

拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の 部分同定における入力ノイズ処理法

沢田 勉¹・平尾 潔²・畠 一樹³・成行義文⁴・山村 猛⁵

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

³正会員 工修 エイコンサリタント(株) (元徳島大学院生) (〒700 岡山市津島京町 3-1-21)

⁴正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

⁵正会員 工修 四国建設コンサルタント(株) (元徳島大学院生) (〒770 徳島市佐古六番町 5-29)

本研究は、拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の部分同定において問題となる入力ノイズの
一処理法を提案したものである。具体的には、部分系境界での入力の時相推移を状態方程式に並列に組
込むとともに、入力記録を観測方程式で考慮することによって、入力ノイズが部分系の同定に及ぼす影響
を除去する手法を開発した。数値計算では、線形 10 自由度系の下層の部分系を同定し、提案した手法の
妥当性を検証した。

Key Words: extended Kalman filter, localized identification, system noise, MDOF structure,
elimination of input noises

1. 緒言

本研究は、拡張カルマンフィルタを用いて線形多
自由度系を部分同定する際に問題となる部分系境界
での入力ノイズ処理法を提案したものである。

近年、地盤および構造物の地震時動特性の把握や
既存構造物の損傷度評価を目的として、各種振動系
の同定に関する研究が盛んに行われるようになった。
振動系の同定解析法は現在までに種々提案されてお
り、それらは時間領域の方法^{1)~12)}と周波数領域の方
法^{13)~15)}に大別される。時間領域の解析法は、さら
にデータを逐次的に処理する方法^{1)~9)}と一括処理
する方法^{10)~12)}に分類できる。とくに、星谷等が改
良した拡張カルマンフィルタによる解析法は、時間
領域における逐次的処理法であるが、ノイズに対す
る安定性が優れていることや計算容量が少なく済
むことなどから、振動系の同定のみならず他分野に
おいても多用されている^{16), 17)}。これら手法は、主
に構造系のパラメータ同定に用いられているが、構
造パラメータとともに入力地震動の推定にも応用さ

れている^{5)~7)}。また、最近では、振動系の同定を
より実用化するための研究として、大規模構造物に
含まれる部分系のみを独自に同定する、いわゆる部
分同定法の開発に関する研究もなされている^{18)~20)}。

振動系の同定においては、種々の要因がパラメ
ータの同定精度に影響を及ぼすが、それらのうちでも
とくに入力および出力に含まれるノイズと構造物の
モデル化の誤差が重要な要因となる^{21)~24)}。これら
のうちで、出力(振動系の応答観測記録)に含まれ
るノイズは、従来の研究でも考慮されてきたが^{1)~7)}、
入力に含まれるノイズと構造物のモデル化誤差がパ
ラメータの推定精度に及ぼす影響についてはほとん
ど検討されなかった。松井・栗田は^{21), 22)}、構造同
定において一般には既知とされるモデルパラメータ
(質量)に誤差がある場合および入力地震動がノイ
ズを含む場合について、それぞれ個別に感度解析を
行い、それらが同定精度に及ぼす影響を検討した。
そして、入力ノイズに比べて既知パラメータの誤差
が同定に及ぼす影響が大きいこと、入出力ノイズと
モデルの誤差が同時に存在する場合には、相乗的に

推定精度が悪くなること等を指摘した。Agbabian et al. は²³⁾、入出力ノイズおよびモデル誤差が同定精度に及ぼす影響を、多くの数値計算結果をもとに検討し、同定パラメータの平均値のみならずそのばらつきについても言及した。Koh and See は²⁴⁾、適応拡張カルマンフィルタを用いて状態方程式にシステムノイズを導入するという方法を提案し、上と同様な解析を行って、Agbabian et al. よりもばらつきの小さい同定結果を得ている。

ここで、以上の研究における入力ノイズおよび出力ノイズの定義をしておく。従来の入力ノイズの影響を考慮しない研究では^(例えば 18), 19)、一般に入力ノイズとシステムノイズ、出力ノイズと観測ノイズは、それぞれ互に対応するものと考えられてきた。しかし、構造系の同定においては、同定に使用する入力および出力は観測より得られるものであるから、それらに含まれるノイズはともに観測ノイズとみなされる。本研究でも、入出力ノイズを上と同様な定義によって表す。他方、システムノイズは、状態量の予測誤差に関与するノイズであり、本研究では後述のように入力加速度記録の差分がこれに対応する。

上述のような研究から、振動系の入力に含まれるノイズとモデル誤差は同定パラメータの推定精度に大きな影響を及ぼすことがわかった。これらのうち、前者は同定パラメータの平均値まわりのばらつきに、また後者は平均値の偏りに関係すると考えられる。とくに、拡張カルマンフィルタによる同定では、状態方程式に現れる入力項がノイズを含む場合、そのノイズは状態量の予測に直接関与し、パラメータの同定精度に大きな影響を及ぼす。この傾向は、全体系から部分系を取り出してそれを独立に同定する場合(部分同定)のように、入力点が複数個(せん断型線形多自由度系では上、下境界の2点)ある場合に顕著に現れ、入力ノイズがあるレベル以上(後述の数値計算例では応答の rms 振幅の 0.5% 以上)になると多くの場合同定精度が極端に悪くなる。したがって、入力ノイズの影響を除去して良好な同定精度を得るための手法の開発が必要となる。このような同定手法としては上述の Koh and See²⁴⁾の研究はあるが、この方法はシステムノイズの共分散行列を求める過程がかなり繁雑であり、また、理解しにくい点もある(後述)。

本研究は、拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の部分同定を対象として、部分系境界での入力に含まれるノイズを比較的簡便に処理する一手法を提案したものである。具体的には、入力的时间推移を状態方程式に並列に組込むとともに、入力記録を観測方程式で考慮することにより、入力記録に含まれるノイズを除去する方法を提案した。この方法

は、拡張カルマンフィルタを用いた従来の研究に比べて、状態方程式が若干複雑になるが、Koh and See のように適応フィルタを必要としないため、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを直接適用できる。入力ノイズ処理法の開発において部分同定を対象としたのは、全体系の同定に比べて部分同定の方が入力ノイズの影響をより大きくうけると考えたためである。なお、同定に用いる観測記録は、実用の便を考えて、入出力とも全て絶対加速度時刻歴とした。数値計算では、10 自由度のせん断型線形系に含まれる部分系の同定を行い、提案した手法の妥当性を検証した。

2. 従来の研究

(1) 従来の部分同定法とその問題点^{18), 19)}

振動系の同定手法を大規模構造物に適用する場合、構造系全体を一括して同定するのは得策ではない。これは、大規模構造物のように多くの自由度を有する多自由度系の一括同定では、多数の観測記録が必要であること、観測記録が少ない場合には同定パラメータの解の一義性が保証されないこと、また同定すべきパラメータの数が多くなると解の収束性および精度が劣化すること等の理由による²⁵⁾。このような観点より、Koh et al.¹⁸⁾、Oreta and Tanabe¹⁹⁾らは拡張カルマンフィルタによる部分同定法を提案している。以下では、従来の部分同定法の概略とその問題点について述べる。

