

効率的なサンプリングフィルタを用いた劣化履歴非線形振動系の構造同定

香川大学工学部 フェロー ○野田 茂
六吹工務店 濱田 隆志

1. はじめに

構造物の状態変化を把握して健全性を知る上で、その動特性の解明は欠かすことができない。そこで本研究では、より現実的な挙動モデルとして劣化履歴復元力特性を有する多自由度振動系を対象に、重点的サンプリングフィルタと棄却法を用いた動特性同定手法を新たに提案する。

ここで提案するアルゴリズムは、1)未知パラメータの初期設定が容易である、2)プログラミング上複雑なコーディングを必要としない、3)非線形・非正規性の確率特性推定に適用可能であるなど、多くの利点を有する。提案手法では、重点的密度関数・サンプリング密度関数を適切に与えることにより、同定精度のさらなる向上が期待される。このことを勘案し、数値シミュレーションを実施することにより、従来手法に比べた提案手法の優位性・有用性を検討する。

2. 効率的なサンプリングフィルタ

重点的サンプリングフィルタと棄却法の基本的考え方については、文献 1)、2)で示されているが、ここでは重点的密度関数・サンプリング密度関数を新しく定義することによって同定の効率化を図る。

提案手法は、確率過程の情報更新理論を基本とし、現在の状態を起点とした予測・フィルタリングのアルゴリズムからなる。これは、時刻 T までの観測量 y_t が与えられたとき、状態量 x_t の条件付確率密度関数 $p(x_t | y_T)$ を同定する問題である。このとき、予測分布 $p(x_t | y_{t-1})$ 、フィルタ分布 $p(x_t | y_t)$ は、それぞれ、粒子と呼ばれる m 個の実現値を用いて近似的に計算される。

(1) 重点的サンプリングフィルタ (ISF)

重点的サンプリングフィルタは、モンテカルロ計算による多数回の試行の効率化を図った上で、得られた条件付確率密度関数(予測分布、フィルタ分布)を頻度分布として近似的に算出する手法である。サンプリングの効率化を図るため、ここでは重点的密度関数 $p_I(x_t)$ を導入して式(1)の重み関数 ω を定義する。

$$\omega = p(x_t) / p_I(x_t) \quad (1)$$

本研究では、重点的密度関数として、次式を与えることを提案する。

$$p_I(x_t) = \frac{1}{2} N(a_{t|t-1}^*, c\Sigma_{t|t-1}^*) + \frac{1}{2} N(a_{t-1|t-1}^*, c\Sigma_{t-1|t-1}^*) \quad (2-a)$$

$$p_I(x_t) = \frac{1}{2} LN(a_{t|t-1}^*, c\Sigma_{t|t-1}^*) + \frac{1}{2} LN(a_{t-1|t-1}^*, c\Sigma_{t-1|t-1}^*) \quad (2-b)$$

ここに、 $N(m, \sigma^2)$ 、 $LN(m, \sigma^2)$ は正規分布、対数正規

分布を表す。 $a_{t|t-1}^*$ 、 $a_{t-1|t-1}^*$ は、それぞれ、予測分布、フィルタ分布から求められる平均値、 $\Sigma_{t|t-1}^*$ 、 $\Sigma_{t-1|t-1}^*$ は同共分散、 c は任意値である。

(2) 棄却法 (RS)

棄却法は、サンプリング密度関数 $p_*(x_t)$ から直接乱数 $z^{(k)}$ ($k=1, \dots, m$) を生成し、状態量の受容確率 $\omega(z^{(k)})$ を満たす粒子を抽出するアルゴリズムである。ここでは受容確率として次式を定義する。

$$\omega(z^{(k)}) = \frac{p(y_t | z^{(k)}) p(z^{(k)} | x_{t|t-1}^{*(i)}) / p(z^{(k)})}{\sup_{z^{(k)}} p(y_t | z^{(k)}) p(z^{(k)} | x_{t|t-1}^{*(i)}) / p(z^{(k)})} \quad (3)$$

