

高層建物制振用アクティブ・マスダンパの 誤動作防止方法について

——その2, センサ異常に対する方法——

Fault Diagnosis Method in Active Mass Dampers for Vibration Control of Tall Buildings
——Part 2, Method for Sensor Malfunction——

藤 田 隆 史*・鎌 田 崇 義*

Takafumi FUJITA and Takayoshi KAMADA

1. はじめに

高層建物制振用のアクティブ・マスダンパの実用化を考える際には、その安全性に関する考慮が十分になされなければならない。本研究では、マスダンパの誤動作防止方法として、新たなハードウェアを必要としないソフトウェア的なフェイルセーフ対策についての提案を行い、建物・マスダンパモデルを用いた振動台による加振実験のデータを利用したシミュレーションによってその有効性の確認を行っている。前報ではマスダンパの吸収エネルギーを監視することによって、マスダンパが不測の原因で建物を加振する事を防止する方法について検討を行った。本報ではセンサに異常が起こった場合（特にセンサからの信号にオフセットや低周波成分が入った場合）の対処方法として、モーダルフィルタ¹⁾を利用したセンサ異常の判別方法、さらには制御する振動モードの数に比べセンサの数に冗長性がある場合には、異常なセンサを特定しこれを除く残りのセンサを用いることによってアクティブ・コントロールを続ける方法について検討を行っている。そして、加振実験のデータを用いたシミュレーションによってその有効性の確認を行っている。

2. センサ異常への対応

2.1 センサ異常の判別

建物に取り付けられたセンサによって計測される物理量をモード座標に変換する方法としてモーダルフィルタがある。{x} を建物の各質点の地面からの相対変位ベクトルとして、{x} = [T] {q} となるモード行列 [T] とモード座標 {q} を導入すると、モーダルフィルタの構成は次式のようになる。

*東京大学生産技術研究所 第2部

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T = [T] \{q_1, q_2, \dots, q_n\}^T \quad (1)$$

ここで、建物の j_1, j_2, \dots, j_k 層の相対変位が既知であるとすると、

$$\{x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_k}\}^T = [\phi] \{q_1, q_2, \dots, q_k\}^T \quad (2)$$

ただし、

$$[\phi] = \begin{bmatrix} t_{j_1 1} & t_{j_1 2} & \dots & t_{j_1 k} \\ t_{j_2 1} & t_{j_2 2} & \dots & t_{j_2 k} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ t_{j_k 1} & t_{j_k 2} & \dots & t_{j_k k} \end{bmatrix}$$

(2) 式より、建物の速度について次式が得られる。

$$\{\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_k\}^T = [\phi]^{-1} \{\dot{x}_{j_1}, \dot{x}_{j_2}, \dots, \dot{x}_{j_k}\}^T \quad (3)$$

ここで、 i 次 ($i < k$) のモード速度について考えると、時間 Δt 間でのモード速度の積分値は、 Δt をそのモードの周期に比べて十分大きくとれば、

$$V_i = \int_t^{t+\Delta t} \dot{q}_i dt \approx 0 \quad (4)$$

となるはずである。これが、 $V_i \neq 0$ となった場合には、センサに何らかの異常が起こったと判断できる。そこでしきい値 X を設けて、 $|V_i| > X$ となった時にはセンサが異常であると判断し、制御を停止することによってソフトウェアでのフェイルセーフとする事ができる。なお、 X の値はシミュレーションによって決定する。

2.2 異常なセンサの特定とその対応

前節の方法は、センサ異常が起こった場合制御を停止す

研究速報

るため建物に悪影響は与えないが、制振効果はなくなってしまふ。ところで、一般に建物の制御を行う場合スビルオーバー対策等の理由から制御対象とする建物の振動モードの次数に比べてセンサの数に余裕を持たせ冗長性を確保する機会が多い。この場合1つのセンサに異常が起こっても、そのセンサを特定することができれば残りのセンサだけを使ってアクティブ制御を続けることが可能である。そこで、異常なセンサの特定方法として次のような方法を考える。

