

拡張カルマンフィルターによる多自由度系の部分同定に関する一考察

徳島大学工学部○学生員 畠 一樹 徳島大学工学部 正 員 沢田 勉
徳島大学工学部 正 員 平尾 潔 徳島大学工学部 学生員 谷口智広

1. はじめに 地震時の構造物特性の解明や既存構造物の損傷度評価を目的として、各種振動系の同定が行われている。しかし、この種の同定問題においては、自由度の数が増加すると同定すべきパラメータの数が増加し、解の精度及びその収束性が悪化する。したがって、一度に同定すべきパラメータの数は少ないほうが良いと考えられている。また、構造物は部分的に損傷を受けるため、損傷度評価は部分的に行えばよいとも考えられる。このような観点より、文献(2)及び(3)では、線形多自由度系をいくつかの部分系に分割して同定を行う部分同定法が提案された。しかし、これらの研究では、部分系の境界における観測記録(入力記録)にはノイズが含まれないとしている。本研究では、線形多自由度系の同定問題に部分同定法を用いた場合に、入力記録に含まれるノイズが同定結果にどのような影響を及ぼすかを検討する。

2. 手法の概要 図-1のような全体系のうち、注目する部分系について考える。ただし、部分系においてはすべての質点において観測記録が得られているとする。この部分系において、最下質点を仮想地盤と考え、質点pから質点qまでの各質点の運動方程式を絶対加速度、速度および変位を用いて表すと次のようになる。

$$[M]\{\ddot{z}(t)\} + [C]\{\dot{z}(t)\} + [K]\{z(t)\} = \{f(t)\} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\{z(t)\} = \{z_p(t), \dots, z_r(t), \dots, z_q(t)\}^T$ は部分系に含まれる各質点の絶対変位、 $[M]$ = 質量行列、 $[C]$ = 減衰行列、 $[K]$ = 剛性行列である。また、右辺の $\{f(t)\}$ は次のようになる。

$$\{f(t)\} = \begin{Bmatrix} c_{p-1}\ddot{z}_{p-1}(t) + k_{p-1}z_{p-1}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_q\ddot{z}_{q+1}(t) + k_qz_{q+1}(t) \end{Bmatrix} \quad \cdots (2)$$

拡張カルマンフィルターは次に示す離散型線形状態方程式と離散型非線形観測方程式を基本式とし、それらを線形化しカルマンフィルターを適用する方法である。

$$x(k+1) = g(x(k)) \quad \cdots (3), \quad y(k) = h(x(k)) + v(k) \quad \cdots (4)$$

ここで、 x = 状態ベクトル、 y = 観測値、 v = ガウス白色雑音であり $k, k+1$ は時刻を表す。式(3)の状態方程式は、

式(1)の運動方程式の数値積分(本研究では Newmark β 法)

を基本とし、これに未知パラメータ(線形多自由度系では

各質点のばね定数と減衰係数)を並列に組み込んだものである。以上のような拡張カルマンフィルターによる部分同定法を用いて、各時刻の状態推定量を逐次同定する。

3. 数値計算および考察 拡張カルマンフィルターによる部分同定法を用いて、線形10自由度系の部分系に含まれるばね定数および減衰係数を同定することにより本手法の有効性を検討する。ここでは解析法の有効性を検討するため、実際の観測記録は用いず入力加速度としてエルセントロ地震波を用い応答計算したものにノイズを付加しこれを観測波形として用いた。但し、観測記録は絶対加速度時刻歴とする。また、時刻刻みは $t=0.02$ (sec)、継続時間は20.48 (sec)とした。表-1は同定に用いた線形10自由度系の諸元(質

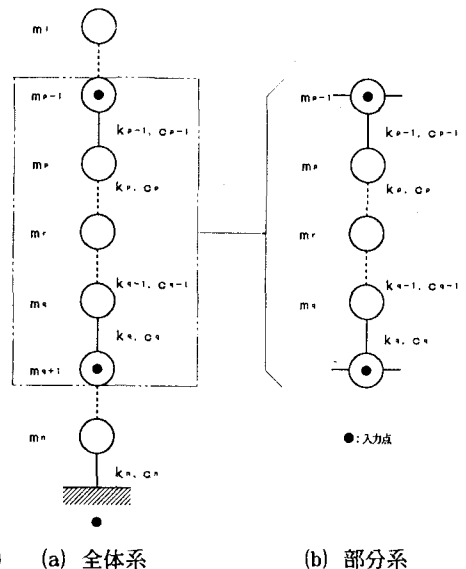


図-1 部分系モデル

量、ばね定数、減衰係数)を示す。以下では、これらの系の質量は既知とし、表-1に示す各質量のばね定数と減衰係数の値を真値として初期値が真値の1.5倍の場合について、系パラメータ(ばね定数と減衰係数)を同定する。なお、観測記録に含まれるノイズの割合は5%、ノイズの共分散は0.0001、状態推定量の誤差共分散は1.0とした。

