

武蔵工業大学 正会員 星谷 勝
フジタ工業(株) 正会員 〇 齊藤 悦郎

1. はじめに

本研究は、制御理論の拡張カルマンフィルタ^(*)1)を用い、入力及びバイリニア系システムのフィルタで応答したノイズを含んだ観測データから、その系における各パラメータの推定を行ったものである。拡張カルマンフィルタは、時系列解析で、システムを構成している支配方程式が明らかな場合には、簡単にその支配方程式を、アルゴリズム中に組み込むことができる特徴を持つ。^(*)2) N. Distefano らは、最適化手法を用い、粘性減衰を含まないバイリニア系に対して、固有円振動数を既知とした場合の各パラメータの同定を行っている。本研究では、粘性減衰を含んだバイリニア系で、固有円振動数をも未知量とした。なお同定には、我々が開発した、拡張カルマンフィルタアルゴリズムに対する重み付きのグローバルな繰り返し方法を適用した。^(*)3)

2. 状態方程式、遷移行列の作成

系の支配方程式を拡張カルマンフィルタアルゴリズムに組み込むためには、状態方程式と遷移行列が必要となる。^{(*)1), (*)3)}

粘性減衰を含んだバイリニア系の運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 g(x) = -\ddot{x}_0 \quad (1) \quad \text{復元力}; g(x)$$

$$\overline{FC}; g(x) = x \quad -X_e \leq x \leq X_e$$

$$\overline{BD}; g(x) = \alpha x + (1-\alpha)X_e \quad x > 0$$

$$\overline{ED}; g(x) = x + (1-\alpha)(X_e - x) \quad x - 2X_e \leq x \leq X_e$$

$$\overline{AE}; g(x) = \alpha x - (1-\alpha)X_e \quad x < 0$$

$$\overline{AB}; g(x) = x - (1-\alpha)(x' + X_e) \quad x' \leq x \leq x' + 2X_e$$

α : 弾塑性傾斜率, X_e : 降伏変位, とし与えられる(図-1)。

次に、 $u = -\ddot{x}_0$, $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$ とおき、システムを状態空間表示する。そして同定するパラメータを、 $x_3 = \beta$, $x_4 = \omega_n$, $x_5 = X_e$, $x_6 = \alpha$ とおいて、各パラメータが定常であるとする、バイリニア系に対する状態方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -2x_3x_4x_2 - x_4^2g' - u \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし $g' = g(x_1, x_2, x_4)$

離散化した遷移行列は(2)式を用い、

$$\begin{aligned} \phi_{11} = \phi_{12} = \phi_{14} = \phi_{15} = \phi_{16} = 1.0, \quad \phi_{13} = \Delta \\ \phi_{21} = -\Delta x_3^2 \{ \partial g' / \partial x_1 \}, \quad \phi_{22} = 1 - 2\Delta x_3 x_4 \\ \phi_{23} = -2\Delta x_4 x_2, \quad \phi_{24} = -2\Delta \{ x_3 x_2 - x_4 g' \} \\ \phi_{25} = -\Delta x_4^2 \{ \partial g' / \partial x_5 \}, \quad \phi_{26} = -\Delta x_4^2 \{ \partial g' / \partial x_6 \} \end{aligned}$$

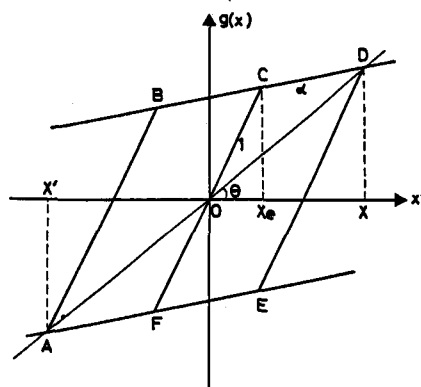


図-1 バイリニア系の復元力特性

表-1 初期条件

初期の最適推定値		初期の推定の共分散値	
X_1	0.0	P_{11}	0.001
X_2	0.0	P_{22}	0.001
X_3	0.1	P_{33}	0.0
X_4	10.0	P_{44}	10^4
X_5	? - 0.04	P_{55}	$0.0 - 10^4$
X_6	1.0	P_{66}	10^4
$R=10^8$		$P_{ij}=0.0 (i \neq j)$	

表-2 粘性減衰が既知の場合の同定結果

Model	ω_n	X_e	α		
B9	7.00	0.052	0.90	----	----
B75	7.00	0.049	----	0.77	----
B5	6.95	0.052	----	----	0.46
EV	7.07	0.050	0.90	0.75	0.50

