原著論文

Mamdani 推論法に基づく複数モード振動のロバスト制御†

楨原 幹十郎 *1・黒石 千香子 *2・福永 久雄 *1

宇宙空間では宇宙機の姿勢・高度制御やドッキングなどにより構造物に様々な振動が発生する。打ち上げ軽量化の為に柔軟構造にならざるを得なく、真空中では振動が減衰しにくいので、宇宙構造物の振動問題は深刻である。宇宙構造物では、電力も限られている為、地上構造物のような多様な入力エネルギーを用いる制御は受け入れられない。そのため、低エネルギー消費の振動制御として、構造物に取り付けた圧電素子をつないだ電気回路を活用するスイッチング型セミアクティブ手法は魅力的である。スイッチング型セミアクティブ振動制御では電気回路の選択スイッチを切替えるだけで、高い振動制御効果を達成できるからである。その反面、スイッチ切り替えのタイミングが非常に重要である。スイッチングタイミングを決定する一つの手法として閾値法が提案されたが、ロバスト性が低いという欠点があった。そこで、その閾値法を用いたセミアクティブ振動制御のロバスト性を高める目的で、スイッチング型セミアクティブ制振手法にファジィ理論のMamdani 推論法を導入した。しかも、従来の閾値法では別途必要であった変位センサを不要にしたセンサレス制御系の構築にも成功した。アクチュエータとして機能している圧電素子にセンサの機能を追加付与した、CFRP積層平板を用いた制振実験により、提案するファジィ理論に基づくセミアクティブ振動制御が従来のセミアクティブ振動制御に比べの高いロバスト性を有することを実証した。

キーワード：Mamdani 推論法，セミアクティブ振動制御，スイッチング型制御，圧電，センサレス

1. 研究の背景と目的

宇宙構造では外力や姿勢・高度制御により様々な振動が励起される。これらの振動は一度励起されると真空環境では減衰し難い。また、打ち上げ軽量化の為に柔軟構造にならざるを得ないため、振動による電子機器への影響や構造の破損が懸念される。そのためセンサやアクチュエータを用いた振動制御の研究が行われている。そのうちの一つに圧電素子を用いた研究がある。圧電素子には構造物の機械的エネルギーを電荷として素子内に蓄電する圧電効果と、逆に素子内に電荷を入力し機械的エネルギーを得る逆圧電効果がある。この2つの効果を利用して振動制御を行う研究がこれまで多くなされてきた[1, 2]。

圧電素子を用いた振動制御の手法としてはアクティブ制御、パッシブ制御、セミアクティブ制御の3つに分けられる。

アクティブ制御は、圧電素子の逆圧電効果を利用し、

制御系の外部からエネルギーを入力し高い制振力を発生させる手法である[3, 4]。アクティブ振動制御手法では外部からのエネルギー入力のため系が不安定になりやすく、スピルオーバーなどに悩まされる。アクティブ制御系構築には、複雑で正確な数学モデルが必要となるため構造物の動特性を詳細に把握する必要がある。また、宇宙空間での外部電力の供給問題など、解決すべき問題は山積している。

パッシブ制御は、圧電素子の圧電効果を利用し、構造物の振動により発生した機械的エネルギーを電気エネルギーへ変換し、制振回路において散逸させることにより制振を行う手法である[5, 6]。電気回路のLC固有振動数と構造物の固有振動数を一致するように設計することによって効率よくエネルギーの散逸を行っている。この手法では外部からのエネルギー入力はないため系は常に安定状態を保つことができる。しかし、両者の振動数がずれた場合、制振効果は全く無くなるという致命的な欠点を抱えている。

そこで考えられたのが、アクティブとパッシブの両者の長所を組み合わせたセミアクティブ制御である[7, 8, 9]。本研究では、セミアクティブ制御の中でも、振動制御効果が高いとされるエネルギー回生セミアクティブ手法[10, 11]に着目した。セミアクティブ制御は構造物の振動エネルギーを電気エネルギーに変換して素

