

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04571

研究課題名（和文）解像度に依存しない分布表現を用いた材料内部の物性値分布の推定手法の開発とその応用

研究課題名（英文）Development of a method to estimate the distribution of material properties using resolution-independent representation and its application

研究代表者

古川 陽（Furukawa, Akira）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60724614

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、材料物性値の分布に応じて柔軟に解像度の設定が実現できる推定手法を開発し、その有効性を検討した。1次元比誘電率分布および2次元位相速度分布の推定を対象に、解の表現方法と求解方法に工夫を加えることで、推定対象とする分布表現に対して適切な解像度の分布を持つ解を求めた。また、これに関連して、周波数解析、基本解近似解法に対する新たな解法を提案し、その有効性を検討した。周波数解析では、観測信号によって決定される周波数分解能に依存せず、周波数解析を実現した。また、基本解近似解法については、解表現に用いる源点の配置や数を事前に設定することなく決定することが可能となることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、解の構成方法と求解方法に工夫を加えることで解像度の選択自由度を確保し、推定を行うことのできる手法の開発を行った。周波数解析や基本解近似解法を取り扱った研究例では、その有効性を示すことができた。これらの成果は、当該手法を用いた実用的な解析への展開が期待できる。さらに、本研究課題を通して得られた知見は、他の数値解析手法・数値シミュレーション手法の開発・改良に対しても貢献が期待できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed estimation methods that can flexibly set the resolution of solution according to the distribution of material properties, and checked their validity. We focused on the estimation of 1D permittivity distribution and 2D phase velocity distribution. Devising solution representations and solution methods, we obtained solutions whose resolution corresponds to the distribution representation to be estimated. In addition, new solution methods were proposed for frequency analysis and the method of fundamental solutions (MFS). The developed method for frequency analysis is able to flexibly set the frequency resolution which is typically determined by the original signal. Moreover, we confirmed the developed MFS enables to determine the location and number of the source points without prior setting.

研究分野：土木工学

キーワード：多重解像度表現 弾性波トモグラフィ マッチング追跡アルゴリズム 周波数解析 基本解近似解法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

非破壊検査や物理探査では、弾性波や電磁波などを用いて、目視では確認できない領域に存在する欠陥の位置や形状、領域内部の速度構造などを推定する。このとき、推定手法は推定対象に応じて適切に選択される。例えば、領域内部のき裂や空洞など、材料物性値の急激な変化を推定したい場合、開口合成法や反射法などが有効である。その一方で、微小き裂による損傷や材料に含まれる水分量など、材料物性値の緩やかな変化を推定したい場合には、トモグラフィなどの手法が有効となる。効率的な推定を実現するためには、推定対象の特徴に応じて手法を使い分けることが必要である。

しかしながら、実際には、材料物性値の急激な変化と緩やかな変化が混在する場面は数多く存在する。例えば、弾性波を用いて、材料の損傷を評価する問題を考える場合、領域内部には、微小き裂を含む領域（＝変化や緩やかな領域）と、それらの成長・合体によって生じた巨視的き裂（＝変化が急激な領域）が混在している。また、電磁波を用いて鉄筋コンクリート内部の水分量を推定したい場合、水分量に依存して誘電率が緩やかに変化する領域と、ひび割れに溜まった水分や鉄筋の存在により誘電率が急激に変化する領域が混在する。材料物性値の急激な変化と緩やかな変化が混在する領域に対して、材料物性値の分布を柔軟に、かつ効率的に推定可能な手法の開発は、学術的にも意義のある研究テーマであると言える。

2. 研究の目的

前述の背景を踏まえ、本課題では、次のように研究の目的を設定した。

（研究目的 1）材料物性値の分布に応じて柔軟に解像度の設定が可能な推定手法を開発し、その有効性を検討する。

（研究目的 2）研究目的 1 に関する研究の知見をもとに、新たな数値解析手法や数値シミュレーション手法を開発し、その有効性を検討する。

ここに、研究目的 1 は材料物性値分布の推定を対象としており、主として逆問題を取り扱う。一方、研究目的 2 は数値シミュレーションとそれに関連した手法を対象としており、主として順問題を取り扱う。

3. 研究の方法

(1) 研究目的 1 に関する研究

研究目的 1 に関する研究では、1次元比誘電率分布および2次元位相速度分布の推定を対象とする。1次元比誘電率分布に対しては、推定対象とする1次元領域によって生じる反射波の情報を用いて、アンセンテッドカルマンフィルタによる推定手法を開発し、その有効性を検討する。一方、2次元位相速度分布に対しては、弾性波の伝播時間に関する情報を用いて、弾性波トモグラフィによる推定手法の開発を行い、その有効性を検討する。これらの推定手法の開発では、より自由度の高い分布表現を有する推定を実現するため解表現に多重解像度表現を導入する。そして、L1 正則化を用いて適切な解像度での解表現を求める。多重解像度表現における最大解像度を上げることで解表現の自由度を確保し、その結果として、解像度に大きく依存しない解析を実現することを目標とする。

