

# 適応同定と $H_\infty$ 制御を併用した構造物のアクティブ制振制御

学籍番号 80021315 今井 博俊

指導教員 佐野 昭

## 1 研究の背景と目的

建築構造物の最上階にアクティブ動吸振器を設置し、これをアクチュエータとして駆動することにより地震や外乱に対する振動を抑制する試みがすでに実用化されている [1]. これらに利用されている有効な制御則に、 $H_\infty$  制御があるが、制御器の設計時において、モデル化に誤差を生じたり、また、材質の劣化等により制振モード自身の変動するような場合があるため、保守的に設計せざるを得ない. 一方で、このようなフィードバック制御だけでは地震入力に対する動吸振器の揺れが大きくなり、ストッパーが作動し、大きな地面の揺れに対してそれほど有効に働かないことも報告されている. そこで、保守的な設計をカバーし、また動吸振器の変位がなるべく小さくなるような適応フィードフォワード制御器を設計し、数値計算により検討する. 尚、使用する適応アルゴリズムは、従来では制御入力から 4 階の加速度までの伝達関数を既知と仮定していたが、全ての経路の不確かさに対処したアルゴリズムである. また、観測器を併合した状態フィードバック制御器を設計し、実験によりその効果を検討する.

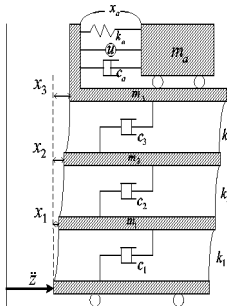


図 1: PHADVA を有する 3 自由度構造物の力学モデル

## 2 振動制御システム

本研究では、並列型ハイブリッドアクティブ動吸振器 (PHSDVA) を動吸振器モデルとして用いる. 図 2 にロバストフィードバック制御器  $H(z)$  と適応フィードフォワード制御器  $\hat{C}(z, k)$ ,  $\hat{K}(z, k)$ ,  $\hat{D}(z, k)$  から構成される 2 自由度振動制御システムを示す. 構造物の地面または離れた地点に設置された加速度センサーにより得られた地震波信号  $r(k)$  を用いて動吸振器に利用することにより将来構造物に入力する地震波信号の影響をキャンセルすることが期待されるが、伝搬路や構造物の不確かさに対処するためには適応フィードフォワードは必要不可欠となる.

## 3 $LQ$ コントローラ制御の構成

4 階建ての構造物及び 2 次の動吸振器を含むフルオーダーモデルは状態を  $x^T = [x_a \ \dot{x}_a \ x_i \ \dot{x}_i]$  にとると、

$$\dot{x} = Ax + Bv + D\ddot{z} \quad (1)$$

と表せる. 各状態  $x_i$  は各階の変位と速度からなる. ここで、出力は各フロアの加速度であり、全ての状態は観測できない. そこで、観測器を用い状態フィードバック制御を行う. 尚、コントローラは 2 次形式の評価関数の最適制御問題を解くことにより求める.

## 4 ロバストフィードバック制御の構成

上記したモデルを 1 次モードまで低次元化したモデルを制御対象の公称モデルとする. 一方、加速度センサを 4 階に設置し、この観測値が利用できるものとする.  $H_\infty$  制御設計に関しては詳細は省略するが、低次元モードに関しては外乱抑制の仕様により、また高次元モードに関してはロバスト安定性の仕様により設計する.

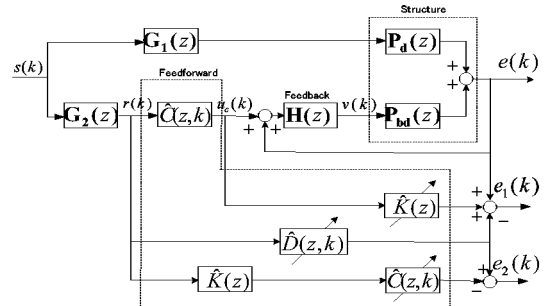


図 2: アクティブ制振システムのブロック線図

## 5 適応フィードフォワード制御の構成

図 2 をもとに、 $e(k)$ ,  $e_1(k)$ ,  $e_2(k)$  を計算すると以下のようになる.

