

走行車両による単純桁橋振動のカルマンフィルタによる状態推定

STATE ESTIMATION OF SINGLE SPAN BRIDGE VIBRATION UNDER A MOVING VEHICLE BY THE KALMAN FILTER

岡林隆敏* 吉村 徹** 加賀敏明***

Takatoshi OKABAYASHI*, Toru YOSHIMURA** and Toshiaki KAGA***

* 工博 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852 長崎市文教町1番14号)

** 長崎大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒852 長崎市文教町1番14号)

*** 長崎大学大学院 海洋生産科学研究科海洋生産開発学専攻 (〒852 長崎市文教町1番14号)

This study concerned with state estimation of bridge vibration under a moving vehicle using by the Kalman filter. The bridge is controlled by hybrid control. The first three modes of vibration are considered. The dynamic damper and the vehicle is modeled as one degree of freedom system. The road surface irregularities are modeled as output of filter system subjected to the white noise. The state variables of the bridge, up to 3th order vibration, the dynamic damper, the vehicle and road surface irregularities can be estimated from a observation point of the bridge by the Kalman filter. The effects and accuracy of the estimation procedure are discussed by the numerical simulation.

Key Words: bridge vibration, active control, state estimation, kalman filter

1. はじめに

近年, 都市高速道路高架橋における交通荷重によって発生する環境振動が, 深刻な問題⁽¹⁾となっている。振動発生 の 主 要 な メカニズムは, 次のように考えられる。路面凹凸や継手部段差などの路面不整により, 車両振動が励起され, このとき発生する車両の接地力が橋梁を加振する。これらの振動が, 橋脚から地盤を伝搬し, 建物などの共振により振動障害の原因となっている。このような振動障害の対策の一つとして, 直接, 橋梁の桁振動の制振を行う振動制御の技術に関する適用の検討が行われている。

振動制御の技術には, 構造物の減衰を高めるもの⁽²⁾, 動吸振器によるパッシブな振動制御⁽³⁾⁽⁴⁾, アクティブ振動制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾およびハイブリッド型振動制御⁽⁷⁾⁽⁸⁾がある。アクティブ振動制御あるいはハイブリッド型振動制御を行う場合, 通常は, フィードバック制御が行われる。フィードバックゲインは, 最適レギュレータ理論⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾により求められる。最適レギュレータ理論では, 状態フィードバックが制御則になる。しかし, 交通荷重による道路橋振動においては, 橋梁と車両が連成振動を行っており, 状態フィードバックを実現するためには, 現実的な制御では, 橋梁に設置した検出器(加速度計)の信号から, 車両の状態量を推定する必要がある。構造物の状態量が推定できない場合, 観測値から状態量を推定す

る機構が, オブザーバー⁽¹²⁾あるいはカルマンフィルタ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾である。構造物に作用する外力のパワースペクトル密度が推定できている場合, 外力は, 白色雑音が作用するフィルタの出力でモデル化できる。このような系に対してカルマンフィルタ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾が適用できる。そこで, 本論文では, 橋梁-車両系の全状態フィードバック制御を実現するために必要な推定機構として, カルマンフィルタによる橋梁-車両系の状態推定の定式化とその有効性を検討したものである。本研究では, 動吸振器を設置した橋梁において, 動吸振器に制御力を加えるハイブリッド型振動制御を対象にした。

白色雑音過程を入力とする路面系で路面凹凸をモデル化すると, 橋梁-車両-動吸振器-路面系は, 白色雑音を入力とする確率微分方程式で記述できる。このような系に対してカルマンフィルタが適用可能である。また, カルマンフィルタの定式化において, 観測値に付加される観測雑音⁽¹⁴⁾が必要になる。道路橋振動の場合, 実際には観測雑音は存在しないと考えられるが, 仮想的に観測雑音を考慮して定式化を行った。また, カルマンフィルタの計算では, 初期条件が必要になる。しかし, 車両の初期条件を求めることができないので, 初期条件が求められたと仮定した場合と, これを無視した場合の状態推定を行った。本論文では, 橋梁に取り付けた検出器(加速度計)から, 橋梁の1点の変位, 速度を観測した場合,

橋梁の各次振動の状態変数、動吸振器の状態変数、車両の状態変数および路面凹凸をカルマンフィルタにより推定し、カルマンフィルタの有効性を検討したものである。

2. 橋梁-車両-動吸振器-路面系の方程式と状態方程式

(1) 橋梁の方程式

図-1に示すような、動吸振器を設置したハイブリッド制御を行う橋梁に対して、1自由度のバネ質点系でモデル化された単一車両が、一定速度 v で走行する場合を考える。 x 点における橋梁の変位応答を、 k 次の振動モード $\phi_k(x)$ と基準座標 $q_k(t)$ により、次式で定義する。

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

ここで、基準座標 $q_k(t)$ は、次の方程式で記述される。

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = \frac{1}{m_k} p_v(t) \phi_k(vt) + \frac{1}{m_k} p_d(t) \phi_k(a) \quad (2)$$

