

平成 2 6 年 6 月 1 7 日現在

機関番号： 1 3 6 0 1

研究種目： 研究活動スタート支援

研究期間： 2012 ~ 2013

課題番号： 2 4 8 6 0 0 5 0

研究課題名（和文）光学迷彩を指向した光制御に関するトポロジー最適化法の開発

研究課題名（英文）Level set-based topology optimization for optical cloaks

研究代表者

藤井 雅留太（FUJII, Garuda）

信州大学・工学部・助教

研究者番号： 9 0 5 6 9 3 4 4

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円、（間接経費） 690,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では光学迷彩構造の設計を指向したトポロジー最適化法を開発し、高性能な光学クローク構造の設計に成功した。設計された最適化構造は従来の光学クロークと比較して、散乱を大きく低減し、誘電体と空気の間に明瞭な境界をもつため、誘電体境界での反射・散乱を厳密に考慮したトポロジー最適設計が可能となった。また、正則化パラメータを変えることにより、構造の周囲長の制約を変えることが可能となり、実際の作製技術に合わせた様々な複雑さを有する光学クローク構造を設計することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：We developed level set-based topology optimization for optical cloaks and present advanced optical cloaks realizing high-performances. The designed optical cloaks can reduce the amount of light scattering caused by a scattering object. The developed optimization method can provide various optimal configuration by changing a regularization parameter.

研究分野： 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

科研費の分科・細目： 5003

キーワード： 光学クローク トポロジー最適化

1. 研究開始当初の背景

光の波長程度の微細な構造体であるフォトニック結晶や、波長よりさらに微細な金属構造体であるメタマテリアルは完全な光制御やこれまでに無い新奇な光学特性を実現しうる研究対象として、世界中で盛んに研究が行われている。これらの構造体は新しい光学デバイスを実現するために用いられ、レーザー、導波路、無反射構造、スーパーレンズなど、その応用先は極めて多岐に渡る。このようなフォトニック結晶やメタマテリアルの性能はその構造に強く依存し、周期、不規則、フラクタルなど、これまでにさまざまな構造が提案され、研究されてきた。

光学クロークはフォトニック結晶・メタマテリアルの応用の最たる例であり、いわゆる透明マント効果（光学迷彩）を実現するための電磁デバイスである。2006年にLeonhardtとPendryらによる論文[1,2]が発表されて以来、瞬く間に世界中に広がった。多くの研究者がその科学的な面白さに魅了され、実現を目指して今日も研究が行われているが、現在でも満足のいく性能を有する光学クロークは実現されていない。光学クロークに関する研究は負の屈折率を有するメタマテリアルを用いた研究が主流であり、Microwave cloaking shell [3] や Unidirectional metamaterial cloak [4] など分割リング共振器を集積して作成したデバイスの実験結果が多数報告されている。しかし、お世辞にもこれらのデバイスのクローク性能はマイクロ波に対してすら十分であるとはいえず、今後の可視光での光学クロークの実現の目処は今のところ立っていない。

最適設計法はデバイスの設計を行う際に有効な数値計算法であり、高性能なデバイスの設計が可能となり得る。最適設計法の中でも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創出を許容することができるなど、従来の寸法最適化、形状最適化と比較して設計の自由度が高く、これまでに無い高性能なデバイスの設計が可能となり得る。光学クロークにおいてもAndkjærらによりこれまでに密度法によるトポロジー最適化が行われ、入射角に性能が依存しない回転対象な構造を有する光学クローク[5]、偏光に依存せず散乱を極小化することが可能な光学クローク[6]などの設計に成功した。しかし、密度法によって得られる最適化構造は最適化構造内にグレースケールと呼ばれる物体（誘電体）と空気の間状態の媒質を含むことを許容する。グレースケールを含む最適化構造は実際に作成することが極めて困難であり、フィルタリングなどによりグレースケールを最適化構造から取り除く方法などが提案されているが、フィルタリングされた構造の性能は劣化し、もはや最適化構造ではない。それゆえ、グレースケールの問題を抜本的に解決するレベルセット法に基づくトポ

ロジー最適化法がYamadaらによって開発された。レベルセット関数は区分一定の関数として、境界からの符号付き距離で表現される。そのためグレースケール問題を抜本的に解決することが可能な構造表現法として提案されている。

[1] U. Leonhardt, Science 312, 1777–1780 (2006).

[2] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, Science 312, 1780–1782 (2006).

[3] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, Science Vol. 314 no. 5801 pp. 977-980(2006)

[4] N. Landy and D. R. Smith, Nature Materials 12, 25–28 (2013)

[5] J. Andkjær and O. Sigmund, Appl. Phys. Lett. 98, 021112 (2011).

[6] J. Andkjær, N. A. Mortensen, and O. Sigmund, Appl. Phys. Lett. 100, 101106 (2012).

