

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

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

池田 義人

1 問題意識と目的

近年は地震の活動期にあると考えられ、建築物の耐用年数に1回遭遇するかもしれない程度の極めて稀に発生する規模の地震は複数回発生している。また、津波等による被害も想定しなくてはならない。こうした被害を受けた建築物は、日本の耐震基準に則り倒壊や崩壊は免れるものの、例えば、津波により内外装が流された鉄骨構造物は躯体のみが残存するなど、その後の使用可否に関する判断を要することになる。また、中程度の繰り返し地震や経年劣化等も含め、構造物の損傷により固有振動数は低くなるとの報告がある。こうした構造物の健全性評価手法は、構造ヘルスマニタリングと呼ばれ、実用化すべき喫緊のテーマである。多くの場合、振動に関するデータを観測し、得られたデータから安全性を評価するための情報へと換算することになるが、こうした問題は逆問題として構成される。遠藤・登坂は、観測量に比較的容易に実測できる固有振動数を用い、各層の水平剛性を同定するために、フィルタリングアルゴリズムを繰り返し計算に援用する逆解析手法を提案しているが、同定が困難な場合もあり新たな対策が求められていた。このような中で、本研究は、射影フィルタ族による逆解析において、フィルタリングステップにおける感度行列の行列式および特異値に基づく条件数の推移により繰り返し計算の安定性に関する検討を行い、さらに感度行列の対角成分の推移により初期値の設定方法に関して、安定した逆解析と精度の高い同定が可能となることを示すことを目的とする。

2 構成及び各章の要約

本研究は、

- 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

の7つの章より成る。各章の要約を以下に述べる。

第1章 序論：本章では、地震および東北地方太平洋地震に代表される津波による被害の特徴と構造ヘルスマニタリングの実用化の必要性を述べ、既往の研究により本研究の位置付けを明らかにし、本研究の目的を述べた。

第2章 システム同定解析アルゴリズムの構成：本章では、本研究の構造システム同定の逆解析手法として用いるフィルタ理論について、フィルタの統計的性質と、確率ダイナミックシステムに対する適用方法を概説し、繰り返し計算アルゴリズムを構成した。さらに、本研究で採用する射影フィルタおよび可変的パラ

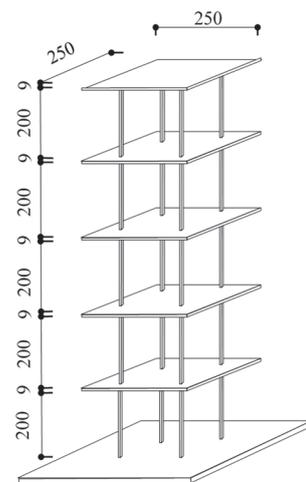


Fig.1 5層フレームモデルの概要

メトリック射影フィルタ（VPPF：Variable Parametric Projection Filter）を，一般に用いられるカルマンフィルタとの比較にて示した。

第3章 フレーム構造物のシステム同定問題の構成：本章では，本研究で対象とする3層および5層フレームモデルの概要を示し，各層の水平剛性を状態量としたときの，観測量としての固有振動数を求めるための固有値解析手法について概説した。本研究では，逆解析の特性の検討を目的としていることから，観測量には固有値解析により求めた計算値を採用したシミュレーション逆解析を多用するが，こうした検討は，実験手法の信頼性のもとで行う必要がある。本研究では，観測量の測定に実験モード解析手法を採用しており，これまでの実験により得られた実測値と固有値解析により得られた計算値との比較において，本実験手法の有効性を示した。さらに，こうして得られた固有振動数を観測量とし，各層の水平剛性を状態量としたときの逆解析手法を構成した。本逆解析は，フィルタ方程式を繰り返し計算に援用することに特徴を有している。

