

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560319

研究課題名(和文) 高効率モータのための高速電磁界解析手法を応用した形状最適化技術の開発

研究課題名(英文) Development of shape optimization techniques using fast electromagnetic field analysis for motors with high efficiency

研究代表者

渡邊 浩太 (WATANABE, Kota)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20322828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、モータ等の電磁機器の効率を改善することを目的とした形状最適化、およびそれに必要な電磁界数値解析の高速化に関するものである。最適化手法であるON/OFF法は、材料の有無を表すビット情報を格子状に配置して形状を表現する。そのために、表面形状が階段状になってしまう問題点がある。そこで、材料が半分存在する状態を追加し、3値で材料配置を表現する手法を開発した。この方法を永久磁石同期モータの回転子の形状最適化問題に適用し、モータの発揮トルクを最大化する最適化に成功した。

また、電磁界有限要素解析に、連立方程式の求解を高速化するデフレーション法を適用することで、解析の高速化にも成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is shape optimizations to improve the efficiency of electromagnetic devices such as motors. Moreover, fast computations of electromagnetic field analysis which is necessary for the optimizations are investigated in this study. An ON/OFF method in which a bitmap expresses the distribution of material is adopted. This method has a poor ability of expression for curved surfaces. The terraced surfaces deteriorate accuracy of finite element analyses. To solve this difficulty, half material state is introduced. The proposed method is applied to an optimization to maximize torque of permanent magnet synchronous motors. The numerical results show that the present method can obtain the optimum shape of rotors.

A deflation method which can improve convergence of linear solvers is introduced so as to reduce the computational cost of the optimizations. The numerical results show that the deflation method can successfully reduce the computational cost of analyses.

研究分野：電磁界数値解析

キーワード：電磁界数値解析 最適化 電磁機器

1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の高速化により、モータ等の電磁機器の特性を数値解析により高精度に求めることが可能になりつつある。それに伴い、機器の設計において、要求仕様を満足するような機器形状を最適化計算によって求める研究も行われている。最適化計算には、機器の幅、高さ等の寸法をパラメータとして、最適値を求める「パラメータ最適化」と、機器の形状を自由に变化させて、その中から、最適な形状を見出す「位相最適化」の2種類がある。パラメータ最適化は、設計者が機器の概形をあらかじめ設定するため、自由度が限られ計算量は少なくすむ。そのため、現在の計算機性能でも実用的な最適化計算が可能である。一方、位相最適化は、形状に制限や仮定を持たせず、場合によっては完全にランダムに作成した初期形状から最適形状を求めるため、設計者の予想を上回る画期的な特性を持つ形状が得られる可能性がある。しかしながら、位相最適化計算は以下の示すような問題点があり、実用的なレベルには達していないのが現状である。

(1)与えられた制約条件を満たす形状は非常に多く(特に3次元)、そのさまざまな形状の中から最適形状を見出す必要があるため、その探索に莫大な計算量を(数値解析を数千回繰り返す)必要とする。

(2)最適化計算過程において、得られた候補解が実際に作成可能かどうかの判断を計算機が行うことが難しく、しばしば工学的に実現不可能な最適解が得られる。

このような問題点が知られているため、主に(1)の理由から、現在、3次元位相最適化に関する研究は世界的にもあまり行われていない。これまで、我々の研究グループでは、免疫型アルゴリズムを基本とした位相最適化手法を開発して、メーカーとの共同研究により、性能を維持したままインダクタの小型化に成功した。しかし、インダクタの最適化に必要な数値解析は、数分程度で終わる静磁場解析である。一方、モータの最適化で必要となる渦電流過渡解析は数日程度の解析時間を要することがあり、現状では位相最適化が困難である。さらに、駆動回路を考慮した回路-電磁界連成解析ではさらに長い解析時間が必要となる。

このようにモータの位相最適化には数値解析の高速化が必須であるが、ここ数年、我々を含むわが国の研究者が以下に掲げる画期的な新しい解析技術を相次いで発表した。ひとつは、電磁界解析で必要であった空気領域のメッシュを不要とする無限要素の改良で、これを用いることで、解析領域を機器本体だけに限定することができ、解析時間の削減が可能となる。また、電磁界解析で解く必要がある大規模連立方程式の計算を高

