

構造系に作用する外力のカルマンフィルタによる推定

長崎大学大学院 学生会員 ○古賀 進一 長崎大学工学部 フェロー 岡林 隆敏
長崎大学工学部 学生会員 姉川 倫太郎 長崎大学工学部 正会員 奥松 俊博

1. はじめに

道路構造物は、常に走行車両の影響を受け経年劣化が生じる。道路構造物の損傷箇所の発見は主に目視点検で行なわれてきたが、道路構造物の蓄積・増加に伴い、作業コストや効率性の両面から維持管理方法を改善する必要がある。そこで、著者らは、路面凹凸を効率的に計測するために、車両振動よりカルマンフィルタの理論を用いて、路面凹凸を推定する手法を研究している。ここでは、本手法の有効性について報告する。

2. カルマンフィルタによる外力の推定

1) 状態変数の推定

離散系の状態方程式を考える。

$$\mathbf{x}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{w}(k) \quad \mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\mathbf{A}} = e^{\mathbf{A}h}$ 、 $\bar{\mathbf{B}} = (e^{\mathbf{A}h} - \mathbf{I})\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 、 $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}$ である。

$\mathbf{x}$ は構造物の状態量を、 $\mathbf{y}$ は観測量を表す確率変数ベクトルであり、カルマンフィルタのアルゴリズム¹⁾を考えると、次式が与えられる。

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = [\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{K}(k)\bar{\mathbf{C}}] \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)\mathbf{y}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{K}(k) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{R}\mathbf{C}^T \{ \bar{\mathbf{C}}\mathbf{R}(k)\bar{\mathbf{C}}^T + \mathbf{Q}_v \}^{-1} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{R}(k)\bar{\mathbf{A}}^T - \bar{\mathbf{A}}\mathbf{R}\mathbf{C}^T \{ \bar{\mathbf{C}}\mathbf{R}(k)\bar{\mathbf{C}}^T + \mathbf{Q}_v \}^{-1} \bar{\mathbf{C}}\mathbf{R}(k)\bar{\mathbf{A}}^T + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{Q}_w\bar{\mathbf{B}}^T \quad (4)$$

これにより状態変数 $\mathbf{x}(k|k-1)$ が表される。

2) 外力の推定

離散系の状態方程式の両辺に $\bar{\mathbf{B}}^T$ をかけ整理すると次式で表される。次式を用いて外力を推定する。

$$\mathbf{f}(k) = (\bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{B}})^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T (\mathbf{x}(k+1) - \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k)) \quad (5)$$

3. 5自由度系骨組み構造物に作用する外力の推定

1) 外力推定の概要

本研究の手法を検証するため5自由度系構造物に作用する外力を推定する。検証に用いるモデルを図-1に示す。5自由度系モデルの運動方程式は次のように表される。

$$m\ddot{\mathbf{y}}(t) + c\dot{\mathbf{y}}(t) + k\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \\ y_5(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & m_3 & \\ & & & & m_4 \\ & & 0 & & & m_5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \\ f_5(t) \end{bmatrix}$$

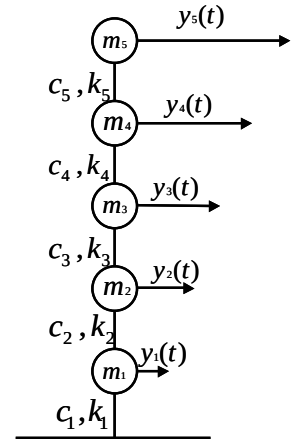


図-1 5自由度系構造物モデル

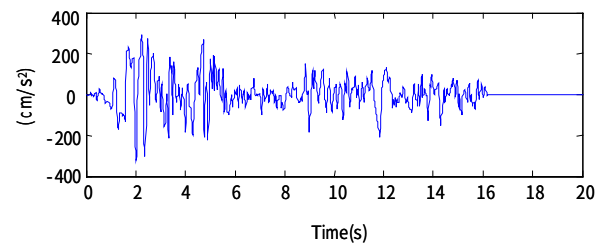


図-2 El Centro 地震波形

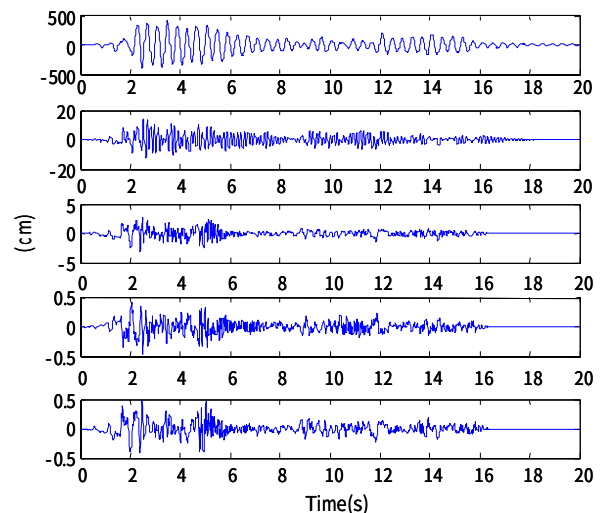


図-3 状態変数推定結果

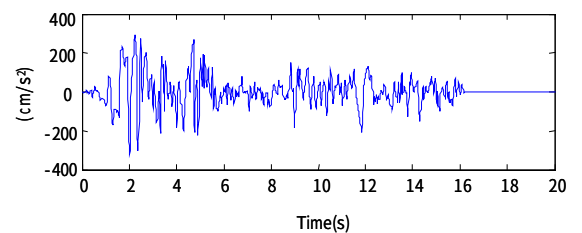


図-4 外力推定結果

$$c = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & \\ & & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 \\ 0 & & & -c_5 & c_5 \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & \\ & & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & & & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}$$