1階を除くk個のセンサの設置階を j_s 階 ($s=1\sim k$) とする。これらからセンサ設置階の絶対速度が、さらに1階の絶対速度を減算すればセンサ設置階の地上からの相対速度が得られる。k個の相対速度のうち j_m 階の情報を除く(k-1)個の相対速度から求められるi次のモード速度をとすると $\dot{q}_{i1}\sim\dot{q}_{ik}$ のk通りの値が得られることになる。これらを基に V_i を計算し、それぞれ $(V_i)_s$ とする。もし、 j_m 階のセンサが異常信号を出した場合、 $(V_i)_m$ のみが $V_i \neq 0$ となり、それ以外は $V_i \neq 0$ となるはずである。したがって、

$$|(V_i)_s| \begin{cases} \approx 0 & (s=j) \\ > X & (s \neq j) \end{cases} \quad (5)$$

となったときには j_j 階のセンサが異常であると判断することができ、これ以後の制御では j_j 階のセンサを除く正常なセンサのみを用いて制御を行えば、冗長性は減るもののアクティブコントロールを続けることができる。

ただし、制御に用いるモード速度の計算にはセンサ設置階の地上に対する相対速度を用いているため、1階の信号が異常な場合にはすべての相対速度が異常となり、正しい計算ができなくなってしまう。そこで、

$$|(V_i)_s| > X \quad (s=1\sim k) \quad (6)$$

となったときは、1階のセンサが異常であると判断し制御を停止するものとする。

3. 実験データを用いたシミュレーション

3.1 フェイルセーフ対策の有効性の確認

前報と同じく建物・マスダンパモデルによる加振実験のデータを使ってシミュレーションによる検証を行った。制御対象は2次モードまで、使用するセンサは1,2,3,4,屋上階の5つ(相対データとしては4つ)、3次のモード速度を使ってセンサ異常の判断をするものとする。3次モードを判断に用いた理由は、1,2次モードを使っても可能であるが、3次モードに比べて周期が長いのでセンサ異常の判断に時間がかかるためである。図1~4にエル

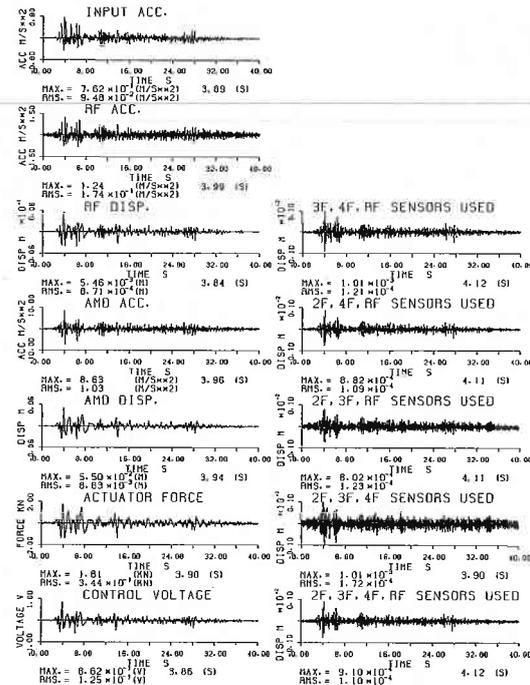
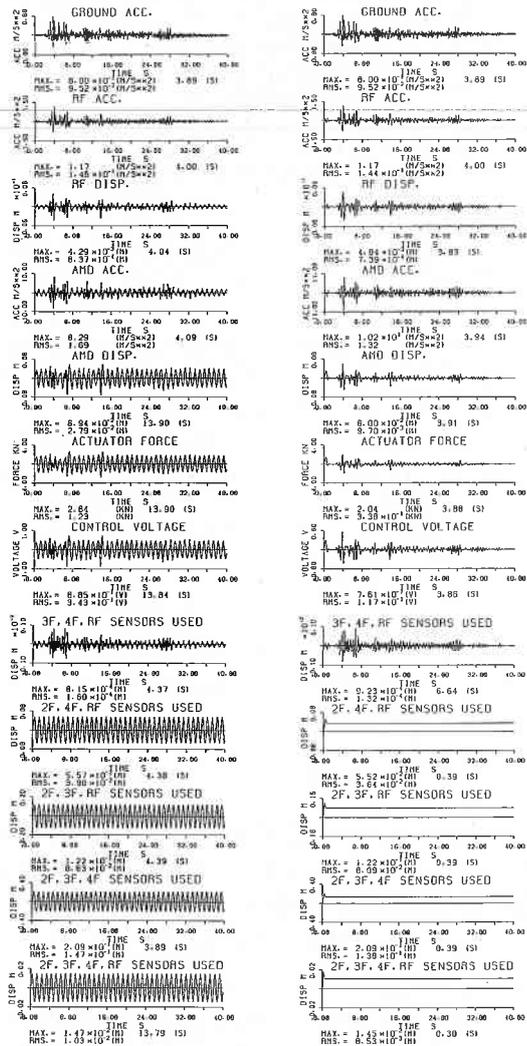


