

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
フツタ工業(株) 正会員 〇斎藤 悦郎

1. はじめに

筆者らが開発したEK-WFI法は、誤差の共分散値に重みを付け、グローバルに振動カルマンフィルタをくり返す方法である。この方法により、システム同定(パラメータの推定)問題では、同定結果の初期条件による影響を取り除くことができ、また安定した同定結果を得ることができる。そしてEK-WFI法が、各種の動特性の推定法として有効であることを数値的に明らかにした。特にモード解析法的にEK-WFI法へ組み込んだ方法による線形多自由度系の同定問題では、入力及び1本の応答波形から各次数の動特性($\omega^{(j)}$, $\beta^{(j)}$, $p^{(j)}$)を推定できることが明らかになった。

地盤・建物等の地震観測では、深さ方向へ何處かの位置に地震計を設置する場合が多い。このような場合に入力及び1本の応答波形のみならず、何本かの応答波形を有効に用いることができれば、より精度の良い動特性の推定が可能であると思われる。そこで、ここでは、何本かの応答波形を用いて順次動特性を検証するシステムについて示した。

2. 線形多自由度系モデル

入力及び応答の観測波形は、同定結果の検証のため、あらかじめ与えられた動特性(表-1)を持つ線形4自由度系モデル(図-1)に対するシミュレーション波形を用いた。表-1に示した $p^{(j)}$ は、入質点でのj次の刺激係数で、4自由度系では16つの刺激係数が与えられることになる。また式で示すと、

$$\ddot{x}_2^{(j)} + 2\beta^{(j)}\omega^{(j)}\dot{x}_2^{(j)} + (\omega^{(j)})^2 x_2^{(j)} = -p_2^{(j)} \ddot{x}_0$$

$$p_2^{(j)} = u_2^{(j)} \sum_{i=1}^m m_i u_i^{(j)}, \quad x_2 = \sum_{i=1}^m \xi_i^{(j)}$$

ここで、 $\beta^{(j)}$ ；j次のモード減衰、 $\omega^{(j)}$ ；j次の固有円振動数、 $u_i^{(j)}$ ；入質点のj次のモード、 m_i ；入質点の質量、 $\ddot{x}_0$ ；入力加速度、 x_2 ；入質点での応答変位。

となる。入力加速度(図-1)特性は、最大加速度 100 cm/sec^2 、 $0.1 \sim 10 \text{ sec}^{-1}$ の周波数帯域を持つホワイトノイズで、サンプリング間隔は 0.01 sec とした。

3. 入力及び質点1の応答波形を用いた場合の同定

多自由度系の動特性の推定手順は、1自由度・2自由度と順次モデルを拡張して同定を行う。表-2は、各段階での同定結果を示した。また*印の欄には、初期条件を示してある。2・3自由度系モデルでは、初期条件の値がかなり同定結果に近くな

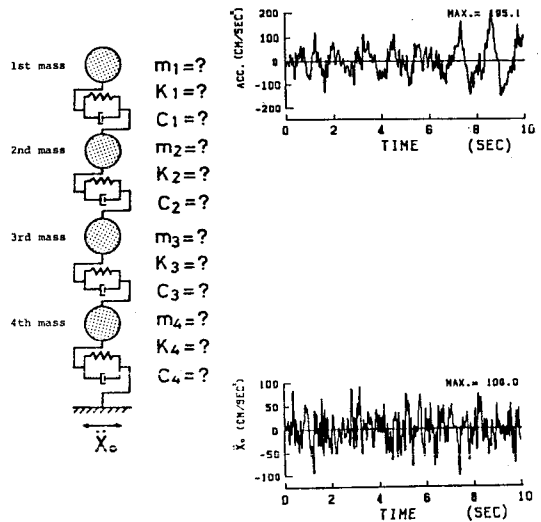


図-1 4自由度系モデル

表-1 動特性値

mode j	1	2	3	4
$\beta^{(j)}$	0.05781	0.1348	0.2175	0.3821
$\omega^{(j)}$ *	4.625	10.78	17.40	30.57
$p_1^{(j)}$	1.350	-0.4182	0.07013	-0.00159
$p_2^{(j)}$	0.7723	0.5538	-0.3543	0.02916
$p_3^{(j)}$	0.3185	0.3962	0.5055	-0.2202
$p_4^{(j)}$	0.08648	0.1215	0.2078	0.5842