(1) 入力記録にノイズが含まれない場合

表-1に示す線形10自由度系のうち質点 m_9 および質点 m_{10} を含む部分系のパラメータのみを同定した。但し、この部分系の入力点 m_9 および地盤の観測記録(入力記録)にはノイズは含まれないとし、質点9および10の観測記録(出力記録)にのみ5%のノイズが含まれるとした。図-2は部分系の同定結果である。図において、横軸は時間、縦軸は各時刻における推定値と真値との比である。この図より、線形多自由度系の部分同定において、入力記録にノイズが含まれない場合には、注目した部分系のみを精度良く同定できることがわかる。

(2) 入力記録のノイズが解の精度に及ぼす影響

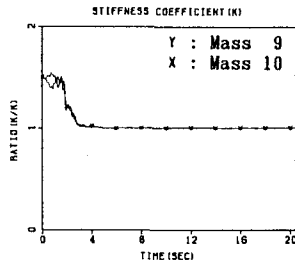
従来の研究では入力点の記録にノイズが含まれないとして同定を行ってきたが^{(2), (3)}、実際には入力点の記録にもノイズが含まれると考えることが現実的である。このノイズは状態方程式の右辺に含まれるため、同定精度が悪化することが予測される。ここでは入力記録に含まれるノイズが同定精度に及ぼす影響を検討するために、入力記録にノイズが含まれない場合と5%含まれる場合の解の精度を比較した。但し、本研究では、観測記録は絶対加速度としているため、式(2)の外力項に含まれる速度および変位 $\dot{z}(t)$ および $z(t)$ は、観測記録にハイパスフィルタ(下限振動数 0.1 Hz)をかけ、それを積分することにより求めた。図-2、図-3はそれぞれ入力記録にノイズが含まれない場合と5%含まれる場合の同定結果である。図-2、図-3の比較により、入力記録にノイズが含まれる場合、解の精度は若干悪化するが、運動方程式を相対加速度、速度、変位で定式化した場合に比べて、ノイズの影響は少ないことがわかる。

4. おわりに 本研究では、線形多自由度系の部分同定法を導入し、その有効性を検討した。その結果、入力記録にノイズが含まれない場合には、部分同定法を用いることにより、線形多自由度系に含まれるパラメータを精度良く同定できること、また、運動方程式を絶対加速度、速度、変位により定式化した場合には、入力記録のノイズの影響を低減しうることがわかった。

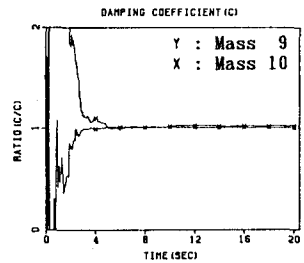
5. 参考文献 (1) Jazwinski, A.H. ; Stochastic Processes and Filtering Theory , Academic Press , 1970 (2) C.G.Koh ; Estimation Of Structural Parameters In Time Domain A Substructure Approach , EESD , Vol.20 , pp787-801 , 1991 (3) W.C.Oreta ; Localized Identification Of Structures By Kalman Filter , JSCE , Vol.9 , pp19-27 , 1993

表-1 10自由度系の諸元

質点番号	質点[kg]	ばね定数 $k \times 10^4$ [kg/s ²]		減衰定数 c [kg/s]	
		真値	初期値	真値	初期値
1	3	0.4	0.6	8	12
2	4	0.6	0.9	12	18
3	5	0.8	1.2	16	24
4	6	1.0	1.5	20	30
5	7	1.2	1.8	24	36
6	8	1.4	2.1	28	42
7	9	1.6	2.4	32	48
8	10	1.8	2.7	36	54
9	11	2.0	3.0	40	60
10	12	2.2	3.3	44	66

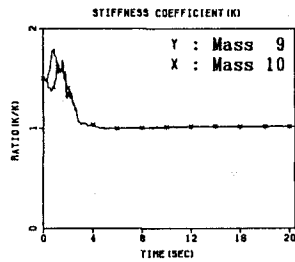


(a) ばね定数

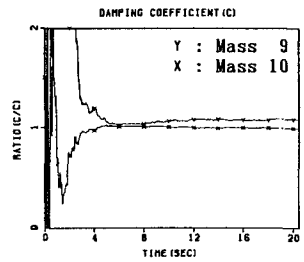


(b) 減衰係数

図-2 同定結果(入力記録ノイズなし)



(a) ばね定数



(b) 減衰係数

図-3 同定結果(入力記録ノイズ=2%)