速化するデフレーション法の研究も行われており、電磁界の有限要素解析において、連立方程式の反復解法の収束性が改善できることが報告されている。また、過渡解析において、定常解を高速に算出するTP-EEC法が提案されており、定常解を高速に可能に算出できることが報告されている。従来の無限要素は連立方程式の収束性を悪化させる問題点があったが、それを軽減する無限要素を開発し、さらにデフレーション法を組み合わせることで、さらに収束性を改善できることを我々の研究グループにより、2011年に発表した。これらとTP-EEC法を組み合わせることで解析時間の大幅な短縮が可能になると思われる。

これらの新しい解析手法を組み合わせることで、モータの位相最適化が現状の計算機性能でも現実的な時間内に実行できるようになり、高効率なモータ設計が実現できることが期待できる。図1に目標とする最適化アルゴリズムの模式図を示す。

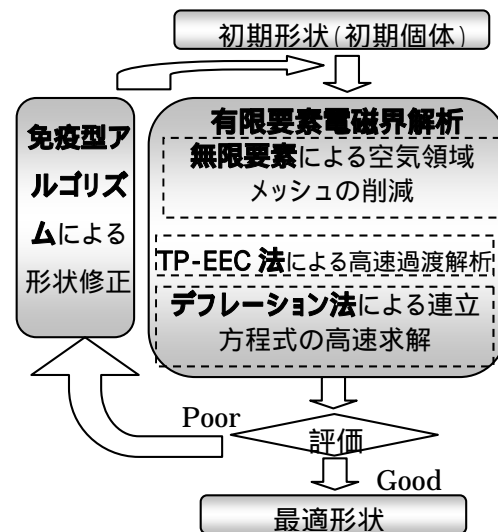


図1 提案する最適化手法

2. 研究の目的

上記の免疫型アルゴリズムと高速な電磁界解析技術を組み合わせた3次元位相最適化手法において、現時点において、以下に示す問題点がわかっており、本研究ではこれらの問題点の解決を目指す。

(1)位相最適化計算において、実用的な形状の最適解を求めるために行うフィルター処理は2次元用に開発したが、3次元最適化にはそのまま適用することが困難である。そこで、3次元向けのフィルター手法の開発を行う。それと並行して、2次元最適化向けの従来のフィルター処理を見直してより効果的な方法を模索し、性能の向上を目指す。

(2)無限要素、TP-EEC法、デフレーション法等による電磁界解析の高速化手法は研究発

表がなされた直後であり、回路との連成問題への適用はまだなされておらず、定式化を含めた手法の開発が必要である。また、デフレーション法により連立方程式の収束性を改善できることは確認できているが、計算コストが高く、計算時間の短縮が必ずしも達成できていない。この問題の解決を目指す。

3. 研究の方法

駆動回路を含めたモータの位相最適化に必要な渦電流非線形過渡解析を高速化するために、本研究では、無限要素法、TP-EEC法、デフレーション法の三つの新しい高速化手法の導入を検討する。そのためには、現在、静磁場解析にしか対応していない無限要素法を、渦電流非線形過渡解析向けに拡張する必要がある。また、TP-EEC法はモータ単体の解析には適用されているが、駆動回路との回路電磁界連成解析には適用できていないので、その手法の開発を行う。また、回路電磁界連成解析は、連立方程式の収束性が悪化することが知られているが、これを解決するためにデフレーション法を適用する。

以上の解析技術の高速化により、モータの位相最適化が実用的な計算時間で実行可能となると予想されるので、次のステップとして、モータの形状最適化に取り組む。解析対象としては、効率が良く高出力な特性からハイブリッド自動車をはじめ、様々な用途に用いられている永久磁石同期モータとする。そして、モータの回転子の磁性体形状の最適化に取り組む。さらに、最適化計算に用いる免疫型アルゴリズムの改良も行う。

上記の免疫型アルゴリズムと高速な電磁界解析技術を組み合わせた3次元最適化手法において、現時点において、以下に示す問題点がわかっており、これらの問題点の解決を目指す。