$$\begin{aligned} e(k) &= W(z)(\bar{G}_1(z) + \hat{C}(z, k))r(k) \\ e_1(k) &= e(k) + \hat{K}(z, k)\hat{C}(z, k)r(k) - \hat{D}(z, k)r(k) \\ e_2(k) &= \hat{D}(z, k)r(k) - \hat{C}(z, k)\hat{K}(z, k)r(k) \end{aligned}$$

ただし、

$$W(z) = \frac{P_{bd}(z)H(z)}{1 - P_{bd}(z)H(z)}, \bar{G}_1(z) = \frac{P_d(z)G_1(z)}{P_{bd}(z)H(z)G_2(z)}$$

このアルゴリズムは  $k \rightarrow \infty$  で  $e_1(k), e_2(k) \rightarrow \infty$  になるように適応コントローラ  $\hat{C}(z, k)$ ,  $\hat{K}(z, k)$ ,  $\hat{D}(z, k)$  を調整し、各適応コントローラが定置に収束してくれさえすれば、 $k \rightarrow \infty$  で  $e(k) \rightarrow \infty$  がいえる. なぜならば、

$$\begin{aligned} e_1(k) + e_2(k) &= e(k) + \hat{K}(z, k)\hat{C}(z, k)r(k) \\ &\quad - \hat{C}(z, k)\hat{K}(z, k)r(k) \end{aligned} \quad (3)$$

を考え、 $k \rightarrow \infty$  で  $e_1(k), e_2(k) \rightarrow 0$  になり  $\hat{C}(z, k), \hat{K}(z, k)$  が定置に収束すると仮定すると、右辺第二項及び第三項は相殺されるので  $e_1(k) + e_2(k) = e(k)$  となり、 $e(k) \rightarrow 0$  がいえるのである。適応コントローラ、記号を以下のように定義する。

$$\hat{C}(z, k) = c_1(k)z^{-1} + c_2(k)z^{-2} + \dots + c_{L_C}(k)z^{-L_C} \quad (4)$$

$$\hat{K}(z, k) = k_1(k)z^{-1} + k_2(k)z^{-2} + \dots + c_{L_K}(k)z^{-L_K} \quad (5)$$

$$\hat{D}(z, k) = d_1(k)z^{-1} + d_2(k)z^{-2} + \dots + d_{L_D}(k)z^{-L_D} \quad (6)$$

また、パラメータ係数ベクトル、回帰ベクトルを  $\hat{\theta}_C(k), \hat{\theta}_K(k), \hat{\theta}_D(k), \phi(k), \zeta(k), \xi(k)$  と定義し、 $e_1(k), e_2(k)$  を上記を用いて以下のように変形する。

$$e_1(k) = [\theta_{D*} - \hat{\theta}_D(k)]^T \xi(k) + [\hat{\theta}_K(k) + \theta_{K*}]^T \zeta(k) \quad (7)$$

$$e_2(k) = [\theta_{C*} - \hat{\theta}_C(k)]^T \phi(k) \quad (8)$$

$\theta_{C*}$  は、 $\hat{C}(z, k)\hat{K}(z, k)^{-1}$  を FIR 型で近似した係数ベクトルである。 $\hat{D}(z, k), \hat{K}(z, k)$  は時変なので  $\theta_{C*}$  も時変となるが、時不変であるものとみなす。また、 $\hat{\theta}_C(k)$  は  $\zeta(k)$  に、 $\theta_K(k)$  は  $\phi(k)$  に関係するが、そのことを考慮せず、 $\zeta(k), \phi(k)$  は各々適応パラメータに関係のない信号とみなして拡張誤差を用いる適応アルゴリズムと同様な方法で調整則を導く。

