

改良拡張カルマンフィルターを用いた動特性の推定

(株) 合田工務店 正会員 ○福家 光宏
香川大学工学部 フェロー会員 野田 茂

1. はじめに

風、交通などの動的外力に曝され、構造物は常に振動状態にあると言える。中でも地震動が構造物に及ぼす影響は大きく、無視できないので、動特性の変化を知る必要がある。また、構造物の健全性を知る上では構造物のモデル化を適切に行わなければならない。従って、構造物の状態を把握する上では動特性を解明することが重要となる。

本研究では、万能型劣化履歴復元力特性を有する非線形多自由度構造物を対象に、従来の拡張カルマンフィルター（EKF-WGI 法）に代わるアルゴリズムを提案し、数値実験によって動特性同定手法の有効性を調べる。ここで取り扱う手法は重み付きグローバルな繰り返しを伴う改良拡張カルマンフィルター法（MEKF-WGI 法）である。

2. 非線形履歴系の運動方程式

構造物は、強震動を受けると、強い非線形性を示すようになる。そこで、ここでは非線形挙動を忠実に追跡するため、Bouc によって提案された万能型復元力特性モデル¹⁾を用いる。この特性を有する非線形多自由度系の運動方程式は次式の状態方程式で表せる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \vdots \\ x_i \\ \dot{x}_i \\ z_i \\ \varepsilon_i \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \dot{x}_i \\ -2h_i\omega_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - \alpha_i\omega_i^2(x_i - x_{i-1}) - (1 - \alpha_i)\omega_i^2 z_i + \frac{m_{i+1}}{m_i}(1 - \delta_{iN}) \\ \cdot \{2h_{i+1}\omega_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + \alpha_{i+1}\omega_{i+1}^2(x_{i+1} - x_i) + (1 - \alpha_{i+1})\omega_{i+1}^2 z_{i+1}\} - \ddot{z}_g \\ \{(A_{i0} - \delta_{A_i}\varepsilon_i)(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - (\nu_{i0} + \delta_{\nu_i}\varepsilon_i)(\beta_i|\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}||z_i|^{n_i-1}z_i \\ + \gamma_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})|z_i|^{n_i})/(\eta_{i0} + \delta_{\eta_i}\varepsilon_i) \\ m_i(1 - \alpha_i)\omega_i^2 z_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 x_i は地表面に対する質点 i の相対変位、 z_i は履歴変位、 ε_i は履歴エネルギーである。また、 m_i は質点 i の質量、 ν_i は質点 i と質点 $i-1$ 間の相対変位（層間変位）、 α_i は降伏比、 $\ddot{z}_g$ は地動加速度である。 δ_{iN} はクロネッカーデルタ記号である。同定すべき線形系パラメータは微小線形振動時における質点 i の等価減衰定数 h_i 、等価固有円振動数 ω_i 、非線形系パラメータは α_i 、 η_i 、 γ_i 、 δ_{A_i} 、 δ_{ν_i} 、 δ_{η_i} である。また、 A_{i0} 、 η_{i0} 、 ν_{i0} はパラメータの初期値である。

3. 改良拡張カルマンフィルターアルゴリズム

本研究で提案する改良拡張カルマンフィルターは、従来法である拡張カルマンフィルターの収束速度を向上させるために導入するものである。これは次の2つのアルゴリズムの並列処理を基本としている。その計算フローを示すと、図-1 のようになる。

1) アルゴリズム 1

i 質点の応答量 (x_i , $\dot{x}_i$, z_i , ε_i) と非線形系パラメータの初期推定値および初期推定誤差共分散を用いて、次のステップにおける応答量と非線形系パラメータを推定する。このとき、線形系パラメータ $\theta_i = (h_i, \omega_i)$ の同定は行わない。線形系パラメータの推定誤差共分散は 0