ここで、 h_k ： k 次の減衰定数、 ω_k ： k 次の固有円振動数、 m_k ： k 次の有効質量である。 $p_v(t)$ は橋梁に作用する車両の接地力、 $p_d(t)$ は動吸振器による制御力であり、

$$p_v(t) = -m_0 \ddot{z}(t), \quad p_d(t) = -m_d \ddot{d}(t) \quad (3)$$

となる。 m_0 は車両の質量、 m_d は動吸振器の質量である。

(2)式と(3)式より、橋梁の基準座標の方程式は、次のように表せる。

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\mu_{kv} \phi_k(vt) \ddot{z}(t) - \mu_{kd} \phi_k(a) \ddot{d}(t) \quad (4)$$

ここで、 μ_{kv} ：橋梁の k 次の有効質量と車両の質量比、 μ_{kd} ：橋梁の k 次の有効質量と動吸振器の質量比。

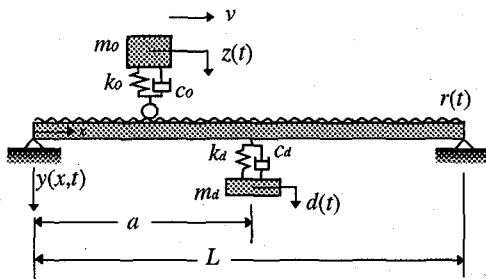


図-1 橋梁-車両-動吸振器-路面系

(2) 車両の方程式

車両の垂直変位を $z(t)$ とすると、橋梁の $x=vt$ 上を走行する車両の方程式は、車両直下の橋梁の変位 $y(vt,t)$ と路面凹凸 $r(t)$ を用いて、次のように表される。

$$\ddot{z}(t) + 2h_0 \omega_0 (\dot{z}(t) - \dot{y}(vt,t) - \dot{r}(t)) + \omega_0^2 (z(t) - y(vt,t) - r(t)) = 0 \quad (5)$$

ここで、 h_0 と ω_0 は、それぞれ車両の減衰定数と固有円振動数である。

(3) 動吸振器の方程式

橋梁の $x=a$ 点に動吸振器を設置した場合、動吸振器の

垂直変位を $d(t)$ とすると、動吸振器の方程式は、次のようになる。

$$\ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d (\dot{d}(t) - \dot{y}(a,t)) + \omega_d^2 (d(t) - y(a,t)) = 0 \quad (6)$$

ここで、 h_d と ω_d は、それぞれ動吸振器の減衰定数と固有円振動数である。

(4) 状態方程式による表現

橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態変数ベクトルを、次のように定義する。

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{q}(t)^T \quad \dot{\mathbf{q}}(t)^T \quad d(t) \quad \dot{d}(t) \quad z(t) \quad \dot{z}(t)]^T \quad (7)$$

ここに、

$$\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \cdots q_n(t)]^T$$

である。

この状態変数 $\mathbf{x}(t)$ を用いると、橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態方程式は、路面凹凸を外力と考えて、次のように表せる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_1(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1(t) \mathbf{r}(t) \quad (8)$$

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$$

なお、路面凹凸の変数は、

$$\mathbf{r}(t) = [r(t) \quad \dot{r}(t)]^T \quad (9)$$

である。ここで、 $\mathbf{A}_1(t)$ ：システムマトリックス、 $\mathbf{B}_1(t)$ ：外力係数マトリックスである。

3. 路面凹凸のモデル化と確率微分方程式による表現

(1) 路面凹凸のモデル化

橋梁、車両、動吸振器、路面凹凸の状態推定にカルマンフィルタを適用する場合、橋梁-車両-動吸振器-路面系の方程式を、白色雑音を入力とする確率微分方程式で表す必要がある。そのため、路面凹凸を、図-2のようなパワースペクトル密度を有する正規確率過程でモデル化する。

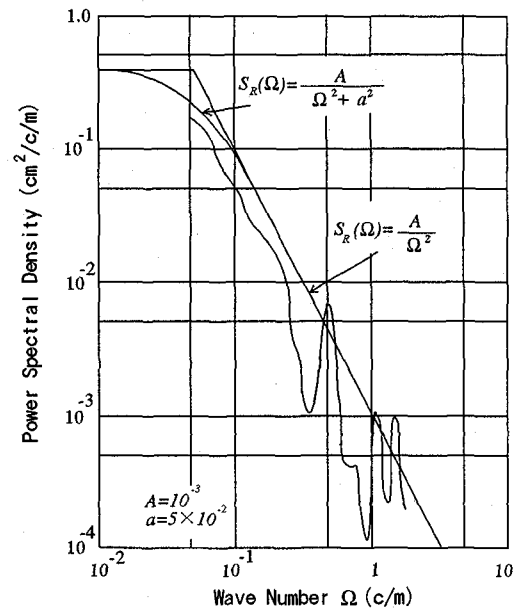


図-2 パワースペクトル密度

$x=vt$ で変換した、時間に対する路面凹凸のパワースペクトル密度は、次式で与えられる。

$$S_r(\omega) = \frac{S_0}{\omega^2 + \beta^2} \quad (10)$$

ここで、 $S_0 = 2\pi v A$ 、 $\beta = 2\pi v a$ 、 $A = 1.0 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{m})$ 、 $a = 0.05$ である。これらの変数は、図-2 のパワースペクトル密度についてモデル化したものである。このパワースペクトル密度を有する定常過程は、強度 σ^2 を有する白色雑音 $n(t)$ を入力とする路面系の定常応答として表現できる。