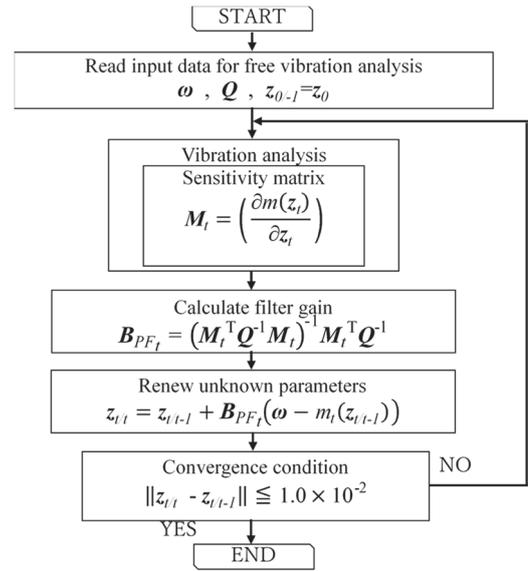


Fig.2 逆解析フロー（射影フィルタ）

フィルタ方程式：

$$z_{t+1/t} = z_{t/t-1} + B_t (\omega - m_t(z_{t/t-1})) \quad (3.1)$$

繰り返し計算を駆動するために初期値として状態量 $z_{t/t-1} = z_{0/l}$ を設定し，これより計算される感度行列 M_t 等でフィルタゲイン B_t を求め，観測量 ω と $z_{t/t-1}$ により計算した固有振動数 $m_t(z_{t/t-1})$ の差に B_t を乗ずることで新たな状態量 $z_{t+1/t}$ が得られる。このように，フィルタゲイン B_t は，状態量を更新する役割を担っており，採用するフィルタにより逆解析の特性は異なる。なお，本逆解析では，状態量の変化量が設定値以下となったときを収束と判断した。

第4章 射影フィルタによるフレーム構造物の逆解析：本章では，本論文で提案する感度行列の推移に着目した特性の検討を述べ，初期値の設定方法に関して安定的な逆解析が可能となることを示した。射影フィルタには，推定誤差に関する項が陽に含まれておらず，観測量 ω と状態量 z の数を同一とすると，観測誤差協分散行列 Q および感度行列 M は正方行列として構成され，感度行列のみで表現される極めてシンプルなフィルタとなる。これにより，感度行列の計算ステップの推移に着目することで，逆解析の特性に関する検討が可能であることが分かる。

射影フィルタ：

$$B_{PFI} = (M_t^T Q^{-1} M_t)^{-1} M_t^T Q^{-1} \quad (4.1)$$

局所前進差分法による感度行列：

$$M_t = \begin{bmatrix} \frac{(\omega_{1_t} - \omega_{1_{t-1}})_{s1}}{z_{1_t} - z_{1_{t-1}}} & \frac{(\omega_{1_t} - \omega_{1_{t-1}})_{s2}}{z_{2_t} - z_{2_{t-1}}} & \frac{(\omega_{1_t} - \omega_{1_{t-1}})_{s3}}{z_{3_t} - z_{3_{t-1}}} \\ \frac{(\omega_{2_t} - \omega_{2_{t-1}})_{s1}}{z_{1_t} - z_{1_{t-1}}} & \frac{(\omega_{2_t} - \omega_{2_{t-1}})_{s2}}{z_{2_t} - z_{2_{t-1}}} & \frac{(\omega_{2_t} - \omega_{2_{t-1}})_{s3}}{z_{3_t} - z_{3_{t-1}}} \\ \frac{(\omega_{3_t} - \omega_{3_{t-1}})_{s1}}{z_{1_t} - z_{1_{t-1}}} & \frac{(\omega_{3_t} - \omega_{3_{t-1}})_{s2}}{z_{2_t} - z_{2_{t-1}}} & \frac{(\omega_{3_t} - \omega_{3_{t-1}})_{s3}}{z_{3_t} - z_{3_{t-1}}} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