(2) 研究目的 2 に関する研究

研究目的 2 に関する研究では、周波数解析および基本解近似解法を対象とする。周波数解析では、対象とする信号を有限フーリエ近似によって表現し、L0 最適化を用いて信号に含まれる周波数成分の推定を行う。その際、解を表現するための基底関数の数を固定し、各々の基底関数に対応する三角関数の周波数を可変とする。これにより、等間隔に設定された離散周波数を用いることなく周波数解析を実現することを目指す。一方、基本解近似解法は、メッシュフリー型の偏微分方程式の数値解法（数値シミュレーション手法）であり、対象とする問題の基本解を用いて近似解を表現する。近似解を構成する基本解の源点は解析領域の補領域に配置されるが、源点の配置と数の設定は任意である。これらの決定方法についてはいくつかの先行研究が存在するものの、十分に確立されていない。そこで、本研究課題では、源点の配置と数の選択自由度を確保し、これらをL0最適化によって求める計算方法を開発し、その有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 研究目的 1 に関する研究

まず、研究目的 1 に関する研究の成果についてまとめる。アンセンテッドカルマンフィルタを用いた 1 次元比誘電率分布の推定手法の開発に取り組んだ。ここでは、材料物性値分布を離散的な基底関数によって表現する手法を採用し、推定手法の開発を行った。具体的には、ウェーブレット基底関数に基づく多重解像度表現を用いて材料物性値分布を表現した。加えて、推定アルゴリズムには L1 正則化に用いられるしきい値作用素を組み込み、スパースな推定解が得られる手法とした。この手法について、離散的な分布表現における基底関数の選択の影響を調べた。その結果、観測雑音に依存して、高周波成分を表現するための基底関数が切り捨てられることを確認した(図 1, 図 2)。また、上述の開発手法において、基底関数の選択によって推定解から除外される基底関数を特定し、それに関連する計算コストの削減について検討した。その結果、推定アルゴリズムにおける平方根行列の計算やシグマポイントによるサンプリング計算のコストを削減した。

次に、多重解像度表現を用いた弾性波トモグラフィ手法の開発に関する取り組みを行った。開発手法では、ウェーブレット級数展開に基づく多重解像度表現を用いて 2 次元位相速度分布を表現し、材料内部を伝播する波動の到達時間からその分布を推定した。このとき、1 次元誘電率分布の推定と同様に、L1 正則化に基づく凸最適化手法の適用を行った。これにより、対象とする分布表現に対応した解像度の分布を持つ推定結果を得た。一方で、正則化パラメータの設定方法などの課題が生じた。また、弾性波トモグラフィでは、材料物性値の分布表現のみならず、弾性波の伝播経路も推定に影響を及ぼすことが知られている。すなわち、逆問題の定式化によって生じる線形システムに含まれる係数行列の性質は、分布表現と伝播経路によって決定される。そこで、逆問題の定式化によって生じる線形システムに含まれる係数行列の性質と材料物性値の分布表現の関係について、いくつかの数値解析例をもとに考察を行った。

(2) 研究目的 2 に関する研究

続けて、研究目的 2 に関する研究の成果についてまとめる。まず、周波数解析手法の開発を行った。具体的には、有限フーリエ近似によって表現された近似信号における近似係数を、マッチング追跡アルゴリズムによって推定した。マッチング追跡アルゴリズムは貪欲法の一種であり、L0 最適化に分類される。開発手法では、有限フーリエ近似に用いる離散周波数を一定とせず、観測信号に応じて設定できるように改良した。これにより、本来観測信号の継続時間によって決定される周波数分解能に依存することなく、周波数解析を実現できることを示した(図 3)。

前述したマッチング追跡アルゴリズムの周波数解析手法への適用で得た知見をもとに、基本解近似解法における近似係数の決定手法の開発を行った。具体的には、2 次元面外波動散

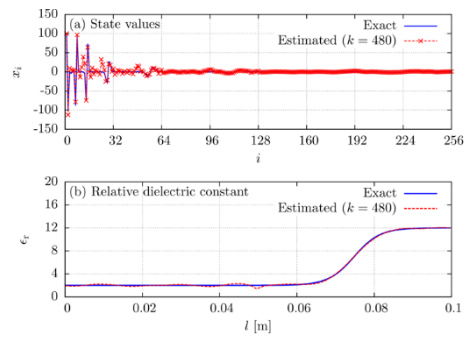


図1 1次元比誘電率分布の推定 (しきい値作用素を用いない場合)

