

加速度情報による構造同定法

京都大学工学研究科 学正員 坂上貴士
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信
 京都大学防災研究所 正員 本田利器

1. はじめに

実際の構造系に対して、最も容易に観測される動的応答が加速度情報であるという現実と、既往の適応型カルマンフィルタを用いた、構造システムの同定アルゴリズムの多くが、相対速度、変位を観測情報として構成されているという問題点をふまえ、同定の対象となる状態量に相対加速度を含むことにより、加速度情報のみから同定可能なアルゴリズムを提案する。また、適応型カルマンフィルタにおいて忘却係数を定数とした場合に、観測ノイズが大きくなると同定結果が不安定化するという問題に対して、比較的簡単な解決方法を提案する。

2. 構造同定法

本研究で用いる同定手法である適応型カルマンフィルタ¹⁾の構造システムの同定への適用法を述べる。線形状態遷移方程式を基本式として構成されるカルマンフィルタを構造システムの同定へ適用させるには、状態量の遷移を線形方程式で表現することが必要になる。

地震荷重をうける1自由度構造系の運動方程式を次式で与え、(m, y, c, k, \ddot{X}_g はそれぞれ質量、相対変位、粘性減衰係数、剛性係数、地動加速度とする。)

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{X}_g$$

同定の対象となる時刻 t における状態量ベクトルを相対加速度を含んだ次式、 $\mathbf{x}_t = \{ \ddot{y} \ \dot{y} \ y \ c \ k \}$ で与える。

まず、相対加速度、速度、変位に関して線形加速度法を用いて離散化を行うと、

$$\begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \dot{y} \\ y \\ c \\ k \end{Bmatrix}_t = \begin{bmatrix} a_{11}\ddot{y} + a_{12}\dot{y} + a_{13}y + d_1 \\ a_{21}\ddot{y} + a_{22}\dot{y} + a_{23}y + d_2 \\ a_{31}\ddot{y} + a_{32}\dot{y} + a_{33}y + d_3 \\ c \\ k \end{bmatrix}_{t-1} \dots \dots \dots (1)$$

となり、相対加速度、速度、変位に関する線形状態遷移方程式が得られる。行列の各要素 a_{ij}, d_i は紙面の制約のため明記しないが、質量、粘性減衰係数、剛性係数、解析における時間刻みに関する非線形関数となっている。

次に、次式

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}_{t-1}(\hat{\mathbf{x}}_{t-1}) + \Phi_{t-1}(\mathbf{x}_{t-1} - \hat{\mathbf{x}}_{t-1}) \quad \Phi_{t-1} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}_{t-1}(\mathbf{x}_{t-1})}{\partial \mathbf{x}_{t-1}} \right|_{\mathbf{x}_{t-1} = \hat{\mathbf{x}}_{t-1}} \dots \dots \dots (2)$$

のように式 (1) を状態 $t-1$ の最適値 $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}$ のまわりで Taylor 展開を用いて線形化し、1次の項まで用いると、全ての状態量に関する線形状態遷移方程式が導かれ、加速度情報のみから構造システムの同定が可能なアルゴリズムが構成できる。