ここに、 $x_{t|t-1}^{*(i)}$ ($i=1, \dots, m$) は予測分布の粒子である。

本研究ではサンプリング密度関数として次式を提案する。

$$p_*(x_t) = N(a_{t|t-1}^*, \gamma\Sigma_{t|t-1}^*) \quad (4-a)$$

$$p_*(x_t) = LN(a_{t|t-1}^*, \gamma\Sigma_{t|t-1}^*) \quad (4-b)$$

ここに、 $a_{t|t-1}^*$ 、 $\Sigma_{t|t-1}^*$ は予測分布の統計量(平均値、共分散)、 γ は任意値である。

3. 劣化履歴非線形振動系の運動方程式

劣化履歴復元力特性を有する N 自由度非線形振動系の質点 i における運動方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{x}_i + \bar{f}_i - \frac{m_{i+1}}{m_i} (1 - \delta_{iN}) \bar{f}_{i+1} = -\ddot{z}_g \quad (5)$$

ただし、

$$\bar{f}_i = 2h_i\omega_i\dot{u}_i + \omega_i^2\phi_i \quad (6)$$

ここに、 x_i ($i=1 \sim N$) は地面に対する質点 i の相対変位、 $\ddot{z}_g$ は入力地震加速度、 m_i 、 h_i 、 ω_i はそれぞれ質点 i の質量、等価減衰定数、等価固有円振動数である。 u_i は質点 i と質点 $(i-1)$ の層間変位であり、 $u_i = x_i - x_{i-1}$ ($x_0 = 0$) で表される。 δ_{iN} はクロネッカーデルタ記号である。 ϕ_i は非線形復元力特性で、降伏比 α_i 、履歴変位 z_i を用いて $\phi_i = \alpha_i u_i + (1 - \alpha_i) z_i$ で表される。

本研究では、劣化履歴復元力特性をモデル化するため、次式を用いた。

$$\dot{z}_i = \{A_i \dot{u}_i - \nu_i (\beta_i |\dot{u}_i| z_i + \gamma_i \dot{u}_i |z_i|^{n_i})\} / \eta_i \quad (7)$$

上式よりわかるように、履歴変位は非線形劣化履歴モデルの各種パラメータ (n_i 、 β_i 、 γ_i 、 A_i 、 η_i 、 ν_i) によって支配される。

4. 数値解析による検証

計算の対象としたモデルは劣化履歴復元力特性を有する 3 自由度非線形振動系である。入力波形には

キーワード：重点的サンプリングフィルタ、棄却法、劣化履歴非線形振動系、構造同定

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

2001年芸予地震時の加速度記録（K-netのデータ）を用いた。

応答量は式(2-a),(4-a),パラメータは式(2-b),(4-b)の分布を用い, c と γ を適切に与え, 提案手法により動特性を規定する線形系パラメータと非線形系パラメータを同定した。その上で, 同定精度, 非線形挙動の再現性について検討した。ここでは, 同定精度の向上を図るため, 応答継続時間においてグローバルな繰り返し同定を実施した。比較検討のため, 従来手法である拡張カルマンフィルタとモンテカルロフィルタによる計算も併せて実施した。

数値計算の結果, 等価固有円振動数は各手法とも高い精度で同定できることがわかった。図-1には同定の繰り返しに伴うパラメータ β の収束過程, 図-2には質点2での同パラメータの経時変化を示す。ISF, RSともに高い同定精度が得られていることが明らかである。劣化を示すパラメータについては質点ごとに同定精度にばらつきが見られた。しかし, 従来手法の同定結果は良くなかったが, 提案手法を採用することによって改善することができた。最適同定パラメータを用いて履歴曲線を求めた結果を図-3に示す。提案手法は従来手法に比べて真の挙動を精度良く再現できている。また, 重点的サンプリングフィルタは従来法に比べて, 少ない繰り返し回数で十分な同定精度を確保できた。これらのことから, 提案手法の効率性が明らかになった。

5. おわりに

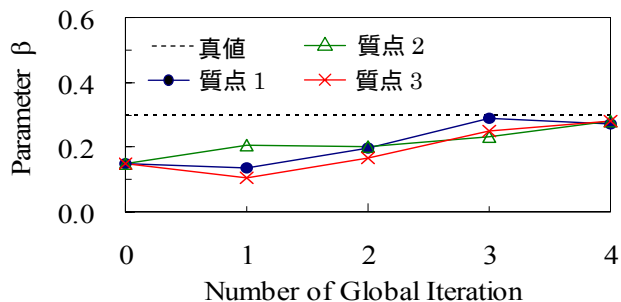
本研究では, 重点的サンプリングフィルタと棄却法を用いた構造動特性を同定するアルゴリズムを提案した。劣化履歴復元力特性を有する3自由度非線形振動系を対象に数値シミュレーションを実施した結果, 次のようにまとめられる。