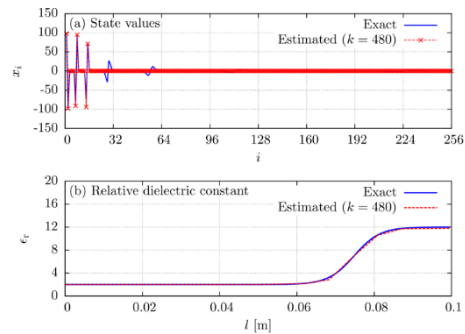


図2 1次元比誘電率分布の推定 (しきい値作用素を用いた場合)

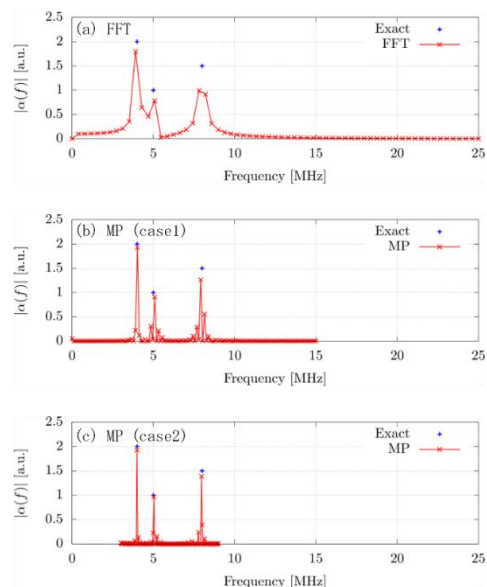


図3 振幅スペクトルの推定結果 ((a)高速フーリエ変換, (b), (c)マッチング追跡アルゴリズム)

乱問題に対する基本解近似解法について、マッチング追跡アルゴリズムの適用を行った。境界条件を考慮するための選点の数（これは、解くべき方程式の数に対応する）よりも多くの源点を解析領域の補領域に密に配置し、外部問題に対する空洞による入射波の散乱問題の解析を行った。マッチング追跡アルゴリズムを用いることで、近似解を表現する上で重要な情報である基本解の源点の配置と数を決定することが可能となることを確認した（図4）。さらに、マッチング追跡アルゴリズムの収束性を改良した、直交マッチング追跡アルゴリズムを基本解近似解法に適用した。マッチング追跡アルゴリズムを用いた場合と同様に、近似解を表現する上で重要な情報である基本解の源点の位置と数を推定することが可能になることを確認した。また、直交マッチング追跡アルゴリズムを用いた解法は、マッチング追跡アルゴリズムを用いた解法と比較して、反復計算の終了条件を容易に設定でき、少ない反復計算回数で近似解を得ることが可能になることを確認した。

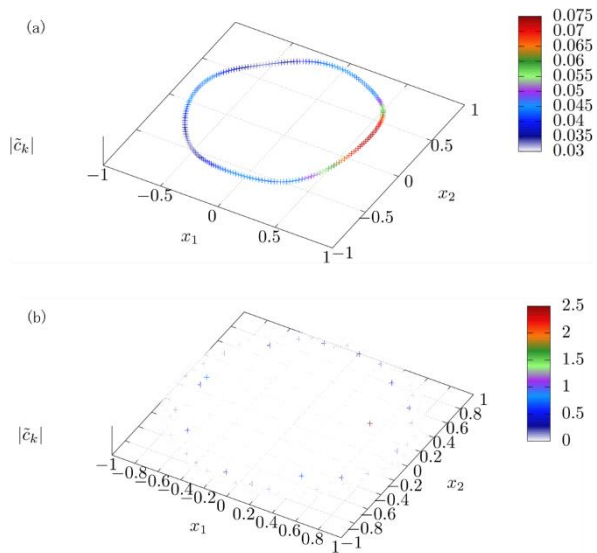


図4 基本解近似解法における源点の配置と各源点における近似係数の絶対値 ((a)従来法, (b)MPを用いた解法)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 古川陽, 松村耕佑, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一	4. 巻 79
2. 論文標題 異方性材料の面外波動問題に対する基本解近似解法の適用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 No.22-15024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 堀合孝太郎, 古川陽
2. 発表標題 多重解像度表現を用いた弾性波トモグラフィに対するADMMの適用
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和4年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂井友哉, 古川陽
2. 発表標題 基本解近似解法に対するマッチング追跡アルゴリズムの適用
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和3年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石裕貴, 古川陽
2. 発表標題 マッチング追跡アルゴリズムの周波数解析への適用
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和2年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀合孝太郎, 古川陽
2. 発表標題 Haar waveletを用いた弾性波トモグラフィの開発
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和2年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川陽, 廣瀬壮一
2. 発表標題 UKFとしきい値作用素を用いた1次元比誘電率分布の推定
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Furukawa, A., Saitoh, T., Hirose, S.
2. 発表標題 Time-domain finite element method for wave propagation in fluid-saturated porous solid
3. 学会等名 APCOM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------