

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870239

研究課題名(和文) 広周波数帯での不可視化を目指したワイドバンド光学迷彩のトポロジー最適化法の開発

研究課題名(英文) Topology optimization for cloaking devices operating at multiple frequency

研究代表者

藤井 雅留太 (FUJII, Garuda)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：90569344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では光学迷彩構造の1つであるカーペットクロークのトポロジー最適化を行い、複数の周波数において透明マント効果を実現させた。カーペットクロークは平坦面上の凸を無散乱化し、凸が無い場合と同じ平坦面による反射を実現することで、凸を不可視化することができる。形状表現方法としてはレベルセット法を用い、格子点上に配置したレベルセット関数を線形に補間し、レベルセット関数のゼロ等位面を誘電体構造の境界として有限要素モデルを作成した。複数の周波数において、散乱を数値化した評価関数の和を最小化する誘電体構造を設計した。得られた最適化構造の評価関数の周波数応答を計算し、複数の周波数で透明マント効果を確認できた。

研究成果の概要(英文)：Topology-optimized carpet cloaks is presented using level-set boundary expressions. These carpet cloaks are designed with the idea of minimizing the value of an objective functional, which is here defined as the integrated intensity of the difference between the electric field reflected by a flat plane and that controlled by the carpet cloak. Cloaks, made of dielectric material, are designed to imitate reflections from a flat plane. The profiles associated with optimal configurations are controlled by adjusting a regularization parameter. We also designed carpet cloaks operating at multiple frequency. The objective function is defined as the summation of the evaluation of the amount of scattering by a bump, and minimize the value of objective function. By computing the frequency response of the numerically evaluated scattering, we confirm the reduction of the scattering at multiple frequency.

研究分野：計算力学

キーワード：トポロジー最適化 光学クローク

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やカーペットクロックに関する研究が世界中で盛んに行われている。光学クロックやカーペット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。このような光のクロッキングは「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。

光学クロックとカーペットクロックはこれまで金属製のメタマテリアルにより構成されてきたが、金属による光散乱を抑制することが困難であるため、メタマテリアルによる光学クロックの実現は、現状では難しい。従来の光学クロックの研究の多くは座標変換に基づく Transformation optics により設計指針がたてられたが、Transformation optics ではクロック構造を具体的に設計できないため、十分なクロック性能を実現できない。

近年では高性能なクロックを実現するためにトポロジー最適化が注目を浴びているが、従来の密度法によるトポロジー最適化で得られる最適化構造はグレースケール（誘電体と空気の間状態）を最適化構造内に含み、実際の作成が困難である。そのような問題点に対し、研究代表者らは光学クロックの設計を指向した光伝搬制御に関するトポロジー最適設計を開発し、誘電体で構成される光学クロックの設計に成功した。得られた最適化光学クロックは単周波数の入射光に対し、極めて良いクロック性能を示した。また、その構造図をもとにシンガポールの研究チームが 3D プリンタを用いてテフロン製のサンプルを作成し、実験においても従来のクロックと比較し、非常に良いクロック性能を有することが示された。

一方で、現在のところトポロジー最適化により設計が可能であるのは、一つの周波数に対してのみ不可視となる光学クロックの設計であり、異なる周波数では強く光散乱が起る。完全な光学クロックを実現するためには光学クロックが不可視となる周波数帯を拡張し、可視光領域すべての周波数で不可視となるワイドバンド光学クロックの実現が極めて重要であるが、今のところ実現の目処は立っていない。それゆえ、ワイドバンド光学クロックの研究は多くの研究者が注目する最重要な研究の一つである。

2. 研究の目的

本研究ではクロッキングデバイスの不可視化が可能な周波数の増加、拡大を目指したクロッキングデバイスのトポロジー最適化法を開発する。最適化手法は数学的根拠に基づき、所望の性能を実現することが可能な構造物の形状や形態を決定する設計手法である。トポロジー最適化は最適化の過程で構造内に新しい孔の出現を許容することが可能であり、最適化手法のなかでも最も設計自由度が高い。それゆえ、従来の最適化手法では得ることのできない高性能なデバイスを設計することが可能である。

3. 研究の方法

近年では高性能なクロックを実現するためにトポロジー最適化が注目を浴びているが、従来の密度法によるトポロジー最適化で得られる最適化構造はグレースケール（誘電体と空気の間状態）を最適化構造内に含み、実際の作成が困難である。

研究代表者らは実際に作成可能な光学クロック構造を具体的に設計することが可能であるレベルセット形状表現に基づく光学クロックのトポロジー最適化法を開発する。波動散乱に関するトポロジー最適化は多峰性の強い問題になるため、性能の良い構造の設計には適切な初期構造の推定を必要とするため、それらの試験的な計算を要する。