$$\dot{r}(t) + \beta r(t) = n(t) \quad (11)$$

ここで、白色雑音過程の特性は、平均値 0 で、自己相関関数は、

$$E[n(t_1)n(t_2)] = \sigma^2 \delta(t_1 - t_2) \quad (12)$$

である。なお、 $E[\cdot]$ は数学的的平均値を表し、 $\sigma^2 = 2\pi S_0$ である。

(2) 確率微分方程式

路面凹凸 $r(t)$ を組み込んだ状態変数ベクトルを、改めて次のように定義する。

$$X(t) = [q(t)^T \dot{q}(t)^T d(t)^T z(t)^T r(t)^T]^T \quad (13)$$

この状態変数ベクトルを用いると、橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態方程式は、次式の確率微分方程式で表現できる。

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A(t)X(t) + B(t)n(t) \\ X(t_0) &= X_0 \end{aligned} \quad (14)$$

初期条件 X_0 は、橋梁に進入する直前の車両と路面凹凸で構成されており、これは、確率変数である。

橋梁の任意の点の変位と速度を求める場合、観測方程式は、一般に、次のようになる。

$$Y_1(t) = C X(t) \quad (15)$$

ここで、 $A(t)$ ：システムマトリックス、 $B(t)$ ：外力係数マトリックス、 C ：観測マトリックスである。

4. 最適レギュレータによる状態フィードバック制御

図-3 のように橋梁の振動をハイブリッド制御する場合、 $x=a$ 点に設置した動吸振器にアクティブな制御力 $u(t)$ を加える必要がある。この場合、橋梁の運動方程式は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) \\ = -\mu_{kv} \phi_k(vt) \ddot{z}(t) - \mu_{kd} \phi_k(a) \ddot{d}(t) \\ - u(t) \phi_k(a) / m_k \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $u(t)$ はアクティブ振動制御のための制御力である。

(7) 式の状態変数ベクトルを用いると、(5)(6)(16) 式は、次のような状態方程式になる。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1(t)x(t) + B_1(t)r(t) + D u(t) \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned} \quad (17)$$

この系を制御するための最適な制御力 $u(t)$ は、 $x(t)$ と $u(t)$ が確率変数になるために、次の二次形式評価関数を最小にするものとして選ばれる。

$$J = E \left[\int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \right] \quad (18)$$

ここに、 Q と R は、重み行列で、それぞれ非負定値と正定値で構成された正方対称行列である。この評価関数を最小にする最適制御入力 $u(t)$ は、確定論によるレギュレータ理論⁽¹³⁾を目的に、次式のように得られる。

$$u(t) = -K(t)x(t) \quad (19)$$

この最適フィードバックゲイン $K(t)$ は、

$$K(t) = R^{-1} D^T P(t) \quad (20)$$

で与えられる。この $P(t)$ は、次式のリカッチ型方程式より求められる。

$$\begin{aligned} A_1(t)^T P(t) + P(t) A_1(t) \\ - P(t) D R^{-1} D^T P(t) + Q = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

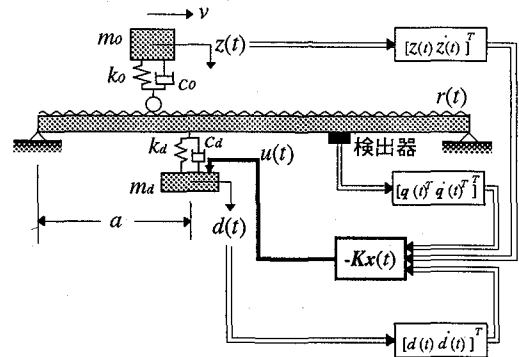


図-3 最適レギュレータによる状態フィードバック

最適制御入力 $u(t)$ は、 $x(t)$ の要素である各状態変数すなわち、橋梁、車両および動吸振器の状態量が、全て得られれば、求めることができる。しかし特に、車両の状態変数は、直接測定することはできない。そこで、状態フィードバックによる制御を実現するためには、車両の状態変数を含めた $x(t)$ の全ての状態変数を推定する必要がある。これらの全状態変数を、カルマンフィルタにより推定する。

5. カルマンフィルタによる状態推定

動吸振器を設置した道路橋のアクティブ振動制御を考える場合、橋梁に設置した検出器（加速度計）から直接検出することができない橋梁と車両と動吸振器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。本論文では、路面凹凸をモデル化することにより、橋梁-車両-動吸振器-路面系の方程式は、伊藤型の確率微分方程式⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾になり、この方程式よりカルマンフィルタを構成することができる。橋梁に設置した1点の検出器（加速度計）から得られる橋梁振動の変位と速度を観測量とし、カルマンフィルタを用いて、3次振動までの橋梁の状態変数、車両および動吸振器の状態変数、および路面凹凸の推定を行う。カルマンフィルタによる状態推定の概要を、図-4 に示した。

