マルチデシメーション同定法を用いたロバスト制振制御のための柔軟構造物のモデリング手法

正員 橋本 誠司* 正員 石川 赴夫*
 正員 足立 修一** 正員 船渡 寛人**
 正員 神山 健三** 非会員 磯島 彰宏***

Multi-Decimation Identification-Based Modeling Method of Flexible Structures for Robust Vibration Control

Seiji Hashimoto*, Member, Takeo Ishikawa*, Member, Shuichi Adachi**, Member, Hirohito Funato**, Member, Kenzo Kamiyama**, Member, Akihiro Isojima***, Non-member

In high performance active vibration control for a flexible structure, it is requirement to establish an accurate model identified not only 1st but also 2nd and 3rd vibration modes of the flexible structure. This paper presents the derivation method of a modal model of flexible structures based on the advanced system identification theory. In this identification, multi-decimation (MD) operation is applied to identify wide frequency region in a short vibration time accurately. By using circle curve fitting on each identified mode, one modal model can be derived from MD identified models. We apply the proposed identification method to the three-story structure, and we show the effectiveness of the proposed method through both the identification and the vibration control experiments.

キーワード：柔軟構造物，マルチデシメーション同定法，サークルカーブフィッティング，モードモデル，ロバスト制振制御
Keywords: flexible structure, multi-decimation identification, circle curve fitting, modal model, robust vibration control

1. はじめに

近年，高層ビルや橋梁などの構造物は，特に軽量化や長大化に起因し柔軟化する傾向にある。その結果，風や地震などの外乱に対する構造物の振動問題が顕在化し，これが居住者への不快感をもたらしたり安全性を脅かしたりする原因となっている。この振動を抑制するためのアクティブ制振技術の実用化研究が現在盛んに行われている^{(1)~(8)}。

また，最近では制御技術の向上や更なる超高層インテリジェントビルの出現に伴い多モード制振⁽⁹⁾の要求が高まっ

てきている。したがって，多モード制振を目的に制御系を設計するためには，広い周波数帯域にわたる高精度な構造物の数学モデルが必要不可欠となる。

構造物の振動特性に対する実験同定手法として実験モード解析法や正弦波掃引法が従来より用いられているが，高精度な同定のためには長時間の加振時間が必要となり，実構造物を対象とした場合には同定対象への負荷が大きく危険性を伴う。これに対し，近年，実験時間や同定精度において有利なモデリング手法としてシステム同定法が注目されている。特に，マルチデシメーション⁽¹⁰⁾（以下 MD と略記）を用いた同定法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は，短時間の加振実験で低域から高域まで高精度に同定することができる有効な手法である。しかし，MD 同定法では特定の周波数帯域でのみ高精度な離散モデルが複数個導出されるため，制御系の設計にはそのまま適用できない。

そこで本研究では，制振制御系の設計に適した MD 同定法に基づく柔軟構造物のモード特性導出法を提案する。ここでは柔軟構造物に対して MD 同定法を適用し，次に同定したモデルに対してサークルカーブフィッティング法を適用することにより，複数個の MD 同定モデルを広帯域にわ

* 群馬大学
 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1
 Gunma University
 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu, Gunma 376-8515
 ** 宇都宮大学
 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2
 Utsunomiya University
 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585
 *** (株)日立製作所
 〒312-8506 茨城県ひたちなか市市毛 1070
 Hitachi, Ltd.
 1070, Ichige, Hitachinaka, Ibaraki 312-8506

たり高精度な1つの合成モデルとして導出することが可能となることを示す。また、本手法では一度の短時間での加振実験で低次モードから高次モードまで精度良いモード特性が導出可能であることをシミュレーション及び同定実験により示す。さらに、導出したMD同定モデルおよびモードモデルがロバスト制御理論に基づく多モード制振制御に適していることを実験により検証する。