図1 エルセントロ (NS波) に対する応答

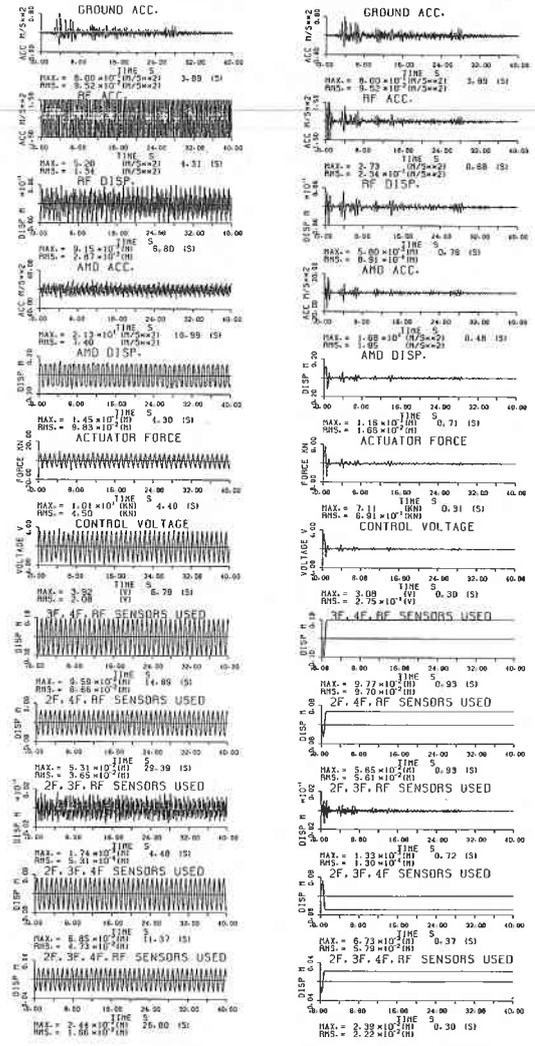
セントロ・NS波に対する応答を示す。センサチェックのための指標はモーダルフィルタによって計算される3次のモード速度を3次モードの3周期分である0.27秒間積分したものである。上からそれぞれ2,3,4階, 2,3,屋上階, 2,4,屋上階, 3,4,屋上階, 2,3,4,屋上階の相対速度を利用して計算したものであるが、実際には正確な積分値ではなく、3次のモード速度にサンプリングタイム(5ms)を乗じて加算したものである。センサチェックのための指標は一定時間(建物の1次モードの周期である0.4s)ごとの最大値をとったもので、この値を判断に用いる。

