カルマンフィルタを用いた油圧式制振装置の研究*

羽生田 信良*¹, 佐藤 浩介*², 上妻 文英*²

Application of Kalman Filter to Hydraulic Active Mass Damper

Nobuyoshi HANIUDA, Kosuke SATO, Fumihide KOZUMA

We report a hydraulic active mass damper (AMD) system based on the optimal control theory, combined with a Kalman filter. The study was carried out to try to improve the conventional optimal control AMD system by (1) reduction of detected signals required, (2) spillover prevention and (3) reduction of the low frequency mass movement due to wind load. A design method using a Kalman filter was developed for the system. Simulations and experiments showed the advantages of the combined system. The effects of the Kalman filter design parameters and structure model errors on the performance characteristics were investigated and system design guide lines were established.

Key Words: Optimal Control, Vibration Control, Hydraulic Actuator, Active Mass Damper, Observer, Kalman Filter

1. 緒 言

地震や風による高層ビルの振動を低減するための一つの方法として、ビルに設置した可動マスを用いてビルの振動エネルギーを吸収する制振装置が研究されている。著者らは最適制御理論に基づくアクティブマダンバ油圧式制振装置(以下 AMD)について研究してきた^{(1)~(3)}。しかし、最適制御の適用に当たり、コントローラの実装を容易にするために非線形要素を線形近似し、可能な限り低次元化したシステムモデルを用いて制御系の設計を行う。このためスビルオーバー現象を生じるという問題があり、これに対しては極配置修正により問題を回避してきたが⁽⁴⁾、まだ十分とはいえない。また、建物に作用する風外力には低周波成分が含まれており、これに感応して可動マスがゆっくりと大ストロークで動くために制振動作に使えるマスストローク範囲が狭くなるという問題も明らかになってきた。さらに、状態変数として選定した建物の変位と速度、可動マスのストロークと速度の各状態量の検出が

必要であり、特に建物変位の正確な検出が難しいという問題があった。本研究では最適制御にカルマンフィルタを併用する方法でこれらの問題の改善を試み、解析と実験によりその有効性を検討する。また、同一の制御対象に H_∞ 制御コントローラを設計し、コントローラの次数についても両者を比較する。

2. 記 号

A : シリンダ受圧面積 mm^2
 C_A : 可動マスの粘性減衰係数 Ns/mm
 C_s : 建物の粘性減衰係数 Ns/mm
 Cs : 建物の減衰行列 Ns/mm
 d_A : マスストロークの検出ノイズ mm
 d_s : 建物速度の検出ノイズ mm/s
 f : 状態フィードバックベクトル
 F : 外力 N
 F_A : 建物に作用する外乱力 N
 F_s : 可動マスに作用する外乱力 N
 F : 建物に作用する外力ベクトル N
 i : サーボ弁指令電流 mA
 i_0 : 線形化時のサーボ弁平衡点電流 mA
 I_R : サーボ弁定格電流 mA
 K_A : 可動マスのばね定数 N/mm

* 原稿受付 1995年12月18日。

*¹ 正員、カヤバ工業(株)基盤技術研究所(〒228 相模原市麻溝台1-12-1)。*² カヤバ工業(株)基盤技術研究所。

- K_E : 油の体積弾性係数 Pa
 K_S : 建物のばね定数 N/mm
 K_S : 建物の剛性行列 N/mm
 M_A : 可動マスの質量 kg
 M_S : 建物の等価質量 kg
 M_S : 建物の質量行列 kg
 p_1, p_2 : シリンダポート圧力 Pa
 p_R : サーボ弁の定格負荷圧力 Pa
 p_S : 供給圧力 Pa
 p_r : タンクへの戻り圧力 Pa
 q_1 : 建物変位への重み係数 $1/\text{mm}^2$
 q_2 : 可動マス変位への重み係数 $1/\text{mm}^2$
 q_3 : 建物速度への重み係数 s^2/mm^2
 $Q_1 \sim Q_5$: 流量 mm^3/s
 Q_R : サーボ弁の定格流量 mm^3/s
 r : サーボ弁電流への重み係数 $1/\text{mA}^2$
 R_1, R_2 : 流路の絞り係数 mm^3/sPa
 U_C : シリンダ推力 N
 U : 建物に作用する制振力 N
 V_1, V_2 : シリンダの等価体積 mm^3
 $\mathbf{x}$: 状態変数ベクトル
 x_A : 可動マスの絶対変位 mm
 x_S : 建物最上階の絶対変位 mm
 $x_{S1} \sim x_{S3}$: 建物各層の絶対変位 mm
 $\mathbf{x}_S$: 建物の変位ベクトル mm
 y : マスストローク $(x_A - x_S)$ mm
 $\mathbf{y}$: 出力変数ベクトル
 z : 地盤(建物地上階)変位 mm
 $\mathbf{A}, [\]$: 行列を表す
 $\mathbf{b}, \{ \}$: ベクトルを表す