(14) 式のシステムに対して、カルマンフィルタによる推定機構⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾は、次のようになる。

$$\begin{aligned}\hat{\dot{X}}(t) &= \{A(t) - G_k(t)C\} \hat{X}(t) + G_k(t)Y(t) \\ \hat{X}(t_0) &= x_0\end{aligned}\quad (22)$$

$\hat{X}(t)$ は推定状態変数ベクトル、 $Y(t)$ は観測量である。橋梁振動は、3次振動まで考慮しているので、

$$Y_I(t) = \begin{bmatrix} \phi(a) & 0 \\ 0 & \phi(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

である。なお、 $\phi(a)$ は振動モードから構成できるベクトルであり、

$$\phi(a) = [\phi_1(a) \ \phi_2(a) \ \phi_3(a)]^T \quad (24)$$

である。また $G_k(t)$ は、後に求めるカルマンフィルタの最適ゲインマトリックスである。

カルマンフィルタ機構を構成するためには、観測量に付加する雑音 v が必要である。そこで、(23)式に仮想的な雑音 $v(t)$ を付加させて、観測量 $Y(t)$ を次のようにする。

$$\begin{aligned}Y(t) &= Y_I(t) + v(t) \\ &= CX(t) + v(t)\end{aligned}\quad (25)$$

ここで、 $v(t)$ は、観測雑音を想定した白色雑音ベクトルで、確率特性は、平均値0で、自己相関関数は、次のようになる。

$$E[v(t_1)v(t_2)^T] = \Sigma_v \delta(t_1 - t_2) \quad (26)$$

ここに、 Σ_v は観測雑音の強度である。

カルマンフィルタ理論より、最適ゲインマトリックス $G_k(t)$ は、次式で与えられる。

$$G_k(t) = S(t)C^T \Sigma_v^{-1} \quad (27)$$

ここで、 $S(t)$ は、次式のリカッチ方程式の解である。

$$\begin{aligned}\dot{S}(t) &= A(t)S(t) + S(t)A(t)^T \\ &\quad - S(t)C^T \Sigma_v^{-1} C S(t) + B(t)\sigma^2 B(t)^T \\ S(t_0) &= S_0\end{aligned}\quad (28)$$

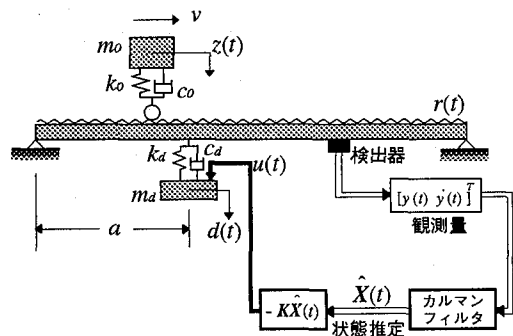


図-4 カルマンフィルタによる状態推定

6. 数値計算と考察

(1) 橋梁、動吸振器、車両の諸元と計算のための仮定
本論文では、橋梁の振動を、3次振動まで考慮した。

表-1に、橋梁の諸元および振動特性を示す。動吸振器と車両は、それぞれ、1自由度のバネ質点系でモデル化した。橋梁に設置する動吸振器は1個とし、動吸振器と橋梁の質量比は、動吸振器の設計において実用的な値と考えられる1/50に設定した。表-2は、その場合の動吸振器の最適パラメータである。橋梁上を走行する車両は、単一車両とし、その諸元及び振動特性を表-3に示す。橋梁のモデル化と車両のモデル化を考えた場合、車両については高次振動を考慮したモデル化をする必要がある。しかし、本研究では、確率論的制御理論の適用可能性を検証することが目的であるので、車両のモデル化については比較的簡単な1自由度系で解析を行っている。

実際の問題において、橋梁の任意の点の変位と速度から、橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態変数を、カルマンフィルタを用いて推定する場合、初期条件の影響を考慮しておく必要がある。本論文では、車両が橋梁の40(m)手前から進入し、橋梁直前の値を初期条件とした。車両の初期条件を考慮した場合と、車両の初期条件を0とした場合について、それぞれカルマンフィルタによる状態推定を行ない、数値シミュレーションと比較する。

応答計算では、車両は一定の速度 $v=10(\text{m/sec})$ で橋梁を走行する場合を考えた。着目点は車両走行上の支間中点とし、観測値に含まれる雑音の割合は、最大応答に対して、標準偏差で5%であるものとした。雑音の強度(分散)は、 $\Sigma_v = 6.45 \times 10^{-4}$ である。(8)式より求め

表-1 橋梁の諸元

支間長 (m)	40.0
総重量 (ton)	106.8
曲げ剛性 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	24.41×10^8
減衰定数	0.02 (1次~3次)
固有振動数 (Hz)	$2.94 \times k^2$ (k :1次~3次)

