T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	広帯域な光学・電磁波多層媒質の設計に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	百瀬智也
Author(English)	Tomoya Momose
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第276号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:梶川 浩太郎,伊藤 治彦,宮本 智之,雨宮 智宏,當麻 真奈,岩見 健太郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第276号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 系 電気電子 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 （ 工学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	百瀬 智也	審査員主査： Chief Examiner	梶川 浩太郎

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

広帯域に電磁波を吸収する媒質や、広帯域に低散乱特性を示す媒質を設計するには、通常、多層構造が求められる。本論文では、多数の未知パラメータを合理的に設計する方法を比較検討した後、実際に 2 種類の媒質、光学クローキング媒質と電波吸収体を設計した。目的は、高性能で広帯域な多層媒質の比誘電率を、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて設計することである。

従来、最適設計には数理計画法が用いられてきた。この手法を用いるためには、(1)目的関数が数式で明示的に記述されている；(2)微分可能である；(3)計算コストが低いなどの要件がある。しかし、現実の最適設計問題ではブラックボックス関数を扱うことが多い。この場合においても、計算コストが低ければ、数値的に微分などを計算することができるため、この手法を用いることができる。しかし、目的関数が複数の谷を持つ場合、効率の良い探索を行うことができない。そこで、様々な代替手法が検討されている。

本論文ではまず、数理計画法の代替手法として、ニューラルネットワーク(NN)、ベイズ最適化(BO)、および遺伝的アルゴリズム(GA)を検討した。GA の交叉確率と突然変異確率を変数として扱い、探索効率を向上させた手法を適応型遺伝的アルゴリズム(AGA)と定義し、NN と AGA を組み合わせた手法(NN+AGA)、BO、GA、および AGA の 4 つの手法に関して、多層円筒クローキング媒質（4, 6, 8, 16 パラメータ）の設計における有用性を比較した。GA と AGA はいずれも進化が十分に収束し、他の手法と比較して安定した性能を示した。未知パラメータが 4 個の場合、GA が最も小さい散乱断面積を達成した。一方、未知パラメータが 6 個、8 個および 16 個の場合では、AGA が最小値を達成しており、複雑な設計問題に対して有効性を示した。NN+AGA は未知パラメータが 4 個の設計において、他の手法に比べて約 10 倍の速さで設計が完了し、高速性が際立った。しかし、NN の予測誤差により、最良解の散乱断面積は GA や AGA より大きくなってしまった。また、未知パラメータの数が 4 以上に増えると、必要な学習データ量が爆発的に増えるため、複雑な設計問題に対応できなかった。BO は初期サンプル生成時の局所解への収束や試行間のばらつきが大きく、高性能なクローキング条件を得る可能性が低いことが示された。特に、試行回数を増やしても GA や AGA と比較して劣る結果となった。結論として、層数が多い場合の媒質設計においては、AGA が他の手法に対して優位性を持つことが確認された。

次に、AGA を用いて、無限長の円筒物体のための広帯域な多層クローキング媒質を最適設計した。この媒質は 0.4 μm から 0.7 μm の帯域幅を持ち、可視光範囲のほぼ全域をカバーした。26 層以上の最適化された媒質で対象物体を覆うことで、平均散乱断面積を対象物体のみの散乱断面積の 6%以下にまで減少させた。AGA で設計した媒質の不可視化性能は、線形座標変換（非磁性）および有効媒質近似に基づく解析計算による設計と比較して 10 倍向上した。性能向上の要因として、光の迂回に加えて、周囲空気とのインピーダンス整合、および対象物体の遮蔽が挙げられる。AGA はこれら 3 つの要素を自動的に考慮することで、クローキング媒質の設計において強力なツールとなった。媒質の周波数分散は本論文にて考慮しなかったが、実際の物質ではその存在は避けられない。特に広帯域クローキングでは、周波数分散を取り入れた設計が重要である。この問題を解決するための設計手法を今後提案する必要がある。

他の最適設計の例として、AGA を用いて 2 種類の多層形電波吸収体(MLA)を設計した。それぞれ、自動車用レーダー周波数バンド（ARF バンドと定義し、76 – 81 GHz）または W バンド(75 – 110 GHz)において 20 dB 以上の吸収率を達成した。ARF バンドをカバーする狭帯域 MLA の必要な厚さは 0.3 mm であり、W バンドをカバーする広帯域 MLA の必要な厚さは 0.5 mm だった。これらは他の論文で報告された吸収体と比較して、最も高水準に薄さと高吸収率を両立した。AGA を用いた設計では、10 層の MLA を検討した。しかし、実際の生産においては、より少ない層数を持つ MLA が望ましい。そのため、構造の簡略化を試みた結果、同等の性能を持ちながら層数の少ない MLA を見出した。この結果は、特定の条件下で最高の性能を持つ吸収体を設計するために、AGA が利用できることを示している。我々が設計した吸収体は、先進運転支援システムおよび自動運転技術の誤検出を減らすのに役立つ。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 系 電気電子 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 （ 工学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	百瀬 智也	審査員主査： Chief Examiner	梶川 浩太郎

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

Designing broadband electromagnetic absorbers or low-scattering media often requires multilayer structures. This dissertation explores different optimization methods for designing such media and applies them to two cases: optical cloaking materials and electromagnetic absorbers. The goal is to optimize the permittivity of multilayer media using a genetic algorithm (GA).

Traditionally, mathematical programming methods have been used for optimization, requiring explicit, differentiable objective functions with low computational costs. However, real-world optimization problems often involve black-box functions that are difficult to optimize using these methods, especially when the objective function has multiple local minima. Therefore, alternative approaches have been explored.

I compared neural networks (NN), bayesian optimization (BO), GA, and an adaptive genetic algorithm (AGA), which improves search efficiency by dynamically adjusting crossover and mutation probabilities. The performance of these methods was evaluated in designing multilayer cylindrical cloaking media with 4, 6, 8, and 16 parameters. GA and AGA exhibited stable performance, with GA performing best for four parameters, while AGA was more effective for complex designs with more parameters. The NN+AGA method achieved a tenfold speed improvement but suffered from increased prediction errors. BO exhibited significant performance variability across trials and yielded inferior results compared to GA and AGA.

AGA was then applied to optimize a broadband multilayer cloaking medium for an infinite cylinder, achieving an invisibility effect over 0.4 – 0.7 μm with a 26-layer structure. The average scattering cross-section was reduced to 6% of the original object. The high invisibility performance of the designed cloaking medium stemmed from impedance matching and object shielding, outperforming traditional transformation optics-based designs by a factor of ten.

Finally, AGA was used to design multilayer electromagnetic absorbers for the automotive radar frequency (ARF) band (76 – 81 GHz) and the W-band (75 – 110 GHz). These absorbers achieved over 20 dB absorption with minimal thickness (0.3 mm for the ARF band and 0.5 mm for the W-band), surpassing previous designs. Structural simplification enabled fewer layers while maintaining high absorption. These results demonstrate AGA's potential for designing high-performance absorbers to reduce false detections in advanced driver-assistance and autonomous driving systems.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).