2. 研究の目的

本研究の目的は、誘電体で構成される光学クローク構造のレベルセット形状表現に基づいたトポロジー最適化法を開発し、高性能かつ現実的に作成可能、つまりグレースケールフリーな光学クロークの適化構造を設計することである。また、レベルセット関数を格子内で線形補間し、格子上でのレベルセット関数の0点、つまり構造の境界をもとめ、明瞭な境界を有する最適化構造を得る。さらに、正則化係数を変えることにより、制約の強さを変え、各正則化係数により得られる様々な最適化構造を示す。以下に本研究で開発するプログラムをまとめる。

- (1) レベルセット関数から誘電体境界の抽出および有限要素生成を行うプログラムの開発
- (2) 大規模光散乱解析のための有限要素解析プログラムの開発
- (3) 随伴場計算および感度解析プログラムの開発
- (4) レベルセット関数の更新プログラムの開発
- (5) 最適設計計算および高性能な光学クローク構造の設計
- (6) 光学クロークの性能評価

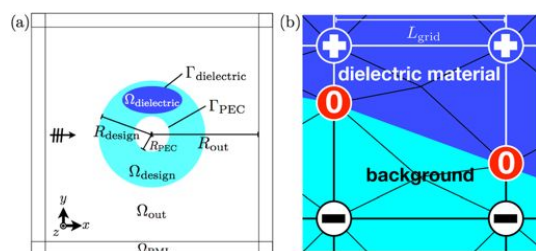


図1 光学クロークのトポロジー最適化の概要と格子内でのレベルセット関数と誘電体境界

3. 研究の方法

本研究では上記の研究目的を達成するために以下の手順で研究を行った。

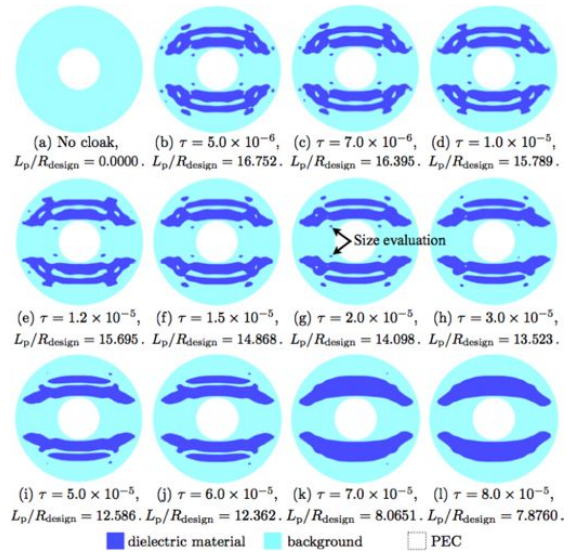
- (1) レベルセット関数から誘電体境界の抽出および有限要素生成を行うプログラムを開発した。レベルセット関数は設計領域内での格子点上に与えられ、境界からの符号付き距離として扱った。誘電体構造内で正、構造外(空気の領域)で負、誘電体境界上で0となるように値を設定した。各格子内に誘電体境界があるかどうかの判定をレベルセット関数の符号から判定し、4つの格子点上のレベルセット関数の符号が異なる場合や0が含まれる場合は格子内に誘電体境界が含まれると判断し、格子上でのレベルセット関数が0となる点の座標を、レベルセット関数を線形補間することで求め、境界上の点として取り扱った。また、レベルセット関数の0点を互いに直線でつなぎ、誘電体境界とし、その境界に沿った誘電体形状をもとめ、それをもとに有限要素を生成した。なお、この有限要素生成は各格子内で独立の作業となるため、解くべき問題の計算コストが大きくなったときのため並列化を実装した。
- (2) 大規模光散乱解析のための有限要素解析プログラムの開発を行った。 \mathbf{E} 偏光に対する開領域での電磁波散乱をシミュレートするため、Helmholtz 方程式を有限要素法で解き、PML 吸収境界条件を実装した。また、大規模問題へ対応が可能となるよう、マルチフロンタル法による連立一次方程式の高速解法を実装した。
- (3) 随伴場計算および感度解析プログラムの開発を行った。随伴方程式を解き、得られた随伴場から各格子点上の感度を求めた。その際にも大規模問題へ対応が可能となるよう、マルチフロンタル法による連立一次方程式の高速解法を実装した。
- (4) レベルセット関数の更新プログラムの開発を行った。求めた感度からレベルセット関数を更新するための時間発展方程式を解き、更新後のレベルセット関数を得た。

4. 研究成果

電磁場の定常振動を仮定し、定常状態で散乱を極小化する構造を設計した。

設計された最適化光学クロック(図2)は明瞭な境界を有し、実際に作成可能である。さらにそのクロック性能は従来のトポロジー最適化法で設計された光学クロックと比較して、散乱を $1/10$ 以下に低減することに成功した(図3)。さらに、これらの成果で得られた構造をもとに海外の研究チームが3Dプリンタで光学クロックを作成し、実験でも良い性能を持つことが示された[L. Lan,

et al., Appl. Phys. Lett. 103, 121113



(2013).]