2. MD同定に基づくモード特性導出法

2.1 システム同定実験 はじめに、柔軟構造物に対する同定実験を行う。構造物に設置された制振用アクチュエータで構造物を加振し各層の変位を観測する。入力信号は、同定したい周波数帯域に対し十分広い周波数を励起できる信号とする。また高域情報の損失を防ぐため、可能な限り短いサンプリング周期で入出力信号を測定する。

2.2 MD同定 最小二乗法により十分な精度の同定が行える周波数帯域 ω_i (rad/s) は、サンプリング周期 T の信号に対して

$$\frac{2\pi}{100T} \leq \omega_i \leq \frac{2\pi}{5T} \dots\dots\dots (1)$$

の1 decade 余りとされている⁽¹²⁾。そのため、特定のサンプリング周期の信号を用いた場合、注目したい対象の周波数帯域と精度良い同定周波数帯域が異なるという問題や、十分に広い帯域を高精度に同定できないという問題が生じる。何種類ものサンプリング周期を用いて実験をおこなえばこの問題は解決できるが、長時間実験を繰り返すことになり現実的ではない。

そこで、ここではマルチデシメーションを用いる。デシメーションとは、あるサンプリング周期 T をもつ離散信号に対して帯域 π/d のローパスフィルタを用い、さらに信号を $(d-1)$ 個おきに間引くことにより、それよりも長いサンプリング周期 dT をもつ離散信号に変換する信号処理である。ここで、 d はデシメーションの次数であり $d \geq 1$ である。一組の実験よりえられる入出力データに対し適切な次数でこれを複数個繰り返すことでそれぞれの帯域 ω_{id}

$$\frac{2\pi}{100dT} \leq \omega_{id} \leq \frac{2\pi}{5dT} \dots\dots\dots (2)$$

に対し精度良い周波数特性がえられる。すなわち、複数個のデシメーションを施すことで、一つの同定実験データに対し異なる同定条件が設定でき、一度の実験で広い周波数帯域を精度良く同定することが可能となる。

MD同定法を柔軟構造物に適用しようとする場合には、特に振動モードに着目する必要がある。そのため、各振動モード毎に(1)式の周波数帯域を満たすよう入出力信号をサンプリングする必要がある。そこで、 k 次振動モードに対するデシメーションの次数 d_{kth} を次のように決定する。図1に示すように(1)式の周波数帯域の上限 $2\pi/(5d_{kth}T)$ を各反共振周波数と一致させ、各振動モードとその近傍が(1)式で示される精度よい同定周波数帯域内に存在するよう設定する。これにより、すべての振動モードを高精度に

図1 次数 d_{kth} の決定法

Fig. 1. Decision of order d_{kth} .

同定することが可能となる。

n 次モードまで考慮した n 層モデルの場合には、第 j 層への入力から第 i 層出力までの入出力信号に対して n 回デシメーションを行うため、入出力信号は n 組となり n 個の同定モデル $\{G_{ij}^{1st}, G_{ij}^{2nd}, G_{ij}^{3rd}, \dots, G_{ij}^{nth}\}$ が導出される。これを n 層分繰り返すことにより、 $n \times n$ 個の同定モデルがえられる。本論文では、同定モデルとして擬似線形回帰モデルである ARMAX (Auto-Regressive Moving Average eXogenous) モデル、パラメータ推定法として予測誤差法(最小二乗法)⁽¹³⁾を用いるものとする。