図1はすべてのセンサが正常であった場合の応答である。使用するセンサの組み合わせによって多少バラツキを生じるが、その積分値はほとんど 1.0×10^{-3} (m) 以下におさまっている。そこで、センサ異常の判断のしきい値Xを $X = 5.0 \times 10^{-3}$ (m) として以降のシミュレーションを行った。図2は2階のセンサ信号に誤信号が入った場合の応答である。誤信号としては変位、速度の信号に固有振動数1.0Hz, 振幅1.0V (A/Dボードのフルスケール5.0Vに対して2割)の正弦波が同位相で入ったものとした。左がセンサ異常に対するフェイルセーフ対策を組み込んでいない系での応答、右が組込んだ系の応答である。制御の対象である1,2次のモード変位、モード速度を求める際にモーダルフィルタを用いるが、2階の計測値にかかる値が小さいためそのまま制御を行ってもほとんど制振性能は劣化しないが、マスダンパの動きは余分な低周波成分が入



フェイルセーフ対策なし フェイルセーフ対策あり

図2 2階の信号に誤信号が入った場合



フェイルセーフ対策なし フェイルセーフ対策あり

図3 4階の信号に誤信号が入った場合

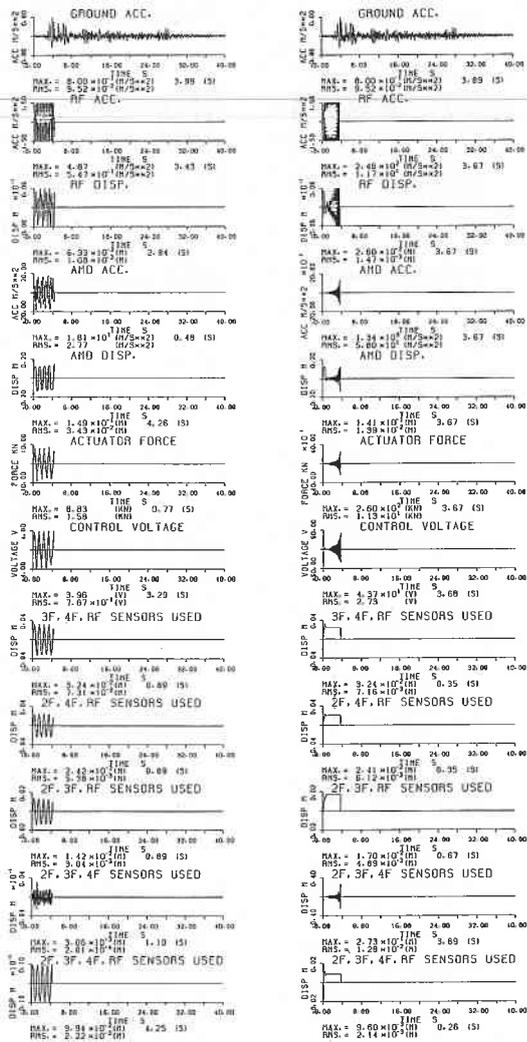
ている。センサ異常チェックのための指標を見ると2階のセンサを含む組み合わせでは大きい値を示しており、3,4,屋上階のセンサのみを用いた場合だけが正常な値となっている。センサ異常に対する対応を行った場合は、すぐに異常を感知し2階のセンサを使わずに制御することによって、センサが正常な場合とほぼ同等の制振性能をあげ、マスダンパも正常に動いている。図3は4階のセンサに同じ誤信号が入った場合の応答である。4階の計測値は1,2次のモード成分を計算する際の係数が大きいためそのまま制御を続けると発振してしまうが、センサ異常に対応した場合は4階のセンサ異常を特定し、以後2,3,屋上階のセンサのみで制御を行うことによって正常な制御に戻っている。図4は屋上階のセンサに同じ誤信号が入った場合の応答である。屋上階の計測値も1,2次のモード成分を計算する際

の係数が大きいままでは発振してしまう。センサ異常に対応した場合は異常のあるセンサが屋上階であることは特定できているが、2,3,4階のセンサを使っての制御が発振を起こしてしまっている。