* rad/sec

表-2 同定結果(入力及び質点1の波形)

Mode j & γ_1	Single degree of freedom	Two degree of freedom	Three degree of freedom
$\hat{\omega}$	10.0 * 4.655	4.623	4.625
1 $\hat{\beta}$	1.0 0.02920	0.05843	0.05783
$\hat{\beta}_1$	2.0 1.011	1.357	1.349
$\hat{\omega}$		10.86 * 10.79	10.79
2 $\hat{\beta}$		0.0931 0.1182	0.1348
$\hat{\beta}_1$		-0.2300 -0.3830	-0.4176
$\hat{\omega}$			18.59 * 17.43
3 $\hat{\beta}$			0.1274 0.2121
$\hat{\beta}_1$			0.03607 0.06840
γ_1	8.64	1.15×10^{-1}	3.4×10^{-5}

$\hat{\omega}$: rad/sec, γ_1 : per cent.

っているが、1 時的に 1 自由度モデルでの初期条件から推定した値である。表-1 の真値と比較してかなり良い精度で 3 次までの動特性が推定できることがわかる。しかしながら 4 次の動特性に対しては、刺激係数が非常に小さいことから推定することはできなかった。

4. 検証システム

図-1 のモデルに対して、すべての質点で加速度波形が得られているものとして検証を行う。図-2 に検証システムを示し、またそれぞれの結果を表-3 に示した。まず、質点 2 での加速度波形を用い、質点 2 に関する各次数の刺激係数 ($p_2^{(1)}, p_2^{(2)}, p_2^{(3)}$) の推定 [2.1] (表-3) を行う (図-2)。ここでは、 $\omega^{(1)}, \beta^{(1)}$ に対しては、質点 1 で推定した 3 次までの $\omega^{(1)}, \beta^{(1)}$ の値 (表-2) を一定として用いる。 $p_2^{(4)}$ に関しては、1 質点における 3 次の刺激係数であるためにこの様

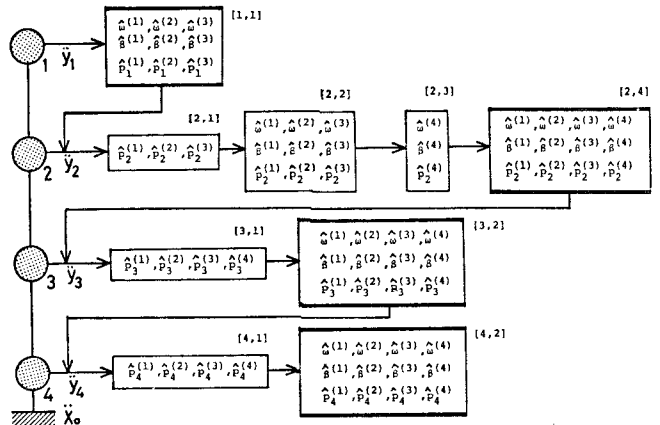


図-2 検証システム

な操作が必要となる。そして再び質点 2 での波形を用いて $\omega^{(1)}, \beta^{(1)}, p_2^{(3)}$ の推定 [2.2] (表-3) を行う (図-2)。次にモデルを 4 自由度系に拡張する。1 次から 3 次の動特性を一定とし、 $\omega^{(4)}, \beta^{(4)}, p_2^{(4)}$ の推定 [2.3] (表-3) を試みた (図-2)。最後に [2.3] (表-3) の動特性を用い、1 次から 4 次の動特性の推定を行った (図-2)。[2.4] (表-3) に示した様に、4 次に対しても安定した動特性が推定された。このことは、質点 2 では、4 次に対する刺激係数が質点 1 に対する刺激係数と比較して大きい (表-1) 点にある。質点 3, 4 に対しても、それぞれの波形から $p_2^{(4)}$ の推定を行った後、 $\omega^{(4)}, \beta^{(4)}, p_2^{(4)}$ の推定する同様な手順により、動特性の推定を行った (図-2)。その結果、[3.2], [4.2] (表-3) に示した様に、1 次から 4 次の安定した動特性が推定された。以上の推定された [2.4], [3.2], [4.2] 及び表-2 の各次数の $\omega^{(i)}, \beta^{(i)}$ がほとんど一致することから、推定された動特性値は、信頼性が高いことが検証された。またここでは、質点 2, 3, 4 の波形から 4 次に対する動特性も精度良く求められることが明らかになった。