(1)位相最適化計算において、工学的に実用的な形状の解を求めるためには、表面形状を滑らかにしたり、材料中の気泡を除去したりするフィルター処理が非常に重要な役割を担っている。この処理無しで位相最適化を行うと、表面形状がフラクタル形状のような複雑な最適解が得られてしまい、工学的に実現不可能な形状になってしまう。これまでに我々の研究グループでは、Surface smoothing, Hole elimination, 引力効果と名づけたフィルター手法を開発し、一定の効果を挙げてきた。しかし、これらの手法は2次元用であり、3次元最適化にはそのまま適用することが困難である。そこで、これらのフィルター処理アルゴリズムを拡張し、3次元向けのフィルター手法の開発を行う。

(2)無限要素法は有限要素法による電磁界解析において、空気領域メッシュを不要とする画期的な手法ではあるが、この無限要素法を用いると、連立方程式の収束性が極度に悪化する

欠点があった。そこで、我々は新しい無限要素の開発を行い、収束性や解析精度を悪化させずに空気領域メッシュを不要にすることに成功した。しかし、現状では、静磁場解析にしか対応しておらず、モータの設計に必要な不可欠な渦電流非線形過渡解析に対応させる必要があり、その検討を行う。

(3)デフレーション法は、連立方程式の求解の過程において、収束の遅い成分を分離して別に解くことで収束性を改善する方法である。この手法を用いることで電磁界の有限要素解析で現れる連立方程式の収束性を改善できることを確認している。しかしながら、この方法には係数行列の固有値および固有ベクトルを算出する必要があり、これに膨大な計算コストを要してしまう。そこで、固有ベクトルの代わりに擬似的なベクトルを用いることで計算コストを削減することを試みる。また、最適計算では、似たような形状のモデルに対して有限要素解析を繰り返すため、過去に解析した解の情報を用いて収束性を改善する方法も考えられる。これらのデフレーション法の実用化に向けた改良を検討する。さらに、過渡解析における最初の数周期分の解を用いて、最終的な定常解との誤差を推定して誤差補正することで、高速に定常解を算出するTP-EEC法にも着目する。現在、この手法はモータの解析に適用され始めている。そこで、この手法を回路電磁界連成問題への拡張を行う。モータ駆動回路としては、スイッチング素子を単純なON/OFFスイッチとしてみなした簡略化した回路を用い、回路方程式を手計算で算出して、電磁界解析プログラムに組み込む予定である。

上記の問題点の解決を解決するほかに、モータの電磁界解析に必要な、メッシュ生成プログラムの開発も行う。モータの数値解析において、回転子が回転するため、その回転に合わせて、時間ステップ毎にメッシュを切りなおす必要がある。これに必要な技術はすでに確立しているので、文献などを参考してプログラムの作成を行う。また、我々はそれぞれ独立して作成したメッシュを接合して有限要素解析を行う非適合メッシュに関する研究も行っており、この手法を適用することで、メッシュ生成が容易になる可能性があり、その検討も行う。

4. 研究成果

(1)位相最適化計算において、従来から開発してきたON/OFF法と免疫型アルゴリズムを組み合わせた位相最適化アルゴリズムを見直して、表面形状を滑らかにするフィルター処理の簡素化を行った。またON/OFF法では、格子状のメッシュに材料のあり/なしの状態を表すビット情報を配置することで形状を表現する。そのために、曲面形状を表現しようとする、表面形状が階段状になってしまう問題点があった。そこで、材料が半分存在

する状態を追加し、2値ではなく、3値で材料配置を表現する手法を新たに開発し、磁気シールドモデルに適用した。その結果、完全にランダムに配置した初期状態からスタートして、提案手法により進化計算を行ったところ、磁気シールド構造で有効とされる多重のシールド構造が現れ、提案手法の有効性を確認した。また、フィルター処理を簡素化したにも係わらず、工学的に実現困難な複雑形状が現れるのを回避することができた。

さらにこの手法を永久磁石同期モータの回転子の形状最適化に適用した。最適化の目的としてトルクの最大化とし、回転子内部の磁性材料の配置の最適化を行った。その結果、フラックスバリアと呼ばれる磁束を回転子の外に導く空隙構造が生成され、トルクが上昇することを確認できた。また、生成された形状も工学的に十分に実現可能な形状であった。

上記の最適化で用いたフィルター処理を3次元に拡張して、3次元の最適化プログラムを作成し、磁気記憶用の磁気ヘッドの形状最適化に適用した。その結果、実用的な形状が得られることを確認した。また、機械学習のアイデアを取り入れて、最適計算の過程を学習過程とみなすことで、形状変更の良し悪しを学習し、最適計算を高速化する手法も開発した。

