

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17778

研究課題名（和文）CMA-ESを用いたマルチフェーズトポロジー最適化法の開発と光デバイス応用

研究課題名（英文）Development of multi-phase topology optimization method using CMA-ES and its application to optical devices

研究代表者

藤井 雅留太 (Fujii, Garuda)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：90569344

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多峰性や設計変数間の依存性、高物性値比などの困難な性質を含むトポロジー最適化において、初期推定や戦略パラメータの調整などの試行錯誤を必要としないトポロジー最適化を開発した。具体的には最適化法として、共分散行列適応進化戦略（CMA-ES）を用い、矩形制約を実装する適応的ペナルティ関数法を実装することで、デバイス設計などの実問題においてもその有効性を確認することができた。開発した手法を用いて、さまざまな物理における透明化・無散乱化を実現するクロージングデバイスの設計に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発された手法は困難な構造設計問題においても初期推定を必要とせず、性能の良い最適化構造を得ることができ、そのため、デバイス開発までの総合的な時間を大幅に短縮することが可能となり、製品開発における設計に必要な時間を短縮することが可能である。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a topology optimization for device design problems that involves difficult properties such as multimodality, interdependence between design variables, and high ratio of material properties. Specifically, by using the covariance matrix adaptive evolution strategy (CMA-ES) as an optimization method and implementing an adaptive penalty function method handling box constraints, its effectiveness is shown in actual design problems. By using the developed method, we succeeded in designing a cloaking device that realizes transparency and invisibility in various physics.

研究分野：計算力学，構造最適化，設計工学

キーワード：トポロジー 最適化 メタデバイス メタマテリアル CMA-ES クロージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶やメタマテリアルなど、光の波長サイズの構造体による光制御が近年盛んに研究されており、究極の光制御を目指した様々な光学デバイスの開発が進んでいる。それらのデバイスの一つとして光学迷彩、つまり光学クロックに関する研究が世界中で盛んに行われている。光学クロックは物体を何らかの構造で囲むことにより、透明マントのごとく物体を不可視にするデバイスである。このような光学クロックは「物体を囲む構造により光の散乱を極限まで抑え、構造外の電磁場を変化させない」と物理的に解釈され、構造外への散乱を極めて小さくすることが可能な構造を設計することにより、光学クロックを実現することは可能である。

一方で、これらのクロックの最適化は多峰性が強い問題となり、トポロジー導関数や感度に基づいて構造を更新する従来のトポロジー最適化では、得られた最適化構造が初期構造に強く依存する。大域的最適解もしくは性能の良い有望な局所的最適解を得るためには、様々な初期解から最適化を行うトライ&エラーの繰り返しが必要であり、多峰性の強い問題では、その探索作業に非常に時間がかかる。実際、申請者のこれまでの研究ではその作業に半年～1年程度必要であり、速やかに最適化を行うためにも、適切な初期構造の探索が不要で、多峰性問題に強いトポロジー最適化法が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、CMA-ES (共分散行列適応進化戦略) に基づいたトポロジー最適化法を構築し、多峰性問題に対して抜本的な解決方法となるトポロジー最適化法を開発する。次に、構造に制約を課すことによる無用な解の削減、有限要素解析部分の MPI による粒度の大きい並列化により、最適化計算全体の大幅な高速化を実現する。レベルセット法による形状表現法を用い、グレースケールを含まない最適化構造を得ることにより、製造に直結するトポロジー最適化を開発する。CMA-ES を用いることにより、多峰性問題における有望な最適解を迅速に探索する方法を構築する。本手法は多峰性が強く、実現が困難な性能を期待されるデバイス設計への抜本的な解決法として、光デバイスのみならず波動伝搬問題 (音響, 振動), 熱伝導問題などをはじめとした他の物理現象における最適化問題への展開も期待される。

一方で、研究開始時点において、CMA-ES に基づいたトポロジー最適化は現在のところ開発されていない。その理由として、導関数や感度に基づいて構造を更新する従来のトポロジー最適化と比較して、計算コストが大きいことが考えられる。特に、多点探索を行うための多くの解の解析と評価や、共分散行列の固有分解に計算時間がかかる。しかし、解の解析は互いに完全に独立であるため、粒度の大きい並列化が可能であり、大きく計算時間を減らすことができる。そこで並列計算を実装し、計算コストの問題を解決することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では (1) ~ (4) の手順で研究目的を達成するための研究開発を行った。

(1) CMA-ES のプログラム開発

CMA-ES は正規分布乱数による解生成と、解の探索範囲の中心・サイズ・形を更新することにより、最適解を求める最適解探索法であり、進化戦略に基づいた最適化法の中でも最も高い最適解の探索性能を有している。また、多峰性・変数間依存性・悪スケール性の強い困難な最適化問題に対して、大域的最適解もしくは有望な局所的最適解の効率的な探索が可能である。さらに、全ての最適化パラメータに推奨値があり、それらは最適化する設計変数の総数にのみ依存するため、その調整が必要無いという特徴がある。