2.3 サークルカーブフィッティングによるモード特性導出 前述したように、MD同定法によりえられるモデルは複数個となるため、制御系設計用モデルとして扱うのは困難である。したがって、ここではそれぞれの同定モデルの周波数応答に基づき各モード特性を導出し、モードの重ね合わせにより複数個の同定モデルを一つのモデルに合成する手法を提案する。モード特性の導出法としては、サークルカーブフィッティング法⁽¹⁴⁾を用いる。手順はMD同定モデルを連続時間モデルに変換し、等間隔な周波数でナイキスト線図をかく。各振動モード近傍の信号は複素平面上で円となるため、この周波数応答にもっとも適合する円を最小二乗法によりフィッティングし、モード特性(固有周波数 ω , 減衰率 ζ , 固有モード ϕ)を導出する。すなわち、前節で求めたMD同定モデル G_{ij}^{kth} の精度良い k 次モードの円のみに対してサークルカーブフィッティング法を適用することにより、第 i 層に対するモード特性が導出できる。この操作を各層に対して行えば、すべてのモード特性を求めることができる。本手法では各モード毎に信頼できるMD同定モデルを用いるため、すべてのモードに対して精度の高いモード特性の導出が可能となる。

その結果、モードの重ね合わせにより、次式のように合成されたモードモデルが導出できる。

$$G_{ij}(s) = \sum_{m=1}^n \frac{\phi_{mi}\phi_{mj}}{s^2 + 2\zeta_m\omega_m s + \omega_m^2} \dots\dots\dots (3)$$

これまでに示したMD同定法の手順を図2に示す。柔軟構造物の同定モデルは一般に高次となるが、ここで導出したモードモデルは複数個のMDモデルを1個に合成できる

図 2 MD 同定法の流れ

Fig. 2. Procedure of MD-based identification.

ことに加え, (3) 式のように各モードに分離できるため, 高次モード項を省略するだけで制御に適した低次元なモデルをえることも可能となる。

3. 柔軟構造物への MD 同定法の適用

本章では, 柔軟構造物を模擬した実験装置に本手法を適用することによりその有効性を検証する。

3.1 システム同定実験 本実験で用いた実験装置の構成と, その部材特性より導出した物理パラメータを図 3 に示す。図中 m, k, c は質量, ばね定数および減衰係数を表し, 添字は層を示す。各層には位置 u を検出するための変位センサ (比例定数: 0.2 V/mm) が, また, 第 3 層には制振および同定のためのアクチュエータが設置されている。アクチュエータには電流制御付きボイスコイルモータを用いており, 入力信号 $f_c \text{ (V)}$ により負荷質量 m_a を駆動し, 入力信号に比例した力 (比例定数: 0.6 N/V) を印加する。

部材特性より導出される物理パラメータは, 接合や質点近似に起因する不確かさを有する。従って, より厳密な物理パラメータの導出が必要となる場合には, 減衰係数とあわせ実験的な手法により再調整するのが一般的である。今回提案する実験的手法も, その一つと考えることができる。

この実験装置に対してまずシステム同定実験を行った。入力信号としては擬似白色性 2 値信号である M 系列信号をアクチュエータより印加し, 出力信号は 1 層, 2 層, 3 層の変位センサにより検出した。データ数は 4,096 個, サンプルング周期 3 ms (加振時間は約 12 s) とした。サンプルング周期は, 3 次モードの周波数帯域を精度良く同定できるよう決定した。

3.2 MD 同定 検出した 3 組の入出力信号に対して前章で示した方法でリサンプリングを行う。1 次, 2 次, 3 次モードを考慮し, 観測したサンプルング周期 $T = 3 \text{ ms}$ の 3 組の入出力信号をそれぞれ表 1 に示すデシメーションの次数でリサンプリングする。ここではデシメーションと

$$m_1: 1.74 \text{ kg} \quad m_2: 1.65 \text{ kg} \quad m_3: 2.34 \text{ kg}$$

$$m_a: 0.047 \text{ kg} \quad k_1, k_2, k_3: 9233 \text{ N/m}$$

図 3 3 層構造物を模擬した実験装置

Fig. 3. Experimental setup.

 表 1 デシメーションの次数 d_{kth}

 Table 1. Orders of decimation d_{kth} .

