

フィルタ包含最適制御を用いたHMDによる風応答制御

筑波大学 学生会員 坂口 剛
筑波大学 正会員 西岡 隆

1. はじめに

最近では、マンション等の高層化に伴い風による振動が問題となり、暴風時の居住性等を改善するために、制振装置を設置することも珍しくない。ハイブリット動吸振器（以下、HMD）はアクティブ制振装置の一つであり、小さな質量で振動を抑制できる。最適制御理論を用いて速度・変位フィードバックを構成すると、HMDは構造物の変位を主にフィードバックすることが必要となる。したがって、低周波数成分を多く含む風力が作用したとき、制御力は多くの低周波数成分を要し、ストロークも増大する¹⁾²⁾。本研究では、制御系のロバスト安定性向上と制御力の低周波数成分の除去、HMDのストロークの増大防止のために背戸により提案されたフィルタ包含最適制御³⁾を用いた。本論では、制御力の低周波数成分の除去について検討した。

2. フィルタ包含最適制御

制御系設計の際、制御対象の低次元モデル化の必要が生じる。その際に、無視した高次モードの影響を断ち切り、制御系のロバスト性を高めるためにフィルタ包含最適制御が提案されている。これは、ローパスフィルタを含めた状態方程式から最適制御理論を用いて制御則を導き、状態フィードバックを構成するため、フィルタが含まれることによってシステムが不安定になることはない。(1) 式の状態方程式で表現されるシステムを考える。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dp(t) \quad (1)$$

A : システム行列, B : 入力行列, D : 外力行列, x : 状態ベクトル, u : 制御力ベクトル, p : 外力ベクトル

制御力 u にフィルタをかけることにすると、フィルタの状態方程式と出力方程式は、(2) 式で表現できる。

$$\dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t), \quad u(t) = C_f x_f(t) + D_f u_f(t) \quad (2)$$

ここに、 u_f はフィルタをかける前の制御力を表す。(1),(2) 式より、拡張系の状態ベクトルを $x_e = \{x^T \ x_f^T\}^T$ とすると、フィルタを含めた状態方程式は (3) 式で表現できる。(3) 式の条件の下で2次形式の評価関数 (4) 式を最小化する制御則 (5) 式を導出する。

$$\dot{x}_e(t) = \begin{bmatrix} A & BC_f \\ O & A_f \end{bmatrix} x_e(t) + \begin{bmatrix} BD_f \\ B_f \end{bmatrix} u_f(t) + \begin{bmatrix} D \\ O \end{bmatrix} p(t) \quad (3)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty \{x_e^T(t) W_x x_e(t) + u_f^T(t) W_u u_f(t)\} \quad (4)$$

$$u(t) = -G_b x(t) \quad (5)$$

3. 解析モデル

図1に示す1自由度系の建物にHMDを設置した2自由度系を解析モデルとする。図中の ω_s, ω_d はそれぞれ建物とHMDの固有角振動数を表す。また、HMD制御系に組み込むフィルタは建物の共振点を含む通過帯域 $[\omega_L, \omega_H]$ を持つ1次、2次のバターワース帯域通過フィルタ⁴⁾とし、制御力の共振点まわりの成分のみを抽出し、作用させる。重み係数マトリクス W_x, W_u は、対角マトリクスとし、制御力 u と建物変位 q_s のみに重み係数を与えて制御則を導き、速度・変位フィードバックを構成する。フィルタを含む場合の有効性を示すために、フィルタなしの場合と比較し、制御効率について検討する。

Key Words: 最適制御, 風応答制御, HMD(ハイブリット動吸振器)