CMA-ES のプログラムの実装後、光学クロックのトポロジー最適化を行ったところ、非常に効率よく良い性能を実現することが可能であることがわかった。一方で、やはりサンプリングの評価に時間がかかり、これらを開発するために次項の並列化に取り組んだ。

(2) MPI によるサンプリング評価の粒度の大きい並列化

MPI によるサンプリング評価の並列化を行った。CMA-ES によるトポロジー最適化の計算コストの多くはこのサンプリング評価であるため、例えば 40 コアの計算機により 40 並列の計算を行うことで、計算時間は劇的に改善した。

一方で、構造の作りやすさを改善するための制約に関する項の最小化に苦戦しており、それらを改善するために、次項の制約の実装法の開発に取り組んだ。

(3) 適応的ペナルティ関数法による矩形制約の開発とプログラム実装

CMA-ES における分布パラメータの一つである中心ベクトルの位置により、解空間に制約を課して狭くすることにより、最適解の効率的な探索を可能とする。この制約を実装することで、最適化における設計変数の上下限値を設定することが可能になり、十分な性能と作成しやすい構造の両立が可能となった。

(4) 様々な物理におけるメタデバイスのトポロジー最適化の開発

電磁波や音響などを対象とした波動散乱問題や、熱伝導や電気伝導に代表されるラプラス問題における有限要素解析プログラムを開発し、それらをトポロジー最適化に組み込むことによ

り、様々な物理におけるメタデバイスのトポロジー最適化の開発をおこなった。また、それらを組み合わせることにより、複数の物理で性能を発揮するマルチフィジクスメタデバイスのトポロジー最適化にも成功した。

4. 研究成果

主な研究成果は次の通りである。

1. 本研究ではまずCMA-ESによる最適解探索に基づいたトポロジー最適化を開発した。形状表現には最適化構造の製造に直結することが可能なレベルセット法を用い、構造の明瞭な境界を表現した。図1は開発した最適化法にとり設計した物体の不可視化(無散乱化・透明化)を実現する光学クロックのトポロジー最適化の過程での構造の変化と、最終的に得られた最適化構造とその周りの電磁波の分布を示す。中心の円筒形の完全電気導体(グレー)によって生じる散乱が誘電体(青)により抑制され、左から右へ伝播する平面波が再現されていることが図1の右端の図からわかる。開発したこれらのトポロジー最適化により、初期推定や戦略パラメータの導出などの試行錯誤が不要であり、一度の最適化計算で性能の良い最適化構造を得ることが可能となった。

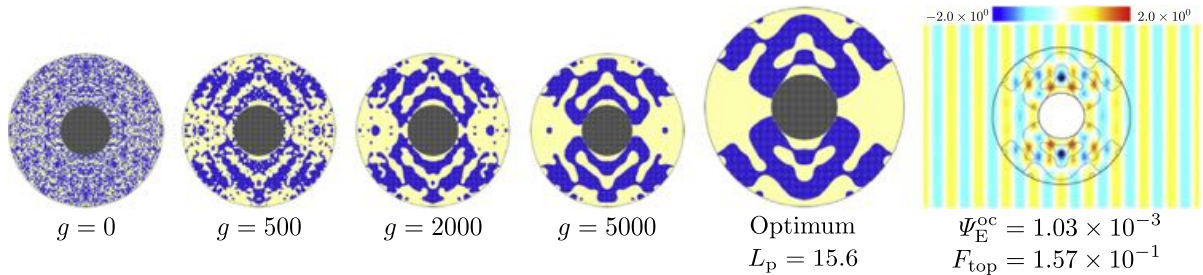


図1

2. 次に、開発したトポロジー最適化を定常状態の熱伝導、電気伝導などのラプラス問題、および音響散乱問題へ拡張した。図2は熱伝導における断熱の領域の不可視化を実現するサーマルクロック、図3は電気伝導における不可視化を実現する直流電流クロックのトポロジー最適化結果を示す。これらのクロックがない場合、断熱や絶縁の領域は温度や電位の等高線を大きく曲げるのだが、クロックが存在する場合は設計領域の外側の領域の等高線がほぼ直線となり、断熱や絶縁の領域がない場合の物理場をほぼ完全に再現し、熱伝導および電気伝導における不可視化を実現できている。また、複数の対称性などを課した最適化結果においては、従来の理論・実験的研究と非常に良い一致を示しており、従来提案されていたスキームが最適化構造の1つであることを明らかにした。