図-1(a)に示すせん断型線形多自由度系における任意の部分系を考える(図-1(b))。図-1(b)の部分系において、 $p-1$ および $r+1$ は境界質点、 $m_p \sim m_r$ 、 $k_{p-1} \sim k_r$ 、 $c_{p-1} \sim c_r$ は、それぞれこの部分系に含まれる質点の質量、ばね定数および減衰係数とする。観測記録は、上下の境界質点および部分系内の1つ以上の質点で得られており、それらは絶対加速度記録であるとする。部分系の質点 $p \sim r$ 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。

$$M\ddot{z}(t) + C\dot{z}(t) + Kz(t) = f(t) \quad (1)$$

ここで M 、 C 、 K は部分系の質量行列、減衰行列、剛性行列であり、 $\ddot{z}(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ 、 $z(t)$ は部分系各質点の絶対加速度、速度および変位応答からなるベクトルである。また、 $f(t)$ は部分系に対する入力ベクトルであり、次式で与えられる。

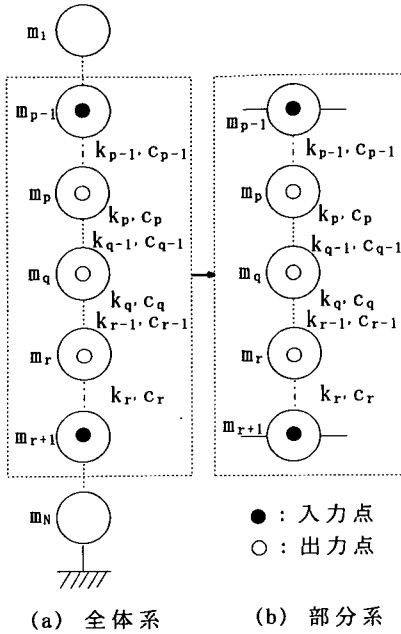


図-1 線形多自由度系モデル

$$f(t) = \begin{bmatrix} c_{p-1}\dot{z}_{p-1}(t) + k_{p-1}z_{p-1}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_r\dot{z}_{r+1}(t) + k_r z_{r+1}(t) \end{bmatrix} \quad (n+1) \quad (2)$$

ここで、部分系の自由度 n は、 $n=r-p+1$ であり、 $\dot{z}_{p-1}(t)$ 、 $z_{p-1}(t)$ 、 $\dot{z}_{r+1}(t)$ および $z_{r+1}(t)$ は、それぞれ上下の境界質点 ($p-1$ および $r+1$) における絶対速度および絶対変位である。

式(1)の運動方程式は、各種の数値積分法を用いて漸次的に解くことができ、時刻 $t_k = k \Delta t$ での絶対加速度、速度および変位応答 $\ddot{z}(k)$ 、 $\dot{z}(k)$ 、 $z(k)$ から $t_{k+1} = (k+1) \Delta t$ での応答 $\ddot{z}(k+1)$ 、 $\dot{z}(k+1)$ および $z(k+1)$ を求めることができる。数値積分法として Newmark の β 法を用い、また式の表示を簡単にするために $\ddot{z}(k)$ 、 $\dot{z}(k)$ および $z(k)$ をそれぞれ $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ および $x_3(k)$ で表わすと、部分系の応答に関する状態方程式は次式ようになる。

$$\begin{cases} x_1(k+1) = A^{-1}\{f(k+1) - Ca(k) - Kb(k)\} & (3) \\ x_2(k+1) = a(k) + \Delta t \cdot x_1(k+1)/2 & (4) \\ x_3(k+1) = b(k) + \beta \Delta t^2 \cdot x_1(k+1) & (5) \end{cases}$$

ここで、行列 A 、ベクトル $a(k)$ 、 $b(k)$ および $f(k+1)$ は、それぞれ以下のように表わされる。

$$\begin{cases} A = M + \Delta t \cdot C/2 + \beta \Delta t^2 \cdot K & (6) \\ a(k) = x_2(k) + \Delta t \cdot x_1(k)/2 & (7) \\ b(k) = x_3(k) + \Delta t \cdot x_2(k) + (1/2 - \beta) \Delta t^2 \cdot x_1(k) & (8) \end{cases}$$

$$f(k+1) = \begin{bmatrix} c_{p-1}\dot{z}_{p-1}(k+1) + k_{p-1}z_{p-1}(k+1) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_r\dot{z}_{r+1}(k+1) + k_r z_{r+1}(k+1) \end{bmatrix} \quad (n \times 1) \quad (9)$$

部分系に含まれる質量 m_p, \dots, m_r を既知とすると、同定すべきパラメータは部分系内のばね定数 $\{k_{p-1}, \dots, k_r\}$ および減衰定数 $\{c_{p-1}, \dots, c_r\}$ となる。これらを x_4 および x_5 で表わすと、同定すべきパラメータの時刻 k から $k+1$ への推移は次式で与えられる。

$$x_4(k+1) = x_4(k) \quad (10)$$

$$x_5(k+1) = x_5(k) \quad (11)$$

ここで、これらのベクトルの次元は、それぞれ $n+1$ である。式(3)~(5)、(10)および(11)は、拡張カルマンフィルタにおける状態方程式となる。周知のように、拡張カルマンフィルタは、時刻 k から $k+1$ への予測過程 (Predictor phase) と時刻 $k+1$ での修正過程 (corrector phase) からなる²⁴⁾。状態方程式は、このうちの予測過程で用いられる。

ところで、式(3)~(5)の状態方程式の右辺は部分系の上下境界での絶対速度および絶対変位時刻歴 $\dot{z}_{p-1}(k+1)$ 、 $z_{p-1}(k+1)$ 、 $\dot{z}_{r+1}(k+1)$ および $z_{r+1}(k+1)$ を含み、しかもそれらは時刻 $k+1$ での値である。そこで、次のような問題点が生じる。

- ①部分系の上下境界での加速度、速度、変位時刻歴は観測より得られるものであるから、それらはノイズを含むと考えるのが実際的である。このように、入力項を構成する時刻歴がノイズを含む場合には、式(3)~(5)の状態方程式が正確に作動せず、時刻 k から $k+1$ への状態量が正確に予測できない。
- ②一般に観測記録は絶対加速度の形で得られることが多い。式(9)右辺に含まれる速度および変位時刻歴は加速度を積分することにより求められるが、加速度記録にノイズが含まれる場合には、何らかの誤差補正が必要となる。たとえこのような補正をしたとしても、速度および変位の真の値は厳密には得られない。
- ③式(3)~(5)の状態方程式の右辺に含まれる入力項 $f(k+1)$ は時刻 $k+1$ での値である。状態方程式は時刻 k から $k+1$ への推移を表す式であるから、これと矛盾する。

