

システム同定理論による動特性推定と適応型動吸振器の開発

長崎大学大学院 学生員○高木真一郎

長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏

長崎大学大学院 学生員 加賀 敏明

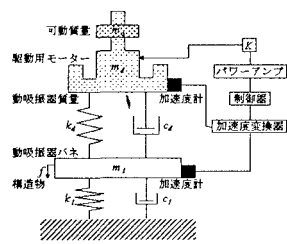
オイレス工業(株) 正 員 下田 郁夫

1. はじめに

道路橋の交通振動問題において、動吸振器を用いるパッシブ制御が検討されてきた。この動吸振器の設計法には、橋梁の振動特性を定常的に扱った理論が適用されている。しかし、道路橋交通振動では、車両台数、走行速度などの走行状態の不確定な要因により、橋梁の見かけ上の固有振動数が時間的に変化することが考えられる。前報¹⁾では、動吸振器にアクティブ制御による制御力を加え、これにより動吸振器の固有振動数、減衰定数を変化させる適応型動吸振器を提案した。本研究では、橋梁系振動に対し、構造物のパラメータが変動した場合に、拡張カルマンフィルタを適用することにより構造物の構造同定を行い、この結果に基づいて適応型動吸振器を調整する機構を考えた。ここでは、橋梁を1自由度系構造物の簡易モデルと考え、数値シミュレーションにより振動制御の有効性を検討する。

2. 適応型動吸振器

適応型動吸振器を1自由度系構造物に適用した場合の構造図を図-1に示す。構造物と動吸振器質量に加速度計を付け、加速度変換器、制御器、パワーアンプによりゲインKを乗じた信号を駆動用モーターに送り、質量体を可動させる。ゲインKを調整することにより、可動質量が発生する制御力で、構造物のパラメータ変動に対し、動吸振器のパラメータも変化させることが可能になる。制御対象とする構造物は重量 $m_1=100(\text{tonf})$ 、固有振動数 $f_1=3(\text{Hz})$ 、減衰定数 $h_1=0.02$ である。可動質量が動かない場合は一般型動吸振器とし、総重量 $10(\text{tonf})$ 、最適設計より固有振動数 $f_d=2.72(\text{Hz})$ 、減衰定数 $h_d=0.18$ となる。この中で可動質量は重量 $m_d=3(\text{tonf})$ であり、この質量を駆動させることにより、 $3(\text{Hz})$ を中心に、振動数と減衰定数を自由に変更することができる。



3. 構造物振動に対する適用

図-1のように構造物 m_1 に外力 f が作用した場合、地盤に対する構造物 m_1 の変位、および構造物 m_1 に対する動吸振器 m_d の変位の差をとり、それぞれの相対変位を y_1 、 y_d と定義する。この場合の構造物および適応型動吸振器の方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{y}_1 + 2h_1\omega_1\dot{y}_1 - \left(2h_d\omega_d\mu + \frac{k_b}{m_1}\right)\dot{y}_d + \omega_1^2 y_1 - \left(\omega_d^2\mu + \frac{k_a}{m_1}\right)y_d = \frac{f}{m_1} \quad (1)$$

$$\ddot{y}_d - 2h_1\omega_1\dot{y}_1 + \left\{2h_d\omega_d(\mu+1) + \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_d}\right)k_b\right\}\dot{y}_d - \omega_1^2 y_1 + \left\{\omega_d^2(\mu+1) + \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_d}\right)k_a\right\}y_d = -\frac{f}{m_1} \quad (2)$$

ここで、 ω_1 、 h_1 ：構造物の固有円振動数および減衰定数、 μ ：構造物に対する可動質量を含む動吸振器の質量比、 ω_d 、 h_d ：動吸振器の固有円振動数および減衰定数、 k_a 、 k_b ：動吸振器の変位および速度に対するフィードバックゲインである。同調後の適応型動吸振器のパラメータが古典的設計法における最適値となるように k_a 、 k_b を決定する。

4. 拡張カルマンフィルタでの構造同定

パラメータ変動後における構造物の構造同定にオンライン推定が可能な拡張カルマンフィルタを適用する。上記の(1)、(2)式を考えると拡張カルマンフィルタの式は次式のようになる²⁾。

$$\hat{X}(k+1|k) = \hat{X}(k|k) + \int_k^{k+1} f(\hat{X}(k|k), k) dt \quad (3)$$

$$P(k+1|k) = \Phi[k+1, k; \hat{X}(k|k)] P(k|k) \Phi^T[k+1, k; \hat{X}(k|k)] \quad (4)$$

