

単一走行車両による道路橋振動のカルマンフィルタを用いた状態推定

長崎大学大学院 学生員 〇吉村 徹 長崎大学工学部 正員 岡林隆敏
総合科学大学大学院 学生員 加賀敏明 オイレス工業(株) 正員 下田郁夫

1. はじめに

現在、都市高速道路周辺では、交通荷重により励起された地盤振動が発生し、その振動の制御が重要な課題となっている。このような橋梁の振動制御をアクティブ制御で行う場合、状態フィードバックを実現するためには、制御対象の直接測定可能な出力(応答)から全ての状態変数を推定することが必要になる。路面凹凸により加振された走行車両による道路橋のアクティブ振動制御を考えた場合、橋梁に設置した検出器(加速度計)から橋梁と車両の状態変数を推定して、これを状態フィードバックする必要がある。しかし、車両の状態変数は直接測定することはできない。本論文では、フィルタの出力として、橋梁-車両-路面系にカルマンフィルタ⁽¹⁾⁽²⁾を適用して、橋梁-車両-路面系の状態推定を行い、その有効性を検討したものである。

2. 状態推定について

橋梁に設置した検出器(加速度計)から、橋梁振動の変位と速度を観測量とし、これよりカルマンフィルタを用いて橋梁-車両-路面系の状態変数を推定する。この概要を図-1に示した。ここでは、観測量に雑音が混入するものとして、カルマンフィルタを構成している。

3. 橋梁-車両-路面系の方程式

車両モデルとして図-2の1自由度系と図-3の2軸車両系を考える⁽³⁾。ここでは1自由度系モデルの場合について説明することにする。

橋梁-車両系の方程式は次式で記述できる。

$$y(x,t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (1)$$

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = \frac{P(t)}{M_k} \phi_k(vt) \quad (2)$$

$$P(t) = -m_v \ddot{z}(t) \quad (3)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_0 \omega_0 (\dot{z}(t) - \dot{y}_v(t) - \dot{r}(t)) + \omega_0^2 (z(t) - y_v(t) - r(t)) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\phi_k(x)$: k 次振動モード、 $q_k(t)$: k 次基準座標、 $z(t)$: 車両の変位、 $P(t)$: 車両の接地力、 M_k : 橋梁の k 次の有効質量、 $\omega_k, \omega_0, h_k, h_0$: それぞれ k 次の橋梁と車両の固有振動数および減衰定数、 $y_v(t)$: 車両直下の橋梁の変位、 $r(t)$: 路面凹凸、 v は車両の走行速度である。路面凹凸は、図-4のパワースペクトル密度に基づいて、強度 σ^2 を有する白色雑音 $n(t)$ を入力とする路面系でモデル化する。

$$\dot{r}(t) + \beta r(t) = n(t) \quad (5)$$

ここで、 $\beta = 2\pi v a$, $\sigma^2 = 4\pi v A$, $a = 0.05$, $A = 1.0 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{m})$ である。

橋梁の1次振動のみを考慮すると、(1)(2)(3)(4)(5)式は状態変数 $X(t)$ を用いて(7)(8)式のように状態空間表示できる。

$$X(t) = [q_1(t) \dot{q}_1(t) z(t) \dot{z}(t) r(t)]^T \quad (6)$$

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)n(t) \quad (7)$$

$$Y(t) = C X(t) + V(t) \quad (8)$$

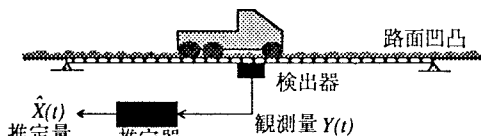


図-1 カルマンフィルタによる状態推定

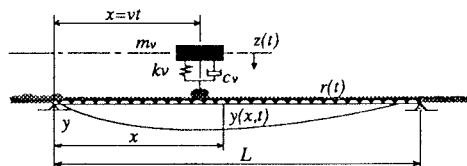


図-2 橋梁-車両(1自由度)-路面系

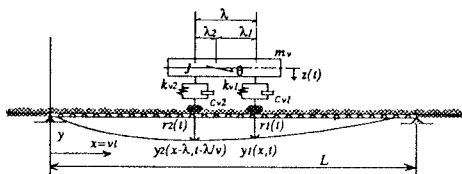


図-3 橋梁-車両(2自由度)-路面系

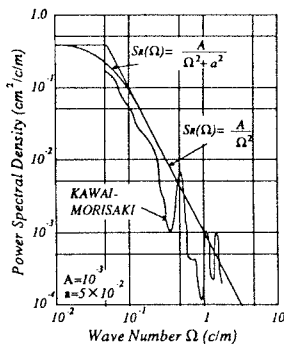


図-4 路面凹凸のパワースペクトル密度

このとき、 $V(t)$ は観測雑音を想定した白色雑音過程を表す行列で、その強度を Σ_V とする。また、 C は観測行列であり、 $Y(t)$ は観測量を表す。

