

多点外力を受ける構造物の入力同定法

京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信
京都大学大学院工学研究科 学生員 ○市田賢

1. はじめに

多点外力を受ける構造系を対象として、作用外力と構造系の動特性を推定するための手法を提案する。構造系への入力としては模擬風力が構造物の各質点に作用するものと仮定する。構造システムと入力の同定は、適応型カルマンフィルタと独立成分解析を用いて行う。また、比較のため最小二乗法を用いた入力の同定を行う。まずこれらの方法論を紹介した後、これらの手法により作用外力と動特性の同定が行えることを示す。

解析に用いた模擬風力波形は、三角級数モデルを用いて構造系の各層で相関を有する確率過程を作成することによりシミュレーションした。この時、変動風速のパワースペクトル密度 $S_u(z, f)$ は、乱れ強さ $I_u(z) (= \sigma_u(z)/U(z))$ 、乱れのスケール $L_u(z)$ 及び平均風速 $U(z)$ を与えることにより、次式のカルマン型を用いることによって表される。

$$S_u(z, f) = \frac{4\sigma_u^2(L_u(z)/U(z))}{\{1 + 70.8(fL_u(z)/U(z))^2\}^{5/6}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで z は高さ、 f は振動数を表す。

2. 独立成分解析

独立成分解析とは混合信号を解析して、元の独立な信号を分離、抽出する手法である。今、 n 個の情報源がそれぞれ時刻 t に独立な原信号 $s_1(t), \dots, s_n(t)$ を発信するものとする。この原信号が混合係数マトリクス $\mathbf{A}$ により線形的に混合され、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ が得られるとする。すなわち、

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \dots\dots\dots (2)$$

今、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ のみが得られたとして、そこから独立な原信号 $\mathbf{s}(t)$ 及び混合係数マトリクス $\mathbf{A}$ に対して $\mathbf{s}(t)$ が独立であるという条件の下で推定を行うのが独立成分解析である。

系の状態を表す運動方程式を適当に変形することにより、構造系の応答から入力波形を同定するのに独立成分解析を適用することができる。ただし、独立成分解析では入力波形は正規化されたものしか同定できないので、原信号の大きさは未知数のままとして残る。

3. 適応型カルマンフィルタ

システム同定の分野において幅広く利用されているカルマンフィルタを用いて構造系の動特性及び入力の大きさの同定を行う。

カルマンフィルタは、系の線形な状態方程式と観測方程式が与えられたときに状態量の最尤推定値をベイズの公式により求めるものである。また、適応型カルマンフィルタでは、事前情報及び観測情報に対して重み付けを行うことにより、同定対象となるパラメーターが非定常な場合にも同定の精度を上げることができる。

入力が既知として地震動による構造物の動特性の同定を行う際は、次のような状態ベクトルを考える。

$$\mathbf{z} = \{ \dots x_i \dot{x}_i h_i \omega_i \dots \}^T \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 h_i は減衰定数、 ω_i は固有円振動数を表す。

また、構造系の動特性が既知として構造系に作用する入力の振幅の大きさの同定を行う際は、次のような状態ベクトルを考える。

$$\mathbf{z} = \{ \dots x_i \dot{x}_i a_i \dots \}^T \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a_i は入力の振幅の大きさを表すスカラー量であり、この係数を状態ベクトルに導入することにより、独立成分解析によって得られた正規化された入力波形に対して、その振幅の大きさを同定することができる。

キーワード：適応型カルマンフィルタ、独立成分解析、システム同定

連絡先：〒 610-0011 京都府宇治市五ヶ庄 Tel 0774-38-4069/ Fax 0774-38-4070

4. 最小二乗法

最小二乗法の手法を用いて入力同定を行う。まず線形な関係を持つ n 次のベクトルである未知量 $\mathbf{x}$ と m 次のベクトルである観測値 $\mathbf{z}$ が $(m \times n)$ の行列 $\mathbf{H}$ を介して次のように表されるとする。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} \dots\dots\dots (5)$$

このとき、式 (5) の全ての条件を満たす解 $\mathbf{x}$ を求めることはできない。そこで、次の様な評価関数 J を最小にするように $\mathbf{x}$ を定めることにより、 $\mathbf{x}$ の推定値を得ることができる。

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}) \dots\dots\dots (6)$$

5. 数値解析

数値解析ではまず振幅レベルの小さい地震動に対する構造系の応答を用いて、構造系の動特性の同定 (図-1) を行い、ここで得られた同定値を入力波形の同定を行う際の事前情報として用いる。次に模擬風力波形を入力とする構造系の応答を観測値として、独立成分解析により入力波形の同定を行う。その後、得られた入力同定波形に対して適応型カルマンフィルタによりその振幅の大きさの同定 (図-2) を行うことによって正規化されていない入力波形 (図-3) を得る。また、最小二乗法において構造系の応答を観測値として用いて入力同定 (図-4) を行う。対象とするのは 5 自由度構造系であり、全ての解析において観測値として構造系の各質点の応答速度と応答変位が得られるものとする。また、各質点の質量は既知とする。

解析結果を示した図-1, 2, 3, 4 は、対象とした構造系の最上層である質点 5 及びばね 5 に関するものである。これによるとそれぞれの解析でほぼ真値に収束していることが分かり、独立成分解析及び最小二乗法による入力同定において、同程度の精度の同定結果が得られた。

6. 結論

適応型カルマンフィルタを用いることにより構造系の動特性の同定が可能であることを示し、また多点入力を受ける構造系に関して、独立成分解析及び適応型カルマンフィルタを用いた入力波形の同定が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 社団法人日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学 (東京電気大学出版局, 1997)
- 2) 星谷勝: 確率論手法による構造解析 (鹿島出版会, 1973)
- 3) S.Amari, A.Cichocki and H.Yang: A new learning algorithm for blind signal separation, Advances in Neural Information Processing Systems, 8, pp757-763, 1995
- 4) 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, pp163-173, 1998)

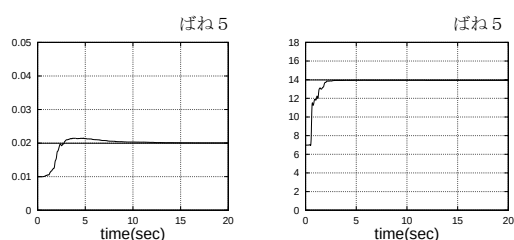


図-1 5 自由度構造系における動特性の同定 (左図: 減衰定数、右図: 固有振動数)

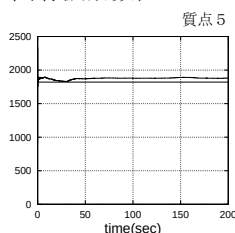


図-2 5 自由度構造系における係数 a_i の同定

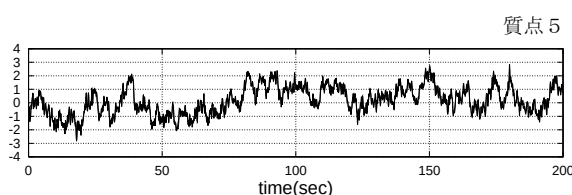


図-3 5 自由度構造系における ICA による同定波形と入力波形の比較

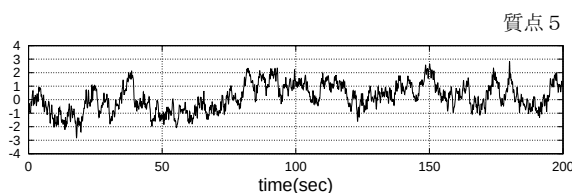


図-4 5 自由度構造系における最小二乗法による同定波形と入力波形の比較