3. カルマンフィルタを併用した最適制御系

制御則として最適制御を用い、これにカルマンフィルタを併用して検出信号のフィルタリングと状態推定を実現する。このための基礎式を導出し、具体的なAMDシステムにこれを適用し、その有効性を解析により確認する。また、この系のパラメータ変化による制御特性への影響を調べ、設計上の目安を示す。

3.1 最適制御式AMDの問題点と対策

一般的に、最適制御系には次のような長所がある。

- ・設計の自由度が少ないため、設計方法が簡単
- ・ノミナルモデルに対しては大きな安定余裕がある
- ・定数フィードバックのため、実装が容易

その一方で、最適制御のAMDには改善が望まれる問題点として次の4点が挙げられる。

Fig. 1 System Model

- ・低次線形近似モデルに基づいて制御系が設計されるため、スピルオーバー現象が心配される
- ・低周波励振力に感応してマスが動くため、制振動作に使えるマスストローク範囲が狭くなる
- ・全状態変数の情報が必要である
- ・建物変位の正確な検出が難しい(特に低周波域)

これらの問題点を解決するためには、低周波域と高周波域で制御ゲインを小さくし、さらに一部の状態量を状態推定から得ることが有効である。これを実現するには、カルマンフィルタを用いる方法と H_∞ 制御による方法とが考えられる。 H_∞ 制御法は、望ましい周波数特性をもつ制御系を実現するためにはコントローラの次数が高くなる傾向があり、実システムへの適用に際してコントローラの低次元化が行われることが多い。低次元化すると、コントローラ内の中間情報である状態推定値を得ることができず、実システムにおける動作の検証や、マスの運動状態に応じてフィードバックベクトルを変更する際に問題を生じることが予想される。このため、カルマンフィルタを用いて最適制御系のもつ長所を生かしつつ問題の解決を図る。

3.2 カルマンフィルタ設計の基礎式 図1に示すAMDのシステムモデルおよび低次線形モデルは、次式で表される。

力の釣合い関係と連続の式より、

$$M_S \ddot{x}_S + C_S \dot{x}_S + K_S x_S = F_S - U \quad \cdots (1)$$

$$M_A \ddot{x}_A = F_A + U \quad \cdots (2)$$

$$U = A(p_1 - p_2) - C_A(\dot{x}_A - \dot{x}_s) - K_A(x_A - x_s) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{V_1}{K_E} \dot{p}_1 = Q_1 - A(\dot{x}_A - \dot{x}_s) - Q_3 - Q_5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{V_2}{K_E} \dot{p}_2 = -Q_2 + A(\dot{x}_A - \dot{x}_s) - Q_4 + Q_5 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし,

$$Q_3 = R_1 p_1, Q_4 = R_1 p_2, Q_5 = R_2(p_1 - p_2)$$

とする.

サーボ弁の静特性より

$i \geq 0$ の場合(ただし, $p_r = 0$ とする)

$$Q_1 = K_{vi} \sqrt{\frac{2(p_s - p_1)}{p_s}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_2 = K_{vi} \sqrt{\frac{2p_2}{p_s}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$i < 0$ の場合

$$Q_1 = K_{vi} \sqrt{\frac{2p_1}{p_s}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_2 = K_{vi} \sqrt{\frac{2(p_s - p_2)}{p_s}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし,

$$K_v = Q_R / I_R \sqrt{p_s / p_R}$$

とする.

