

構造物被災状況評価のための EKF と MCMC を用いた変位及び構造パラメータのベイズ推定

土木大学 正会員 ○久野 元
土木大学 正会員 長山 智則
土木大学 正会員 蘇 迪

1. はじめに

構造物の被災状況評価には、変位の情報が重要であるが、変位を直接測定することは難しく、加速度の数値積分はノイズの影響をうける。構造物の挙動をモデル化し観測された加速度にフィッティングする手法は、変位だけでなく耐力なども評価できる可能性がある。しかし、実構造物の挙動の完全な再現は不可能である。モデルの複雑化は可能であるが、数点の加速度のみでフィッティングすることは困難である。そこで、自由度の低い非線形運動方程式とモデル化誤差を許容可能な状態空間モデルを用いてモデル化する手法が提案されている¹⁾。しかし、被害が大きい場合には推定が外れるリスクはとて大きい。この問題には、推定の不確実さも評価可能なベイズ推定が有効である。状態空間モデルのパラメータのベイズ推定には伝統的には非線形カルマンフィルタが用いられるが、非線形運動方程式を状態・観測方程式としたモデルのパラメータ推定は難しいことが指摘されている²⁾。そこで、本研究では、まず、非線形状態空間モデルの安定的なパラメータのベイズ推定手法について議論する。そして、採用した手法により Bouc-Wen モデルの逆推定を行うことで推定性能を調べる。次に、E-Defense の橋脚を用いた実験結果に対して手法を適用し適用可能性を調べる。

2. 手法

非線形カルマンフィルタによる推定の難しさはオンライン推定であることに起因する。しかし、本研究の目的を考えると、極端に時間がかからない場合はオンラインで推定する必要はない。そこで、オフラインでパラメータをベイズ推定すれば、安定的な推定が可能になると考えられる。マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)は事後分布が解析的に計算できない場合でもサンプリングを可能にする手法であり、強い仮定が不要で汎用性が高いため、オフラインのベイズ推定を考える場合には有力な候補である。推定の対象は、時間の長さを T 、 $1\sim T$ までの観測値を $\mathbf{y}_{1:T}$ 、状態変数を $\mathbf{x}_{1:T}$ 、パラメータを $\boldsymbol{\theta}$ とすると、状態変数とパラメータの事後分布 $p(\mathbf{x}_{1:T}, \boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ である。ところが、 $p(\mathbf{x}_{1:T}, \boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ から直接サンプリングを行うと、状態変数が数千から数十万次元に及ぶため、困難である。 $p(\mathbf{x}_{1:T}, \boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T}) = p(\mathbf{x}_{1:T} | \boldsymbol{\theta}, \mathbf{y}_{1:T})p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ と式変形が可能なので、 $p(\mathbf{x}_{1:T} | \boldsymbol{\theta}, \mathbf{y}_{1:T})$ と $p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ からそれぞれサンプリングを行えば、 $p(\mathbf{x}_{1:T}, \boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ からのサンプリングが可能になる。特に、 $p(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_{1:T})$ からは、状態変数を積分消去した周辺尤度 $p(\mathbf{y}_{1:T} | \boldsymbol{\theta})$ を非線形フィルタリングにより近似的に計算することで、MCMCによりサンプリング可能である。本研究では、計算時間の観点から周辺尤度の計算には拡張カルマンフィルタ(EKF)を採用し、MCMCの手法としてはメトロポリス法を採用した。また、事前分布はパラメータの定義域全体に広がる一様分布を用いた。

また、状態空間モデルの状態・観測方程式としては、Bouc-Wen モデルを検討した。Bouc-Wen モデルは Bilinear モデルの一般化であり、高い表現力を持つ。また、Bilinear のような区分線形モデルでは、状態空間モデルで要求されるマルコフ性を満たす定式化が困難であるのに対し、Bouc-Wen モデルはマルコフ性を満たす。

3. 逆推定

入力地震波は 1995 年の兵庫県南部地震において JR 鷹取駅にて計測されたものを利用した。逆推定に利用するのは、応答加速度の 5%の標準偏差のホワイトノイズを付加した入力加速度と絶対応答加速度である。分布を推定するパラメータは Bouc-Wen モデルの全てのパラメータとプロセスノイズ、観測ノイズの 13 パラメー

キーワード 被災状況評価, Bouc-Wen モデル, 拡張カルマンフィルタ, マルコフ連鎖モンテカルロ法

連絡先 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 社会基盤学科 TEL 03-5841-6097