表-2 動吸振器(TMD)の最適パラメータ

質量比	1/50
振動数 (Hz)	2.83
減衰定数	0.12

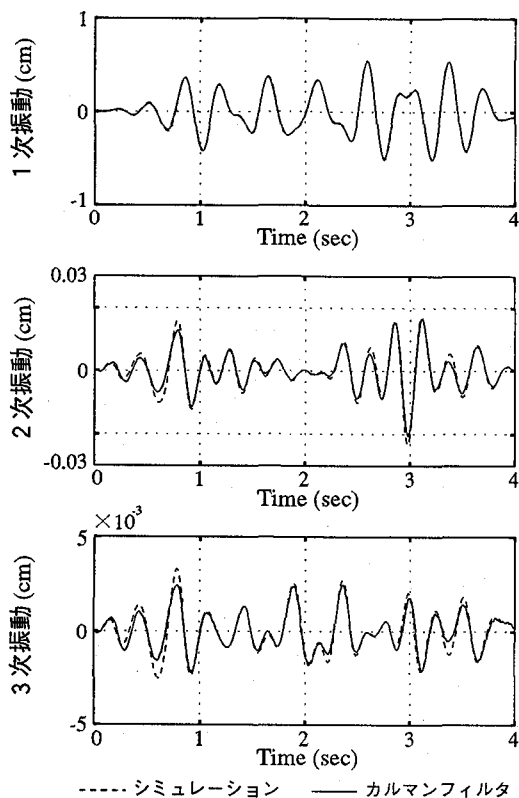
表-3 車両の諸元

重量 (ton)	20
振動数 (Hz)	3.0
減衰定数	0.03

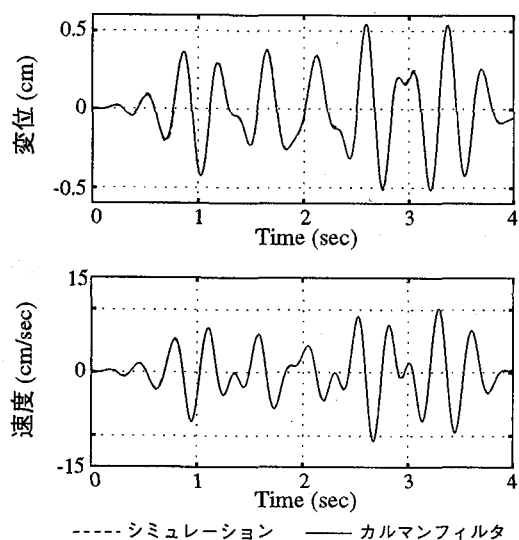
た橋梁の応答に雑音を付加した観測量 $Y(t)$ を、(22)式における入力値とした。カルマンフィルタでは、橋梁の1点($x=L/2$)に設置した検出器で、橋梁振動の変位と速度を観測し、橋梁の3次振動までの状態変数、動吸振器、車両、および路面凹凸の各変数を推定するものとする。

(2) 車両の初期条件を考慮した計算

1) 橋梁の各次振動および橋梁系の状態推定



図—5 カルマンフィルタによる
橋梁の各次振動の状態推定



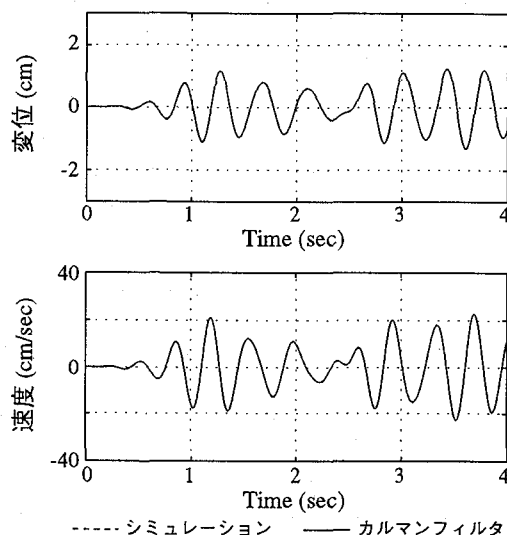
図—6 カルマンフィルタによる
橋梁系の状態推定

車両が橋梁に進入する以前では、橋梁は振動していないものとした。そのため、橋梁の各次振動および橋梁系の初期条件は0である。車両の初期条件は、橋梁の40(m)手前から走行し、橋梁に進入する直前の値を用いた。

図-5に、橋梁の各次振動の状態推定を示した。また、図-6に、橋梁の観測点の応答の推定値を示した。図において、点線がシミュレーションによる応答であり、実線がカルマンフィルタによる推定値である。計算結果は、以下同じ表現をするものとする。図-5によれば、各次振動ともシミュレーションによる応答値とカルマンフィルタによる推定値の波形には、ほとんど差は認められない。両者の波形はほとんど一致しており、カルマンフィルタによる良好な推定が実現している。図-6においても、橋梁の変位応答と速度応答のそれぞれの推定値は、シミュレーションの応答波形とほぼ一致しており、良好な状態量推定を行っていることが分かる。