目的関数は複数の周波数での散乱を数值的に評価し、それらの和を最小化する。

4. 研究成果

本研究ではまず光学迷彩の1つであるカーペットクロックのトポロジー最適化を行なった。カーペットクロックのトポロジー最適化は多峰性の強い関数であるため、いくつかの初期構造から最適化を行い、多層膜構造から行なった最適化計算において、図1の最適化構造と高いクロッキング性能を実現することができた。得られた最適化構造はレベルセット形状表現を用いているため、境界上での光散乱をシミュレーション上で厳密に取り扱うことが可能であり、明瞭な誘電体境界を有しているため、3Dプリンタでの作成が容易となっている。また、性能面でも平坦面上の凸が無い場合とほぼ同じ反射を実現することができており、カーペットクロックが無い場合と比較して、凸による散乱を 0.2% 未満にまで低減することが可能となった。

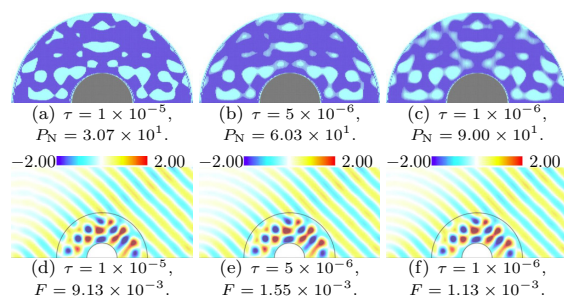


図1 カーペットクロックのトポロジー最適化構造

本研究ではさらにカーペットクロークに対して、複数の周波数での不可視化を試みた。

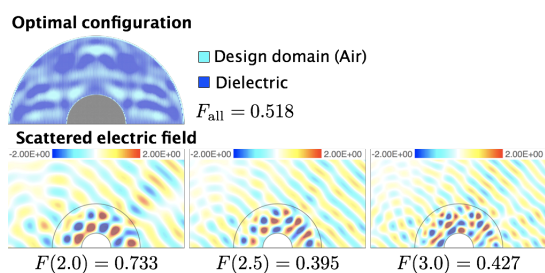


図2 複数の周波数での不可視化

図2は複数の周波数での不可視化を目的としたトポロジー最適化結果である。複数の周波数での不可視化を実現するためには、非常に細かい構造が必要となり、その部分は平均的な誘電率が小さい材料に相当する物性値が必要となることが明らかとなった。

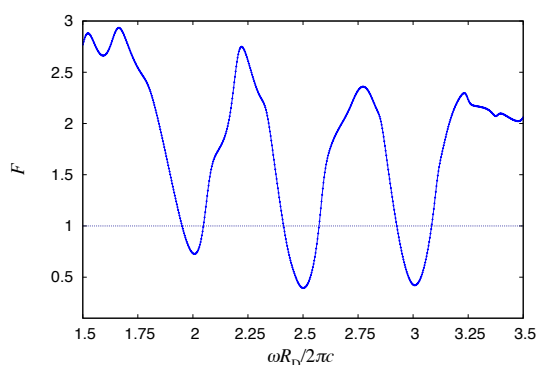


図3 評価関数の周波数応答

図3は散乱を数値化した評価関数の周波数応答を表している。最適化の対象とした周波数では評価関数のディップがみられ、散乱が低減され、透明マント効果が出現していることがわかる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Garuda Fujii and Tsuyoshi Ueta, Topology-optimized carpet cloaks based on a level-set boundary expression, Physical Review E, Vol. 94, 043301 (2016), doi:10.1103/PhysRevE.94.043301. (査読有り)
- ② Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta, Mamoru Mizuno, and Masayuki Nakamura, Topology-optimized multiple-disk resonators obtained using level set

expression incorporating surface effects, Optics Express, Vol. 23, Issue 9, pp.

11312-11326 (2015),

doi:10.1364/OE.23.011312. (査読有り)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 高橋 正幸, 藤井 雅留太, 秋本 洋平, 中村 正行, 進化的戦略を用いたカーペットクロークのトポロジー最適化, 講演番号 2311, 日本機械学会第 26 回設計工学・システム部門講演会・2016.10.8-10, 慶應義塾大学 日吉キャンパス.
- ② 高橋 正幸, 藤井 雅留太, 秋本 洋平, 中村 正行, CMA-ES を用いたトポロジー最適化と光デバイス応用, 講演番号 292, 日本機械学会第29回計算力学講演会 (CMD2016), 2016年9月22日~24日, 名古屋大学 東山キャンパス.
- ③ Garuda Fujii, Multi-Objective Topology Optimization for Carpet Cloaks, MS502-5(150997), Advanced Simulation for Energy Harvesting and Converting Metamaterial Devices, Mini-symposium, Conference Room South 311 (3F, Coex), 11:00-12:30, WCCM/APCOM2016, COEX, Korea | 24-29 July 2016.
- ④ Garuda Fujii and Masayuki Nakamura, Topology optimized design of carpet cloaks based on a level set approach, 9630, SPIE Optical Systems Design 2015: Computational Optics, Jena, Germany | September 07, 2015.
- ⑤ Garuda Fujii and Masayuki Nakamura, Topology optimized carpet cloak by means of a level set based topology optimization, ID:1144, Topology and Shape Optimization 7 (Metamaterials I), 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSMO-11), Sydney University, Australia | 25-29 August 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井雅留太 (FUJII, Garuda)

信州大学 学術研究院工学系 助教

研究者番号 : 90569344