

感度行列とモーダルパラメータに着目したフィルタの特性に基づく射影フィルタ族によるフレーム構造物の逆解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-07-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 池田, 義人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/19558

「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員（主査）理工学部専任教授

氏名 小林正人 ⑩

（副査）理工学部専任教授

氏名 高木仁之 ⑩

（副査）理工学部専任教授

氏名 小山明男 ⑩

1 論文提出者 池田 義人

2 論文題名

「感度行列とモーダルパラメータに着目したフィルタの特性に基づく射影フィルタ族によるフレーム構造物の逆解析」

(Inverse Analysis for Frame Structures Using Projection Filter Family Based on Characteristics of Filter Focused on Sensitivity Matrix and Modal Parameter)

3 論文の構成

本論文は次の7章から構成されている。

第1章 序論

第2章 システム同定解析アルゴリズムの構成

第3章 フレーム構造物のシステム同定問題の構成

第4章 射影フィルタによるフレーム構造物の逆解析

第5章 可変的パラメトリック射影フィルタによる逆解析

第6章 本逆解析手法の実用化への展開

第7章 結語

4 論文の概要

本論文は、射影フィルタ族を用いたフレーム構造物の逆解析において、感度行列に着目した特

性を明らかにし、繰り返し計算の安定化と解の精度の向上に関する研究成果を取りまとめたものである。

日本の耐震規定では、数百年に一度程度の頻度で発生する地震を極めて稀に発生する地震と定義し、この地震に対しても倒壊・崩壊しないことを義務付けており、損傷するものの残存する建築物がほとんどである。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波により内外装が流された結果、躯体のみが残存する例も見られた。これに加え、中程度の地震は頻繁に発生しており、繰り返し地震による損傷や経年劣化等による損傷にも留意しなくてはならない。こうした建築構造物の損傷の程度を推定する手法として、構造ヘルスマモニタリングが知られており、特に地震の活動期にあると考えられる近年において、実用化が望まれている。このような中で、固有振動数等のモーダルパラメータの変化を用いて、構造物の健全性等を評価する手法として逆解析は有用との報告があり、観測誤差等を考慮できるフィルタを用いた手法が提案されている。本論文では、一般に知られるカルマンフィルタに替えて、射影フィルタ族を採用しており、特に、遠藤・登坂により提案された可変的パラメトリック射影フィルタ (VPPF: Variable Parametric Projection Filter) は、優れたフィルタとして注目を集めている。これまでのVPPFを援用した構造システム同定に関する研究では、観測量に固有振動数を採用し、状態量として上部構造の代表的な構造特性である水平剛性の同定が試みられているが、多層フレームモデルの任意の層剛性に設計値の50%程度の大きな剛性低下があると、同定が不可能となる場合が見られ、新たな対策が求められていた。

本研究は、フィルタを用いた逆解析の実用化を目指し、感度行列の推移に基づく初期値の設定方法により、繰り返し計算の安定化を図ることが可能となり、解の精度が向上されることを論証することを目的としている。本研究では、フィルタ方程式を繰り返し計算に援用していることから、復元作用素が状態量の変化をコントロールする役割を果たすことになる。ここで、状態量と観測量の数を同一とすると、射影フィルタの復元作用素は感度行列のみで表現されることになり、感度行列の推移と逆解析結果の良否について検討が可能となることを示している。すなわち、射影フィルタによる逆解析において、第一に、繰り返し計算ステップにおける感度行列の行列式および特異値の推移に着目することで逆解析が困難なモデルを判別し、第二に、感度行列の対角成分の推移に着目することで、大きな変化の見られる成分に対応する層の初期値を他の層の比として低減することで、繰り返し計算は安定し解の精度の向上が可能であることを検証している。本研究は、これまでの報告に見られるようなフィルタの構成に関する研究とは異なり、多くのフィルタに含まれる感度行列の推移に着目しているところに特徴がある。本論文の後半では、本提案手法を異なるフィルタであるVPPFに適用し、先に述べたモデルにおいても精度の高い同定が可能となることを示し、さらに、観測量を1次モードのみとした逆解析にも本提案手法を適用することで、解の精度の向上が可能であることを示している。逆解析の同定精度の向上において、本研究で論証した感度行列に着目した計算手法は有効な対策であることを明らかにしている。

以下、本論文の構成に従い、各章の概要について述べる。

第1章「序論」では、本論文の背景として、日本の地震の発生状況と建築構造物の被害状況を概説し、耐震性能を評価するための構造ヘルスマモニタリングの重要性を述べ、さらにフィルタを用いた逆解析の有効性を述べている。