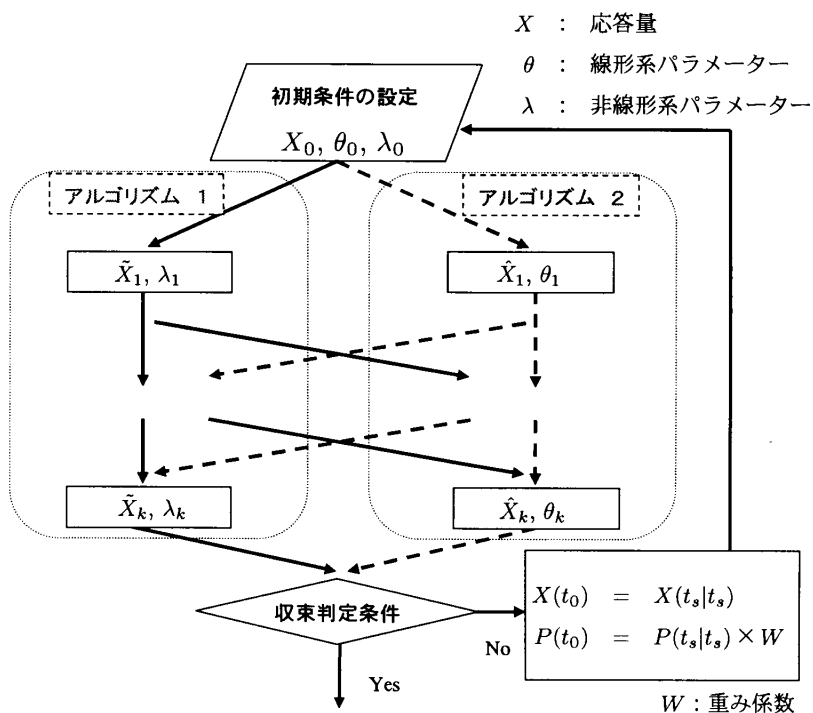


図-1 MEKF-WGI 法の計算フロー

キーワード：構造同定、改良拡張カルマンフィルター、万能型復元力特性モデル

連絡先：〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 Tel 087-864-2153 Fax 087-864-2153

に設定しておく．図-1 に示す如く， k ステップ目における応答量 $\hat{x}_k$ と非線形系パラメーター λ_k は， $k-1$ ステップにおいてアルゴリズム2で求めた線形系パラメーターの推定値 θ_{k-1} ，アルゴリズム1で得られた応答量 $\hat{x}_{k-1}$ ，非線形系パラメーターの推定値 λ_{k-1} とそれらの推定誤差共分散を用いることにより同定される．

2) アルゴリズム2

アルゴリズム2は，アルゴリズム1における非線形系パラメーターと線形系パラメーターの扱い方が逆になるだけである．つまり，応答量と線形系パラメーターの初期推定値，初期推定誤差共分散を用いて，次ステップにおける応答量と線形系パラメーターを推定する．このとき非線形系パラメーターは固定して同定計算をしない． k ステップにおいては， $k-1$ ステップにおけるアルゴリズム1の非線形系同定パラメーター λ_{k-1} ，アルゴリズム2で求められた応答量 $\hat{x}_{k-1}$ ，線形系パラメーターの推定値 θ_{k-1} とそれらの推定誤差共分散から，応答量 $\hat{x}_k$ と線形系パラメーター θ_k を推定することになる．

4. 数値計算結果および考察

ここでは，従来法である重み付きグローバルな繰り返しを伴う拡張カルマンフィルター法（EKF-WGI 法）と提案手法である MEKF-WGI 法の比較分析を行う．

図-2 には3自由度系の応答の一例（質点3の履歴復元力曲線）を示す．図-3 は EKF-WGI 法による，図-4 は MEKF-WGI 法による評価基準値の反復過程である．図-4 より，誤差が図-3 に比べ 1/10~1/100 のオーダーになっていること，少ない繰り返しで収束していることが理解できる．

図-5 にはグローバルな繰り返し回数に対するパラメーターの収束過程の一例を示す．等価固有円振動数 ω は1回目ではほぼ真値に収束し，2回目以降の繰り返しでは安定状態にある．非線形系パラメーター β は，質点によらず，ほぼ同一値に収束している．同定パラメーターを用いた復元力特性（図-6）は図-2 とは若干異なっているが，全体的な応答挙動の再現性は比較的高いと言える．