ここで, 平衡点として $p_1 = p_2 = p_s/2$, $i = i_0$ ($i \geq 0$ の場合), $i = -i_0$ ($i < 0$ の場合) として式(6)~(9)を微小変動法により線形化し, 油の圧縮性を無視した低次線形近似モデルを導く⁽¹⁾. ここまでは最適制御則設計の基礎式と共通で, 文献(1)に示した手順で最適制御則が設計できる. カルマンフィルタの設計のために, 検出信号を建物速度とマスストロークとし, 状態変数ベクトル $\mathbf{x}$, 出力変数ベクトル $\mathbf{y}$, 制御入力 u を用いて検出ノイズ $\mathbf{d}$ とシステム外乱 $\mathbf{v}$ を含めた状態方程式と出力方程式を次式で表す.

$$\text{状態方程式: } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{E}\mathbf{v} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Fig. 2 Block Diagram

$$\text{出力方程式: } \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{d} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし,

$$\mathbf{x} = \{x_s \quad y \quad \dot{x}_s \quad \dot{y}\}^T, u = i, \mathbf{y} = \{y \quad \dot{x}_s\}^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_s}{M_s} & \frac{K_A}{M_s} & -\frac{C_s}{M_s} & \frac{AK_B + C_A}{M_s} \\ \frac{K_s}{M_s} & -mK_A & \frac{C_s}{M_s} & -m(AK_B + C_A) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \left\{ 0 \quad 0 \quad -\frac{K_B K_v}{M_s} \quad mK_B K_v \right\}^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/M_s & 1/M_s \\ 0 & 0 & 0 & 1/M_A \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{v} = \{F_s \quad F_A\}^T, \quad \mathbf{d} = \{d_A \quad d_s\}^T$$

ここで,

$$K_B = 2A / (K_{vi} i_0 / p_s + R_1 + 2R_2),$$

$$m = (M_s + M_A) / (M_s M_A)$$

とする.

このとき, フィルタゲイン行列 $\mathbf{L}$ は, 定常カルマンフィルタ理論を適用し, 式(12)の J_L を最小にすると式(13)で与えられる⁽⁴⁾.

$$J_L = E[(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})^T (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})] \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{P}_L \mathbf{C}^T \mathbf{R}_L^{-1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし, $E[\cdot]$ は期待値演算子, $\hat{\mathbf{x}}$ は $\mathbf{x}$ の推定値, $\mathbf{P}_L$ は式(14)の解である.

$$\mathbf{P}_L \mathbf{A}^T + \mathbf{A} \mathbf{P}_L - \mathbf{P}_L \mathbf{C}^T \mathbf{R}_L^{-1} \mathbf{C} \mathbf{P}_L + \mathbf{E} \mathbf{Q}_L \mathbf{E}^T = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$\mathbf{Q}_L$ は建物と可動マスに作用する励振力の分散を対角要素にもち, $\mathbf{R}_L$ はマスストロークと建物速度の検出ノイズの分散を対角要素にもつ対角行列であり, それぞれフィルタゲイン行列 $\mathbf{L}$ の設計パラメータである. 図2に併合システムのブロック図を示す.

3.3 併合系の設計と解析 図3に示すように,

Fig. 3 Structure Full Model

Table 1 Regulator Design Condition

M_s : 74120 Kg	R_1 : 0.0 mm ³ /(sMPa)
C_s : 1.187 Ns/mm	R_2 : 0.0 mm ³ /(sMPa)
K_s : 190.4 N/mm	p_s : 10.3 MPa
M_A : 2500 Kg	Q_R : 158000 mm ³ /s
C_A : 0.0 kNs/mm	I_R : 200 mA
K_A : 0.0 kN/mm	i_o : 50 mA
A : 1819 mm ²	

Table 2 Regulator Design Results

Weighting Coef.	Feedback Coef.	Poles(ζ)
q_1 : 1000	f_1 : 30.71	$-0.275 \pm 1.55j$
q_2 : 0.01	f_2 : 0.1000	($\zeta=0.174$)
q_3 : 0.01	f_3 : 0.6013	-0.0532
r : 1	f_4 : -0.02418	-582.0
q_1 : 1000	f_1 : 29.88	$-0.267 \pm 1.55j$
q_2 : 0.5	f_2 : 0.7071	($\zeta=0.170$)
q_3 : 0.01	f_3 : 4.308	-0.378
r : 1	f_4 : 0.1461	582.0

建物(フルモデル)は3D.O.F.の3層とし、これの1D.O.F.モデルで最適レギュレータとカルマンフィルタを設計する。理論的に制御系とカルマンフィルタとは互いに独立に設計できるため、個別に設計された両者を単に結合することで併合系を実現できる。建物の1D.O.F.モデルとAMD諸元を表1に示す。

3・3・1 最適レギュレータの設計 表1の値を用いて最適レギュレータを設計する。設計法は、閉ループの複素根の減衰比が17%になるように建物変位への重み係数 q_1 を加減する⁽¹⁾。2種類の値の q_2 で最適レギュレータを設計し、それぞれの重み係数とフィードバックベクトルおよび最適レギュレータの極を表2に示す。