まず、3層フレームモデルを対象としたシミュレーションによる逆解析結果を示し、感度行列、フィルタゲインおよび状態量の各成分のフィルタリングステップにおける推移から、感度行列の具体的な計算手法を示した。本研究では、感度行列に含まれる固有振動数の計算において、すべての層の水平剛性を更新させる方法を広域前進差分法と呼び、これに対して、特定の層の水平剛性のみを更新させる方法を局所前進差分法と呼ぶこととし、本逆解析では、局所前進差分法を用いることとした。ここで言う特定の層とは、例えば、1列目の固有振動数の計算では、1層の水平剛性のみを更新させることを意味し、これ以降の列においても同様に該当する層の水平剛性のみを更新させた。局所前進差分法を用いた逆解析では、感度行列の各成分の推移に大きな変化は見られず、繰り返し計算は安定し、精度の高い同定が可能となることを示した。ところで、感度行列の各成分の推移による検討では、3層モデルであれば9つの数値により検討することになり、極めて複雑である。そこで、より明快な指標として、感度行列の行列式および特異値に基づき得られる条件数の推移に着目することにした。この結果、同定が困難なモデルでは、いずれの値の推移にも大きな変化が見られ、逆解析の安定性に関する検討が可能となることを示した。

こうした特性に基づき、繰り返し計算に不安定さが見られる場合には、設定した初期値が適合していない可能性があり、感度行列の基準化した対角成分の推移に着目することで、設定する初期値の適合していない層の検討が可能であることを示した。本研究では、感度行列の計算に局所前進差分法を採用しており、例えば、1行1列の成分は1層の水平剛性の変化に、2行2列以降の成分においても同様に、それぞれの層の水平剛性の変化に対応している。したがって、対角成分に大きな変化の見られる層は、設定した初期値が適合していないと推察できる。そこで、この層に設定する初期値を他の層に対する比として低減させることで、安定した逆解析となり、精度の高い同定が可能となった。後半では、本研究で得られたフィルタによる逆解析の特性を、非適切性のリスクの高い5層フレームモデルに適用し、本論で提案する初期値の設定方法に関する計算手法の有効性を示した。

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：本章では、3層および5層フレームモデルの逆解析に、観測量として実測値を採用するため、射影フィルタに代えて観測誤差等を考慮できるフィルタを用いる必要がある。本研究では、遠藤、登坂により提案されたVPPFを採用し、異なるフィルタによる逆解析にも提案した本手法が有効であることを示した。VPPFは、フィルタゲインに含まれる正則化項を1次元化し、繰り返し計算ステップの中で計算的かつ自律的に決定するフィルタである。1次元化に際しては、特定のモードの固有振動数に着目することから、採用するモード次数によりフィルタの特性が異なるモード依存性に基づきVPPFの特性を述べた。また、前章までに同定が不可能であったモデルに対する逆解析結果により、VPPFの有効性を示した。

ここで、優れたフィルタであるVPPFを用いても同定が不可能となったモデルが存在した。こうしたモデルに対して、これまでに示したフィルタによる逆解析の特性に則り、本論で提案する初期値の設定に関する手法を適用することで、極めて精度の高い同定が可能となることを示した。

第6章 本逆解析手法の実用化への展開：本章では、観測量として採用するモーダルパラメータに着目した。これまでの逆解析では、観測量に高次モードの固有振動数を採用しているが、高次モードの情報は実測が困難な場合が想定されることから、1次振動モードのみの情報により観測量を構成した。本研究では、感度行列を正方行列として構成するため、観測量の数と状態数の数を同一とする必要がある。そこで、観測量の第1番目にはこれまでと同様に1次モードの固有振動数を、第2番目以降には、固有モード形に基づく各層の変位を1層の変位で基準化した値を採用することを提案し、これによる逆解析が可能であることを示した。さらに、観測量を1次モードのみで構成した逆解析においても、本論で提案する手法を適用することで同定の精度が向上することを示した。

第7章 結語：本章では、論文の各章を要約し、フレームモデルの逆解析に用いる感度行列に着目したフィルタの特性と初期値の設定方法に関する提案を総括した。今後は、実構造物への実用化を目指し、実験手法の確立と観測量を低減した場合のVPPFによる逆解析手法の検討を喫緊の課題として挙げた。