表-3 同定結果 (入力及び質点 2, 3, 4 の波形を用いた場合)

Mode j & y_1	Exact values	[2,1]	[2,2]	[2,3]	[2,4]
1 $\hat{\omega}$	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625
1 $\hat{\beta}$	0.05781	0.05783	0.05810	0.05810	0.05784
$\hat{p}_2$	0.7723	0.7735	0.7743	0.7743	0.7724
2 $\hat{\omega}$	10.78	10.79	10.78	10.78	10.79
2 $\hat{\beta}$	0.1348	0.1348	0.1331	0.1331	0.1349
$\hat{p}_2$	0.5538	0.5514	0.5449	0.5449	0.5537
3 $\hat{\omega}$	17.40	17.43	17.43	17.43	17.41
3 $\hat{\beta}$	0.2175	0.2121	0.1991	0.1991	0.2180
$\hat{p}_2$	-0.3543	-0.3393	-0.3280	-0.3280	-0.3537
4 $\hat{\omega}$	30.57			30.08	30.90
4 $\hat{\beta}$	0.3821			0.2537	0.3815
$\hat{p}_2$	0.02816			0.009985	0.02746
y_1		1.33×10^{-2}	8.46×10^{-3}	3.95×10^{-3}	6.60×10^{-6}

$\hat{\omega}$: rad/sec, y_1 : per cent.

Mode j & y_1	Exact values	[3,1]	[3,2]
1 $\hat{\omega}$	4.625	4.625	4.625
1 $\hat{\beta}$	0.05781	0.05784	0.05795
$\hat{p}_3$	0.3185	0.5535	0.3187
2 $\hat{\omega}$	10.78	10.79	10.79
2 $\hat{\beta}$	0.1348	0.1349	0.1349
$\hat{p}_3$	0.3962	0.2888	0.3960
3 $\hat{\omega}$	17.40	17.41	17.41
3 $\hat{\beta}$	0.2175	0.2180	0.2183
$\hat{p}_3$	0.5055	0.4385	0.5056
4 $\hat{\omega}$	30.57	30.90	30.60
4 $\hat{\beta}$	0.3821	0.3815	0.3861
$\hat{p}_3$	-0.2202	-0.2566	-0.2196
y_1		4.62	1.04×10^{-5}

$\hat{\omega}$: rad/sec, y_1 : per cent.

Mode j & y_1	Exact values	[4,1]	[4,2]
1 $\hat{\omega}$	4.625	4.625	4.625
1 $\hat{\beta}$	0.05781	0.05795	0.05768
$\hat{p}_4$	0.08648	0.1505	0.08644
2 $\hat{\omega}$	10.78	10.79	10.79
2 $\hat{\beta}$	0.1348	0.1349	0.1350
$\hat{p}_4$	0.1215	0.09214	0.01215
3 $\hat{\omega}$	17.40	17.41	17.41
3 $\hat{\beta}$	0.2175	0.2183	0.2181
$\hat{p}_4$	0.2078	0.1952	0.2076
4 $\hat{\omega}$	30.57	30.60	30.62
4 $\hat{\beta}$	0.3821	0.3861	0.3856
$\hat{p}_4$	0.5842	0.5649	0.5816
y_1		7.92×10^{-2}	6.43×10^{-6}

$\hat{\omega}$: rad/sec, y_1 : per cent.

*参考文献

- 1) Jazwinski, A.H: Stochastic Process and Filtering Theory, Academic. Press, 1970
- 2) 星谷, 斎藤: 拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文報告集, 1983. 11
- 3) 星谷, 斎藤: 拡張カルマンフィルタを用いた振動系の同定, 17 回地震工学研究発表会, 1983. 7