MR ダンパの適応同定と振動制御への応用

坂井 千春*・寺澤 崇*・佐野 昭**

Adaptive Identification of MR Damper with Application to Vibration Control

Chiharu SAKAI*, Takashi TERASAWA* and Akira SANO**

This paper presents a simple mathematical model of MR damper with a small number of model parameters, which can express its hysteresis effect of nonlinear dynamic friction mechanism of the MR fluid. The adaptive identification algorithm is also proposed in which the uncertain model parameters and internal state variable can be estimated in an online manner. The proposed model has an advantage that by using its inverse model the necessary input voltage to the MR damper can be analytically determined so that the desirable damper force calculated by bilinear H_∞ controller is generated to suppress vibration of a structure in an adaptive manner. Experimental results validate the proposed adaptive modeling and control schemes in vibration isolation of four-story quake-absorbing structure.

Key Words: MR damper, adaptive identification, adaptive inverse system

1. 緒 論

MR(Magnetorheological) ダンパは、入力電圧による磁場印加で粘性を可変にする MR 流体を封入したダンパであり、他のセミアクティブ装置に比べて高い減衰力が発生できることから、構造物の免震制御や車両のセミアクティブサスペンションへの適用が期待されている。このため MR ダンパのモデリングについては、動作解析を目的としたさまざまな数式モデルが提案されているが^{1),2)}、本質的に非線形ヒステリシス特性をもつために制御系設計と整合するモデルはほとんどないのが実情である。

これまでの MR ダンパのモデルは、静的モデルと動的モデルに分類される。静的モデルである修正 Bingham モデル³⁾は、速度からダンパ減衰力への関係を簡単な非線形関数で与えており、パラメータは電圧に関して線形であるが、ヒステリシス特性を表現することができない。ヒステリシス特性を記述できるモデルとして、非線形区分ヒステリシスモデル⁴⁾、多項式モデル⁵⁾、双曲線関数などの非線形関数の組み合わせ^{6),7)}、など関数近似で表現したものが提案されている。一方、動的モデルに関しては、非線形微分方程式によりヒステリシス特性を記述できる Bouc-Wen モデル⁸⁾を拡張し、入出力関係を

表現した修正 Bouc-Wen モデル^{1),2)}に対しては、さまざまな非線形減衰項の導入が提案されている。しかし、これらの静的および動的モデルは、MR ダンパの動特性を厳密に記述し、動作解析することが目的であるために、一般に多くのパラメータと非線形関数を必要とし、モデルベース型制御系設計や実時間での同定には適してはいない。

一方、ダンパの磁性微粒子の動作が非線形摩擦現象とみなせることから、LuGre 摩擦モデル⁹⁾に基づく修正モデル¹⁰⁾も提案されている。このモデルは構造が簡単でモデルパラメータ数も少ない利点をもつが、所望減衰力を与える入力電圧を求めるための逆システムが実現できない。そこで、本論文の大きな目的の一つは、LuGre 摩擦モデルを修正し、所望の減衰力を与える MR ダンパへの入力電圧を解析的に計算できるモデルの提案と、そのモデルパラメータを実時間で同定するアルゴリズムを提案することである。

さて、MR ダンパを用いた構造物のセミアクティブ振動制御手法についてもこれまで多くの研究がなされている。Clipped-optimal 制御¹¹⁾は、最適な所望減衰力と実際の MR ダンパ減衰力の差によって入力電圧を 0 か最大値かをオンオフで決定する方法であり、所望減衰力は線形レギュレータ問題の解で与えている。このような分離機構をもった制御手法として、最適レギュレータ¹²⁾、瞬時最適制御則¹³⁾、スライディングモード制御^{14),15)}、遺伝的アルゴリズム¹⁶⁾などを利用したものが提案され、セミアクティブ機構への応用が図られている。しかし、本論文とは異なり、これらのアプローチは MR ダンパのモデルを活かした制御系設計ではなく、ダンパモデルの不確かさやパラメータ同定を行ない、その逆システムを実時間で構築し、MR ダンパの不確かな非線形特性を補償してい

* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

* Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama

** Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

(Received February 17, 2006)

(Revised July 25, 2006)

るわけではない。本論文の方向に近いものとして、ニューラルネットワークを用いたMRダンパのフォワードモデルおよび逆モデルの研究がなされているが^{17)~19)}、更新重みの数が非常に多く実用的ではない。

これら従来の制御手法はMRダンパのセミアクティブな特性を本質的に使用した振動制御則にはなっておらず、速度と異なる方向の所望減衰力が要求される問題がある。本来、MRダンパの特性は縦軸を減衰力、横軸を速度にとったグラフでは第1および第3象限にあり、所望減衰力がこのような特性をもつ制御系の設計が望まれる。これらに対応して、MRダンパのセミアクティブ特性と構造物モデルを併せて1つの双線形状態空間表現にした設計法として、ゲインスケジューリング制御²⁰⁾や、双線形最適制御²¹⁾や双線形 H_∞ 制御^{22), 23)}などが提案されているが、やはりMRダンパモデルの情報に基づく設計法ではない。