4. カルマンフィルタについて

支間中点の変位および速度の状態変数を観測量として、(9)式のカルマンフィルタを用いて橋梁-車両-路面系の状態変数を推定する。ここに、 $\hat{X}(t)$ は推定状態変数で、フィードバックゲイン $G_k(t)$ は、(11)式のリカッチ方程式の正定解 $R(t)$ から求まる。

$$\dot{\hat{X}}(t) = (A(t) - G_k(t)C)\hat{X}(t) + G_k(t)Y(t) \quad (9)$$

$$G_k(t) = P(t)C^T \Sigma_V^{-1} \quad (10)$$

$$\dot{R}(t) = A(t)R(t) + R(t)A(t)^T - R(t)C^T \Sigma_V^{-1} C R(t) + B(t)\sigma^2 B(t)^T \quad (11)$$

なお、

$$E[V(t_1)V(t_2)^T] = \Sigma_V \delta(t_1 - t_2) \quad (12)$$

である。

5. 数値解析と考察

シミュレーションは、図-2のモデルを想定し、車両が走行する際の路面凹凸により加振された橋梁-車両系の応答を考える。カルマンフィルタを用いるために、検出器(加速度計)で測定した状態量にはノイズが混在するとみなす。カルマンフィルタを用いて、スパン中央の変位と速度の状態量からノイズを除去し、橋梁と車両と路面凹凸の全ての状態変数を推定する。本論文では、ノイズの割合による、カルマンフィルタによる推定の精度を検討した。

図-5は、シミュレーション結果で、 $q_1(t)$ 、 $\dot{q}_1(t)$ 、 $z(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ は橋梁-車両系の変位および速度であり、 $r(t)$ は観測された路面凹凸である。図-6、図-7、図-8はノイズをそれぞれ20%、10%、5%とした場合の橋梁-車両-路面系の推定状態変数である。

推定した橋梁の変位、速度、車両の速度は大きなノイズの場合にも、それぞれシミュレーションの状態量とはほぼ一致した。車両の変位はノイズに関わりなく正確な状態量を推定していない。しかし、固有振動数(3Hz)に近い変動となっている。路面凹凸の推定量はノイズが小さくなるほど振幅レベルは上がったが、シミュレーションとは全く一致しなかった。従って、測定値にノイズが混在すると考えてカルマンフィルタを構成すると、車両の変位および路面凹凸の推定が精度良く求められなかった。

6. まとめ

走行車両による橋梁振動における状態推定にカルマンフィルタを適用した。観測雑音が存在するとしたカルマンフィルタでは、推定できる変数と十分推定できない変数があった。この結果を踏まえて、さらに問題点を解決したい。なお、2軸車両系モデルでの推定結果は、講演時に報告する。

- [参考文献] (1)制震構造-理論と実際-,小堀,鹿島出版会,1993年.(2)入門現代制御理論,啓学出版,1987年.
(3)橋梁振動の計測と解析,技報堂出版,1993年.

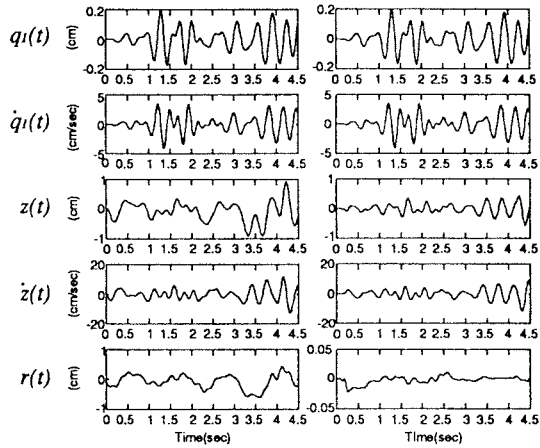


図-5 橋梁-車両-路面系

図-6 ノイズ20%

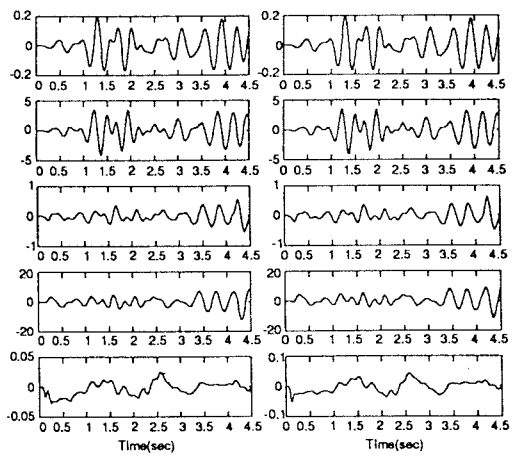


図-7 ノイズ10%

図-8 ノイズ5%