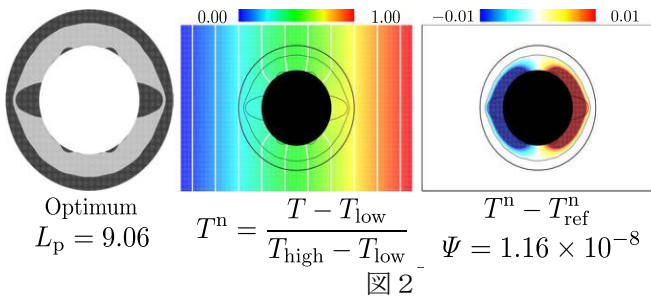


図2

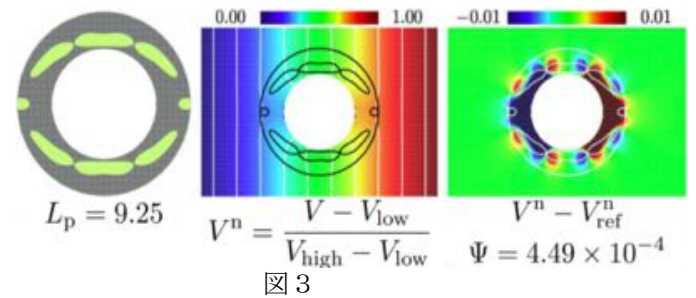


図3

3. さらに複数の物理に対して、不可視化を実現するよりチャレンジングな設計問題への展開にも成功した。これらはバイファンクショナルクロックまたはマルチフィジカルクロックなどといわれ、本研究では図4に示す熱伝導と電気伝導どちらにおいても不可視化を実現できるデバイスの設計を行った。

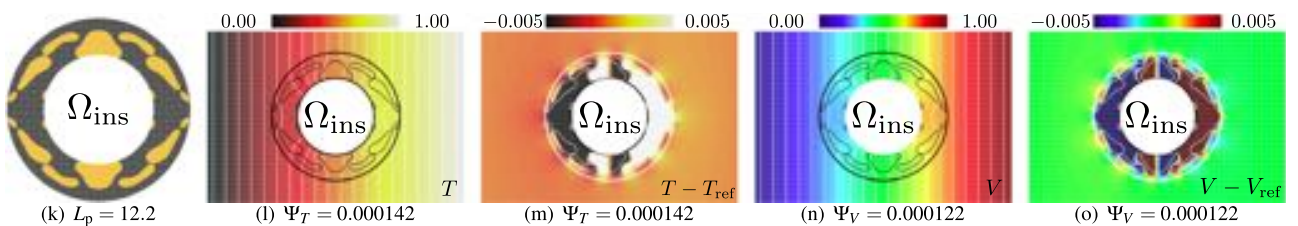


図4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujii Garuda, Akimoto Youhei	4. 巻 115
2. 論文標題 Optimizing the structural topology of bifunctional invisible cloak manipulating heat flux and direct current	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 174101 ~ 174101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5123908	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Garuda, Akimoto Youhei, Takahashi Masayuki	4. 巻 123
2. 論文標題 Direct-current electric invisibility through topology optimization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 233102 ~ 233102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5022881	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Garuda, Akimoto Youhei	4. 巻 137
2. 論文標題 Topology-optimized thermal carpet cloak expressed by an immersed-boundary level-set method via a covariance matrix adaptation evolution strategy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1312 ~ 1322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Garuda, Akimoto Youhei	4. 巻 44
2. 論文標題 DC carpet cloak designed by topology optimization based on covariance matrix adaptation evolution strategy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2057 ~ 2057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.44.002057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujii Garuda, Takahashi Masayuki, Akimoto Youhei	4. 巻 332
2. 論文標題 CMA-ES-based structural topology optimization using a level set boundary expression--- Application to optical and carpet cloaks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 624 ~ 643
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cma.2018.01.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujii Garuda, Akimoto Youhei, Takahashi Masayuki	4. 巻 112
2. 論文標題 Exploring optimal topology of thermal cloaks by CMA-ES	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 061108 ~ 061108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5016090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋 正幸、秋本 洋平、藤井 雅留太	4. 巻 84
2. 論文標題 共分散行列適応進化戦略に基づいた音響クロークのトポロジー最適化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 藤井 雅留太, 秋本 洋平
2. 発表標題 ラプラス方程式におけるクロークの CMA-ES によるトポロジー最適化
3. 学会等名 日本機械学会第 31 回計算力学講演会 (CMD2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井 雅留太, 秋本 洋平
2. 発表標題 設計変数間の依存性を考慮した Sparse CMA-ES とトポロジー最適化への応用
3. 学会等名 日本機械学会 第 28 回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 正幸
2. 発表標題 CMA-ES を用いた音響クローキングデバイスのトポロジー最適化
3. 学会等名 日本機械学会 第30回計算力学講演会 (CMD2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Garuda Fujii
2. 発表標題 CMA-ES Based Topology Optimization for Thermal-Electrical Bifunctional Devices
3. 学会等名 The 42nd PIERS, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井雅留太
2. 発表標題 CMA-ESを用いたトポロジー最適化によるクローク・カムフラージュ・イリュージョン
3. 学会等名 日本応用数理学会研究部会「数理設計」第21回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井雅留太
2. 発表標題 トポロジー最適化の基礎と最新展開
3. 学会等名 第87回 形の科学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Garuda Fujii and Youhei Akimoto
2. 発表標題 Thermal electrical bifunctional cloak designed by topology optimization based on CMA-ES
3. 学会等名 ICMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Garuda Fujii and Masayuki Takahashi
2. 発表標題 Topology optimization for acoustic cloak incorporating acoustic-elastic coupling
3. 学会等名 ICMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Garuda Fujii Research Group http://www.kankyo.shinshu-u.ac.jp/~garudalab/html/index.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----