	G_{13}^k	G_{23}^k	G_{33}^k
1 st mode G_{ij}^{1st}	$d_{1st} = 7.9$	$d_{1st} = 6.9$	$d_{1st} = 6.7$
2 nd mode G_{ij}^{2nd}	$d_{2nd} = 3.9$	$d_{2nd} = 4.9$	$d_{2nd} = 3.7$
3 rd mode G_{ij}^{3rd}	$d_{3rd} = 1$	$d_{3rd} = 1$	$d_{3rd} = 1$

 (a) $d_{3rd} = 1, T = 3 \text{ ms}$

 (b) $d_{2nd} = 3.7, T = 11.1 \text{ ms}$

 (c) $d_{1st} = 6.7, T = 20.1 \text{ ms}$

図 4 入出力データに対するデシメーション処理

Fig. 4. Input-output data with/without decimation.

インターポレーションを用いることにより d_{kth} を小数値としてリサンプリングした。

各層の入出力信号に対して 1 次モード, 2 次モード近傍も精度良い同定が行えるよう 2 回デシメーションを施した。したがって, 合計 9 組の入出力信号となる。第 3 層に対する入出力信号とそれにデシメーションを施した信号を図 4 に示す。デシメーションの次数が大きくなるに従い, 高域の情

図 5 MD 同定モデルとモードモデルのゲイン線図

Fig. 5. Gain plots of MD identification model and modal model.

表 2 MD 法を用いた場合と用いない場合の同定結果の比較

Table 2. Identified mode parameters with/without MD method.

	with MD	without MD	error [%]
ω_{1st} [rad/s]	25.92	25.67	0.965
ζ_{1st}	0.008622	0.01300	50.8
ω_{2nd} [rad/s]	76.18	75.87	0.410
ζ_{2nd}	0.01051	0.01021	2.85
ω_{3rd} [rad/s]	118.1	137.38	16.3
ζ_{3rd}	0.01749	0.1153	560

報を犠牲にし、低域の情報を抽出しているのが確認できる。これらの信号に対してシステム同定法を用いて 9 個のモデル $\{G_{13}^{1st}, G_{13}^{2nd}, G_{13}^{3rd}, G_{23}^{1st}, G_{23}^{2nd}, G_{23}^{3rd}, G_{33}^{1st}, G_{33}^{2nd}, G_{33}^{3rd}\}$ を導出する。モデルは ARMAX モデル、次数は 4~30 次、パラメータ推定法は予測誤差法を用いた。図 5 に、MD 同定した 9 個のモデルの、それぞれの精度良い帯域での周波数特性を示す。3 層構造物において重要となる 3 つの振動モードがよく同定できていることが確認できる。

次に、MD 同定法の有効性を検証するために原信号にそのままシステム同定を適用した結果と MD 同定を適用した結果のモード特性を比較する。表 2 に同定モデルよりえられた各モード特性値と MD 同定値に対する MD 同定なしの値の誤差率を示す。原信号にそのままシステム同定を適用した場合には、3 次モードがよく同定できていないこと、1 次モードの減衰率が 2 次モードより大きくなっていることが確認できる。

さらに、共振周波数より低い周波数帯域での特性を比較するためにフーリエ解析を行った結果を示す。図 6 に一例として u_3/f_c に対するそれぞれの周波数特性を示す。デシ

図 6 MD 同定結果とフーリエ解析の比較

Fig. 6. Comparison of gain plots for several identification methods.

図 7 3 層構造物のナイキスト線図

Fig. 7. Nyquist plot of three-storied structure.