以上の背景のもとで、本研究の目的は、MRダンパへの入力電圧を、適応同定により得られたモデルパラメータを利用して計算し、MRダンパの非線形特性を実時間で補償することにより、双線形 H_∞ 制御により与えられる所望減衰力をMRダンパに発生させるための方法を提案することである。

本論文の構成は、以下のとおりである。2節では問題の設定、3節はMRダンパの提案モデル、4節はモデルパラメータの適応同定（安定性については付録参照）、5節は提案モデルに基づいた双線形 H_∞ 制御について述べる。提案法の有効性については、4節と5節でそれぞれMRダンパの同定実験と4層構造物の振動制御実験により明らかにする。

2. 問題設定

Fig.1に示すように、MRダンパを免振層に設置した N ($N = 4$) 層構造物の免振制御問題を考える。ただし振動は水平方向のみとし、ねじれや鉛直方向の変位については考慮しないと仮定する。Fig.1の構造物の各変数とパラメータを以下に示す。

- m_i : i 階の重量 [kg]
- c_i : i 層の減衰係数 [N·s/m]
- k_i : i 層の剛性定数 [N/m]
- x_i : i 階の地盤からの相対変位 [m]
- $\ddot{x}_g$: 地震波加速度 [m/s^2]
- f : MRダンパの発生する減衰力 [N]
- v : MRダンパへの入力電圧 [V]

変位ベクトルを $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ と定義すると、MRダンパを設置した免振構造物の運動方程式は次式で表現される。

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_s \mathbf{x} = \mathbf{\Gamma} f - \mathbf{M}_s \mathbf{\Lambda} \ddot{x}_g \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{M}_s$ は質量行列、 $\mathbf{C}_s$ は減衰行列、 $\mathbf{K}_s$ は剛性行列、 $\mathbf{\Lambda} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 、 $\mathbf{\Gamma} = [-1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ である。

構造物に加わる所望減衰力 f_d は、時間関数である減衰係数 c_d とMRダンパ装着部速度 $\dot{x}_1$ の積により、

Fig. 1 Quake-absorbing structure with MR damper

Fig. 2 Proposed control method

$$f_d = c_d \dot{x}_1 \quad (2)$$

と表現できる。所望減衰力 f_d を発生させるMRダンパへの入力電圧 v が生成可能とすると、運動方程式 (1) は以下の双線形状態空間表現に変換できる。

$$\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{b}_{p1} \ddot{x}_g + \mathbf{b}_{p2}(\mathbf{x}_p) c_d \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_p = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p \quad (4)$$

ただし、

$$\mathbf{x}_p = [\mathbf{x}^T \ \dot{\mathbf{x}}^T]^T, \quad \mathbf{y}_p = [\ddot{x}_{2a} \ \ddot{x}_{3a} \ \ddot{x}_{4a}]^T$$

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{K}_s & -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{C}_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_{p1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{\Lambda} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_{p2}(\mathbf{x}_p) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{\dot{x}_1}{m_1} \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{C}_p = [-\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{K}_s \ -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{C}_s]([2:4], :)$$

とおいだ。

本論文で提案する免振制御アルゴリズムの考え方を Fig.2 に示す。提案アルゴリズムは、適応ダンパ制御器と双線形 H_∞ 制御器からなる。適応ダンパ制御器は、適応同定されたダン

パモデルパラメータと内部状態を利用して、双線形 H_∞ 制御器により計算される最適粘性係数 c_d を用いた (2) 式の所望減衰力 f_d と同じ減衰力 f を MR ダンパが発生するように入力電圧 v を決定する。もし MR ダンパモデルが正確に同定されるならば、適応ダンパ制御器は MR ダンパの逆モデルとなり、 $f = f_d$ が満たされ、あたかもアクティブに近い制御が実現できることになる。

3. MR ダンパのモデリング

3.1 MR ダンパモデル

MR ダンパは電圧によってシリンダ内部の流体の粘性特性を変化できるセミアクティブ装置であり、実測においても非線形ヒステリシス特性をもつことが確認できる。このヒステリシス特性を記述できる修正 Bouc-Wen モデル^{1), 2)}は、同定すべきパラメータ数が多く、モデルベース型制御器設計には利用できない。そこで、非線形摩擦現象が記述できる LuGre 摩擦モデル⁹⁾を MR ダンパへ拡張したモデル¹⁰⁾が提案されたが、内部状態 z の非線形ダイナミクスに入力項が入るために逆システムの設計が困難である。

そこで、本論文では LuGre 摩擦モデル⁹⁾を修正し、MR ダンパのもつ Bingham 特性とヒステリシス特性の両方が記述できる次式のモデルを提案する。

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} + \sigma_b \dot{x} v \quad (5)$$

$$\dot{z} = \dot{x} - a_0 |\dot{x}| z \quad (6)$$

ここで、各パラメータの定義を以下示す。

- $\dot{x}$: シリンダ装着部速度 [m/s]
- z : 内部状態変数 [m] (Bristle の変位)
- σ_0 : 電圧に依存する z の剛性 [N/(m·V)]
- σ_1 : z の減衰係数 [N·s/m]
- σ_2 : 電圧 0V 時の粘性減衰係数 [N·s/m]
- σ_a : 電圧 0V 時の z の剛性 [N/m]
- σ_b : 電圧に依存する粘性減衰係数 [N·s/(m·V)]
- a_0 : 定数 [m⁻¹] (σ_a/F_c に対応)