EV ; Exact Values

その他の要素は 0.0, Δ ; 時間刻み, とし与えられる。

3. 粘性減衰が既知の場合の同定

同定に用いる1対の入出力観測波形は、応答計算により算出した。入力観測波形は、正弦波 ($f=1.13\text{ Hz}$) で最大加速度 1.0 m/sec^2 , 継続時間 15 sec , 時間刻み 0.01 sec とした。またバイリニア系システムは B9, B7.5, B5 の3ケース ($B9; \omega_0=7.07, X_e=0.05, \alpha=0.9$) を用い, 各パラメータの諸量を表-2に示した。そしてこのシステムによる応答波形の2乗平均値に対して、それぞれ1%のノイズを付加して出力の観測データとした。表-1は、各パラメータの初期値を示した。しかしながら、バイリニア系の同定の特徴として、 X_e の初期値の与え方が問題となる。この値を変位観測波形の最大値を越えた値として与えると、 α 及び X_e の同定結果は、任意に選んだ初期値と等しい値となってしまう。そしてこの時得られた ω_0 は、バイリニア系を線形系のモデルで置き換えたことを意味した等価固有円振動数として同定される。そこで X_e を初期においてある程度推定する次の操作が必要となる。図-2は、

X_e のP55を0.0と同定し X_e をパラメトリックに変化させ同定を行ったものである。この図から、 X_e の値が変位観測波形の最大値を越えた範囲において、 α , ω_0 の同定結果はそれぞれ、初期値、等価固有円振動数と等しい値となるが、 X_e の値が小さくなるに従い、意味のある値として同定されてくる。そしてこの範囲の X_e を任意に定め、初期値とした。表-2は、表-1の初期条件を用い、変位を観測波形とした場合の同定結果を示したものである。同表から各パラメータとも真の値に近い値が同定されることがわかる。

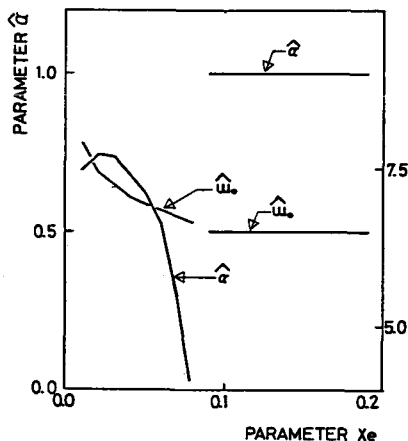


図-2 X_e をパラメトリックにして α, ω_0 を同定した場合

ある値として同定されてくる。そしてこの範囲の X_e を任意に定め、初期値とした。表-2は、表-1の初期条件を用い、変位を観測波形とした場合の同定結果を示したものである。同表から各パラメータとも真の値に近い値が同定されることがわかる。

4. 粘性減衰も未知な場合

初期条件は、表-1と同じ値を用いた。ただし、 β の初期値としては、最大 α の1.0とした。変位波形のみを観測波形として用いた場合には、粘性減衰と履歴減衰との分離ができず、安定した同定結果は得られなかった。一方変位波形と同時に速度波形を観測波形として用いれば、重み付きのグローバルな繰り返しを行なうことにより、安定した同定結果を得ることができた(図-4)。同図より、 α の値が減少するに従い、1回目のグローバルな繰り返しによる同定結果が不安定となり、特に β , α の値が安定するまで、かなりの重み付きのグローバルな繰り返しが必要であることがわかる。しかしながらこの繰り返しを20回程度行えば、各パラメータとも、真の値に対して10%以内に同定できることが明らかになった。

*参考文献 1) Jozwinski, A.H.; Stochastic Process and Filtering Theory 1970 2) Distefano, N.他; Sequential identification of hysteretic 1975 3) 星谷地; 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, 土論集[投稿中] and Viscous model in structural dynamic, Comp Mech App Mech

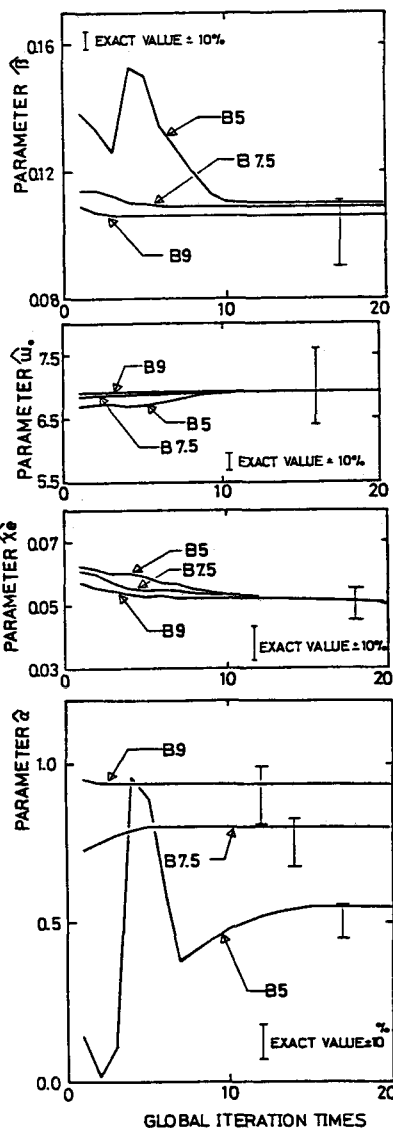


図-3 粘性減衰も未知な場合の同定結果