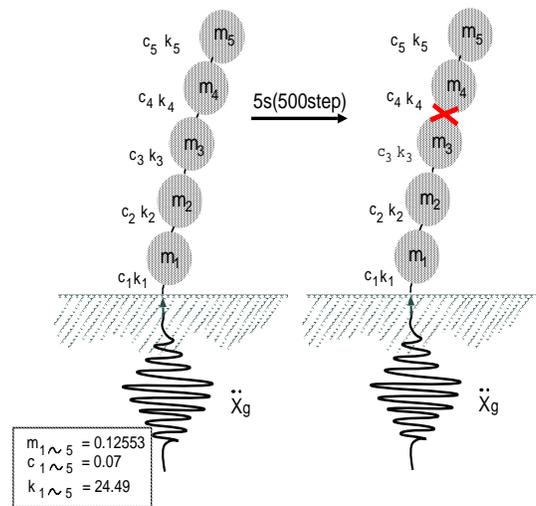


図-1 解析モデル

3. 残差を忘却係数の採用規準とする同定アルゴリズム

適応型カルマンフィルタにおける忘却係数は、状態量に関する事前情報と観測情報の相対的な重み付けを行うスカラー量であり、非定常性を有するパラメータの同定結果の追従性を支配する。小さな忘却係数を採用すると、同定に用いる観測情報の数を多くすることで、非定常性を有するパラメータへの追従性を上昇させるが、同時に観測ノイズの影響を大きく受けることになるため、同定結果は不安定になる。図-2は、3通りの忘却係数を設定して、地震動入力中に構造システムに損傷が発生し、バネ4の粘性減衰係数が20%増加、剛性係数が20%低下することを想定した、図-1で表される解析モデルの同定を行ったバネ4における粘性減衰係数の同定結果であり、実線が各忘却係数における同定値の時刻歴で、点線が真値時刻歴である。入力波形としては、El centro地震記録の最大値を25galに修正したものを扱い、応答計算で得られた加速度波形に観測ノイズを付加し、観測波形を作成する。観測ノイズは、応答値の標準偏差の5%の標準偏差を持つ周波数帯域0~50Hzのピンクノイズとした。図-2より忘却係数を小さくする程、真値の追従性は上昇するが、同定結果は真値から大きく変動している事が分かる。

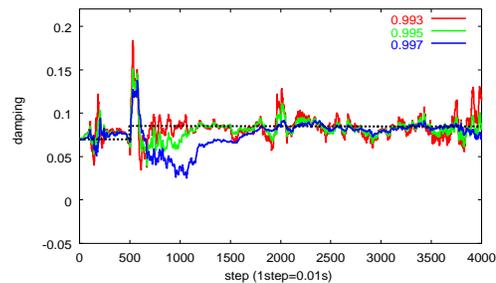


図-2 各忘却係数と同定結果

そこで本研究では、適応型カルマンフィルタにおける、忘却係数を観測前の状態量と観測量の残差に応じて調節するアルゴリズム(図-3)を構成した。このアルゴリズムでは、各ステップで残差を求め、過去5ステップにおける残差の中間値を代表値とし、代表値がある規準より小さければ通常のカルマンフィルタを用いて同定を行い、大きければ小さな忘却係数を採用し、適応型カルマンフィルタを用いて同定を行うものである。これにより、構造系が非定常性を有する時にのみ同定に用いる観測量の数を少なくし、構造系が定常性を有する時には、観測量の数を多くすることが出来る為、同定結果が安定することが期待できる。図-4は、図-1で表される非定常性を有する構造モデルの同定を忘却係数を一定として行った場合と、改良したアルゴリズムを用いて同定を行った場合をバネ4における粘性減衰係数の同定結果で比較したものである。忘却係数は0.993、規準値は10.0とした。図-4より、改良したアルゴリズムを用いた同定結果は、忘却係数を一定にした場合に比べ、追従性に関しては若干劣るが、同定が進むにつれ真値への収束が良くになっている事が分かる。

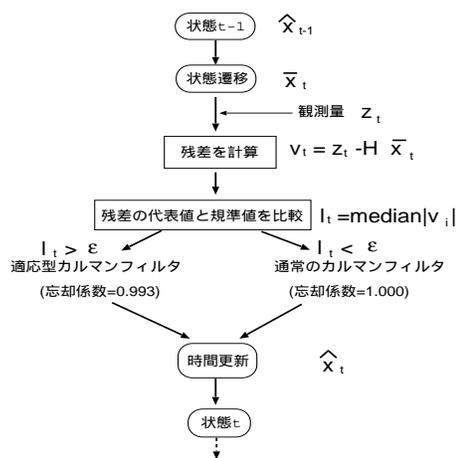


図-3 忘却係数の選択法

4. おわりに

本研究では、加速度情報のみから構造システムの同定が可能なアルゴリズムを提案した。また、適応型カルマンフィルタにおいて忘却係数を定数にすると、観測ノイズが同定結果に悪影響を与える問題に対して、残差に応じて忘却係数を調節することで、解決する方法を提案した。

参考文献

- 1) 佐藤忠信、竹井賢二:適応型カルマンフィルタの構築とその応用,土木学会論文集, No.584/I-42, pp.163-173, 1998.

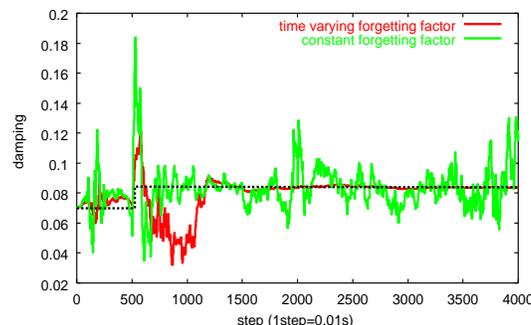


図-4 忘却係数を調節した同定結果