ただし、 F_c はクーロン摩擦係数 [N] である。

このモデルの性質について触れておく。内部状態 z が初期条件 $|z(0)| \leq a_0$ を満たすならば、元の LuGre モデル⁹⁾と同様に解は有界領域 $\Omega = \{z(t) : |z(t)| \leq a_0\}$ に存在する。これは $V = (1/2)z^2$ とおき、 V の時間微分

$$\dot{V} = z\dot{z} = -|\dot{x}|z(a_0|z| - \text{sgn}(\dot{x})\text{sgn}(z)) \quad (7)$$

より明らかである。この z の飽和現象を利用することにより、ヒステリシス特性を記述できる。また、飽和後の $\dot{z} = 0$ となる領域において、

$$f = \text{sgn}\{\dot{x}\} F_c \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_a} v\right) + \sigma_2 \dot{x}_1 + \sigma_b \dot{x}_1 v \quad (8)$$

となり、従来の MR ダンパの静的モデルである Bingham 特性を含むことがわかる。

Fig. 3 Adaptive identification scheme incorporating with adaptive observer

さらに、つぎの特徴をもつ。

- (a) 摩擦モデルの性質から、すべてのパラメータは正。
- (b) 粘性減衰係数と入力電圧 v に比例関係をもつ。
- (c) $\dot{x} \rightarrow z$ の写像に関して、 $V = (1/2)z^2$ とおくと、元の LuGre モデル⁹⁾と同様にエネルギー消散性を満たす。

3.2 線形パラメトリック表現

提案モデル式 (5) を書き直すと、つぎの入出力関係で記述できる。

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v - \sigma_1 a_0 |\dot{x}| z + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x} + \sigma_b \dot{x} v \quad (9)$$

ここで、パラメータベクトル θ と回帰ベクトル φ を

$$\begin{aligned} \theta &= [\sigma_a \quad \sigma_0 \quad \sigma_1 a_0 \quad \sigma_1 + \sigma_2 \quad \sigma_b]^T \\ &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5]^T \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varphi = [z \quad zv \quad -|\dot{x}|z \quad \dot{x} \quad \dot{x}v]^T \quad (11)$$

と定義すると、(9) 式はつぎの線形パラメトリック表現

$$f = \theta^T \varphi \quad (12)$$

となる。ここで、未知パラメータ θ の推定値 $\hat{\theta}$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= [\hat{\sigma}_{0a} \quad \hat{\sigma}_{0b} \quad \widehat{\sigma_1 a_0} \quad \sigma_1 + \hat{\sigma}_{2a} \quad \hat{\sigma}_{2b}]^T \\ &= [\hat{\theta}_1 \quad \hat{\theta}_2 \quad \hat{\theta}_3 \quad \hat{\theta}_4 \quad \hat{\theta}_5]^T \end{aligned} \quad (13)$$

以上のモデル表現において、つぎの仮定をおく。

(i) 減衰係数 σ_1 の値は既知とする。 σ_1 の公称値は、パッチ処理による上の 5 個のパラメータ同定と σ_1 の同定とを交互に行なうことにより得られるので、実際にはこの公称値を利用すればよい。

(ii) 内部状態 z の推定値 $\hat{z}$ の有界性、すなわち $\hat{z} \in L_\infty$ を保証するために、上界値 $1/\hat{a}_{0\min}$ は既知とする。

4. MR ダンパモデルの適応同定

4.1 適応同定アルゴリズム

MR ダンパモデルの内部状態 z は測定できないので、回帰ベクトル φ をつぎの推定値 $\hat{\varphi}$ で置き換える。

$$\hat{\varphi} = [\hat{z} \quad \hat{z}v \quad -|\hat{x}|\hat{z} \quad \hat{x} \quad \hat{x}v]^T \quad (14)$$

ただし、 $\hat{z}$ は後述するように推定パラメータを利用した非線形オブザーバによって与える。このとき同定モデルの出力、すなわち減衰力の推定値は、

$$\hat{f} = \hat{\theta}^T \hat{\varphi} \quad (15)$$

で与えられる。ここで、推定誤差を次式で定義する。

$$\varepsilon = \hat{f} - f \quad (16)$$

推定値 $\hat{z}$ は、更新パラメータ $\hat{\theta}_3$ と同定誤差 ε とオブザーバゲイン L を用いて次式より計算する。

$$\dot{\hat{z}} = \hat{x} - \frac{\hat{\theta}_3}{\sigma_1} |\hat{x}| \hat{z} - L\varepsilon, \quad L \geq 0 \quad (17)$$

また、仮定 (i) より更新パラメータは、 $\hat{a}_0 = \hat{\theta}_3/\sigma_1$ により与えられる。付録に示すように、オブザーバゲイン L を用いなくとも所望の有界性が保証できるが、モデル化誤差などの補償を考慮し L を導入している。