図2 トポロジー最適化により得られた光学クロック構造。各領域は青：誘電体、シアン：設計領域、白：散乱体(PEC)を表す。

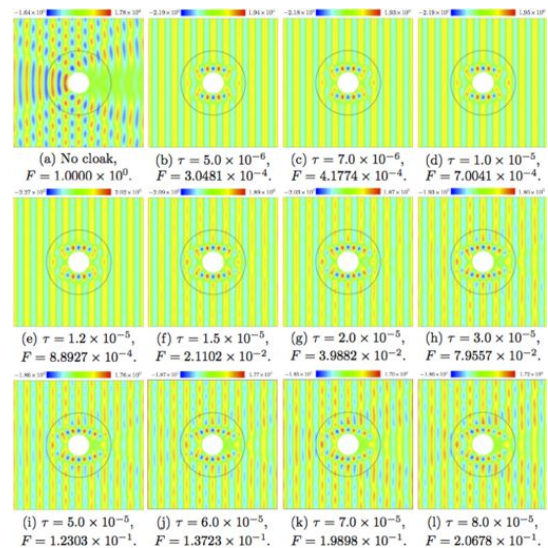


図3 最適化構造のクロック性能。F は目的関数である。PEC による散乱が極小化され、入射波が左から右へ散乱することなく流れている。

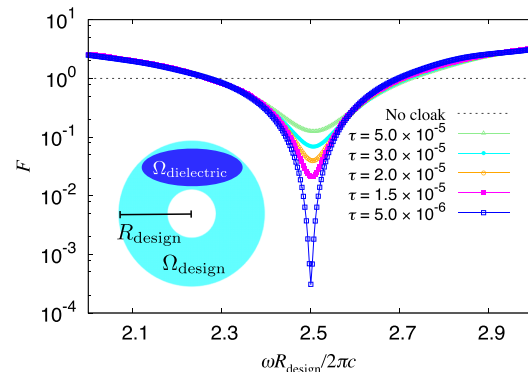


図4 周波数を変化したときの光学クロックの性能の変化。無次元化周波数(横軸)が2.5の時は散乱が抑えられているが、それ以

外の周波数では散乱を抑えることは現時点では難しい。

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 3 件)

- ① Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta, and Mamoru Mizuno, Level-set-based topology optimization for anti-reflection surface, *Applied Physics A*, Online Publish (2014). 【査読有】
- ② Garuda Fujii, Hayato Watanabe, Takayuki Yamada, Tsuyoshi Ueta, and Mamoru Mizuno, Level set based topology optimization for optical cloaks, *Applied Physics Letters* Vol.102, Issue 25, 251106 (2013). 【査読有】
- ③ Takayuki Yamada, Hayato Watanabe, Garuda Fujii and Toshiro Matsumoto, Topology optimization for a dielectric optical cloak based on an exact level set approach, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.49, No.5, pp.2073--2076, (2013). 【査読有】

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 渡邊 勇人, 藤井 雅留太, 山田 崇恭, 飯盛 浩司, 松本 敏郎, 高橋 徹, “光学迷彩構造のレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法について”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会(CMD2013), 2013 年 11 月 2 日～11 月 4 日, 佐賀大学.
- ② Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta and Mamoru Mizuno, Finite element analysis for laser action in porous random media, *Proceedings of Metamaterials' 2013: The 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, No. 54, 16-19 September 2013, Bordeaux, France.
- ③ Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta and Mamoru Mizuno, Study on the performance robustness of optical cloaks designed by means of level set based topology optimization method, 30 June - 5 July, 2013, V6.1: Fundamentals and cloaking, ICMAT 2013:7th International Conference on Materials for Advanced Technologies, Suntec, Singapore.
- ④ Garuda Fujii, Hayato Watanabe, Takayuki Yamada, Tsuyoshi Ueta, Mamoru Mizuno, Level set based topology optimization for optical cloaks containing a large scattering object, *Proceedings of 10th WCSMO*, 5283, (2013), WCSMO10, 13-17 May 2013,

Orlando, Florida, USA.

- ⑤ Takayuki Yamada, Hayato Watanabe, Garuda Fujii and Toshiro Matsumoto, Topology Optimization for a Dielectric Optical Cloak Based on an Exact Level Set Approach, *Digests of the 15th Biennial IEEE Conference on Electronic Field Computation (CEFC2012)*, 11-14 November, 2012, Oita, Japan, p.478.
- ⑥ Garuda Fujii, Tsuyoshi Ueta and Mamoru Mizuno, Finite element analyses for random laser action in metallic disordered structures, *Proceedings of Metamaterials' 2012: The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics*, 17-22 September, 2012, Saint Petersburg, Russia, ISBN: 978-952-67611-2-1, pp. 758--760.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 雅留太 (FUJII, Garuda)

信州大学・工学部 助教

研究者番号 : 90569344