永久磁石同期モータの最適化は国内外の他の研究グループでも盛んに実施されており、それに用いられている最適化手法も様々提案されている。しかし位相最適化に限ると、局所解に陥りやすいレベルセット法等の手法が多く、大域的探索能力の面において提案手法は優れていると思われる。ただし、現状では最適解の探索に多くの時間を要しているため、より効果的な探索方法を検討する必要がある。

(2)大規模な連立方程式を求解の高速化手法であるデフレーション法では、解の中で収束の遅い成分を分離する必要があるが、その分離する方法の比較、および反復計算の過程において、内部反復の収束判定が全体の収束特性に与える影響などを調べた。さらに、デフレーション法において、膨大な計算コストを要していた固有値及び固有ベクトルの計算を行わず、疑似的な固有ベクトルを代わりに用いる方法の実用性を調べた。その結果、極めて軽微な計算コストで作成した疑似固有ベクトルを用いても収束性を改善でき、計算コストを削減できることを示した。また、提案手法が線形解析だけでなく、実用的な非線形解析においても有効であることを示した。提案手法は解析メッシュの中に扁平な要素が含まれているときにより効果的に働く。ON/OFF法を元にした形状最適化計算では、格子状にメッシュを切る制約から、空気領域に扁平な要素が現れやすく、そのようなメッシュに対して、提案手法は効果的に収束性を改

善できる。

提案手法を非線形解析に適用したところ、収束性の改善を確認できたが、その理論的な裏付けはまだ不十分である。また、他の高速化手法との数学的な関連性の調査が不十分であり、今後、これらの解明を進めることでより効果的な高速化手法を見出すことができる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Yuki Hidaka, Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Stochastic topology optimization based on level-set method, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 33, No. 6, pp. 1904-1919, 2014, DOI: 10.1108/COMPEL-11-2013-0375

Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, A modified immune algorithm with spatial filtering for multiobjective topology optimization of electromagnetic devices, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 33 No. 3, pp. 821-833, 2014, DOI:10.1108/COMPEL-09-2012-0174

Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Accuracy Evaluation of Three Dimensional FE Analysis Based on Nonconforming Voxel Element, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol. 33, No. 1/2, pp. 181-190, 2014, DOI:10.1108/COMPEL-10-2012-0232

〔学会発表〕(計8件)

渡邊浩太, 五十嵐一, 強化学習を取り入れた免疫型アルゴリズムによる電磁機器の形状最適化, 第23回MAGDAコンファレンス in 高松, 2014年12月5日, サポートホール高松(香川県・高松市)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Topology Optimization based on Three State ON/OFF method for Electromagnetic Devices, The 33rd JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology, 2014年10月29日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

Kota Watanabe, Yuki Taiami, Hajime Igarashi, Fast Deflated CG Method for Topology Optimization, The 16th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, 2014年9月17日, Graz(オーストリア)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi,
Topology Optimization Based on Immune
Algorithm with Reinforcement Learning,
The Sixteenth Biennial IEEE Conference on
Electromagnetic Field Computation, 2014
年 5 月 28 日, Annecy (フランス)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi,
Deflated Conjugate Gradient Method for
Magnetostatic Analysis, International
Conference on Simulation Technology, 2013
年 9 月 11 日, 明治大学 (東京都・千代田区)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi,
Topology Optimization based on ON/OFF
method with Surface Smoothing,
International Conference on the
Computation of Electromagnetic Fields,
2013 年 6 月 30 日, Budapest(ハンガリー)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi ,
Convergence Property of Deflated
Conjugate Gradient Method , 15th Biennial
IEEE Conference on Electromagnetic Field
Computation , 2012 年 11 月 14 日 , 大分オア
シスタワーホテル(大分県・大分市)

Kota Watanabe, Hajime Igarashi ,
Filtering Effect in Topology Optimization
of Electromagnetic Devices , 12th Workshop
on Optimization and Inverse Problems in
Electromagnetism , 2012 年 9 月 20 日 ,
Ghent(ベルギー)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

渡邊 浩太 (WATANABE, Kota)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 2 0 3 2 2 8 2 8