さらに、正規化信号として、

$$N = (\rho + \hat{\varphi}^T \hat{\varphi})^{1/2}, \quad \rho > 0 \quad (18)$$

を導入し、各信号ベクトルを N で割ったものを $\hat{\varphi}_N = \hat{\varphi}/N$ とおく。特性 (b) より $z \in L_\infty$ 、仮定 (ii) より $\hat{z} \in L_\infty$ であり、 $v, \hat{x}$ が $v \in L_\infty, \hat{x} \in L_\infty$ を満たせば、正規化信号 N を用いることで $\varphi_N \in L_\infty$ および $\hat{\varphi}_N \in L_\infty$ となる。また、(16) と (18) より正規化推定誤差も同様に次式で定義する。

$$\varepsilon_N = \hat{f}_N - f_N \quad (19)$$

ただし、 $f_N = f/N$ 、 $\hat{f}_N = \hat{\theta}^T \hat{\varphi}_N$ とおいた。

以上の準備により、 $\varepsilon_N, \hat{\varphi}_N$ を用いた可変ゲイン型適応則は、次式となる。

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma \hat{\varphi}_N \varepsilon_N \quad (20)$$

$$\dot{\Gamma} = \lambda_1 \Gamma - \lambda_2 \Gamma \hat{\varphi}_N \hat{\varphi}_N^T \Gamma \quad (21)$$

ここで、各定数は次式の条件を満たすものとする。

$$0 \leq \lambda_1, \quad 0 \leq \lambda_2 < 2, \quad \Gamma(0) = \Gamma^T(0) > 0 \quad (22)$$

提案モデルの適応同定アルゴリズムの安定性については付録を参照されたい。本論文では、 λ_1, λ_2 の選択に際し、次式の固定トレース則を用いた。

$$\lambda_1 = \frac{\|\Gamma \hat{\varphi}_N\|^2}{\text{tr}\{\Gamma\}}, \quad \lambda_2 = 1 \quad (23)$$

得られた推定パラメータ $\hat{\theta}$ から各モデルパラメータが、

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_a &= \hat{\theta}_1, \quad \hat{\sigma}_0 = \hat{\theta}_2, \quad \hat{\sigma}_2 = \hat{\theta}_4 - \sigma_1, \\ \hat{\sigma}_b &= \hat{\theta}_5, \quad \hat{a}_0 = \hat{\theta}_3/\sigma_1, \end{aligned} \quad (24)$$

により求められる。提案ダンパモデルの特性 (a) と仮定 (ii) より推定パラメータの存在範囲は、

Fig. 4 Applied voltage and velocity in used experiment

$$0 \leq \hat{\sigma}_0, \quad 0 \leq \hat{\sigma}_2, \quad 0 \leq \hat{\sigma}_a,$$

$$0 \leq \hat{\sigma}_b, \quad 0 \leq \hat{a}_{0\min} \leq \hat{a}_0 \quad (25)$$

となることから、射影法を併用する。以上の提案アルゴリズムの概要を示した Fig. 3 から明らかなように、2 入力 1 出力系の適応同定を実現している。

4.2 適応同定実験

小型の MR ダンパ (LORD 社, RD-1097-01) を用いて適応同定実験を行なった。ただし、ダンパに接続した電流ドライバに不感帯が存在するために、低い入力電圧 (0.1[V] 以下) に対してのみ 3 乗の値を利用している。しかし Fig. 4 に示すように、このような電圧値をほとんど取ることが少ない場合には実際にはほとんど影響しない。レーザー変位計により MR ダンパの移動変位 x を測定し、動ひずみ測定器をダンパと直結するように設置して減衰力 f を測定した。 x と f の測定サンプリング周波数は 1kHz とした。同定対象は 2 入力 (速度 $\dot{x}$ 、電圧 v) 1 出力 (減衰力 f) 系であり、本実験で用いた入力速度 $\dot{x}$ と入力電圧 v の一例を Fig. 4 に示す。

(20)(21) 式で適応同定される推定パラメータベクトル $\hat{\theta}$ の収束状況を Fig. 5 に図示した。点線は、入出力データをバッチ処理して求めた最小二乗推定値であり、適応同定により各パラメータはこれらの値に収束することが確認された。さらに、 $\hat{\theta}$ を用いて計算される推定減衰力 $\hat{f}$ と実際のダンパ減衰力 f との推定誤差 $\varepsilon = \hat{f} - f$ を Fig. 6 に示した。図より、減衰力の推定誤差は $\pm 2 \sim 3$ [N] の範囲に収まっている。これは、推定誤差と減衰力の各 rms 値の比 0.64 [N]/ 23.9 [N] = 0.027 から、2.7% 程度の推定誤差である。

つぎに、本実験で用いた MR ダンパのヒステリシス特性を観測するために、振幅 1.5 [cm]、周波数 2.5 [Hz] の正弦波変位を加え、電圧を 0, 1.0, 1.25 V の 3 つの場合について測定を行なった。この測定より得られた Fig. 7(a)(b) より、速度 $\dot{x}$ とダンパ減衰力 f の関係においてヒステリシス特性をもつことが確認された。一方、提案モデルにおいて Table 1 に示すバッチ処理で求めた最小二乗推定値を用いた場合のヒステリシス特性を、同様に Fig. 8(a)(b) に示した。類似のヒステリシス特性が得られ、提案モデルとモデルパラメータの同定値