従来の部分同定法では^{18), 19)}, 上述の問題点は考慮されていない。ただし, 多自由度系の一括同定では, 次項に述べる Koh and See²⁴⁾ の研究がある。

(2) システムノイズを考慮した従来の研究²⁴⁾

Koh and See は²⁴⁾, 適応拡張カルマンフィルタを用いて状態方程式にシステムノイズを導入することにより, 入力ノイズの影響を低減する方法を提案した。この方法は, システムノイズの共分散行列を求める過程と拡張カルマンフィルタによる同定の二段階からなるが, 第一段階のシステムノイズの共分散行列を求める過程が新しく導入されたものである。以下, これについて簡単に説明する。

いま, 付録の式(A1)と(A2)で表わされる状態方程式と観測方程式が与えられているとする。ただし, Koh らの研究との整合のため, 式(A1)右辺の $\Gamma(k)w(k+1)$ はまとめて $w(k+1)$ で表わす。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{g}\{\mathbf{x}(k)\} + \mathbf{w}(k+1) & (12) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) & (13) \end{cases}$$

ここで, $w(k+1)$ はシステムノイズのベクトル, $v(k)$ は観測ノイズのベクトルであり, それぞれ次の性質をもつ。

$$E[\mathbf{w}(k)] = 0, E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}(l)] = \mathbf{Q}(k)\delta_{kl} \quad (14)$$

$$E[\mathbf{v}(k)] = 0, E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}(l)] = \mathbf{R}(k)\delta_{kl} \quad (15)$$

上式における $\mathbf{Q}(k)$ および $\mathbf{R}(k)$ はシステムノイズおよび観測ノイズの共分散行列であり, このうち $\mathbf{R}(k)$ は一般に試行錯誤により与えられる。Koh and See は, システムノイズの共分散行列 $\mathbf{Q}(k)$ を以下のような方法により求めた。いま, 時刻 k での予測過程において時刻 $k+p$ の予測誤差ベクトル $\mathbf{r}(k+p)$ を考える。

$$\mathbf{r}(k+p) = \mathbf{y}(k+p) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(k+p|k) \quad (16)$$

ここで, $\mathbf{y}(k+p)$ は時刻 $k+p$ の観測ベクトル, $\hat{\mathbf{x}}(k+p|k)$ は時刻 $k+p$ での状態量の予測値である。予測誤差 $\mathbf{r}(k+p)$ の共分散 $Cov[\mathbf{r}(k+p)]$ は, 若干の計算過程を経て次のように求められる²⁴⁾。

$$\begin{aligned} Cov[\mathbf{r}(k+p)] &= \mathbf{H}\Phi(k+p, k)\mathbf{P}(k|k)\Phi^T(k+p, k)\mathbf{H}^T \\ &+ \mathbf{H}\left[\sum_{i=1}^p \Phi(k+p, k+i)\mathbf{Q}(k+i)\Phi^T(k+p, k+i)\right]\mathbf{H}^T \\ &+ \mathbf{R}(k+p) \end{aligned} \quad (17)$$

ここで, $\mathbf{P}(k|k)$ は時刻 k における状態量の誤差共分散行列, $\Phi(k+p, k)$ は時刻 k から $k+p$ への状態推移行列であり次のように求められる。

$$\Phi(k+p, k) = \prod_{i=1}^p \Phi(k+i, k+i-1) \quad (18)$$

Koh and See は, システムノイズの共分散行列 $\mathbf{Q}(k+1)$ が時刻 $k+1 \sim k+N$ で不変であり非対角項が対角項に比べて無視できると仮定して, 式(17)を近似した式から \mathbf{Q} の対角要素を求めた後, 拡張カルマンフィルタを適用して, 時刻 k から $k+M$ の同定を行うという二段階からなる手法を開発した。ここで, N および M の値としては, 例えば $N=20, M=3$ が用いられた。しかし, この手法はかなり複雑であり, 多くの繰り返し計算を伴う。また, システムノイズの共分散行列 $\mathbf{Q}(k+1)$ を求める際に状態推移行列 $\Phi(k+p, k)$ を必要とするが, $p \geq 2$ の場合の状態推移行列をどのようにして求めるのかなど, 理解に苦しむ点がある。

3. 入力ノイズ処理を考慮した部分同定

前述のように, 従来の部分同定法は, 入力に含まれるノイズの処理を考慮していない。また, 入力ノイズを処理するためにシステムノイズを導入した Koh and See の方法はかなり複雑であり, また理解しにくい点もある。ここでは, 部分系の境界質点でノイズを含む絶対加速度記録が得られているという前提のもとに, 式(9)の入力項 $f(k+1)$ を比較的簡便に処理する手法について述べる。

(1) 入力の状態推移の導入

いま, 部分系の境界質点 $p-1$ および $p+1$ の絶対加速度記録を $\ddot{z}_{p-1}(k)$ および $\ddot{z}_{p+1}(k)$ とする。入力項 $f(k+1)$ に含まれる境界質点での速度および変位 $\dot{z}_{p-1}(k+1)$, $z_{p-1}(k+1)$, $\dot{z}_{p+1}(k+1)$, $z_{p+1}(k+1)$ は, 時刻 k でのそれらの値と, 時刻 k および $k+1$ での加速度から, Newmark の β 法を用いて次のように表すことができる。ただし, 質点 $p-1$ と $p+1$ に対する式は同形になるので, $p-1$ に対する式について記述する。

$$\begin{cases} \dot{z}_{p-1}(k+1) = \dot{z}_{p-1}(k) + \Delta t\{\ddot{z}_{p-1}(k) + \ddot{z}_{p-1}(k+1)\}/2 & (19) \\ z_{p-1}(k+1) = z_{p-1}(k) + \Delta t \cdot \dot{z}_{p-1}(k) + \Delta t^2 \cdot \ddot{z}_{p-1}(k)/2 \\ \quad + \beta \Delta t^2 \cdot \{\ddot{z}_{p-1}(k+1) - \ddot{z}_{p-1}(k)\} & (20) \end{cases}$$

ここで, 次式に示すような加速度記録の差分 $w_1(k)$ を導入する。

$$w_1(k) = \ddot{z}_{p-1}(k+1) - \ddot{z}_{p-1}(k) \quad (21)$$

上式より $\dot{z}_{p-1}(k+1)$ を求め, これを式(19), (20)に代入すると, 次の3式が得られる。

$$\begin{cases} \ddot{z}_{p-1}(k+1) = \ddot{z}_{p-1}(k) + w_1(k) & (22) \\ \dot{z}_{p-1}(k+1) = \dot{z}_{p-1}(k) + \Delta t \cdot \ddot{z}_{p-1}(k) + \Delta t \cdot w_1(k) / 2 & (23) \\ z_{p-1}(k+1) = z_{p-1}(k) + \Delta t \cdot \dot{z}_{p-1}(k) + \Delta t^2 \cdot \ddot{z}_{p-1}(k) / 2 \\ \quad + \beta \Delta t^2 \cdot w_1(k) & (24) \end{cases}$$