3.2 モーダルフィルタの信頼性

本章で用いたモーダルフィルタの値を表1に示す。2,3,4,屋上階の4層のデータを用いた場合と、4層のうちの3層のデータを用いた4つの場合の値である。1,2次モードの腹にあたる屋上階のデータを除く2,3,4階の3層のデータを用いた場合に各階の計測値に乗ずる値が他と比べてかなり大きくなっているのがわかる。図5に正常な制御において2,3,4階のセンサを用いて求められる1,2次のモード変位、速度と、5層すべてのセンサを用いて求められる1,2次のモード変位、速度との比較を示す。2次モー

研究速報



フェイルセーフ対策なし フェイルセーフ対策あり
図4 屋上階の信号に誤信号が入った場合

表1 モーダルフィルタ

センサ設置階	モード	2階	3階	4階	屋上階
2, 3, 4, 屋上	1次	0.1888	-0.0455	0.4939	0.3871
	2次	0.6489	1.1889	0.1050	-0.9724
2, 3, 4	1次	2.6971	-3.3804	2.4349	
	2次	-5.6858	9.5669	-4.7713	
2, 3, 屋上	1次	-0.4953	0.8031		0.4856
	2次	0.5132	1.3692		-0.9515
2, 4, 屋上	1次	0.1545		0.4674	0.3923
	2次	1.5431		0.7969	-1.1104
3, 4, 屋上	1次		0.2055	0.3478	0.4162
	2次		2.0515	-0.3971	-0.8723

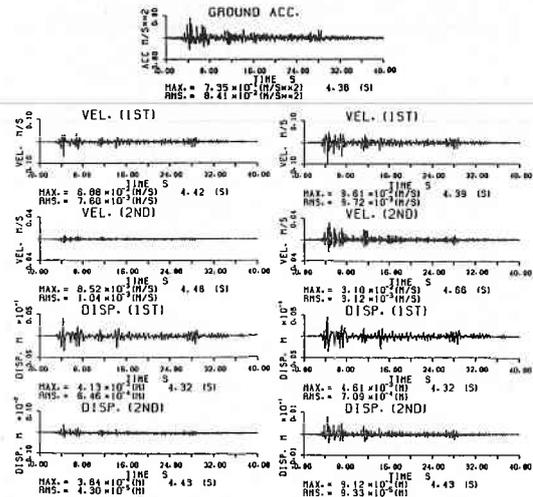


図5 モーダルフィルタの信頼性

ドの変位, 速度など両者にはかなりの違いが見られており, 2,3,4階のデータのみでの制御が困難であることがモーダルフィルタの値とシミュレーションから判断できる。

4. ま と め

本報ではマスダンパの誤動作防止のためのフェイルセーフ対策として, モーダルフィルタを利用したセンサ異常への対処方法を提案し, 実験データを利用したシミュレーションによってその有効性について検討した. その結果, 建物各階に取り付けられたセンサの信号にオフセットや低周波成分が入るような異常が起こっても, 高次の速度成分を計算しこれを積分した値を用いることによって異常を発見できること, さらに制御を行う回数に比べセンサの数に余裕がある場合には, 異常なセンサを特定しこれを除いたセンサで制御を続けることも可能であることが確認できた. ただし, 残されたセンサを用いたモーダルフィルタの値が大きくなりデータに信頼性がなくなる場合には, 無理にアクティブ制御を続けられないほうがよいことも確認できた.

さらに, 前報で示したようなアクティブ・パッシブ切り換え型のマスダンパを用いた場合では, センサ異常によってアクティブ制御ができないと判断された場合でも, マスダンパを停止するのではなくパッシブモードに切り換えることによって制振効果をあげることが期待できる。

(1994年7月7日受理)

参 考 文 献

1) L. Meirovitch and H. Baruh : Jounal of Guidance,Control and Dynamics, 8,6,707-716, 1985