Fig. 5 Convergence profiles of identified model parameters

Fig. 6 Comparison of measured actual force f with estimated force $\hat{f}$

Table 1 Identified model parameters

Parameters	LS estimate	Initial values
σ_0 [N/m · V]	3.95×10^4	2.90×10^4
σ_1 [N · s/m]	0.131	-
σ_2 [N · s/m]	92.5	8.00
σ_a [N/m]	1.51×10^4	3.50×10^3
σ_b [N · s/(m · V)]	24.9	5.00
a_0 [m ⁻¹]	2.85×10^3	2.00×10^4

の妥当性が確認されたが、実測値に見られるようなロールオフ特性（ヒステリシス特性の中に現れるマイナーループ特性）が実現できていないことがわかる。しかし、非線形適応オブザーバを併用した適応同定アルゴリズムを適用した場合のヒステリシス特性は、Fig.9(a)(b)に示すように、実測結果と非常に近い特性が得られていることがわかる。これらの結果から提案したMRダンパモデルと適応同定アルゴリズムの妥当性が示された。

Fig. 7 Measured hysteresis characteristics of MR damper

Fig. 8 Estimated hysteresis characteristics of MR damper with fixed parameters obtained by the proposed adaptive identification

Fig. 9 Estimated hysteresis characteristics of MR damper with always updated parameters obtained by the proposed adaptive identification method

5. 適応ダンパコントローラを使用した振動制御

5.1 双線形 H_∞ 制御

双線形状態空間表現式 (3) に対して、一般化プラントを構成する。状態に対する周波数重み $W_1(s)$ と入力に対する周波数重み $W_2(s)$ を、それぞれ状態空間表現で、

$$W_1(s) \begin{cases} \dot{x}_w = A_w x_w + B_w y_p \\ z_w = C_w x_w + D_w y_p \end{cases} \quad (26)$$

$$W_2(s) \begin{cases} \dot{x}_u = A_u x_u + b_u c_d \\ z_u = c_u x_u + c_d \end{cases} \quad (27)$$

と実現する。新たな状態変数として、

$$x_s = [x_p^T \quad x_w^T \quad x_u^T]^T \quad (28)$$

を定義すると、一般化プラントは次式で記述される。

$$\dot{x}_s = Ax_s + b_1 \ddot{x}_g + b_2(x_s) c_d \quad (29)$$

$$z = \begin{bmatrix} l(x_s) z_w \\ a(x_s) z_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(x_s) C_{11} \\ a(x_s) c_{12} \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 \\ a(x_s) \end{bmatrix} c_d \quad (30)$$

ただし,

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ B_w C_p & A_w & 0 \\ 0 & 0 & A_u \end{bmatrix}, \quad b_1 = \begin{bmatrix} b_{p1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$b_2(x_s) = [b_{p2}^T(x_s) \quad 0^T \quad b_u^T]^T$$

$$C_{11} = [D_w C_p \quad C_w \quad 0], \quad c_{12} = [0 \quad 0 \quad c_u]$$

である。ここで、 $l(x_s)$ は状態 x_s に、 $a(x_s)$ は制御入力 c_d に対する非線形重みを表わし、 z は評価出力である。この一般化プラントに対して地震波外乱 $\ddot{x}_g$ から z までの L_2 ゲインが正定数 γ 以下となるような制御則を考える。 $c_u = 0$ とし、入力に対する重みを定数とすれば、(29)(30) 式に対してつぎのリカッチ不等式：

$$PA + A^T P + \frac{1}{\gamma^2} P b_1 b_1^T P + C_{11}^T C_{11} < 0 \quad (31)$$

を満たす正定対称行列 P が存在し、さらに非線形重み $l(x_s)$ 、 $a(x_s)$ が³

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{a^2(x_s)} - 1 \right) x_s^T P b_2(x_s) b_2^T(x_s) P x_s \\ & + (1 - l^2(x_s)) x_s^T C_{11}^T C_{11} x_s \geq 0 \end{aligned} \quad (32)$$

の制約を満たすならば、非線形 H_∞ 状態フィードバック制御則は次式で与えられる²³⁾。

$$c_d = - \left(\frac{1}{a^2(x_s)} b_2^T(x_s) P \right) x_s \quad (33)$$

ただし、 $m_0(x_s)$ は任意の正定スカラー値関数である。

ここで、非線形重みが

$$l(x_s) > 0, \quad l(0) = 1, \quad a(x_s) > 0, \quad a(0) = 1 \quad (34)$$

とし、さらに、

$$l(x_s) = \sqrt{1 + m_0(x_s) x_s^T P b_2(x_s) b_2^T(x_s) P x_s} \quad (35)$$

$$a(x_s) = \frac{1}{\sqrt{1 + m_0(x_s) x_s^T C_{11}^T C_{11} x_s}} \quad (36)$$

であれば、制約条件 (32) を満たす²³⁾。非線形重み $l(x_s)$ が状態 x_s が大きくなることによって $l(x_s) \geq 1$ となる場合には状態 x_s に対する重みが大きくなるので、より状態 x_s の変移を抑えるような制御が可能となる。

5.2 適応ダンパコントローラ

MR ダンパモデルの逆システムを実時間で構築することが前節で可能となったので、所望のダンパ減衰力 $f_d = c_d \dot{x}_1$ と実際のダンパ減衰力 f とが一致するような最適な入力電圧 v を決定することができる。入力を f_d 、出力を v とする適応ダンパ制御器において、(5)(6) 式の提案モデルから、次式で