3・3・2 カルマンフィルタの設計 カルマンフィルタの設計パラメータとしては、システム外乱の分散を対角要素とする重み行列 $Q_L (= \text{diag}[F_s^2 F_s^2])$ と検出ノイズの分散を対角要素とする重み行列 $R_L (= \text{diag}[d_s^2 d_s^2])$ がある。ここでは、シリンダ推力への外乱をシステム外乱と考え、外乱の大きさをシリンダ最大推力の0.52%に相当する97.4 Nとする。また、検出ノイズとして建物速度は検出レンジの3.3%(0.99 mm/s)、マスストロークは検出レンジの1%(1 mm)とする。いま、 $Q_{L0} = \text{diag}[97.4^2 \ 97.4^2]$ 、 $R_{L0} = \text{diag}[0.99^2 \ 1.0^2]$ として、 $Q_L = \alpha_Q Q_{L0}$ 、 $R_L = \alpha_R R_{L0}$ 、 $\alpha = \alpha_Q / \alpha_R$ とする。この α_Q 、 α_R を変えたときのカルマンフィルタの極と α の値を表3に示す。これより α が一定のときカルマンフィルタは同一になり、設計パラメータは α とすればよいことがわかる。この α が大きいほど絶対値の小さいほうの実根(可動マスの推定に関する

Table 3 Kalman Filter Pole Position

	$Q_{L0}/2$	$Q_{L0}/1.5$	Q_{L0}	$1.5Q_{L0}$	$2Q_{L0}$
$\alpha=0.1$	$\alpha=1.33 \ \zeta=0.118$ -1.210 ± 1.008j 0.0895 -581	$\alpha=2.00 \ \zeta=0.134$ -0.135 0.904 -2.723 -581	$\alpha=3.00 \ \zeta=0.146$ 0.298 ± 0.088j 6.910 581	$\alpha=4.00 \ \zeta=0.155$ 0.214 0.378 4.950 581	$\alpha=5.00 \ \zeta=0.162$ 0.135 0.904 2.723 581
$\alpha=0.2$	$\alpha=0.75 \ \zeta=0.090$ -0.681 ± 1.422j 0.0502 -581	$\alpha=0.67 \ \zeta=0.083$ -0.606 ± 1.455j 0.0447 -581	$\alpha=1.00 \ \zeta=0.100$ -0.908 ± 1.288j 0.0670 581	$\alpha=1.50 \ \zeta=0.123$ 1.361 ± 0.791j 0.101 581	$\alpha=2.00 \ \zeta=0.134$ 0.135 0.904 2.723 581
$\alpha=0.3$	$\alpha=0.50 \ \zeta=0.073$ -0.454 ± 1.510j 0.0335 -581	$\alpha=0.44 \ \zeta=0.068$ -0.404 ± 1.524j 0.0298 -581	$\alpha=0.50 \ \zeta=0.073$ -0.454 ± 1.510j 0.0335 581	$\alpha=0.75 \ \zeta=0.090$ -0.681 ± 1.422j 0.0502 581	$\alpha=1.00 \ \zeta=0.100$ -0.908 ± 1.288j 0.0670 581
$\alpha=0.4$	$\alpha=0.33 \ \zeta=0.057$ -0.303 ± 1.547j 0.0223 -581	$\alpha=0.25 \ \zeta=0.045$ -0.227 ± 1.560j 0.0167 581	$\alpha=0.25 \ \zeta=0.045$ -0.227 ± 1.560j 0.0167 581	$\alpha=0.33 \ \zeta=0.057$ -0.303 ± 1.547j 0.0223 581	$\alpha=0.50 \ \zeta=0.073$ -0.454 ± 1.510j 0.0335 581

Fig. 4 Step Response with/without Kalman Filter

る極)の絶対値が大きくなる。一方、複素根(建物の推定に関する極)の実部の絶対値には最大値があることから、 α には最適値が存在することが推測される。

3・3・3 併合系の特性解析と評価 カルマンフィルタでは、対象システムのモデルに基づいてそのシステム本来の信号を抽出するため、モデルの固有振動数近傍の信号はレベルを保持されるが、それから離れた周波数帯域では高周波側だけでなく低周波側も信号レベルが下がる傾向がある。このため、図4に示すよう