同様に、質点 $r+1$ に対する式を求め、質点 $p-1$ のそれらとともに行列表示すると、次式が得られる。

$$\mathbf{x}_6(k+1) = \mathbf{B}\mathbf{x}_6(k) + \mathbf{D}\mathbf{w}(k) \quad (25)$$

ここで、ベクトル \mathbf{x}_6 , \mathbf{w} , および行列 \mathbf{B} , \mathbf{D} は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_6 &= \{x_{5n+3}, \dots, x_{5n+8}\}_{(6 \times 1)}^T \\ &= \{\ddot{z}_{p-1}, \dot{z}_{p-1}, z_{p-1}, \ddot{z}_{r+1}, \dot{z}_{r+1}, z_{r+1}\}_{(6 \times 1)}^T \end{aligned} \quad (26)$$

$$\mathbf{w} = \{w_1, w_2\}_{(2 \times 1)}^T \quad (27)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t^2 / 2 & \Delta t & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t^2 / 2 & \Delta t & 1 \end{bmatrix}_{(6 \times 6)} \quad (28)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \Delta t / 2 & 0 \\ \beta \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \Delta t / 2 \\ 0 & \beta \Delta t^2 \end{bmatrix}_{(6 \times 2)} \quad (29)$$

式(25)は、部分系への入力の時刻 k から $k+1$ への推移を表わす式である。

(2) 状態方程式および観測方程式の修正

ここでは、従来の研究における状態方程式(式(3)~(5))および観測方程式を、前項の入力の状態推移を用いて修正する。式(9)に示す入力項 $f(k+1)$ を式(25)のベクトル \mathbf{x}_6 を用いて表わすと

$$\begin{aligned} f(k+1) &= \mathbf{E}\mathbf{x}_6(k+1) \\ &= \mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{x}_6(k) + \mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{w}(k) \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、行列 \mathbf{E} は次式で表わされる。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & c_{p-1} k_{p-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_r & k_r \end{bmatrix}_{(n \times 6)} \quad (31)$$

式(30)を式(3)~(5)に代入すると入力の状態推移を考慮した応答の状態方程式が次のように得られる。

$$\mathbf{x}_1(k+1) = \mathbf{g}_1\{\mathbf{x}(k)\} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{w}(k) \quad (32)$$

$$\mathbf{x}_2(k+1) = \mathbf{g}_2\{\mathbf{x}(k)\} + \Delta t \cdot \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{w}(k) / 2 \quad (33)$$

$$\mathbf{x}_3(k+1) = \mathbf{g}_3\{\mathbf{x}(k)\} + \beta \Delta t^2 \cdot \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{w}(k) \quad (34)$$

上式中の $\mathbf{g}_1\{\mathbf{x}(k)\}$, $\mathbf{g}_2\{\mathbf{x}(k)\}$, $\mathbf{g}_3\{\mathbf{x}(k)\}$ は、それぞれ次のようになる。

$$\mathbf{g}_1\{\mathbf{x}(k)\} = \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{E}\mathbf{B}\mathbf{x}_6(k) - \mathbf{C}\mathbf{a}(k) - \mathbf{K}\mathbf{b}(k)] \quad (35)$$

$$\mathbf{g}_2\{\mathbf{x}(k)\} = \mathbf{a}(k) + \Delta t \cdot \mathbf{g}_1\{\mathbf{x}(k)\} / 2 \quad (36)$$

$$\mathbf{g}_3\{\mathbf{x}(k)\} = \mathbf{b}(k) + \beta \Delta t^2 \cdot \mathbf{g}_1\{\mathbf{x}(k)\} \quad (37)$$

ここで、行列 \mathbf{A} 、ベクトル $\mathbf{a}(k)$, $\mathbf{b}(k)$ および $\mathbf{x}_6(k)$ は、それぞれ式(6)~(8)および式(26)で与えられる。以上のように、入力ノイズ処理を考慮した場合の状態方程式は、式(32)~(34)、式(10)、(11)および式(25)により構成される。これらをまとめると、状態方程式の一般式は次式となる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{g}\{\mathbf{x}(k)\} + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{w}(k+1) \quad (38)$$

ここで、ベクトル \mathbf{x} および \mathbf{g} , 行列 $\mathbf{\Gamma}$ は次のように与えられる。

$$\mathbf{x} = \{x_1^T, x_2^T, \dots, x_6^T\}_{(5n+8) \times 1}^T \quad (39)$$

$$\mathbf{g} = \{\mathbf{g}_1^T, \mathbf{g}_2^T, \mathbf{g}_3^T, x_4^T, x_5^T, (\mathbf{B}\mathbf{x}_6)^T\}_{(5n+8) \times 1}^T \quad (40)$$

$$\mathbf{\Gamma}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D} \\ \Delta t \cdot \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D} / 2 \\ \beta \Delta t^2 \cdot \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{D} \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}_{[(5n+8) \times 2]} \quad (41)$$

式(38)より、本研究の部分同定問題では、式(21)および(27)で定義される加速度記録の差分が状態方程式のシステムノイズとみなされる。ところで、一般のカルマンフィルタでは、システムノイズ $\mathbf{w}(k)$ は式(14)で表わされる性質をもつ。この $\mathbf{w}(k)$ は、式(21)に示すように、境界質点 $p-1$ および $r+1$ での加速度記録の差分として計算されるので、式(14)が正確に成立するとは限らない。しかし、後述の計算例で示すよ

表-1 線形 10 自由度系モデルの諸元

No.	m	k	c
1	3	0.4	8
2	4	0.6	12
3	5	0.8	16
4	6	1.0	20
5	7	1.2	24
6	8	1.4	28
7	9	1.6	32
8	10	1.8	36
9	11	2.0	40
10	12	2.2	44

No.: 質点番号 m: 質量 ($\times 10^2$ tons)

k: ばね定数 ($\times 10^6$ kN/m) c: 減衰係数 ($\times 10^2$ tons/sec)

観測記録は、図-3(c)の加速度波形を入力として、図-2(a)の 10 自由度系の応答解析から絶対加速度応答を求めた後、入力および質点 9, 10 の絶対加速度時刻歴にノイズを付加することにより作成した。ノイズは 0.1~25Hz の有帯域ホワイトノイズとし、そのレベルは、入力または応答の rms 値を基準に設定した。図-2(b)に示す部分系の同定では、質点 9 および基礎が入力点となり、質点 10 の応答が出力となる。このようにして得られた入出力の加速度波形を図-3に示す。図において、(a)および(c)は部分系に対する入力波形であり、(b)は出力波形となる。解析では、質量 m_9 は既知とし、ばね定数 k_9 , k_{10} と減衰係数 c_9 , c_{10} を同定した。これらの同定パラメータの初期値(時刻 0 での値)は、通常は真値の 2 倍とするが、初期値の影響の検討では真値の 8 倍まで拡張した。なお、システムノイズの共分散行列 Q の計算(式(46))では、平均化時間を $T_a=1\sim 5$ sec に変えて解析した結果、同定結果がほとんど変わらなかったため、 $T_a=4$ sec として計算を行った。