メーションを施さずにシステム同定を行った場合には予測誤差法に起因する高域重みの特性⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾から、低域でフーリエ解析結果と誤差が生じる。しかしながら、MD 同定法では低域においてもフーリエ解析と比較的に良く一致しており、このことから MD 同定法の有効性が確認できる。伝達特性 u_1/f_c 、 u_2/f_c に対しても同様の結果がえられた。

3.3 サークルカーブフィッティングによるモード特性導出 導出した 9 個の MD 同定モデルに対し、サークルカーブフィッティングを適用することによりモード特性を求める。例として、第 3 層に対する 3 つの同定モデル $\{G_{33}^{1st}, G_{33}^{2nd}, G_{33}^{3rd}\}$ に対しフィッティングした時のナイキスト線図を図 7 に示す。同図に示すように、ナイキスト線図は 1 次モードに対する外側の円、2 次モードに対する中側の円、3 次モードに対する内側の円の合計 3 つの円となる。

ここでは共振周波数は、 $\omega_{1st} = 25.92$ 、 $\omega_{2nd} = 76.18$ 、 $\omega_{3rd} = 118.1$ 、減衰率は、 $\zeta_{1st} = 8.622 \times 10^{-3}$ 、 $\zeta_{2nd} = 1.051 \times 10^{-2}$ 、 $\zeta_{3rd} = 1.749 \times 10^{-2}$ 、また固有モード行列 ϕ (質量正規固有モード) は

$$\phi = \begin{bmatrix} 1.528 & -5.067 & 3.942 \\ 2.711 & -2.630 & -6.153 \\ 3.207 & 3.127 & 2.263 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

図 8 モデル出力と実験出力の比較

Fig. 8. Comparison of model output and experimental output.

となった。以上のモード特性より、(3) 式に示す合成したモードモデルが求まる。図 5 にモードモデルの周波数特性を重ねて示す。モードモデルの周波数特性は MD 同定モデルと比較して各振動モードでよく一致していることが確認できる。また、一つのモードに対して MD 同定モデルは 4~30 次であるのに対し、3 つのモードを合成したモードモデルは 6 次であり、低次でも精度良い同定が可能となる。

次に、導出したモードモデルを時間領域において評価する。図 8 に検証用入力信号を印加したときのモードモデルの出力と実際の実験出力を示す。比較的良く一致していることから、構造物の特性を良く近似したモデルであることが確認できる。

4. モードモデルを用いたロバスト制振制御系の設計

はじめに、同じ入出力データからマルチデシメーションを施さずに 3 層モデルを同定し、以下で述べる設計仕様を満たすような 3 次モードまでの制振を目的とした $\mathcal{H}_\infty$ コントローラを設計した。このコントローラを用い、1 次モードの正弦波加振実験を行ったときの 3 層変位の時間応答波形を図 9 に示す。制御系は発散してしまっているが、通常の手法でシステム同定をおこないロバストコントローラを設計するだけでは 3 次モードまでの制振が困難であることが確認できる。

本章では、提案するモデル同定法の有効性を示すために、導出した MD モデルとモードモデルを用いたロバスト制振制御系の設計法を示す。制御入力図 3 で示したアクチュエータへの入力電圧 f_c であり、観測出力は 3 層変位 u_3 とする。

図 5 の点線で示される MD モデルは、マルチデシメー

図 9 1 次モードの加振実験結果

Fig. 9. Experimental results for 1st mode excitation.

ションにより各モードが精度良く同定できていることから、ここでは真のプラント P と仮定する。また、図 5 の実線で示される MD モデルの各モードを重ね合わせたモードモデルを次式の制御系設計用ノミナルプラント P_n と仮定する。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_p x + B_p f_c \\ u_3 &= C_p x \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、各係数行列は 3・3 節で導出した値を用い、

$$\begin{aligned} A_p &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\omega_{1st}^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_{2nd}^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_{3rd}^2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2\zeta_{1st}\omega_{1st} & 0 & 0 \\ 0 & -2\zeta_{2nd}\omega_{2nd} & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta_{3rd}\omega_{3rd} \end{bmatrix} \\ B_p &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} \end{bmatrix}^T \\ C_p &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