Fig. 5 Step Response at different α

Fig. 6 Controller Gain Characteristic Curve

Fig. 7 Power Spectrum Density

に併合系にするとマスの定位性(中立位置に戻る性質)が悪くなる。そこで最適レギュレータの設計において、マストロークへの重み係数 q_2 を大きくしてマスの定位性を向上させる必要が生じる。このため、今後は $q_2=0.5$ とした最適レギュレータを用いて検討する。

なお、この併合系ではカルマンフィルタの初期値を零にしていることから、全状態量を検出する場合にはステップの初期にマスがプラス方向に動くのに対し、状態推定をする併合系では建物状態量の推定誤差のためにステップの初期にマスはプラス方向にはほとんど動かず、やや遅れてマイナス方向に動く。このため、全状態量検出に比べてステップ初期での制振効果は小さくなる。

併合系の特性評価指標としてステップ応答における

- ・初めの1周期での建物減衰比
- ・建物変位の状態推定の速さ
- ・可動マスの定位性

を上げる。図5に示す建物変位とマストロークのステップ応答波形(真値と推定値)から

- ・ x_s の推定を速くする α の最適値がある
- ・ α が大きいとマスの定位性が悪くなる
- ・ 今回の事例では、 x_s の推定が速い場合にはマス

の定位性もよい

- ・ α が大きいと状態推定は遅いが、制振効果が高い(推定誤差が制振効果を高めるように作用する)
- ・ y , $\hat{y}$ とともに初期値が一致しているため、常に推定値は真値に一致している

という傾向が読み取れる。今回の事例では α が 1.0 のときに、 x_s の推定速度とマスの定位性のバランスがよく、このときのコントローラの周波数特性を図6に示す。これから、建物モデル(1 D. O. F.)の固有振動数から離れた周波数成分に対して、ゲインが下がっており、低周波への低感度化と高周波へのロバスト性が実現できていることがわかる。3 D. O. F.の建物モデルにこの併合系を適用し、低周波としての 0.05 Hz と建物の 1, 2, 3 次モードの 0.25, 0.56, 0.71 Hz の正弦波を重ね合せた励振力を作用させたときの建物速度とその推定値のパワースペクトル密度を図7に示す。推定値には、建物一次モードの 0.25 Hz に比べて他の周波数の信号レベルが抑えられ、カルマンフィルタが建物一次モード成分を中心に通すようなフィルタリングをしていることが確認できる。

3・4 モデル誤差の影響 α が 1.0 のときの併合

系において、建物モデルと実際の建物とに差がある場合として以下の2ケースを考える。

Case a: 建物の固有振動数は正確だが、一次の等価質量に誤差がある

Case b: 建物の一次の等価質量は正確だが、固有振動数に誤差がある

これら2ケースの併合系において、 $\pm 40\%$ のモデル誤差があるときのステップ応答解析を行い、はじめの1周期での建物の減衰比とモデル誤差との関係を整理したものを図8, 9に示す。この範囲のモデル誤差では制御系の安定性には問題がなく、建物質量の大きさに

より制振効果が変化するだけである。実際のシステムでは、建物の固有振動数の同定は容易であり、Case a (図8)のモデル誤差を生じやすい。

3.5 H_∞ 制御との比較 3.1節で述べたように、状態推定により検出信号数を減らし、コントローラに周波数特性を付加することは H_∞ 制御でも実現できる。そこで、建物速度とマスストロークを検出信号とし、コントローラの次数を低く抑えるために、重み関数はすべて一次の関数として H_∞ 制御系を設計したところ、分母が七次のコントローラが得られた。この制

Fig. 8 Effect of Structure Mass Error

Fig. 9 Effect of Structure Natural Frequency Error

Table 4 Controller Order Comparison

	Numerator	Denominator
H_∞ Controller	6	7
Combined System with Kalman Filter	3	4

Fig. 10 Characteristics of H_∞ Control

Fig. 11 Full Model Step Response

Fig. 12 Wind Response Simulation Results

御系の応答解析結果とコントローラの周波数特性を図10に示す。また、カルマンフィルタを用いた併合系とのコントローラ次数の比較を表4に示す。これらにより、カルマンフィルタを用いた併合系では、同等の特性を低次のコントローラで実現していることがわかる。

4. 実験および解析との比較

建物を3D.O.F.とし、油圧系の非線形特性を考慮したシミュレーション解析と、建物以外は実際のハードウェアを用いて行う模擬実験により、併合系が期待どおりの制御特性を有するかどうかを確認する。