- 1) 等価固有円振動数についてはいずれの手法を用いても高い同定精度が得られた。
- 2) 劣化を示すパラメータについては, 質点ごとに同定精度に違いが見られた。特に, 劣化度の小さい下層部においては応答が小さく線形挙動をしているため, 同定が困難であった。しかし, 提案手法の同定精度は従来法に比べて高い。
- 3) 最適同定パラメータを用いて応答量を求めた結果, 提案手法は真の挙動を比較的精度良く再現できた。
- 4) 重点的サンプリングフィルタによれば, 従来法に比べて少ない繰り返し回数で高い同定精度を確保することができた。

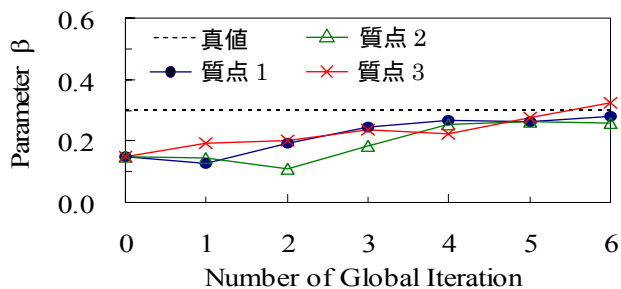
以上の結果から, 従来手法と対比した提案手法の優位性, 有用性が明らかになった。

参考文献

- 1) Tanizaki, H.: Nonlinear and nonnormal filter using importance sampling: Antithetic Monte Carlo integration, Communications in Statistics, Simulation and Computation, Vol.28, No.2, pp.463-486, 1999.
- 2) Tanizaki, H.: On the nonlinear and nonnormal filter using rejection sampling, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.44, No.2, pp.314-319, 1999.

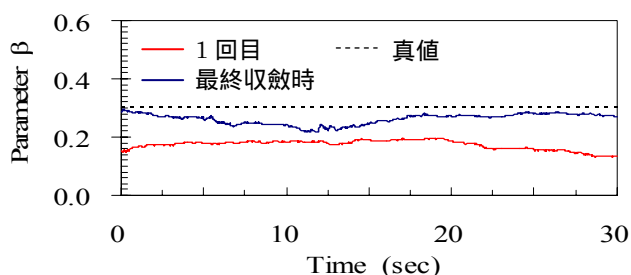


(a) ISFによる計算結果

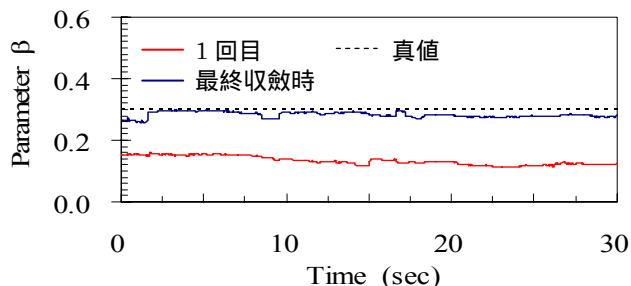


(b) RSによる計算結果

図-1 同定の繰り返しに伴うパラメータの収束過程

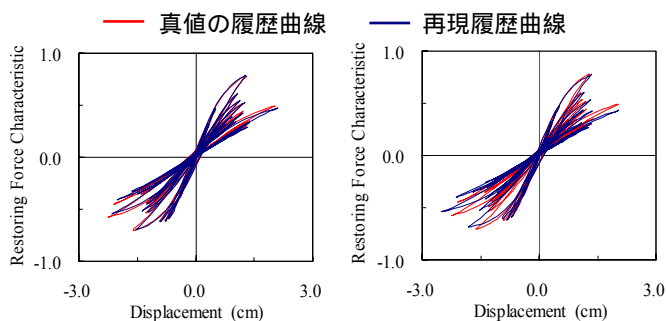


(a) ISFによる計算結果（質点1）



(b) RSによる計算結果（質点1）

図-2 同定の繰り返しに伴うパラメータの経時変化



(a) ISFによる計算結果 (b) RSによる計算結果
図-3 履歴曲線（質点3）