† Robust Control of Multi-modal Vibrations based on Mamdani Method

Kanjuro MAKIHARA, Chikako KUROISHI and Hisao FUKUNAGA

*1 東北大学 航空宇宙工学専攻

Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

*2 東日本旅客鉄道株式会社

East Japan Railway Company

子内に蓄電させ、適切なタイミングで電荷の正負を反転させることにより制振を行う手法である。振動制御に外部エネルギーを必要とせずともアクティブ制御と同程度の制振効果が得られるとともに系は常に安定状態を保つことができる。Richardら[10]はLCR回路にスイッチ機構を組み込んだスッチング型セミアクティブ制振回路を提案した。また Onodaら[11]はこの回路にダイオードを組み込みより効率的な制御手法を提案した。スイッチを組み込むことにより、効率的に振動を抑制することができる。先行論文[10]では、単モードの構造振動を対象にしており、複数モードの振動制御が不可能であった。先行論文[11]では、複数モードの振動制御を行うために、LQR 制御理論とカルマンフィルタを導入しており、外乱状態を予め確定した上で理論が構築されていたので、外乱変化へのロバスト性が低いという問題点を有していた。

本論文では、スッチング型セミアクティブ振動制御手法のロバスト性を向上させることを目的とする。スッチング型セミアクティブ振動制御手法にファジィ理論[12]を導入し、スイッチ切替えのための閾値の係数を可変にした制御手法を提案する。この手法の妥当性を検証するため、CFRP 積層平板を用いた制振実験を行い、外乱入力が増加した場合にも幅広く制振効果を得るロバスト性の高い制御システムの構築を目指す。

2. セミアクティブ振動制御

2.1 圧電素子の基礎方程式

本研究で、アクチュエータとしてのみならず、センサとしても用いる圧電素子について述べる。セラミック型圧電素子はしばしばPZTと呼ばれる。圧電素子の基礎方程式は、圧電素子の引張荷重 f_p 、圧電素子の伸び u_p 、電圧 V 、電荷 Q を用いて表す。

$$f_p = k_p u_p - b_p Q \quad (2.1)$$

$$V = -b_p u_p + \frac{Q}{C_p} \quad (2.2)$$

ここで、 k_a は圧電素子の等電荷剛性、 C_a は等歪静電容量、 b_a は圧電定数を示している。圧電素子の係数を求める方法は様々な提案されている[13]。後に、重要になることだが、圧電素子は内部にキャパシタ成分を有している。圧電素子のモデル化は、図1に見られるように、キャパシタ C_a と圧電効果による電圧発生器 V_a の直列で表現する。

2.2 圧電素子を組み込んだ多自由度系の運動方程式

セミアクティブ振動制御を説明するにあたってま

ず、多自由度系の振動についてモデル化をする。参考文献[2, 14]によると、複数の圧電素子を組み込んだ多自由度系の運動方程式は(2.3)式で表される。

$$M\ddot{x} + Kx = B_p Q + f \quad (2.3)$$

x は変位ベクトル、 M は質量マトリクス、 K は剛性マトリクス、 B_p 圧電素子入力マトリクス、 Q は圧電素子電荷ベクトル、 f は外力ベクトルを示す。モード座標系に変換する。

$$x = \Phi \xi \quad (2.4)$$

モード減衰を導入して

$$\ddot{\xi} + \Xi \dot{\xi} + \Omega \xi = \Phi^T B_p Q + \Phi^T f \quad (2.5)$$

ただし、 Ξ 、 Φ 、 Ω は以下で定義される。

$$\Xi \equiv \text{diagonal}[2\zeta\omega_k] \quad (2.6)$$

$$\Phi \equiv [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (2.7)$$

$$\Omega \equiv \text{diagonal}[\omega_k^2] \quad (2.8)$$

ω_k は k 次の固有振動数、 ϕ_k は k 次の固有モードベクトルを表す。ここで以下の状態力ベクトル z を導入すると(2.5)の運動方程式は(2.10)式で書き換えられる。

$$z \equiv [\xi^T, \dot{\xi}^T]^T \quad (2.9)$$

$$\dot{z} = Az + BQ + Gf \quad (2.10)$$

$$A \equiv \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -\Xi \end{bmatrix}, \quad B \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T B_p \end{bmatrix}, \quad G \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

