。とくにレベルセット関数分布から滑らかな構造境界を生成する手法について詳しく解説する。第三章では、設計感度の定義、計算法およびその高速化手法について解説する。トポロジー最適化において起こりうる構造の変化は境界形状の変形と新たな穴の生成に分けることができる。これら2つの構造変化に伴う目的関数の変化率を表す設計感度はそれぞれ形状導関数およびトポロジー導関数と呼ばれる。本章ではまず、2次元電磁場における最適化問題に対する形状導関数およびトポロジー導関数の表現を示し、これらの設計感度が順問題と随伴問題と呼ばれる2つの境界値問題の解を用いて表されることを示す。つづいて、境界要素法と H マトリクス法を用いることで順問題および随伴問題を高精度かつ高速に解く方法について解説する。とくに多目的最適化問題における感度解析専用の高効率アルゴリズムを提案する。電場強度の最小化問題に提案手法を適用した結果、最適化全体にかかる時間は従来法に比べ最大で65%削減されることを確認した。第四章では、第三章で解説した高速感度解析手法をクローキングデバイスの設計に適用した例を示す。クローキングとは、散乱体の周囲に誘電体などの物質を配置することにより電磁波の軌道を制御し、あたかも散乱体が透明化したかのように見せる技術であり、周囲に配置する物質をクローキングデバイスという。これまでに開発されてきたクローキングデバイスの構造最適化問題は円形の散乱体を不可視化するような誘電体形状を最適化により決定するものであった。本章では、従来の定式化について説明した後、定式化の修正により任意形状・材料の散乱体を不可視化するクローキングデバイスを設計する手法を提案する。実際に従来法と提案手法のそれぞれで最適化を行った結果から、従来法では散乱体の形状を変化させた場合にクローキング効果が著しく悪化するのに対し、提案手法では任意の散乱体に対して安定的にクローキング効果を発揮する誘電体形状が得られることを確認した。第五章では、第三章で提案した高速感度解析手法を境界上で目的関数が定義される場合のトポロジー最適化に適用する。目的関数が境界上で定義される場合、トポロジーの変化に伴う目的関数の変化はもともとあった境界上での目的関数値の変化と新たに発生した領域境界上での目的関数値の和として表現される。この点に配慮した上で、電波吸収体および散乱制御デバイスの設計のためのトポロジー導関数を厳密に導出し、トポロジー最適化に適用する。電波吸収体の設計に提案手法を適用した結果、吸収体表面で

の散乱を抑えつつ効率よく電磁エネルギーを吸収する構造が得られることがわかった。また、散乱制御デバイスの設計に提案手法を適用することにより、所望の方向へ強い散乱を示す誘電体構造が得られることを確認した。第六章では、形状導関数とトポロジー導関数を用いた新たな構造更新手法を提案する。これまでに開発されてきた多くのトポロジー最適化手法では、形状導関数とトポロジー導関数のどちらか一方のみを用いて構造の更新が行われてきた。しかしながら、トポロジー最適化では境界形状の変形とトポロジーの変化が同時におこるため、2つの感度を同時に使うのが自然である。本章では、境界形状の変形とトポロジーの変化の両方がレベルセット関数の変化量を用いて表現可能であることに着目し、これら2つの構造変化に伴う目的関数の変化量をレベルセット関数の変化量の関数として表現する。こうして表現した目的関数の変化量を最大化するようなレベルセット関数変化の分布を決定し、これをレベルセット関数の更新量として用いることを提案する。提案手法を逆散乱問題に適用した結果、トポロジー導関数のみを用いて最適化を行った場合に比べ、目的関数の大きさを10倍程度まで減少させることに成功した。またクローキングデバイスの設計に本手法を適用した結果、トポロジー導関数のみを用いた場合にはクローキングデバイスとして機能する構造を得られない条件であっても提案手法を用いた場合はクローキングデバイスとして十分な性能を発揮する構造が得られる場合があることを確認した。第七章では、本論文の結論を示す。

結論として、本論文では電磁デバイスのトポロジー最適化に伴う高精度解析の必要性や膨大な計算量、さらには局所最適解が無数に存在するという問題点に着目し、これらを改善することを目的として境界要素法とHマトリクス法に基づく高精度・高速感度解析手法の開発および形状導関数とトポロジー導関数の同時使用による収束性能の改善法の開発を行った。本研究により、クローキングデバイスに代表されるような複雑構造を有する電磁デバイスの構造を高速かつ安定的に決定することができるトポロジー最適化手法が開発された。本研究で提案した手法は音響デバイスや弾性体など他の物理場における最適化にもそのまま適用可能であるため、広い範囲への応用が期待される。さらに、本研究で開発した手法は周期問題への拡張も容易であるため、工学的に重要なフォトニック結晶構造やメタマテリアル構造の最適化問題への発展性を有している。