ところで、拡張カルマンフィルタによる同定精度および収束性は、同定パラメータの初期値 $\hat{x}(0|0)$ 、時間刻み Δt 、状態量の誤差共分散行列の初期値 $P(0|0)$ 、観測ノイズの共分散行列 R などの影響を受ける。とくに、 $P(0|0)$ と R は、同定精度に直接影響を及ぼすので、これらを適切に設定することが重要である。ここでは、 $P(0|0)$ と R を種々に変化させて計算を行い、これらと同定精度の関係を検討した。その結果、 $P(0|0)$ の対角要素と R の対角要素の比が同定精度と密接に関係することが分かったので、 $P(0|0)$ の対角要素を次のように設定した。

a) 入出力の加速度、速度および変位

$$P_{ii}(0|0) = \left(\frac{A_{9max}}{N_p} \right)^2 \times R_{ii} \quad (47)$$

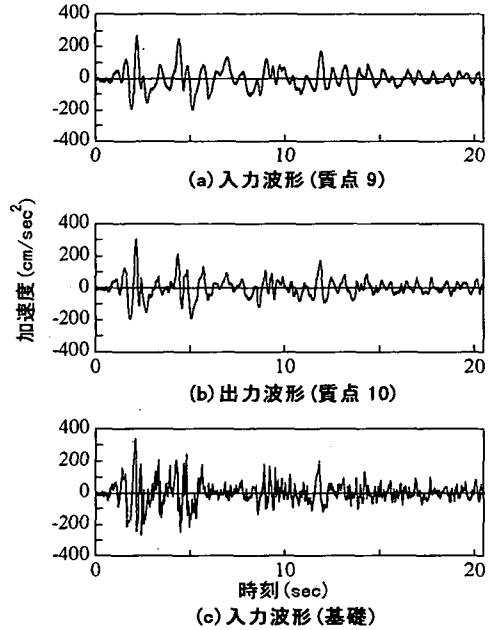


図-3 入出力の加速度波形 (入出力ノイズ 10%)

b) ばね定数

$$P_{ii}(0|0) = \left(\frac{k_{init}}{N_p} \right)^2 \times R_{ii} \quad (48)$$

c) 減衰係数

$$P_{ii}(0|0) = \left(\frac{c_{init}}{N_p} \right)^2 \times R_{ii} \quad (49)$$

以上において、 A_{9max} =質点 9 の最大加速度、 k_{init} =ばね定数の初期値、 c_{init} =減衰係数の初期値、 R_{ii} =行列 R の対角要素である。また、係数 N_p は、 $P_{ii}(0|0)$ の大きさを決めるパラメータであり、 N_p を 1~100 の範囲で変化させた結果、 $N_p = 2\sim 20$ 程度のとき同定精度が良好であった。他方、上記の N_p を用いた場合は、 R_{ii} が $10^{-8}\sim 10^{-1}$ の広い範囲で安定した同定結果が得られた。これらのことにより、以下の数値解析では、 $N_p=10$, $R_{ii}=10^{-5}$ を用いた。

つぎに、式(14)で表わされるシステムノイズの性質のうち第 2 式について検討した。この式は、システムノイズが白色雑音的な性質をもつことを示す。そこで、図-3(a)および(c)の加速度記録の差分 $w_1(k)$ および $w_2(k)$ を計算した後、これらの自己相関関数を求めた。図-4(a)~(c)には、 $w_1(k)$, $w_2(k)$ の自己相関関数 $R_1(\tau)$, $R_2(\tau)$ およびそれらの相互相関関数 $R_{12}(\tau)$ を示す。図において、横軸は時間遅れ τ である。また、これらの関数は、それぞれ自己

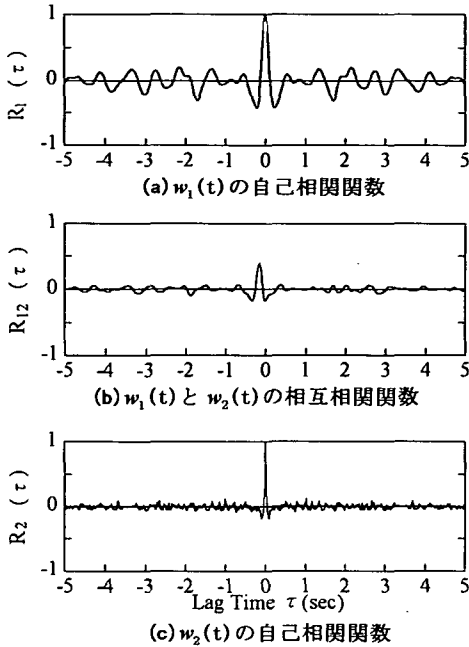


図-4 システムノイズの自己相関関数
および相互相関関数

相関関数の最大値 ($\tau=0$ での値) で正規化したものである。図より、基礎でのシステムノイズはほぼ白色雑音的な性質をもつが(図-4 (c))、質点9でのシステムノイズは式(14)を満足せず、時間遅れが0以外の点でも最大0.4程度の値をもつことがわかる(図-4 (a))。

(2) 従来の部分同定法による同定

図-2(b)に示す部分系の入力点(質点9および基礎)の観測記録がノイズを含まない場合と含む場合について、従来の部分同定法を用いてばね定数 k_9 , k_{10} および減衰係数 c_9 , c_{10} を同定し、手法の有用性と問題点を検討した。

まず、入力点の観測記録がノイズを含まない場合について述べる。表-2は、出力点(m_{10})の加速度記録のみが1~30%のノイズを含むときの同定精度を示したものである。ノイズの割合は、応答のrms振幅との比率(%)で表わされ、同定精度は真値に対する誤差の比率(%)で表わされている。また、図-5には、入力ノイズが0%、出力ノイズが10%の場合のばね定数と減衰係数の収束状況を示した。図において、左図はばね定数、右図は減衰係数であり、横軸は時間、縦軸はそれぞれのパラメータの真値に対する比である。これらの図表より、従来の同定法で入力ノイズが0%であれば、出力ノイズが0~20%の範囲で精度のよい同定が可能であることがわかる。

表-2 従来手法による同定誤差(%)
(入力ノイズなし、初期値/真値=2, $R_{ii}=10^{-5}$)