#### 調整則

$$\hat{\theta}_D(k+1) = \hat{\theta}_D(k) + \gamma_D \xi(k) \epsilon_{DK}(k) \quad (9)$$

$$\hat{\theta}_K(k+1) = \hat{\theta}_K(k) + \gamma_K \zeta(k) \epsilon_{DK}(k) \quad (10)$$

$$\hat{\theta}_C(k+1) = \hat{\theta}_C(k) + \gamma_C \phi(k) \epsilon_C(k) \quad (11)$$

$$\epsilon_{DK}(k) = \frac{e_1(k)}{1 + \gamma_D \xi^T(k) \xi(k) + \gamma_K \zeta^T(k) \zeta(k)} \quad (12)$$

$$\epsilon_C(k) = \frac{e_2(k)}{1 + \gamma_C \phi^T(k) \phi(k)} \quad (13)$$

## 6 数値計算による検討

制御対象は、実験用に作製した 4 階建ての構造物に対して数値計算を行った。この構造物全体の重量は 2.31kg あり、動吸振器は、リニアモータを使用し、可動質量の合計は約 0.135kg であり、その質量比は 4% である。センサは、4 階に設置され加速度が測定可能である。出力フィードバック制御は、フルオーダー 8 次のモデルから 4 次まで低次元化し、1 次モードまで制振する仕様のもとで  $H_\infty$  制御器  $H(z)$  を求める。サンプリング周期を 10ms、適応フィードフォワード制御器の次数を 250 次とした。以上の設定の実験器を同定し、同定モデルに対して入力地震波として八戸地震、エル・セントロ波、ノースリッジ地震、神戸地震をこの順で加え、数値計算を行った。

適応フィードフォワードコントローラはコントローラのパラメータを絶えず更新することにより誤差信号を収束させていく。図 3 により、適応フィードフォワード制御を併用した右列図の場合の方は、 $H_\infty$  制御のみの左列図より、地震を重ねるごとに制振効果が高くなっているこ

とがわかる。

図 4 から、構造物からセンサまでの距離、構造物の 4 階の最大加速度と動吸振器の最大変位とに関係があることがわかり、構造物の制振効果が最も高く、また動吸振器の最大変位が最も小さい地点が存在し、地震波が構造物に伝わるのに 1.5 秒を要するところ、つまり約 1.8km の地点に設置すればよいことがわかる。

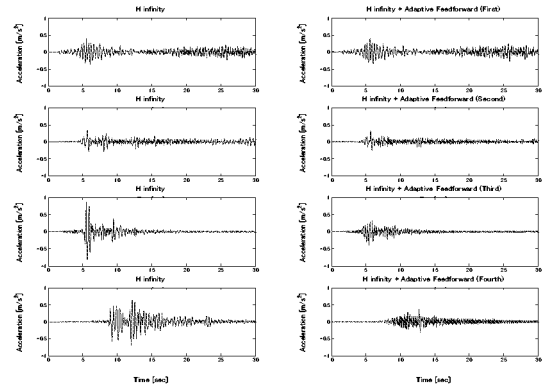


図 3: 構造物加速度の時間応答 (左列: $H_\infty$  制御のみ 右列: 適応フィードフォワードを併用)

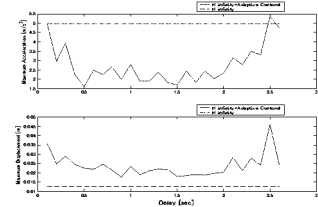


図 4: 地動センサーから構造物までの距離と 4 階の加速度、動吸振器の変位の関係

## 7 実験による検討

観測器を併合した状態フィードバック制御により構造物の制振制御を行った結果を図 5 に示す。この図から制振が達成されていることがわかる。地震波が加わってすぐの応答は制御前よりも大きくなっており、フィードバック制御の特徴をよく表した結果となっている。

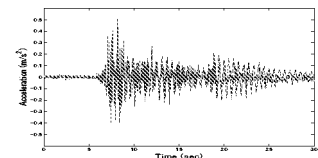


図 5: LQ 制御結果

## 8 結論

本研究で使用した適応フィードフォワード制御の併用は、適切な位置にセンサを設置することにより、動吸振器の最大変位をそれほど増加させることなく、4 階の最大加速度を大幅に低減できることを明らかにした。また、実験により観測器を併合した状態フィードバック制御を用いて構造物が制振されることを確かめた。

## 9 参考文献

[1]B.F.Spencer Jr and M.K. Sain, "Controlling buildings", IEEE Control Systems, 17-6, 19/35, 1997.