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K[k+1; \hat{X}(k+1|k)] \times [y_{k+1} - h(\hat{X}(k+1|k), k+1)] \quad (5)$$

$$P(k+1|k+1) = \left[I - K \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} M \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix}^T \right] \times P(k+1|k) \left[I - K \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} M \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix}^T \right]^T + K \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} R(k+1) K^T \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$K \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} = P(k+1|k) M^T \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} \left[M \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} \times P(k+1|k) M^T \begin{Bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{Bmatrix} + R(k+1) \right]^{-1} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{X}(k|k)$ ： Y_k が与えられたときの k 時間における状態推定ベクトル、 $P(k|k)$ ： $\hat{X}(k|k)$ と目標値 $X(k)$ との差の推定誤差共分散行列、 $\hat{X}(k+1|k)$ ： Y_k が与えられたときの $k+1$ 時間における状態推定ベクトル、 $P(k+1|k)$ ： $\hat{X}(k+1|k)$ と目標値 $X(k+1)$ との差の推定誤差共分散行列、 $K \begin{bmatrix} k+1; \hat{X}(k+1|k) \end{bmatrix}$ ： $k+1$ 時間でのカルマンゲイン行列、 Y_k ： $\{y_1 \dots y_k\}$ 、 I ：単位行列である。

5. 数値シミュレーション

構造物に白色雑音が作用した場合、固有振動数 $f_1=3(\text{Hz})$ 、減衰定数 $h_1=0.02$ の構造物が $f_1=4(\text{Hz})$ と $h_1=0.04$ に変動したとする。変動前の構造物に最適調整された一般型動吸振器を用いた場合の構造物の変位応答を図-2の(a)に、変動後の構造物に変動前に最適調整されていた一般型動吸振器を用いた場合の構造物の変位応答を(b)に示す。これを見ると、構造物の固有振動数の変動により、制御効果が悪くなっている。また、構造物の変動後のパラメータが既知として、適応型動吸振器を古典的設計法より求めたパラメータになるようにチューニングした場合の構造物の変位応答とチューニングに要する制御力を図-3に示す。チューニングを行った適応型動吸振器の制御効果は見られるが、このチューニングは手動で行わなければならない、現実的ではない。そこで、適応型動吸振器に拡張カルマンフィルタを用いて変動後の構造物の構造同定を行い、推定結果から古典的設計法での設計パラメータにチューニングを行った。図-4の(a)に固有振動数の推定、(b)に構造物の変位応答、(c)にチューニングに要する制御力を示す。これより、図-2の(b)の一般型動吸振器と比べ、適応型動吸振器を用いた方がより有効な制御となっている。また、図-3と図-4の構造物の変位応答の波形はほぼ一致しており、拡張カルマンフィルタによって、高い精度での推定が実現できている事が確認できる。

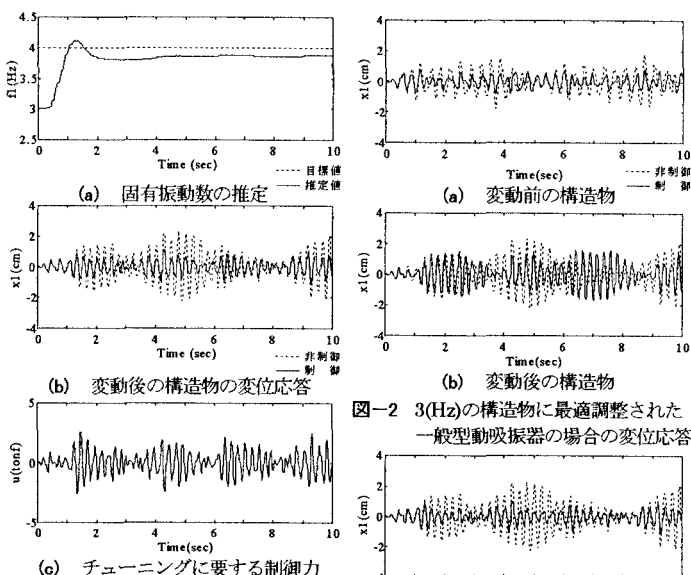


図-2 3(Hz)の構造物に最適調整された一般型動吸振器の場合の変位応答

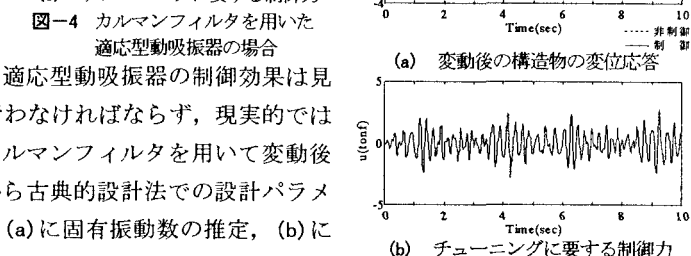


図-3 構造物のパラメータが既知とした時の適応型動吸振器の場合

6. まとめ

数値シミュレーションの結果、拡張カルマンフィルタによる構造物の構造同定を行って適応型動吸振器を設計した場合の1自由度系構造物に対する振動制御の有効性が確認できた。しかし、構造物にもう一段階の変動が生じた場合、拡張カルマンフィルタによる推定に時間がかかり、構造物のパラメータ変動に追従できていない。今後は、この問題を解決することが課題である。

〔参考文献〕1)加賀敏明・岡林隆敏・下田郁夫：振動性状適応型動吸振器の開発，平成8年度土木学会西部支部講演概要集，pp84～85,1997.3 2)星谷勝・斉藤悦郎：拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用，土木学会論文報告集，第339号，pp.59～67,1983.11.