Fig. 10 Quake-absorbing structure with MR damper

表現される。

$$\begin{aligned} n_1 &= \hat{\sigma}_{0b} \hat{z} + \hat{\sigma}_{2b} \dot{x}_1 \\ n_2 &= \begin{cases} n_1 & \text{for } n_1 < -\delta, \delta < n_1 \\ \delta \operatorname{SGN}(n_1) & \text{for } -\delta \leq n_1 \leq \delta \end{cases} \\ v_c &= \frac{f_d - \{\hat{\sigma}_{0a} \hat{z} - \sigma_1 \hat{a}_0 |\dot{x}_1| \hat{z} + (\sigma_1 + \hat{\sigma}_{2a}) \dot{x}_1\}}{n_2} \\ v &= \begin{cases} 0 & \text{for } v_c \leq 0 \\ v_c & \text{for } 0 < v_c \leq V_{\max} \\ V_{\max} & \text{for } V_{\max} < v_c \end{cases} \end{aligned} \quad (37)$$

ただし、 $\operatorname{SGN}(\cdot)$ は符号関数を表わし、 $\delta > 0$ はゼロ割りを防ぐために導入されたものであるが、理論的な決定法はなく実験条件に応じて定める。

5.3 MR ダンパを用いた免震制御実験

制御対象として Fig.1 を模擬する 4 層構造物を製作し、その実験装置図を Fig.10 に示した。入力地震波信号として El-Centro 地震波 N-S 成分と、0~20Hz の周波数成分をもつランダム加速度信号を使用した。また部分空間法と周波数域フィッティング法を併用する方法により、4 層構造物の周波数特性と物理パラメータを同定し、1 階および 4 階の同定された周波数特性を Fig.11 に与え、同定された物理パラメータを以下に示した。さらに、同定結果より得られた構造物の固有周波数と減衰定数を Table 2 にまとめた。

$$M_s = \begin{bmatrix} 1.38 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.27 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

$$C_s = \begin{bmatrix} 8.46 & -0.875 & 0 & 0 \\ -0.875 & 0.899 & -0.0240 & 0 \\ 0 & -0.0240 & 0.0817 & -0.0577 \\ 0 & 0 & -0.0577 & 0.0577 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

Fig. 11 Bode diagram of quake-absorbing structure

Table 2 Identified characteristics of structure

Mode	Natural frequency [Hz]	Damping factor
1st	1.62	0.024
2nd	4.55	0.043
3rd	7.42	0.025
4th	9.33	0.014

Fig. 12 Measured accelerations (solid line: proposed control method, dotted line: no damper)

Fig. 13 Quake-absorbing structure with MR damper

$$K_s = \begin{bmatrix} 2.21 & -1.32 & 0 & 0 \\ -1.32 & 2.42 & -1.10 & 0 \\ 0 & -1.10 & 2.27 & -1.17 \\ 0 & 0 & -1.17 & 1.17 \end{bmatrix} \times 10^3 \text{ N/m}$$

適応ダンパ制御器については、オブザーバゲインを $L = 0.05$ と設定した。双線形 H_∞ 制御器については、全状態に対する周波数重みをカットオフ周波数 20Hz の 1 次のローパスフィルタを設定し、入力に対する周波数重みは定数 1 と設定した。

本論文では、MR ダンパモデルの適応同定とそれに基づく双線形 H 無限大制御の効果を実験で検証するために、地震波の振動周波数帯と構造物の固有振動数とがオーバーラップする状況を取って設定した。そのため地震加速度波形をスケールリングすることにより、1.5~7.5[Hz] の範囲にパワーをもつようにした。そのため現実の地震波の周波数帯よりも低く構造物の固有周波数を設定する通常の免振制御系の設計とは必ずしも適合していないことを付記しておく。Fig.12 に、El-Centro 地震波を使用した際の 1 階と 4 階の応答加速度について、MR ダンパを使用しない免震構造物の場合と MR ダンパを設置して制御した場合の比較を示した。提案制御手法により、各階応答加速度の低減が図られていることが確認できる。

つぎに、提案手法の有用性を検証するために、ランダム加速度信号を使用し、(a) 免震層を設置しない従来構造物（免震層が完全に剛）、(b)MR ダンパを設置しない免震構造物、(c)MR ダンパを設置し電圧を 0V に固定、(d) 適応ダンパコントローラと双線形 H_∞ 制御を組み合わせた提案手法、について、各階加速度の RMS 値の比較を行ない、Fig.13 に示した。(a)(b) に比べて、MR ダンパを設置した (c)(d) では地震エネルギーを効果的に吸収することで上部構造への振動伝達を防いでいることがわかる。また、提案手法により MR ダンパの減衰特性を制御することで (c) より各階層の RMS 値を低減していることから、瞬時瞬時の振動特性に合わせた良好なパッシブシステムになっていると考えられる。MR ダンパの変位には上限があり、変位を大きくとれる場合には加速度の低減化が可能であり、両者の要求は両立しないが、本実験では MR ダンパの変位は各制御方式においていずれも可動範囲を越えないようにして比較実験を行なっている。