出力ノイズ(%)	k_9	k_{10}	c_9	c_{10}
1.0	0.3	0.2	0.7	-0.5
2.0	0.3	0.1	0.4	-0.6
3.0	0.3	0.1	0.3	-0.7
4.0	0.7	0.5	1.7	-1.4
5.0	0.6	0.3	0.9	-1.1
6.0	0.6	0.2	0.3	-1.2
8.0	1.1	0.7	2.2	-2.1
10.0	1.6	1.2	4.2	-2.9
15.0	2.4	1.8	6.3	-4.3
20.0	3.4	2.4	7.8	-6.3
30.0	83.2	93.4	445.3	-91.8

表-3 従来手法による同定誤差(%)
(入出力ノイズあり、初期値/真値=2, $R_{ii}=10^{-5}$)

入出力ノイズ(%)	k_9	k_{10}	c_9	c_{10}
0.1	0.2	0.4	2.5	0.2
0.2	-1.7	-1.2	-4.0	3.2
0.3	-4.8	-3.8	-12.3	8.3
0.4	-9.5	-7.6	-23.5	16.5
0.5	-12.8	-10.2	-31.0	22.0
0.6	-15.5	-13.1	-39.4	26.6
0.8	-27.6	-21.9	-62.3	44.6
1.0	-34.9	-29.7	-89.2	55.4
1.5	-43.1	-37.6	-113.7	73.6
2.0	-51.0	-41.8	-117.5	89.3

つぎに、入出力ともにノイズが含まれる場合について同定を行い、従来の部分同定法における入力ノイズの影響を検討した。入力点(質点9および基礎)と出力点(質点10)の観測記録に含まれるノイズのレベルは、ともに0.1~2.0%に変化させた。表-3は、ノイズレベルと同定精度の関係を示したものである。表より、従来の部分同定では、入力ノイズが0.5%以上になると同定誤差が10%以上になることがわかる。このように、部分同定では入力点が複数個(この例では2個)存在するため、入力ノイズの影響が顕著に現れ、ノイズレベルが低くても同定精度は極端に悪くなる。

(3) 提案手法による部分同定

図-2(b)に示す部分系の入力点(質点9および基礎)の観測記録がノイズを含む場合に対し、前節で述べた入力ノイズ処理法を適用してばね定数 k_9 , k_{10} , および減衰係数 c_9 , c_{10} を同定し、提案した手法の有効性を検証する。ノイズレベルは、入出力とも1~30%とした。表-4は、ノイズレベルと同定誤差の関係を示したものである。図-6は、入出力ノイズが10%の場合のばね定数と減衰係数の収束状況を示したものである。

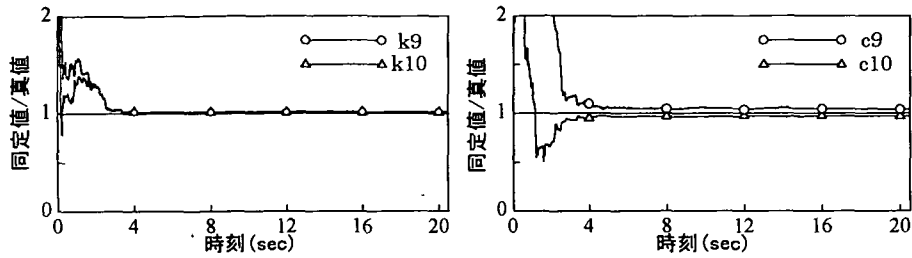


図-5 従来手法による同定結果(初期値/真値=2.0, 入力ノイズ0%, 出力ノイズ10%, $R_{ii}=10^{-5}$)

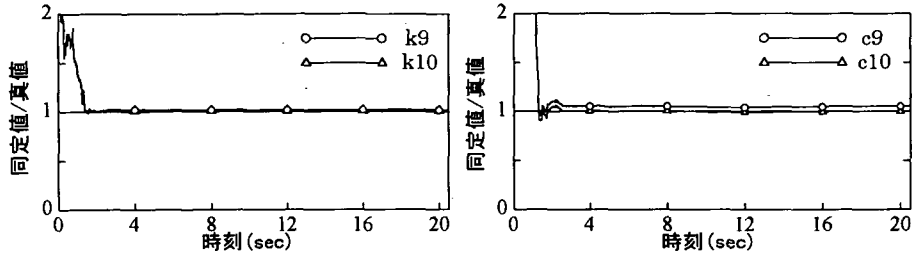


図-6 提案手法による同定結果(初期値/真値=2.0, 入出力ノイズ10%, $R_{ii}=10^{-5}$)

表-4 提案手法による同定誤差(%)

(入出力ノイズあり, 初期値/真値=2, $R_{ii}=10^{-5}$)

入出力ノイズ(%)	k_9	k_{10}	c_9	c_{10}
1.0	0.2	0.3	1.2	-0.0
2.0	0.9	0.1	0.1	-0.8
3.0	1.0	-0.1	-0.5	-0.7
4.0	0.6	0.6	2.4	0.1
5.0	1.1	0.5	1.8	-0.5
6.0	1.4	0.7	2.5	-0.6
8.0	1.6	0.9	3.6	-0.2
10.0	1.9	1.2	5.1	-0.0
15.0	2.6	1.5	7.0	0.4
20.0	2.6	1.5	8.6	2.1
30.0	2.8	1.7	14.8	6.2

表-5 提案手法による同定誤差(%)

(入出力ノイズあり, 初期値/真値=4, $R_{ii}=10^{-5}$)

入出力ノイズ(%)	k_9	k_{10}	c_9	c_{10}
1.0	-0.5	0.4	1.7	0.5
2.0	-0.2	0.2	1.0	0.6
3.0	0.9	0.2	0.7	-0.8
4.0	1.3	0.1	0.5	-1.1
5.0	1.5	0.1	0.4	-1.2
6.0	1.7	0.3	1.1	-1.3
8.0	2.2	0.8	3.3	-1.6
10.0	2.7	1.2	5.4	-1.8
15.0	4.3	3.5	15.4	-2.7
20.0	2.8	3.3	15.0	0.3
30.0	6.8	11.4	53.8	-0.5

これらの図表より、第3節の提案手法すなわち部分同定における入力ノイズ処理法を用いた場合には、入力および出力に含まれるノイズのレベルがかなり大きい場合(20%程度)であっても、良好な同定結果が得られることがわかる。また、表-2の従来の部分同定法(入力ノイズを含まない場合)と、表-4の提案手法(入力ノイズを含む場合)による同定結果を比較すると、両者の同定誤差は同程度になることがわかる。