第2章「システム同定解析アルゴリズムの構成」では、本研究のベースとなるフィルタ理論に

について概説しており、射影フィルタ族（射影フィルタおよびパラメトリック射影フィルタ）と一般に知られるカルマンフィルタ、さらに、遠藤・登坂により提案された可変的パラメトリック射影フィルタの可変的アルゴリズムについて解説している。

第3章「フレーム構造物のシステム同定問題の構成」では、本研究で対象とする3層および5層のフレームモデルの諸元を示し、状態量である水平剛性と観測量である固有振動数の数理モデルを自由振動方程式により解説し、フィルタ方程式を援用する逆解析手法について提示している。また、実測値としての観測量を得るための実験モード解析手法について概説し、実用化に向けた有効な手法であることを明らかにしている。

第4章「射影フィルタによるフレーム構造物の逆解析」では、感度行列の計算ステップにおける推移に着目することで、逆解析の繰り返し計算の安定化と解の精度の向上が可能となることを、シミュレーション逆解析により検証している。第一に、射影フィルタが感度行列のみで表現されるフィルタであることを提示し、感度行列の計算手法として局所前進差分法が有効であることを感度行列、復元作用素および状態量の推移から明らかにしている。第二に、3層および5層フレームモデルの各層または複数層に、設計値に対して25%、40%および50%の段階的な剛性低下を仮定した場合のシミュレーション逆解析結果により、感度行列の行列式および特異値に着目することで逆解析が困難である構造物を簡便に判別できることを示している。第三に、感度行列の対角成分を剛性低下のないモデルの値で基準化することにより初期値の適合していない層を抽出し、設定する初期値を他の層の比として低減することで、繰り返し計算が安定的となり、同定精度が向上することを示している。

第5章「可変的パラメトリック射影フィルタによる逆解析」では、観測量に実験値を用いた逆解析に当たり、正則化の項を有するVPPFを採用し、フィルタが異なる場合にも、感度行列に着目した本論文の提案手法が有効であることを検証している。VPPFは、PPFに含まれる正則化項を計算ステップにおいて計算的に決定するフィルタであり、優れたフィルタとされているものの、実験値による5層モデルの逆解析では、同定が不可能な場合が確認された。ここで、感度行列の推移に着目したところ、これまでの検証と同様に、VPPFに含まれる感度行列の行列式の推移は極めて不安定であり、対角成分の推移から初期値の適合していない層を確認することが可能であることを示している。さらに、感度行列の行列式および対角成分が安定的な推移となる初期値を設定することで、精度の高い同定が可能となることを示している。

第6章「本逆解析手法の実用化への展開」では、観測量に用いるモーダルパラメータを1次モードのみで構成し、観測量が異なる逆解析においても本論文の提案手法を適用することで同定精度が向上することを検証している。先に述べた逆解析では、実測が困難と想定される高次モードの固有振動数を用いているが、逆解析の実用化のために、1次モードのみで観測量を構成することを提案し、逆解析が可能であることを提示している。このときの観測量は、1次モードの固有振動数に加えて、1次モードのモード形から得られる各層の変位を採用している。こうした場合にも、感度行列の行列式および対角成分の推移に着目し、安定的となる初期値を設定することで逆解析の精度が向上することを明らかにしている。

第7章「結語」では、本論文で得られた知見を総括し、実際の建築構造物へ適用するための今後の課題について述べている。

5 論文の特質

本論文は、フィルタを繰り返し計算に援用した逆解析において、感度行列の行列式および特異値の推移に着目することで、逆解析が困難な構造物を簡便に判別し、さらに、感度行列の対角成分の推移に着目することで、初期値の組み合わせを比として構成する設定手法により、逆解析の精度の向上が可能であることを検証しており、これまでに類を見ない新たな提案である。また、感度行列は多くのフィルタに含まれる項であり、本論文でも報告しているように、採用するフィルタが異なる場合にも適用が可能であることが特徴である。さらに、観測量に用いるモーダルパラメータが固有振動数に限定されず、固有モード形を用いた場合にも適用が可能であることを明らかにした点は、特筆すべき成果である。

6 論文の評価

本論文で示されている初期値の設定方法が逆解析に与える影響について、フィルタを繰り返し計算に援用した逆解析手法を対象として検討された研究はこれまでにほとんどなく、本論文は先駆的研究として学術的な意義が高く評価される。さらに、射影フィルタを用いた逆解析を通して、感度行列に局所前進差分法を用い、感度行列の行列式と対角成分および特異値の推移に着目することで、逆解析結果の検証と適切な初期値の設定が可能となることを明らかにしたことは、実用的な研究成果としても高く評価できる。

7 論文の判定

本学位請求論文は、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び試験に合格したので、博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定する。

以 上