4.1 解析条件と解析結果 これまでの検討は建物を1D.O.F.としていたが、ここでの解析には三次までの振動モードを持つ3D.O.F.モデルを用いる。この建物の運動方程式を次式に示す。

$$M_s \ddot{\mathbf{x}}_s + C_s \dot{\mathbf{x}}_s + K_s \mathbf{x}_s = \mathbf{F} \quad (15)$$

ただし、

$$\mathbf{x} = \{x_{s1} \ x_{s2} \ x_{s3}\}^T, \mathbf{F} = \{F_1 \ F_2 \ F_3 - U\}^T$$

$$M_s = \begin{bmatrix} M_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & M_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & M_{s3} \end{bmatrix}$$

Fig. 13 Real Time Simulation Outline

$$C_s = \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & -C_{s2} & 0 \\ -C_{s2} & C_{s2} + C_{s3} & -C_{s3} \\ 0 & -C_{s3} & C_{s3} \end{bmatrix}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & -K_{s2} & 0 \\ -K_{s2} & K_{s2} + K_{s3} & -K_{s3} \\ 0 & -K_{s3} & K_{s3} \end{bmatrix}$$

である。

また、可動マスおよび油圧系に関しては式(2)～(9)を用いる。これらの式はサーボ弁の非線形特性や油の圧縮性なども考慮されている。建物諸元は図3、AMD諸元は表1の値をそれぞれ用いる。

この3D.O.F.モデルに一次モードに対応する比率で各層に初期変位を与えたときの応答と状態推定の結果を図11に示す。低次線形モデルの場合と同様に状態推定も制御性能も良好である。

この3D.O.F.モデルに150秒間風外力を作用させたときの応答を、制御OFF、最適制御(全状態量を検出)、カルマンフィルタとの併合系について応答解析した結果を図12に示す。

4.2 実験方法および実験結果 図13に模擬実験の概要を示す。AMD本体やセンサ、積分器等は実際のシステムで構成しているが、制御対象である3D.O.F.の建物(図3)はパーソナルコンピュータの中に数学モデルとして組み込み、このモデルに風外力と可動マスの加速度に質量を乗じて得られる制御力を作用させ、このときの建物速度をリアルタイムで出力する。これは、速度計による速度検出と等価になる。

実験も解析と同様に、制御OFF、最適制御(全状態量を検出)、カルマンフィルタとの併合系について行い、その結果を図14に示す。

4.3 実験結果と解析結果の比較 図12と14を比較すると、実験と解析とはよく一致しており、カルマンフィルタとの併合系では、制振効果は同等でマスの低周波での動きが抑えられる結果マスストロークが

Fig. 14 Wind Response Experiment Results

大幅に小さくなる。また、解析では最適制御だけの場合に外力がなくなった後に二次モードの振動(スピルオーバー現象)を生じているが、併合系では安定が保たれている。実験では最適制御系でもスピルオーバー現象を生じていないが、これはサーボ弁のオーバーラップ特性やシリンダの摩擦特性などのためと考えられる。

5. 結 言

アクティブマスダンパ方式の油圧式制振装置にカルマンフィルタを適用した併合系に関して、カルマンフィルタの設計法と制御系の特性について基礎的な検討を加えた。この結果は以下のようにまとめられる。

(1) シリンダ推力への外乱をシステム外乱とするカルマンフィルタの設計法を示し、設計パラメータの影響を調べ、設計指標を示した。

(2) 検出信号を2信号に減らした併合系が、スピルオーバー現象の抑制と低周波励振力に対するマストロークの低感度化がはかれることを実験と解析により確認した。

(3) 制御対象のモデル誤差の制御特性への影響を調べ、 $\pm 40\%$ のモデル誤差は問題ないことを確認した。

本研究の解析および実験は、(株)竹中工務店およびカヤバ工業(株)の多くの方々の御協力と御助言をいただいてなし得たものであり、本論文のまとめに際しては、東京工業大学北川教授から貴重な御助言をいただいた。ここに関係の方々に深く謝意を表する。

文 献

- (1) 羽生田信良・相沢寛, 油圧式制振装置への最適制御理論の適用と小規模モデル実験, 機論, **61** 583, C(1995), 223-230.
- (2) 羽生田信良・相沢寛, 高層ビル用油圧式制振装置の実用化検討と中規模実験, 油圧と空気圧, Vol. 26 (1995), 142-149.
- (3) 羽生田信良・相沢寛, ほか2名, 大規模ビル用油圧式制振装置の研究, 油圧と空気圧, Vol. 27 (1996), 86-93.
- (4) 小郷寛・美多勉, システム制御理論入門, (1979) 173-177, 実教出版.