

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 電磁場の形状最適化理論と電子デバイス設計への応用

氏 名 佐竹 正義

論 文 内 容 の 要 旨

本論文の目的は、電気・電子機器の製品事例に対し、設計目標に対応した評価関数を用いた、電磁場領域におけるノンパラメトリック形状最適化問題を数理的に定式化し、コンピュータシミュレーションによりその解法を示すことである。

製品設計においては、目的とする機能・性能（例えば、センサの検知感度など）の向上に加え、その他の様々な制約（例えば、体格要件など）も満たしつつ、機能・性能を高めることが必要となる。このため設計者は、自身の設計の善し悪しを何らかの方法で判断し、より最適な設計に更新したいと考える。1900年代後半からはCAEによる事前評価が可能となり、試作実験に加えCAEの評価結果を用いた設計が行われるようになった。しかし近年、形状と性能が複雑に関係し、設計候補が多数となる製品が増加しており、CAEを用いても最良な設計を得ることに時間がかかるようになってきた。例えば、自動車などで多く用いられる静電容量式のセンサスイッチは、その電極の形状と周囲の環境により性能が複雑に変化する。このため、形状候補は膨大となるが、限られた設計時間で全ての候補を検証し、最適な設計を得ることは困難である。このような設計上の問題を解決する技術として、形状最適化技術が注目されている。しかし、電磁場領域での形状最適化に関する研究は十分には行われておらず、特にノンパラメトリック形状最適化に関しては先行研究が見当たらない。そこで、電気・電子機器製品の設計に対し、形状最適化技術を応用するための課題を選定した。以下に本研究で扱う課題について述べる。

第1の課題は、電磁場領域の電気・電子機器の設計にあたっての性能要求を、どのように評価関数で定義し、最適化問題を構築するかを明らかにすることである。一般に、電子デバイスの設計に用いられる計測値や評価値が、そのまま最適化問題の評価関数に適するかどうかはわからない。安定した最適解を得るには、その性能要求に適した評価関数の選定が重要となる。構造・流体分野の産業では、形状最適

化に関して多くの事例が報告され、適切な評価関数に関する知見も増加している。電磁気分野においても最適化問題の構築事例を示すことが、工学的な応用において重要であると考えられる。

第2の課題は、形状最適化問題に対する一解法である H^1 勾配法が、電磁場分野においても形状の滑らかさの担保が可能かを示すことである。形状最適化問題においては、得られる結果形状が、数値不安定性（形状境界が波打つ、など）を有するケースが存在する。すでに構造・流体分野においては、 H^1 勾配法により形状の滑らかさを担保できることが示されている。産業応用において、滑らかな形状を得る具体的な手段を示すことは重要であると考えられる。

第3の課題については、産業の設計で活用することを狙い、短時間で最適形状を導出可能とする手法を明らかにすることである。製品の設計現場においては、費やせる時間は限られており、設計者が短時間で利用できることが求められる。そこで、形状最適化問題をコンピュータによる数値計算シミュレーションとして実装し、短時間（本論文ではいずれの事例も1時間未満で導出）で最適な形状を導出できることを示す。

本研究では、具体的な電子デバイスとして、電化製品や自動車の操作パネルで良く用いられるようになった「静電式タッチセンサスイッチ」、および高周波無線通信やレーダセンサなどに利用される「円筒型導波管ハイパスフィルタ」を扱った。先に示した3つの課題に対する解として、各電子デバイスに対し、(1) 各電子デバイスの設計指標を考慮した最適化問題を解法可能な評価関数の提示、(2) 形状最適化問題の定式化とその形状微分の導出、(3) 数値計算例による有効性の確認、の3点を示す。第2章では、電磁場の支配方程式から、静電式タッチセンサスイッチと円筒型導波管ハイパスフィルタの設計に用いる式を導出した。以下、各電子デバイスにおける具体的な取り組み内容について述べる。

静電場の変化を利用して指などを検知する、静電式タッチセンサスイッチの電極形状を最適化する問題について、第3章で述べている。センサの検知感度は2つの状態決定問題から得られる解（電位）の差に対する H^1 2乗ノルムを目的関数として定義した。また、制約関数として電極の体積を採用した。評価関数の形状微分は、2つの状態決定問題および2つの随伴問題の解を用いて導出された。体積制約の下で負の誤差ノルムを最小化することを目的とした形状最適化問題の解を得るため、 H^1 勾配法を用いた反復法を採用した。数値解析プログラムは、汎用な有限要素法解析プログラム COMSOL Multiphysics の JAVA API によって記述し、実装された。そのプログラムを用いた数値解析により、電極の設計領域を制限しない場合には、電極が極めて薄い形状に変化し、収束解が得られない場合があることが明らかとなった。しかし、実際の設計でも行われるように、電極の設計領域を制限すれば、最適な収束形状解が得られること明らかにした。本章では、収束形状を得るた

めに、電極の設計領域を制限したが、別の方法として境界の曲率を制約することも考えられる。

高周波の電磁波を伝送する際にハイパスフィルタとして使われる、円筒型導波管の管壁形状を最適化する問題の定式化について第4章で示した。導波管の管壁形状を設計対象に選び、目的関数には導波管の入力ポートにおける各サンプリング周波数での電力消費量の和を用いた。サンプリング周波数はカットオフ周波数の前後にとられ、電力消費量の係数には、フィルタ特性に対応した係数がつけられた。目的関数に電力消費量を選んだことにより、準自己随伴と呼べる関係が成立し、状態決定問題の解のみを用いて形状微分が計算できることを示した。その結果に基づいて、第3章と同様に、 H^1 勾配法を用いた反復法による数値解析プログラムをCOMSOL Multiphysics の JAVA API を利用して作成した。円筒型導波管の数値モデルに対して得られた最適化形状は、テーパ部分が滑らかな形状に変化した。そのときのフィルタ性能は、リターンロス s_{11} のカットオフ周波数付近での変化が初期形状と比べ急峻に改善されたことにより確認された。また、経験則から導出された円筒型導波管ハイパスフィルタの形状と、本解析によって得られた形状を比較して、両者のリターンロス s_{11} は非常に近い特性を示すことを明らかにした。これより、本導波管ハイパスフィルタの形状最適化を用いることでこれまでの経験則と同等の形状を導出できることを明らかにした。本研究では、サンプリング周波数が2つしかとれなかったが、その数を増やすことにより、経験則の設計以上のフィルタ設計も可能であると考えられる。

以上の結果より、本論文では、電磁場領域における形状最適化理論を用いた電子デバイス設計への応用を具体的に示し、それらの最適化より得た設計形状により、製品性能が向上することを明らかにした。また、今後の残された課題については第5章でまとめた。