2) 動吸振器の状態推定

車両が橋梁に進入するまで、橋梁に設置した動吸振器も振動しない。そこで、動吸振器の初期条件は0とした。図-7は、動吸振器の状態推定の結果を示したものである。動吸振器の変位と速度のそれぞれの推定値は、シミュレーションの波形とほぼ一致しており、カルマンフィルタによる状態推定が実現できている。



図—7 カルマンフィルタによる
ダンパー系の状態推定

3) 車両の状態推定

図-8は、車両の状態推定を示したものである。初期条件を考慮したので、車両系の応答は車両が橋梁に載った時点($t=0$)ですでに振動している。車両の変位を見ると、シミュレーションと推定のレベルに差が見られる。しかし、車両の振動数は、3.0(Hz)に近い変動となっており、推定値はシミュレーションに追従している。他方、車両の速度では、シミュレーションと推定値の波形は、かなり近い値をとっている。速度応答でも、変位応答の時と

同様に振動数は、3.0(Hz)に近い変動となっている。変位応答に比べると比較的良好な状態量の推定が実現しているが、厳密な推定とはなっていない。

4)路面凹凸の状態推定

路面凹凸は、橋梁に進入する以前において、車両-路面系の方程式で表される。ここでは、車両の初期条件を考慮したので、路面凹凸の初期条件も考慮した。図-9は、路面凹凸の状態推定を示したものである。0.5秒～3.5秒の間では、カルマンフィルタによる推定値の波形は、シミュレーション波形に似た変動の波形になっている。しかし、振幅レベルが大きく違っている。このようにカルマンフィルタの適用からは、路面凹凸まで推定することはできないことが確認できた。本論文の定式化は、観測雑音が存在しないカルマンフィルタの無雑音問題を、仮

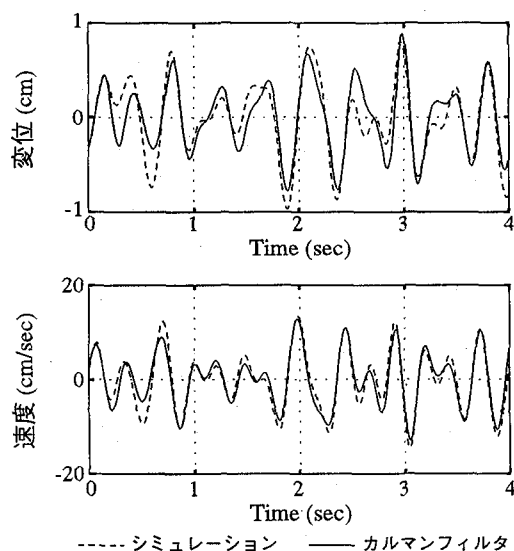


図-8 カルマンフィルタによる車両系の状態推定

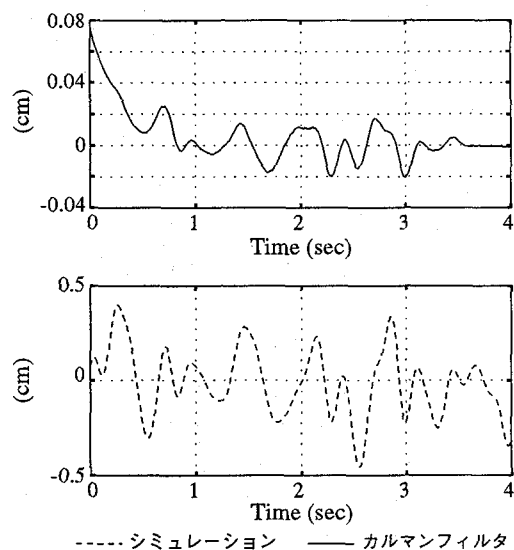


図-9 カルマンフィルタによる路面凹凸の状態推定

想的な雑音を付加することにより、通常のカルマンフィルタの問題にしている。仮想的な観測雑音のレベルを変化させると、路面凹凸の推定結果が変化する。このようなカルマンフィルタのモデル化の影響が現れているものと考えられる。