ここでは、5自由度系モデルに図-2に示した El Centro 地震波形を作用させ、その応答から状態変数、外力を推定してその精度を検証する。推定には m_1 、 m_5 点の応答を用いた。

2) 推定結果

式(2)~(4)より図-3の状態変数が推定される。これより、式(5)を用いて図-4の外力が推定される。図-2と図-4を比較してみるとほぼ同じ波形であることが確認できた。

4. 車両振動から路面凹凸の推定

1) 状態推定による路面凹凸の予測

本手法を用いて車両振動から路面凹凸を推定する。対象モデルは図-5に示している、ばね上、ばね下質量を考慮した2自由度系車両モデルである。車両-路面系の運動方程式は次式で表される。

$$m_S \ddot{z}_S + k_S(z_S - z_T) + c_S(\dot{z}_S - \dot{z}_T) = 0 \quad (7)$$

$$m_T \ddot{z}_T + k_S(z_T - z_S) + c_S(\dot{z}_T - \dot{z}_S) + k_T(z_T - r) + c_T(\dot{z}_T - \dot{r}) = 0 \quad (8)$$

$$\dot{r}(t) = -an(t) + n(t) \quad E[n(t_1)n(t_2)] = \sigma^2 \delta(t_1 - t_2) \quad (9)$$

車両に入力する路面凹凸は、路面凹凸のパワースペクトル密度をスペクトルモデル法によってモデル化したものを用いる。合成された路面凹凸モデルを図-6に示す。車両モデルに路面凹凸を作用させたときの応答を用いて推定を行うが、ここでは、①ばね上質量の変位応答のみと、②ばね上質量の変位応答と速度応答を用いた推定を行った。

2) 路面凹凸推定結果

ばね上質量の変位応答のみを用いた路面凹凸推定結果を図-7に示す。推定結果を図-6と比較してみると、概形は似ているが振幅の値が小さくなっている。次に、ばね上質量の変位応答と速度応答を用いた路面凹凸推定結果を図-8に示す。推定結果を図-6と比較してみると、初期においては若干のずれが生じているが、全体的な概形、振幅の一致が見られたことから、本手法の有効性が確認できた。

5. まとめ

本研究をまとめると以下ようになる。

- 1) カルマンフィルターの理論を用い、車両の振動から路面凹凸を推定する手法を開発した。
- 2) 5自由度モデルを用いて本手法の検証を行った。また、車両モデルを用いて路面凹凸の推定を行った。
- 3) 今後の課題として、1つの応答を用いて推定をおこなったときの推定の精度を高める必要がある。

応答から外力を推定する逆解析の問題は、土木構造物設計における種々の分野で必要になっている。本研究は、道路舗装維持管理の視点から、長距離の路面凹凸を効果的に計測する手法の開発を行っているものである。本研究の結果、車両振動より路面凹凸の予測が可能になった。本手法を実際の車両と道路に適用して、本手法の有効性を検証する予定である。

【参考文献】 1) 中野道雄, 西山清: パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善(株), 1993.

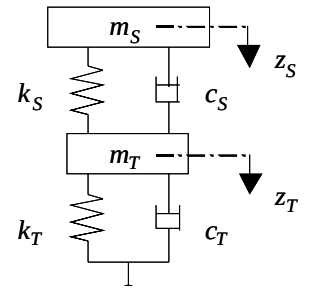


図-5 車両モデル

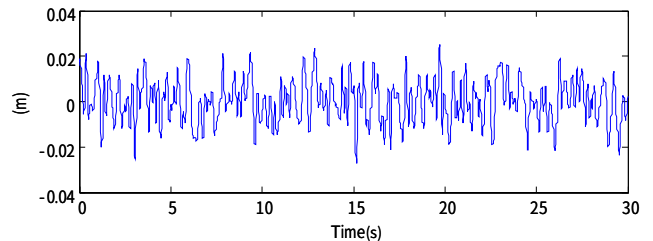


図-6 路面凹凸モデル

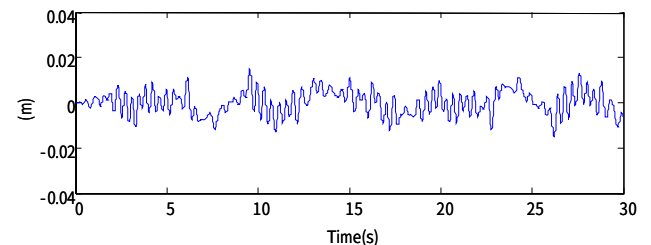


図-7 変位応答を用いた路面凹凸推定結果

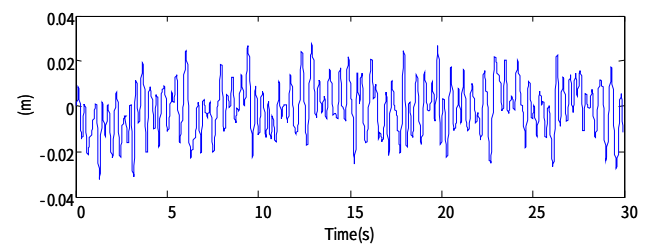


図-8 変位・速度応答を用いた路面凹凸推定結果