6. 結 論

本論文では、MR ダンパの新しいモデルを提案し、モデルパラメータを適応的に実時間で同定するアルゴリズムとそのモデルに基づいた構造物の免振制御法について提案し、実験によりその有効性を明らかにした。本論文で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 標準的な動的モデルである Bouc Wen モデルは 14 個のモデルパラメータを含み（ロールオフ特性を表わすにはさらに 3 個）、しかも非線形にパラメータ化されているため適応同定アルゴリズムでの実現は難しい。これに対して提案モデルは 6 個のモデルパラメータと非線形適応オブザーバを利用することにより、ヒステリシス特性とロールオフ特性をもつ減衰力を適応的に予測することが可能となり、所望の減衰力を生成するための入力電圧を解析的に計算できる特徴をもつ。
- (2) 所望の減衰力は MR ダンパのセミアクティブな特性を活かした双線形 H_∞ 制御器により生成することにより、整合性

のとれた統合化が実現できた。

(3) 提案モデルおよび制御方法の有効性を、MR ダンパの適応同定と4層構造物の免振制御の実験を通して確認した。

今後の課題として、構造物にも不確かさが存在する場合の適応セミアクティブ制御法の開発を考えている。

参 考 文 献

- 1) B. F. Spencer Jr., M. K. Sain, S. J. Dyke and J. D. Carlson: Phenomenological model of a magnetorheological damper, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, **123**-3, 230/238 (1997)
- 2) G. Yang: *Large-scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control*, The University of Notre Dame, Indiana (2001)
- 3) Gongyu Pan, Hiroshi Matshushita and Yoshihisa Honda: Analytical model of a magnetorheological damper and its application to the vibration control, *Proc. Industrial Electronics Conference*, **3**, 1850/1855 (2000)
- 4) R. Stanway, J. L. Sproston and A. K. El-Wahed: Application of electrorheological fluids in vibration control: A survey, *Smart Materials and Structures*, **5**-4, 464/482 (1996)
- 5) S-B. Choi and S-K. Lee: A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper, *Journal of Sound and Vibration*, **245**-2, 375/383 (2001)
- 6) L. Pang, G. M. Kamath and N. M. Wereley: Analysis and testing of a linear stroke magnetorheological damper, *AIAA Structural Dynamics and Materials Conference*, **4**, 2841/2856 (1998)
- 7) Xio Qing Ma, En Rong Wang, S. Rakheja and C.-Y. Su: Modeling hysteretic characteristics of MR-fluid damper and model validation, *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 1675/1680 (2002)
- 8) B. F. Spencer Jr.: *Reliability of Randomly Excited Hysteretic Structures*, Springer-Verlag (1986)
- 9) C. Canudas, H. Olsson, K. J. Åström and P. Lischinsky: A new model for control of systems with friction, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **40**-3, 419/425 (1995)
- 10) René Jiménez and Luis Alvarez: Real time identification of structures with magnetorheological dampers, *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 1017/1022 (2002)
- 11) S. J. Dyke, B. F. Spencer Jr., M. K. Sain and J. D. Carlson: Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, *Smart Materials and Structures*, **5**, 565/575 (1996)
- 12) 樋渡, 塩崎, 藤谷, 曾田: 最適レギュレータ理論を用いたMRダンパによるセミアクティブ免震, 日本建築学会構造系論文集, 567, 47/54 (2003)
- 13) 佐藤, 藤田: MR流体ダンパを用いたセミアクティブ免震構造, 日本機械学会2004年次大会講演論文集(6), 259/260 (2004)
- 14) 横山, J. K. Hedrick, 外山: セミアクティブサスペンションのスライディングモード制御, 日本機械学会論文集(C編), **67**-657, 449/454 (2001)
- 15) C. Y. Lai and W. H. Liao: Vibration control of a suspension systems via a magnetorheological fluid damper, *Journal of Vibration and Control*, **8**, 525/547 (2002)
- 16) 田中, 相馬, 渡辺, 背戸: MRダンパの非線形モデルを用いたセミアクティブ制御, 日本機械学会2004年次大会講演論文集(6), 261/262 (2004)
- 17) C-C. Chang and L. Zhou: Neural network emulation of inverse dynamics for a magnetorheological damper, *ASCE Journal of Structural Engineering*, **128**-2, 231/239 (2002)
- 18) 中谷, 白石, 森下: MRダンパを設置した構造物のニューラル

ネットワークによる制振, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集, **2002**, No. Pt. 3, 403/406 (2002)

- 19) 横山, 外山, 伊藤, 愛田: ニューラルネットワークを利用したセミアクティブサスペンション, 日本機械学会論文集(C編), **67**-663, 3405/3412 (2001)
- 20) 西村, 加山: MRダンパを用いたセミアクティブサスペンションのゲインスケジュールド制御, 日本機械学会論文集(C編), **68**-676, 3644/3651 (2002)
- 21) 吉田, 藤尾: 双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への応用, 日本機械学会論文集(C編), **67**-656, 992/998 (2001)
- 22) 三平, 大作, 上村: 非線形 H_∞ 制御理論の限界と可能性—セミアクティブサスペンションへの応用, システム/制御/情報, **43**-10, 544/554 (1999)
- 23) 清水, 久保田, 三平, 古賀: 双線形システムに対する非線形 H_∞ 状態フィードバック制御則の一設計法, 計測自動制御学会論文集, **35**-9, 1155/1161 (1999)