(4) 初期値と同定精度の関係

一般の同定問題では、未知パラメータの初期値をどのように与えるべきかが問題となる。初期値をどのように与えても真値に収束するという

が理想であるが、ある程度真値に近い初期値を与えなければ同定精度が悪くなるのが一般的である。この点で、星谷らが提案したEK-WGI法は有力な手法となっている^{1)~3)}。ここでは、EK-WGI法のようなグローバルな繰り返しを行わない場合に、提案手法に基づいて初期値と同定誤差の関係を検討した。表-4~6は、初期値が真値の2倍、4倍および8倍の場合について、ノイズレベルと同定誤差の関係を示したもので、図-6~8は、ノイズレベルが10%の場合について、初期値が真値の2倍、4倍および8倍のときの各パラメータの収束状況を示したものである。これらの図表より、初期値が真値から離れノイズレベルが大きくなると、精度および収束性が悪くなることがわかる。

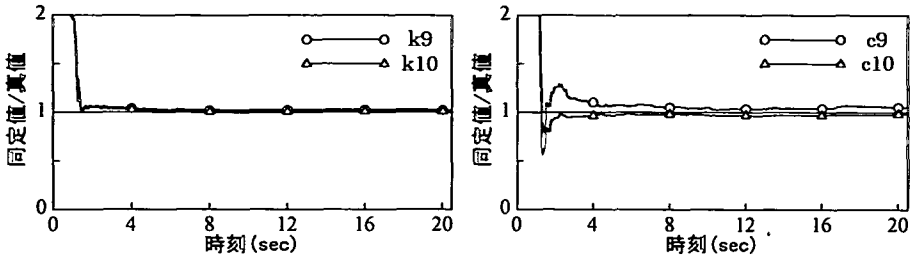


図-7 提案手法による同定結果(初期値/真値=4.0, 入出力ノイズ10%, $R_{ii}=10^{-5}$)

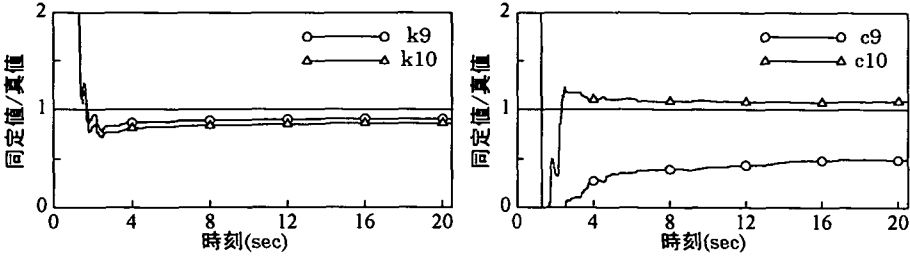


図-8 提案手法による同定結果(初期値/真値=8.0, 入出力ノイズ10%, $R_{ii}=10^{-5}$)

表-6 提案手法による同定誤差(%)
(入出力ノイズあり, 初期値/真値=8, $R_{ii}=10^{-5}$)

入出力ノイズ(%)	k_9	k_{10}	c_9	c_{10}
1.0	-2.1	0.3	0.8	3.2
2.0	-2.4	0.4	1.6	3.4
3.0	-0.3	0.0	0.8	0.4
4.0	2.4	-1.3	-3.5	-4.8
5.0	0.4	-0.2	-0.2	0.1
6.0	-3.0	-0.2	-0.4	6.1
8.0	-3.4	0.2	1.7	6.4
10.0	-9.3	-13.8	-51.1	8.5
15.0	-10.2	-9.6	-32.7	14.1
20.0	15.2	6.9	45.2	-15.6
30.0	45.2	26.1	136.8	-50.7

しかし、初期値が真値の数倍程度で、入出力ノイズのレベルが数%程度であれば同定精度は良好である(表-5および6)。このように、入力ノイズ処理を考慮した部分同定法は、未知パラメータの初期値としてかなり粗い推定値を与えても良好な同定結果が得られることから、安定性の面でも優れた手法であるといえる。

5. 結言

本研究は、拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の部分同定法における部分系境界での入力ノイズ処理法を提案したものである。観測記録として、部分系境界点および内部のいくつかの

点で絶対加速度記録が得られるという前提のもとに部分同定法を定式化するとともに、入力記録がノイズを含む場合の問題点について述べ、その処理法について詳しく述べた。本研究の内容を要約すると、以下ようになる。

- (1) 部分系境界の入力点における絶対加速度時刻歴の差分を用いて入力速度および変位時刻歴の推移を表すと同時に、これを状態方程式に並列に組込む方法を提示した。これにより、入力の加速度記録を出力の観測記録と同様に観測方程式で考慮することが可能になり、その結果、入力に含まれるノイズを従来の拡張カルマンフィルタにより処理することができた。
- (2) 入力にノイズを含む場合、従来の部分同定法では、入力ノイズの影響が顕著に現れ、入力ノイズレベルが rms 振幅比で 0.5%程度で同定精度がかなり悪くなる。しかし、提案した入力ノイズ処理法を用いると、入力ノイズが 20%程度であっても良好な同定結果が得られ、本研究の手法が有用であることがわかった。
- (3) 未知パラメータの初期値が同定精度に及ぼす影響を検討した結果、提案した手法では、初期値が真値の数倍程度でかつ入出力のノイズレベルが 10%程度であれば、良好な同定結果が得られた。

以上、本研究の内容について述べたが、今後の課題として提案手法の実用性の検討がある。そのためには、実在構造物におけるアレー観測記録の収集をしなければならないが、良質な記録は意外と少なくまた入手が難しい。今後このような観測記録が多数蓄積され、また公開されるようになれば、提案手法の実用性の検討を行いたい。

付録：拡張カルマンフィルタのアルゴリズム

状態方程式と観測方程式は、一般に次のように与えられる。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{g}\{\mathbf{x}(k)\} + \Gamma(k)\mathbf{w}(k+1) & (A1) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) & (A2) \end{cases}$$

ここで、 $\mathbf{x}(k)$ = 状態量ベクトル、 $\Gamma(k)$ = 係数ベクトル、 $\mathbf{w}(k)$ = システムノイズベクトル、 $\mathbf{y}(k)$ = 観測ベクトル、 \mathbf{H} = 観測行列、 $\mathbf{v}(k)$ = 観測ノイズベクトルである。 $\mathbf{w}(k)$ と $\mathbf{v}(k)$ は本文中の式(14)および(15)の性質をもち、それらの共分散行列は $\mathbf{Q}(k)$ および $\mathbf{R}(k)$ で与えられる。いま、時刻 k での状態推定量 $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ とその誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k|k)$ が与えられたとき、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムは以下ようになる。

① 時刻 $k+1$ の予測値 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ を計算する。

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{g}\{\hat{\mathbf{x}}(k|k)\} \quad (A3)$$

② 状態推移行列 $\Phi(k+1, k)$ を求める。

$$\Phi(k+1, k) = \left[\frac{\partial \mathbf{g}\{\mathbf{x}(k)\}}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k)} \quad (A4)$$

