

第I部門

加速度情報による構造同定及び観測点配置評価法

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
京都大学工学部 学生員 ○ 坂上貴士

1. はじめに

実際の構造系に対して、最も一般的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。さらに、構造系の加速度情報が得られる箇所を観測点と定義し、観測を行うことによる状態量の不確かさの減少量を情報エントロピーを用いて計量することで、構造システムの同定における観測点配置を評価する方法を提案する。

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 Δ 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 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 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。

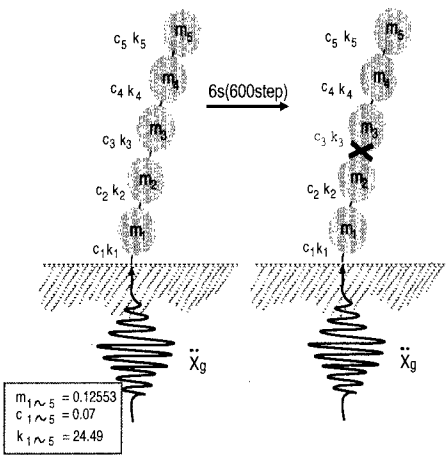


図-1 解析モデル

3. 線形多自由度系構造システムの同定

1自由度系の適用法を多自由度系に拡張させ、地震動入力中に構造システムに損傷が発生し、バネ3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う。入力波形としては、El centro地震記録の最大値を25galに修正したものを用い、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3%の標準偏差を持つ周波数帯域0~50Hzのピンクノイズとする。適応型カルマンフィルターにおける忘却係数は同定を通じて0.995とした。図-2、3はそれぞれ、バネ3における粘性減衰係数及び剛性係数の同定結果であり、実線が同定値の時刻歴で、点線が真値時刻歴である。両係数とも損傷発生後は真値から大きく変動するが、時刻とともにほぼ真値へ収束している。

4. 情報エントロピーを用いた観測点配置の評価法

構造システムの同定問題に対する観測点配置の評価法として、情報エントロピー²⁾の概念を利用する。時刻 t における状態量 $\mathbf{x}_t$ の不確かさは情報エントロピーを用いて、次式のように表される。

$$H(\mathbf{x}_t) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{x}_t) \ln p(\mathbf{x}_t) d\mathbf{x}_t$$

また、相互エントロピーは次式、

$$I_t(\mathbf{x}_t; \mathbf{z}_t) = H(\mathbf{x}_t) - H(\mathbf{x}_t | \mathbf{z}_t)$$

によって定義されており、 $H(\mathbf{x}_t)$ を $\mathbf{x}_t$ に関する事前情報のエントロピー、 $H(\mathbf{x}_t | \mathbf{z}_t)$ を観測後の $\mathbf{x}_t$ に関する事後情報のエントロピーと解釈すると、相互エントロピーは $I_t(\mathbf{x}_t; \mathbf{z}_t)$ は観測 $\mathbf{z}_t$ を得ることによる状態量 $\mathbf{x}_t$ についての不確かさの減少量をエントロピーで計測した量になり、観測点配置を評価する尺度になる。本研究では、観測値が得られる各時刻での $I_t(\mathbf{x}_t; \mathbf{z}_t)$ の和に-1を乗じた値を観測点配置の評価値とし、値が小さい程、望ましい観測点配置とする。

相互エントロピーに基づく観測点配置の評価法の妥当性を検討するために、各時刻で得られる粘性減衰係数の同定結果を用いて、真値との誤差率の2乗平均値(rms 値)を求め、相互エントロピーに基づく観測点配置の評価値との比較を行う。図-1で表される、バネ3に損傷が発生する5自由度構造系を解析モデルに用い、観測点数を3に固定し、全10通りの観測点配置の下で同定を行う。図-4は、各観測点配置における rms 値と相互エントロピーに基づく評価値の関係を表したものである。図-4より rms 値が小さければ相互エントロピーに基づく評価値も小さくなる傾向が見られ、相互エントロピーに基づく観測点配置の評価法の妥当性が示せている。 rms 値は粘性減衰係数の真値が既知でなければ求まらないので、真値についての正確な情報が得られない実際の構造系などに対しては、 rms 値で観測点配置を評価することはできないが、相互エントロピーを用いた観測点配置の評価法では真値が未知であっても評価を行うことができる。

5. 結論

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、観測点の違いが同定結果に及ぼす影響する問題に対して、状態量の収束の良さを相互エントロピーを用いて計量することで、構造システムの同定における観測点配置を評価する手法を提案した。

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.
- 2) 有本卓:確率・情報・エントロピー, 森北出版, 1980

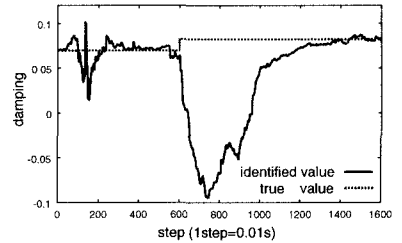


図-2 粘性減衰係数の同定結果 (バネ3)

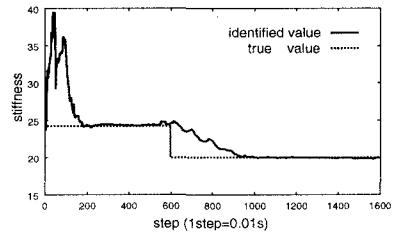


図-3 剛性係数の同定結果 (バネ3)

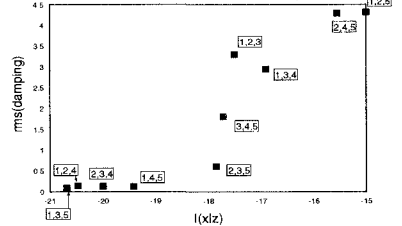


図-4 rms 値と相互エントロピーによる評価値(□内の数字は観測点箇所)