7. 付録: 適応同定アルゴリズムの収束性の証明(概要)

リアプノフ関数の候補として次式を考える。

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{c\sigma_1}{2} \tilde{z}^2, \quad V > 0, \quad c > 0 \quad (38)$$

ただし, $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$, $\tilde{z} = \hat{z} - z$ である。 V の時間微分を計算すると,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\tilde{\theta}^T \dot{\varphi}_N \varepsilon_N + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \dot{\varphi}_N \varphi_N^T \tilde{\theta} \\ &\quad - c\sigma_1 \tilde{z} \{ \hat{a}_0 |\dot{x}| \tilde{z} - a_0 |\dot{x}| z \} - \frac{1}{2} \lambda_1 \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \\ &= -\frac{1}{2} \lambda_1 \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} - \frac{1}{2} \varepsilon_N^2 - c\hat{z} |\dot{x}| \tilde{\theta}_3 \tilde{z} \\ &\quad - \frac{1}{2} \left\{ 2c\theta_3 |\dot{x}| - \frac{(\theta_1 + \theta_2 v - \theta_3 |\dot{x}|)^2}{N^2} \right\} \tilde{z}^2 \quad (39) \end{aligned}$$

ここで $0 < k_1 < 1$ 満たす定数 k_1 を用いて, (39) 式の右辺第一項を分割する。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{(1-k_1)}{2} \lambda_1 \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} - \frac{k_1}{2} \lambda_1 \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} - \frac{1}{2} \varepsilon_N^2 \\ &\quad - \frac{1}{2} \left\{ 2c\theta_3 |\dot{x}| - \frac{(\theta_1 + \theta_2 v - \theta_3 |\dot{x}|)^2}{N^2} \right\} \tilde{z}^2 \\ &\quad - c\hat{z} |\dot{x}| \tilde{\theta}_3 \tilde{z} \\ &\leq -\frac{(1-k_1)}{2} \lambda_1 \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} - \frac{1}{2} \varepsilon_N^2 \\ &\quad - \frac{1}{2} \left\{ 2c\theta_3 |\dot{x}| - \frac{(\theta_1 + \theta_2 v - \theta_3 |\dot{x}|)^2}{N^2} \right\} \tilde{z}^2 \\ &\quad - \frac{k_1 \lambda_1}{2\gamma_3} \tilde{\theta}_3^2 - c\hat{z} |\dot{x}| \tilde{\theta}_3 \tilde{z} \quad (40) \end{aligned}$$

さらに $k_2 = (1-k_1)\lambda_1$ を満たす定数 k_2 を導入し, $k_2 V$ を右辺で足し引きし, 平方完成を行なうと,

$$\dot{V} \leq -k_2 V - \frac{1}{2} \varepsilon_N^2 + \frac{1}{2} S(\dot{x}, v, \hat{z}, t) \tilde{z}^2 \quad (41)$$

が得られる。ただし, $S(\dot{x}, v, \hat{z}, t)$ は,

$$\begin{aligned} S(\dot{x}, v, \hat{z}, t) &= -2c\theta_3 |\dot{x}| + \frac{(\theta_1 + \theta_2 v - \theta_3 |\dot{x}|)^2}{N^2} \\ &\quad + \frac{c^2 \gamma_3 \hat{z}^2 \dot{x}^2}{k_1 \lambda_1} + ck_2 \sigma_1 \quad (42) \end{aligned}$$

で与えられる。

ここで $S(\dot{x}, v, \hat{z}, t)$ の値が負であれば, ε_N と $\hat{z}$ の L_2 特性が証明でき, 以下の収束特性が得られる.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_N = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{z} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0 \quad (43)$$

一方, $S(\dot{x}, v, \hat{z}, t)$ の値が正である場合については, 入力速度 $\dot{x}$ と入力電圧 v と内部状態 $\hat{z}$ が有界であるので, $S(\dot{x}, v, \hat{z}, t)$ の上界値 $S_{\max}$ が存在する. それゆえ,

$$\dot{V} \leq -k_2 V + \frac{1}{2} S_{\max} \left(\frac{1}{a_0} + \frac{1}{\hat{a}_{0\min}} \right)^2 \quad (44)$$

を満たし, リアプノフ関数は以下の V_0 の領域内に留まる.

$$V_0 = \frac{1}{2k_2} S_{\max} \left(\frac{1}{a_0} + \frac{1}{\hat{a}_{0\min}} \right)^2 \quad (45)$$

[著者紹介]

坂井 千春

2003年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒, 同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程2年在学中.

寺澤 崇

2004年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒, 同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程1年在学中.

佐野 昭 (正会員)

1966年東京大学工学部計数工学科卒業. 71年同大学大学院工学系研究科博士課程計数工学専攻修了. 工学博士. 同年慶應義塾大学工学部電気工学科助手. 現在同大学理工学部システムデザイン工学科教授. 適応制御, システム同定とモデリング, 音と振動の制御, 移動体通信, デジタル信号処理論とその応用などの研究に従事.