タである。初期値は真値の 50~150%からランダムに選択した。図 1 に質量で割った剛性パラメータのサンプルのヒストグラムを示した。真値は 100 であり、高い精度で推定できていることが分かる。また、図 2 に変位の推定結果を示した。数値積分が大きく真値から外れているのに対し、推定した変位の中央値がほとんど真値と重なっていることがわかる。また、E-Defense の実験では、時間変化するドリフトノイズが観測値に含まれていた。このようなドリフトノイズが含まれる場合にも安定的に推定できる必要がある。そこで、時間変化するドリフトノイズを加え、ハイパスフィルタをかけた応答加速度を用いて推定した結果を図 3 に示す。図 3 から、わずかに推定精度が下がっているがロバストに推定できていることが分かる。

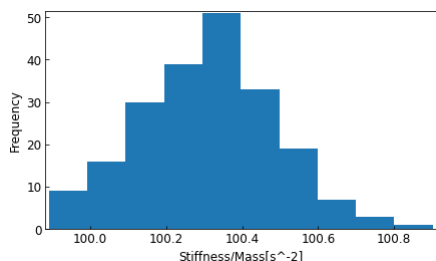


図 1：剛性係数のヒストグラム

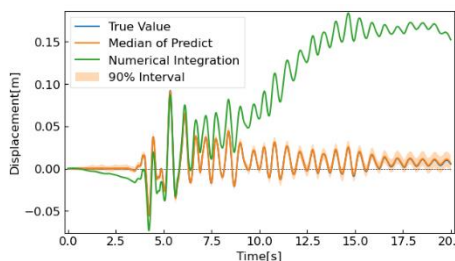


図 2：推定変位

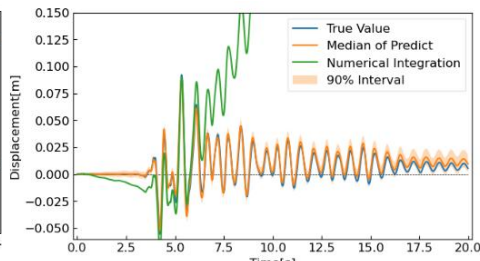


図 3：ドリフトノイズを含むケース

4. E-Defense の実験に対する適用

E-Defense の橋脚を用いた実験結果に対して 1 自由度の Bouc-Wen モデルと状態空間モデルにより対象をモデル化し、変位を推定した結果を示す。上述の通り、時間変化するドリフトノイズが観測値に含まれていたため、ハイパスフィルタをかけた加速度を用いた。実験では JR 鷹取駅にて計測された地震波に倍率をかけたものが入力として用いられており、10%のものと 100%のものについて推定を行った。10%のケースに対する手法の適用結果を図 4、100%のケースに対する手法の適用結果を図 5 に示した。10%のケースではある程度よく変位が真値に一致しているのに対し、100%のケースでは特に残留変位について推定結果の中央値は真値に近いが、非常に 90%区間が広がっていることが分かる。これは、大地震時には挙動の非線形性が強く Bouc-Wen モデルから乖離していることが原因であると考えられる。

このような広い事後分布を考慮することは、安全側の評価を与える。また、剛性の推定値も 10%のケースに比べ 1/6 程度に低下していた。このようなケースでは更なる検査や補修が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、Bouc-Wen モデルと状態空間モデルを用いた被災状況の評価を検討した。また、推定の不確かさを安定的に評価するために、拡張カルマンフィルタで計算される疑似的な周辺尤度を用いたマルコフ連鎖モンテカルロ法によるベイズ推定手法を採用した。逆推定結果より、高い精度で推定可能であり、ドリフトノイズに対してもロバストであることが示された。また、E-Defense の実験に対しては、小地震程度では精度よく一致し、大地震時には残留変位はよく推定できるものの、モデルと実構造物の違いが大きく 90%区間が非常に広がった。

参考文献

- 1) 石原佳奈, Yang Yaohua, 長山智則, 蘇迪: 加速度応答計測と非線形履歴特性パラメータ同定に基づく変位応答推定, 第 75 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2020
- 2) Li, D., and Wang, Y.: Parameter identification of a differentiable Bouc-Wen model using constrained extended Kalman filter, Structural Health Monitoring, 2020.

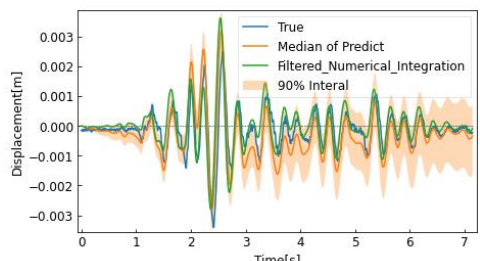


図 4：10%のケースの推定変位

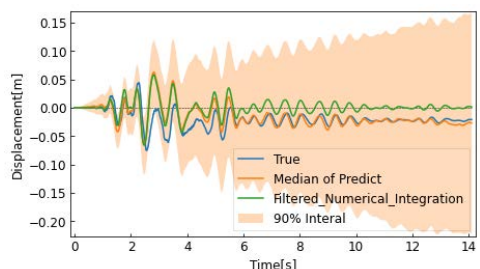


図 5：100%のケースの推定変位