(3) 車両の初期条件を無視した計算

1)橋梁の各次振動および橋梁系の状態推定

車両が橋梁に進入するまで、橋梁は振動しないため、

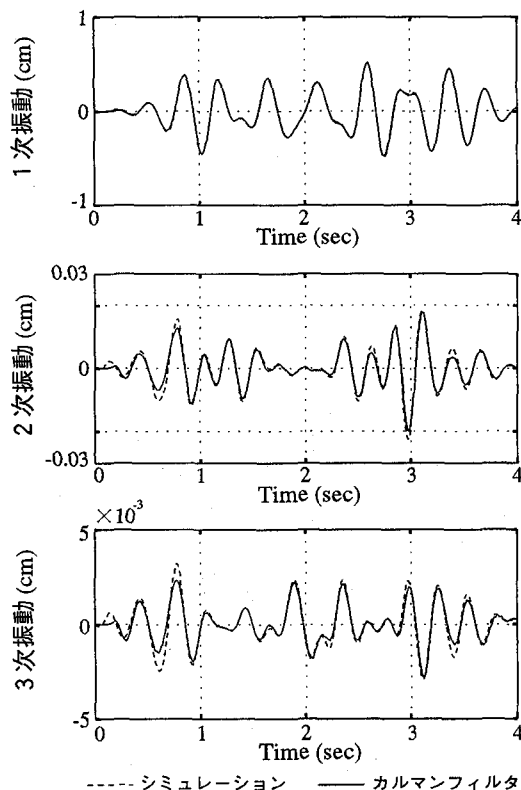


図-10 カルマンフィルタによる橋梁の各次振動の状態推定

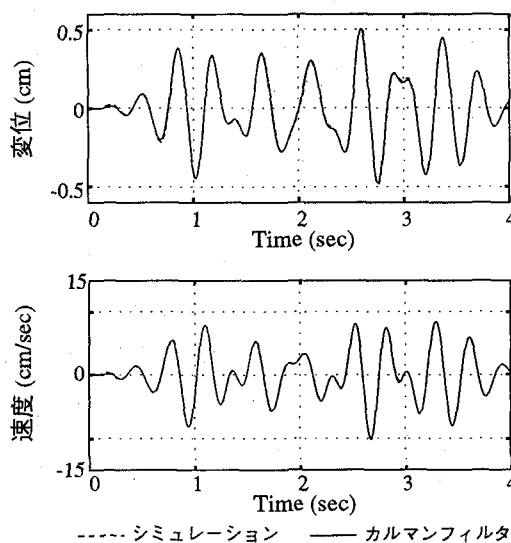


図-11 カルマンフィルタによる橋梁系の状態推定

橋梁の各次振動および橋梁系の初期条件は0である。図-10は、橋梁の各次振動の状態推定を示したものである。また、図-11に、橋梁の着目点($x=L/2$)の変位と速度を示した。点線は(2)と同じシミュレーションであり、実線が車両の初期条件を0としたカルマンフィルタの推定値である。橋梁の推定においては、車両の初期条件の影響は少なく、各次振動についても、カルマンフィルタにより、良好な推定が実現できている。その結果、着目点における応答についても、良好な推定ができています。

2) 動吸振器の状態推定

車両が橋梁に進入するまで、動吸振器は振動しないため、動吸振器の初期条件は0である。図-12は、動吸振器系の状態推定を示したものである。車両の初期条件を考

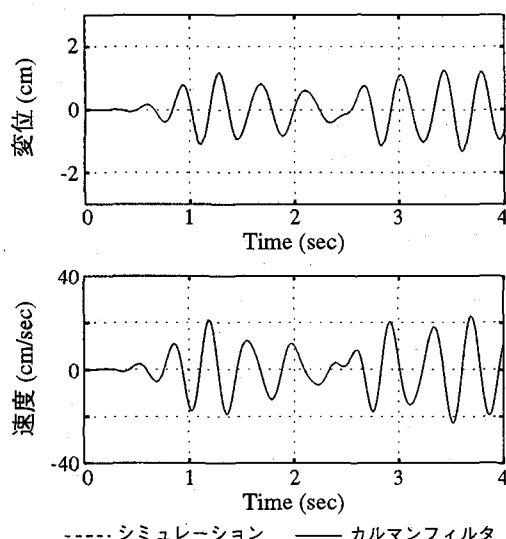


図-12 カルマンフィルタによるダンパー系の状態推定

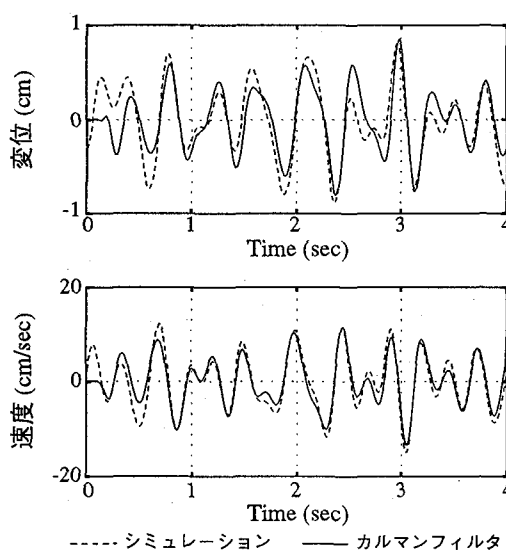


図-13 カルマンフィルタによる車両系の状態推定

慮した場合の、動吸振器系の状態推定と同様に、シミュレーション波形とカルマンフィルタによる推定値の波形は、ほぼ一致しており、良い推定結果が得られた。

3) 車両の状態推定

図-13は、車両系の状態推定を示したものである。カルマンフィルタの推定では、初期条件は0としているので、変位と速度は、初動においては、良い推定となっていない。それ以後については、変位応答も速度応答も初期条件を考慮したシミュレーションと良く一致している。車両の変位応答では、状態変数はほぼ推定できている。速度応答でも、正確な推定値とは言えないが、変位応答に比べると比較的良い推定ができています。