〒305-0006 つくば市 天王台 1-1-1 筑波大学 機能工学系

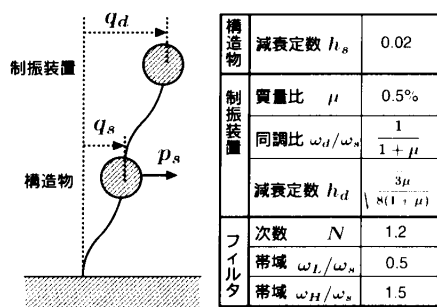


図-1 解析モデル

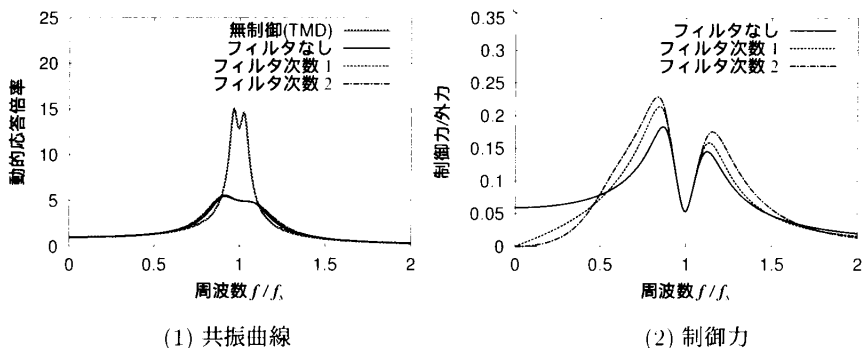


図-2 周波数応答

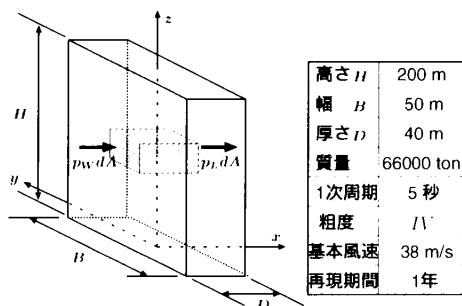


図-3 想定建物モデル

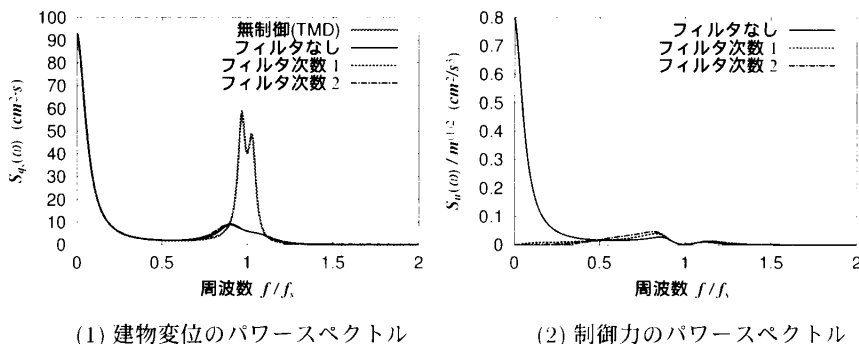


図-4 風応答時スペクトル解析

4. 解析結果

制御効率は、同等の制振効果を実現するために要する制御力やストロークを比較することにより評価できる。まず、解析モデルの周波数応答を図2に示す。左図(1)は建物変位、右図(2)は制御力の周波数応答である。共に横軸の周波数は建物の固有振動数 f_s で基準化してある。制御効率を比較するために、図(1)のように両者のHMD制御系は同等の制振効果をもつよう重み係数を調節してある。要する制御力は、フィルタを含ませることにより、フィルタの遮断帯域成分を省くことができるが、共振点周りで増加している。

図4に風応答スペクトル解析結果を示す。風力は空間的に作用する外力なので、建物規模を設定し、建築物荷重指針・同解説⁵⁾に従って風力を定めた。ここでは、図3のような片持ち梁形式の建物を想定し、風方向振動のみを考えている。解析モデルは、質量、剛性として建物の1次のモード質量、モード剛性を与えた2自由度系モデルとし、一般化変動風力を作用させる。ただし、図4(2)中の $m^{(1)}$ は1次モード質量を表している。フィルタを含ませることにより、同等な制振効果を小さな制御力で実現できている。また、制御力の高周波数成分も除去しているため、モデル化の際に無視することになる高次モードに作用する制御力も小さくなり、スビルオーバを防止できると考えられる。

5. おわりに

HMD制御系にフィルタ包含最適制御を用いてバターース帯域通過フィルタを含ませることにより、制御系の安定性が保証されたまま効率良く風応答を抑制できた。

参考文献

- 金子美香ほか：ハイブリット型性振装置に関する研究(その2) TMDのアクティブ化に関する検討。日本建築学会大会学術講演梗概集 構造I.1990年10月
- 田村利夫ほか：能動型同調質量ダンパーを設置した高層建物の強風に対する制振特性評価。日本建築学会構造系論文集 第465号.1994年11月
- 背戸・登、松本幸人：パソコンで解く振動の制御。丸善.1999
- 小畑 秀文、幹 康：CAI デジタル信号処理。コロナ社.1991
- 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説。日本建築学会.1993