このとき加法的不確かさ Δ_a は $\Delta_a = P - P_n$ により導出でき、そのゲイン線図を図 10 に示す。提案する同定法では、複数モデルであるが各モードに対して同定精度の良い MD モデルと、モードの重ね合わせにより近似したモードモデルが導出可能であるため、ロバスト制御理論に適したモデル構築手法といえる。

ここでは、設計仕様を次のように与える。

- (s1) 各モードに対してスピルオーバー不安定を回避する。
- (s2) 各振動モードでの振動低減率を、1st mode: -20 dB, 2nd mode: -10 dB, 3rd mode: -5 dB とする。

仕様 (s1) を満たすよう重み関数 W_T をここでは次のように決定した。

$$W_T(s) = \frac{K_T(1 + T_{T1}s)}{1 + T_{T2}s} \quad (6)$$

ここで、 $K_T = 0.00127$, $T_{T1} = 10$, $T_{T2} = 0.05$ である。

図 10 不確かさに対する重み関数

Fig. 10. Gain plots of uncertainty and weighting function.

図 11 一般化制御対象

Fig. 11. Block diagram of control system.

図 10 に W_T のゲイン線図を示す。仕様 (s_2) に対しては、直流に近い振動に対してアクチュエータがドリフトしないよう、また各振動モードでの振動低減率が仕様を満たすよう重み関数 W_S を次のように決定した。

$$W_S(s) = \frac{K_S(1 + T_{S1}s)}{1 + T_{S2}s} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $K_S = 1$, $T_{S1} = 0$, $T_{S2} = 0.005$ である。 P_n および W_S のゲイン線図を図 12 に示す。

H_∞ コントローラ設計にあたっての、重み関数を含む一般化制御対象を図 11 に示す。図 11 において u はアクチュエータへの制御入力、 y は 3 層位置、 w は外生入力であり、また z はコントローラ設計にあたっての仮想的な評価出力である。このような条件の基で制御系設計用 CAD である MATLAB の LMI Control Toolbox⁽¹⁶⁾ を用いコントローラ導出のための γ イタレーションを行った。その結果 $\gamma = 1.0$ となり、表 3 に示す極、零およびゲインを持つ 8 次の H_∞ コントローラがえられた。図 12 にコントローラを含む閉ループ系 y/w_1 のゲイン線図を太線で示す。仕様を満たすコントローラが設計され、各モードでの伝達ゲインが 1 未満となっていることが確認できる。

MD モデルおよびモードモデルを用いて設計した制振制御系の有効性を示すために、ここでは歴史的な地震波であ

表 3 H_∞ コントローラの極・零・ゲイン

Table 3. Parameters of the designed H_∞ controller.

gain	zero	pole
-528.0	-2.269	-0.04723
	-21.05	-19.75
	-66.87	-197.3
	$-6.736 \pm j 72.36$	-200.0
	$-2.010 \pm j 115.8$	$-7.061 \pm j 71.06$
		$-1.983 \pm j 113.0$

図 12 重み関数と閉ループ系の周波数特性

Fig. 12. Gain plots of weighting function and closed-loop transfer function.

図 13 エルセントロ地震波に対する時間応答特性

Fig. 13. Time response of u_3 to typical El Centro NS earthquake.

るエルセントロ NS 地震波を用いて実験検証をおこなった。図 13 に地震波を印加した時の制振制御あり、制振制御なしでの 3 層出力の時間応答波形を示す。図 13 より、複数の周波数成分を含む地震波に対してもスピルオーバー不安定となることなく、制振制御が達成できていることが確認できる。

また、各モードに対する振動低減率を確認するためにモード加振実験をおこなった。図 14 に各振動モードを正弦波により加振したときの制振制御あり、制振制御なしでの定後の時間応答波形を示す。図 14 より 1 次および 2 次モードに対してはほぼ仕様を満たしており、また 3 次モードにおいては仕様を完全には満たしていないが、不安定化することなく制振可能となることが確認できる。これにより、提案する同定モデルの精度と、それにより導出した不確かさが信頼できるものであることが確かめられる。

図 14 モード加振実験に対する時間応答特性

Fig. 14. Time response to mode excitation experiment.