③ $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ の誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k+1|k)$ を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1|k) &= \Phi(k+1, k)\mathbf{P}(k|k)\Phi^T(k+1, k) \\ &+ \Gamma(k)\mathbf{Q}(k+1)\Gamma^T(k) \end{aligned} \quad (A5)$$

④ カルマン利得行列 $\kappa(k+1)$ を求める。

$$\kappa(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T \left\{ \mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k+1) \right\}^{-1} \quad (A6)$$

⑤ 時刻 $k+1$ での状態推定量 $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1)$ を求める

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) &= \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) \\ &+ \kappa(k+1)\{\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)\} \end{aligned} \quad (A7)$$

⑥ $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1)$ の誤差共分散行列 $\mathbf{P}(k+1|k+1)$ を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1|k+1) &= [\mathbf{I} - \kappa(k+1)\mathbf{H}]\mathbf{P}(k+1|k)[\mathbf{I} - \kappa(k+1)\mathbf{H}]^T \\ &+ \kappa(k+1)\mathbf{R}(k+1)\kappa^T(k+1) \end{aligned} \quad (A8)$$

⑦ $k=k+1$ として、①～⑥の手順を繰返す。

参考文献

- 1) 星谷勝, 齊藤悦郎: 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, 第339号, pp.59-67, 1983年11月.
- 2) 星谷勝, 齊藤悦郎: 線形多自由度系の動特性の推定, 土木学会論文集, 第344号/I-1, pp.289-298, 1984年4月.
- 3) 星谷勝, 丸山收: 非線形構造系の地震時の挙動特性の同定, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.397-405, 1987年10月.
- 4) 須藤敦史, 星谷勝: 拡張カルマンフィルタの基礎的考察とEK-WLI法の提案, 土木学会論文集, 第437号/I-17, pp.203-211, 1991年10月.
- 5) Hoshiya, M. and Sutoh, A.: Identification of input and parameters of a MDOF system, Proc. of 5th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engr. and Construction, Vol. 2, pp.1309-1314, July, 1995.
- 6) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, 竹内廣高: カルマンフィルタを用いた多入力系の入力地震動の推定, 京都大学防災研究所年報, 第32号, B2, pp.23-38, 1989年4月.
- 7) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J.: Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, structural Engr. / Earthquake Engr., Vol. 6, No. 2, pp.413-421, October 1989.
- 8) 土岐憲三, 佐藤忠信, 生木泰秀: 自己回帰・移動平均法による構造物の動的パラメータの推定, 京都大学防災研究所年報, 第21号, B2, pp.57-68, 1978年4月.
- 9) 丸山收, 相沢旬, 星谷勝: ARMAモデルによる既存構造物の動特性の同定, 土木学会論文集, 第416号/I-13, pp.439-447, 1990年4月.
- 10) Beck, J.L. and Jennings, P.C.: Structural identification using linear model and earthquake records, Earthquake Engr. & Structural Dynamics, Vol. 8, pp.145-160, 1980.
- 11) 松井邦人, 栗田哲史: 応答加速度波を用いた構造特性の同定, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp.689-698, 1989年3月.
- 12) 安藤幸治, 岩楯徹広: 時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用, 土木学会論文集, 第450号/I-20, pp.151-160, 1992年7月.
- 13) Mcverry, G.H.: Structural identification in

- the frequency domain from earthquake records, Earthquake Engr. & Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 161-180, 1980.
- 14) 沢田勉, 辻原治, 阿世賀宏, 神谷宏: せん断型線形多自由度系の同定問題の周波数領域における解析法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 32A, pp. 739-748, 1986年3月.
 - 15) 沢田勉, 辻原治, 平尾深, 山本英史: 地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用, 土木学会論文集, 第446号/I-19, pp. 205-213, 1992年4月.
 - 16) 鈴木誠, 石井清: 拡張カルマン・フィルタによる土質定数の空間分布推定, 土木学会論文集, 第406号/III-11, pp. 71-78, 1989年6月.
 - 17) 須藤敦史, 星谷勝: EK-WLI法と有限要素法を用いた逆解析, 土木学会論文集, 第446号/I-19, pp. 177-185, 1992年4月.
 - 18) Koh, C.G., See, L.M. and Balendra, T.: Estimation of structural parameters in time domain: A substructure approach, Earthquake Engr. & Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 787-801, 1991.
 - 19) Oreta, W.C. and Tanabe, T.: Localized identification of structures by Kalman filter, Structural Engr./Earthquake Engr., Vol. 9, No. 4, pp. 217-225, January, 1993.
 - 20) 沢田勉, 岡本康, 平尾深, 辻原治: 地盤のS波速度とQ値の部分同定法の開発, 土木学会論文集, 第495号/I-28, pp. 111-118, 1994年7月.
 - 21) 松井邦人, 栗田哲史: 構造同定における各種の誤差およびノイズの影響, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 839-849, 1991年3月.
 - 22) Matsui, K. and Kurita, T.: Sensitivities of parameters due to model errors and measurement noises in structural identification problems, Structural Engr./Earthquake Engr., Vol. 7, No. 2, pp. 263-272, October, 1990.
 - 23) Agbabian, M.S., Masri, S.F., Miller, R.K. and Caughey, T.K.: System identification approach to detection of structural changes, Jour. of Engrg. Mech., ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 370-390, February, 1991.
 - 24) Koh, C.G. and See, L.M.: Identification and uncertainty estimation of structural parameters, Jour. of Engrg. Mech., ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 1219-1236, June, 1994.
 - 25) Zhao, Q., Sawada, T., Hirao, K. and Nariyuki, Y.: Localized identification of MDOF structures in the frequency domain, Earthquake Engr. & Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 325-339, 1995.
 - 26) 戸川隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンス社, pp. 34-43, 1975年.
 - 27) Sawada, T., Hata, K., Hirao, K. and Nariyuki, Y.: A few remarks on localized identification of MDOF structures by extended Kalman filter, Proc. of 5th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engrg. and Construction, Vol. 2, pp. 1327-1332, July, 1995.
 - 28) Jazwinski, A.H.: Stochastic process and filtering theory, Academic Press, pp. 266-286, 1970.

(1996. 4. 9 受付)

A LOCALIZED IDENTIFICATION METHOD OF MDOF STRUCTURES CONSIDERING INPUT MOTION NOISES BY EXTENDED KALMAN FILTER

Tsutomu SAWADA, Kiyoshi HIRAO, Kazuki HATA,
Yoshifumi NARIYUKI and Takeshi YAMAMURA

A method for identifying structural parameters of local part of a structure (substructure) is developed, in which the input motions at the boundaries of the substructure are assumed to be noise corrupted since they are observed or measured. The absolute velocities and displacements at the boundaries, that are the input motions to the substructure, are incorporated into the state equation and observation equation of extended Kalman filter from which the influence of input motion noises on identification is reduced. Numerical analysis is carried out for localized identification of structural parameters of a shear type MDOF structural model and the effectiveness of presented method is investigated.