4) 路面凹凸の状態推定

図-14は、路面凹凸の状態推定を示したものである。すでに考察したように、路面凹凸の推定はできていない。この方法で、路面凹凸まで推定するのは困難であると思われる。

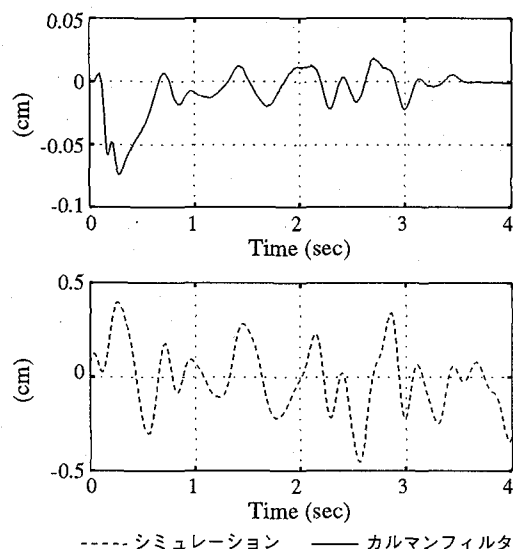


図-14 カルマンフィルタによる路面凹凸の状態推定

7. まとめ

本論文は、動吸振器を設置した橋梁において、動吸振器に制御力を加えるハイブリッド型振動制御を対象にした。走行車両による道路橋の振動制御をアクティブ制御で行う場合に必要な量となる状態量の推定を、カルマンフィルタを用いて行い、その有効性を検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 路面凹凸を、白色雑音過程を入力するフィルターの出力でモデル化し、橋梁-車両-動吸振器-路面系の方程式を確率微分方程式で表現し、系の状態推定を行うためのカルマンフィルタの定式化を行った。

(2) 橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態推定にカルマンフィルタを適用した場合、橋梁の各次振動および橋梁系の状態変数は、車両の初期条件を考慮した場合でも、車両の初期条件を0とした場合でも良好な推定結果が得ら

れた。

(3) 動吸振器系の状態推定は、橋梁の各次振動および橋梁系の状態推定と同じように、車両の初期条件を考慮した場合でも、車両の初期条件を0とした場合でも良好な推定結果が得られた。

(4) 車両の状態推定では、変位応答は、初期条件を考慮した場合でも、初期条件を0とした場合でも、近似的な推定はされている。また、速度応答は、橋梁や動吸振器の場合ほど正確な推定はできていないが、比較的良好な推定が可能であることが確認できた。

(5) この定式化による方法では、路面凹凸の推定までは困難である。この理由は、仮想的に観測雑音を考慮したカルマンフィルタ理論を適用したためである。

交通振動による道路橋の振動制御を、状態フィードバックにより実現するためには、車両の状態変数のような観測できない変数を推定する必要がある。このような推定機構にカルマンフィルタが有効であることが確認できた。さらに、状態量を全て検出しなくても、少ない観測点から、状態推定を行うことが可能であることも明らかになった。

参考文献

- 1) 梶川康男・大嶋信太郎：周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法，土木学会論文報告集，第341号pp.79～88，1984.4.
- 2) 藤野陽三・比江島慎二：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減，土木学会論文集，第465号。-23, pp.107-116, 1993.4.
- 3) 梶川康男・沖野真，他：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果，構造工学論文集，Vol.35A，pp.747～748, 1989.3.
- 4) 岡林隆敏・竹下渡：走行車両による道路橋振動制御のための動吸振器の最適設計，土木学会振動制御コロキウム講演論文集，PART.B，pp.97～104, 1991.7.
- 5) 矢作枢・吉田和彦：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文報告集，第356号-3，pp.435-444，1985.4.
- 6) M.Abdel-Roman and H.H.E.Leipholtz：Active Control of Flexible Structures, ASCE, J. of the Structural Division, Vol.104, No. ST8, pp.1251～1266, 1978.7.
- 7) 藤野陽三・ビノドK.バルティア・笠原覚：高架橋の交通振動に対するアクティブ制御，構造工学論文集，Vol.41A，pp.677-681，1995.3.
- 8) 川谷充郎，山田靖則，他：桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験，構造工学論文集，Vol.41A, pp.683-690, 1995.3.
- 9) D.G.Schultz and J.L.Melsa (久村富持訳)：状態変数と線形制御系，学献社，1971.5.
- 10) 小郷，美多：システム制御理論入門，実教出版1986.
- 11) 白石昌武：入門現代制御理論，啓学出版，1987.11.
- 12) 岩井善太，井上昭，川路茂保：オブザーバー，コロナ社，1988.10.
- 13) 榎木義一，添田喬，中溝高好：確率システム制御の基礎，日新出版，1975.5.
- 14) 有本卓：カルマン・フィルター，産業図書，1977.1.
- 15) 砂原善文：確率システム理論通信学会，1979.3.

(1995年9月18日受付)