5. まとめ

本稿では、一度の短時間での同定実験で低域から高域までの振動モードを高精度に同定できる手法を提案した。ここでは MD 同定法を適用し、かつ MD 同定によりえられた複数のモデルからサークルカーブフィッティングによりモード特性を導出し重ね合わせることで、制御系設計に適した一つの低次元なモードモデルが導出可能となることを示した。

また、導出した MD 同定モデルとモードモデルより容易に不確かさが導出できるため、ロバスト制振制御系に適した同定法であるといえる。提案したモデリング手法の有効性を柔軟構造物を模擬した実験装置を用い、高次モードにわたるロバスト制振制御実験により検証した。

(平成 15 年 5 月 15 日受付, 平成 15 年 11 月 25 日再受付)

文 献

- (1) H. Nishimura: "Control Design for Active Vibration Suppression and Vibration Isolation of Structural Systems", *1998 National Convention Record IEEJ*, S.24-1 (1998) (in Japanese)
西村秀和:「構造系のアクティブ制振・免振のための制御系設計」, 平成 10 電気学会全大, S.24-1 (1998)
- (2) H. Nishimura, K. Nonami, and O. Nakada: " $\mathcal{H}_\infty$ Control with Pole Assignment in a Specified Region for Multi-Degree-of-Freedom Structure Using Active Dynamic Vibration Absorber", *Trans. of JSME(C)*, Vol.61, No.584, pp.87-94 (1995) (in Japanese)
西村秀和・野波健蔵・中田 修:「アクティブ動吸振器による多自由度構造物の極配置領域指定 $\mathcal{H}_\infty$ 制御」, 日本機械学会論文集 C, 61, 584, pp.87-94 (1995)
- (3) M. Shimakage, A. Moran, M. Nagai, and M. Hayase: "Design of Vibration Suppression $\mathcal{H}_\infty$ Control System for High-Rise Buildings", *Proc. of International Power Electronics Conference (IPEC-Yokohama'95)*, Vol.1, pp.464-469 (1995)

- (4) H. Amano and K. Nonami: " $\mathcal{H}_\infty$ Vibration Control of Flexible Truss Structure by Control Momentum Gyro", *Proc. of the Third International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC-Chiba'96)*, pp.268-273 (1996)
- (5) H. Kagaya, T. Tamaki, and Y. Suzuki: "Experimental Study on Active Seismic Response Control of Full-Scale Steel Structure Using $\mathcal{H}_\infty$ Control", *Proc. of the 5th Symposium on MOVIC*, pp.78-81 (1997)
- (6) Y. Nakagawa, Y. Koike, K. Nonami, K. Iwamoto, K. Tanida and T. Suzuki: "Robust Control of Flexible Structure Using μ -Synthesis with Description Form", *Trans. of JSME(C)*, Vol.64, No.618, pp.57-63 (1998) (in Japanese)
中川裕介・小池裕二・野波健蔵・岩本浩祐・谷田宏次・鈴木寿幸:「ディスクリプタ μ 設計を適用した柔軟構造物のロバスト制御」, 日本機械学会論文集 C, 64, 618, pp.57-63 (1998)
- (7) A. Forrai, S. Hashimoto, H. Funato, and K. Kamiyama: "Structural control technology—System identification and control of flexible structures", *Computing and Control Engineering Journal*, Vol.12, No.6, pp.257-262 (2001)
- (8) S. Hashimoto, S. Adachi, and H. Funato: "Derivation of Modal Parameters of a Flexible Structure based on the Multi-Decimation Identification Method", *Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2002)*, Vol.2, pp.436-440 (2002)
- (9) W. Gawronski: "Balanced Control of Flexible Structures", Springer (1996)
- (10) P.P. Vaidyanathan: "Multirate Systems and Filter Banks", PTR Prentice Hall (1992)
- (11) S. Adachi, J. Oaki, and T. Shigemasa: "System Identification by Multi Decimation—Identification Experiments for Robot Arm", *Trans. of SICE*, Vol.26, No.9, pp.1029-1035 (1990) (in Japanese)
足立修一・大明準治・重政 隆:「デシメーションを複数個用いたシステム同定法—ロボットアームの同定実験への適用」, 計測自動制御学会論文集, 26, No.9, pp.1029-1035 (1990)
- (12) 足立修一:「ユーザのためのシステム同定理論」, 計測自動制御学会編, コロナ社 (1993)
- (13) L. Ljung: "System Identification—Theory for the user: second edition", Prentice Hall PTR (1999)
- (14) A. Nagamatsu: Introduction to Modal Analysis, Corona Publishing Co., LTD. (1993) (in Japanese)
長松昭男:「モード解析入門」, コロナ社 (1993)
- (15) L. Ljung and T. Glad: "Modeling of Dynamic Systems", PTR Prentice Hall (1994)
- (16) P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, and M. Chilali: "LMI Control Toolbox User's Guide", The Mathworks, Inc. (1995)