5. おわりに

MEKF-WGI 法と EKF-WGI 法の比較分析の結果，提案手法は従来法に比べて少ない繰り返し回数である程度の同定精度を確保できることがわかった．

参考文献

- 1) 野田茂，久保田秀樹：非線形履歴劣化多自由度系の震動特性の同定，第3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp. 195-209，1993．

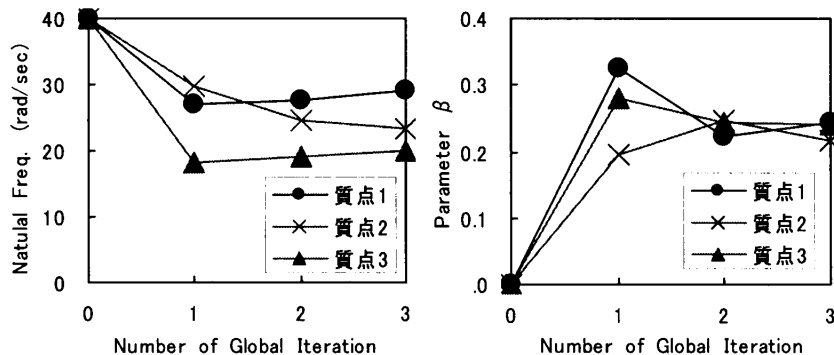


図-5 MEKF-WGI 法によるパラメーターの収束過程

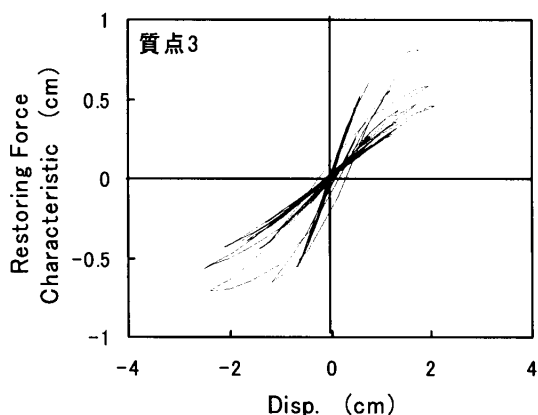


図-2 質点3の復元力特性

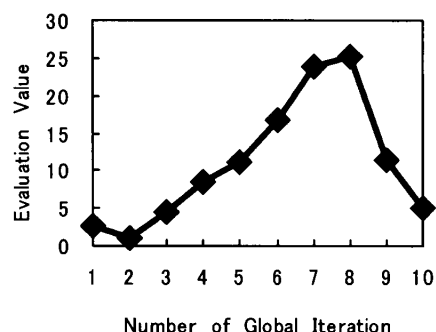


図-3 EKF-WGI 法による評価基準値の変化

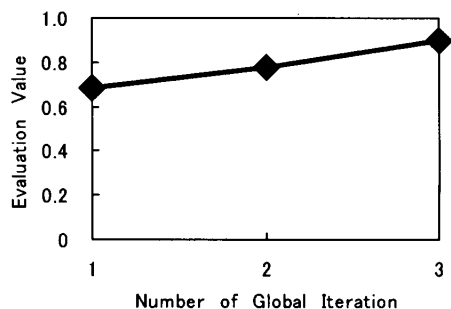


図-4 MEKF-WGI 法による評価基準値の変化

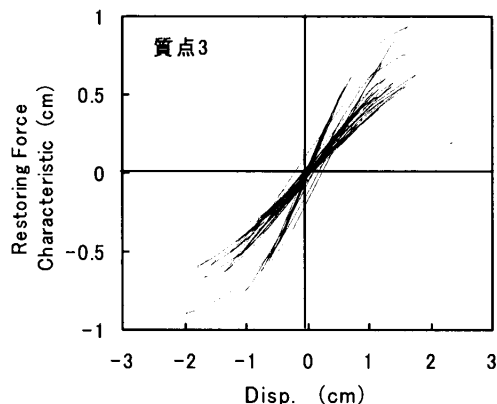


図-6 MEKF-WGI 法による最適同定パラメーターでの計算応答（質点3の復元力特性）