橋本 誠 司 (正員) 1971 年 12 月 19 日生。1999 年宇都宮大学大学院工学研究科博士課程修了。1996 年～1999 年日本学術振興会特別研究員。2000 年より小山工業高等専門学校機械工学科助手, 2002 年より群馬大学工学部助手, 現在に至る。博士(工学)。主にシステム同定・制御理論の産業分野への応用に関する研究に従事。2003 年 IEEE IES Best Presentation Award 受賞。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE 会員。

石川 赴 夫 (正員) 1956 年 1 月 1 日生。1983 年東京工業大学博士後期課程修了。工学博士。同年群馬大学工学部電気工学科助手。助教授を経て, 現在同大学電気電子工学科教授。1998 年 IEEE Trans. VT 論文賞, IEEE CEFC 2002 論文賞受賞。電気機器, パワーエレクトロニクスなどの研究に従事。IEEE, 日本シミュレーション学会会員。

足立修一（正員）1957年10月19日生。1986年慶應義塾

大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年（株）東芝入社，総合研究所に勤務。1990年宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授，2002年同教授，現在に至る。1993～1996年航空宇宙技術研究所客員研究官を兼務。2003～2004年ケンブリッジ大学工学部客員研究員。システム同定・制御理論と，それらの産業応用に関する研究に従事。1993年SICE創立30周年記念著述賞1等受賞。1998年日本機械学会賞（論文）受賞。計測自動制御学会，日本機械学会，IEEEなどの会員。

船渡寛人（正員）1964年2月26日生。1989年3月横浜国

立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年4月東京電力（株）入社。1995年3月横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了。同年4月宇都宮大学工学部電気電子工学科助手。2001年1月同大学助教授，現在に至る。パワーエレクトロニクスの電力分野への応用，パワーエレクトロニクス回路の制御，新エネルギーに関する研究に従事。博士（工学）。平成6年度，平成8年度電気学会論文発表賞受賞。パワーエレクトロニクス学会，計測自動制御学会，IEEE会員。

神山健三（正員）1936年3月12日生。1961年3月早稲

田大学大学院修士課程修了。同年4月（株）日立製作所入社，モータドライブの開発設計に従事，1991年3月退社。1991年4月より宇都宮大学工学部教授，2001年3月退官。工学博士。パワーエレクトロニクス，モータドライブ及びアドバンスト制御の研究と教育に従事。IEEE Fellow。電気学会，計測自動制御学会などの会員。

磯島彰宏（非会員）1976年12月2日生。2001年宇都宮

大学工学研究科修士課程修了。同年4月日立製作所入社，現在に至る。在学中，主として柔軟構造物のモデリング手法およびアクティブ制振制御法に関する研究に従事。