また、圧電素子の電圧・電荷と変位の関係式もベクトル行列で表記される。

$$V = -B_p^T x + C_p^{-1} Q \quad (2.12)$$

ここで、 C_p は圧電素子の等歪静電容量を表す。

2.3 セミアクティブ制御のスイッチ制御

本研究では、エネルギー回生型セミアクティブ手法[10, 11, 14]を利用する。この手法は図1に示されるように、圧電素子に接続されたスッチング回路を用いる。スッチング回路はインダクタと抵抗とダイオードと選択スイッチから構成される。切り替えスイッチはポイント1またはポイント2に接続され、電流の流れを制御する。我々の過去の研究によると、この先進的エネルギー回生型手法は同時に複数の回路と複数圧電素子を扱うことが可能である。

エネルギー回生メカニズムでは、圧電素子に切り替えスイッチ付きのLC電気回路を取り付ける。Lはインダ

図1 セミアクティブ用スイッチング回路

クタ由来で、Cは圧電素子内のキャパシタ成分から由来している。構造振動により圧電素子に応力が生じ、その結果電荷が溜まる。圧電素子に望ましい変形が発生するように、スイッチングによって電流を流し溜まった電荷の符号を反転させる。電流を流さない状態で、構造物が振動すると圧電効果により圧電素子に電荷が蓄えられる。次に適切にスイッチを切り替えると、電流が流れ、電荷の正負を反転する。

上記メカニズムを式を使って説明する。この回路において図1の構造物が

$$x = x_0 \cos(\omega t) \quad (2.13)$$

の式で表現される振動している場合について考える。回路に電流が流れている場合と、流れていない場合の2つの状態がある。

● 電流が流れる場合: $L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C_p} = b_p x \quad (2.14)$

● 電流が流れない場合: $\dot{Q} = 0 \quad (2.15)$

制振回路において $\frac{\pi}{\omega}$ 秒毎(点線ライン)に於いて、スイッチが切替えられる場合、式(2.14)に従って電気振動が始まる。電荷が初期値(極値)から出発して、符号が逆の極値に達すると、LC回路は、また逆向きに電流を流そうとする。しかしダイオードによって、電荷は極値に留まる。つまり、1つの極値からもう1つの極値へと移る。この効果で図2の点線ラインの時間で、電荷と電圧の正負が入れ替わる。電気量の正負の入れ替えには、外部電力を全く必要とせず、LC回路のメカニズムを用いた。電気回路の時定数は外力の周波数に比べて十分小さいように、以下の式を満たすように設計する。

図2 LR-circuit と R-circuit に於ける圧電素子の電圧と電荷の挙動の違い

$$\frac{1}{\omega} \gg \sqrt{LC_p} \quad (2.16)$$

インダクタが制振効果に与える影響は大きく、インダクタがあることによってスイッチングに伴い反転する電荷が大きくなるため、より大きな制振力が得られる。一方、大きいインダクタは大きなレジスタンスを生み、エネルギー散逸が起きてしまう。インダクタの値は大きすぎても小さすぎても最適な制振効果は得られないため、構造振動と電気振動の両振動数比も考慮して、適切なインダクタンス値を試行錯誤で決定する。

図2でLR-circuitとして示すように、この操作を繰り返すとスイッチが切り替わるになるたびに電荷は反転かつ増幅し、電圧は反転するという挙動を繰り返す。電荷量はスイッチングの度に加算的に増加するので、バンバン制御のように強力な制御となる。スイッチの切り替え操作のみで制御を行うので、系にエネルギーを与えず、制御機能に不具合があっても常に安定である事が特徴である。

比較の為、インダクタが存在しない回路をR-circuitとする。その回路を用いた制御も文献[15]で提案されている。その挙動も図2に併記している。R-circuitは電圧と電荷の増幅メカニズムが無いために、増大することは無い[15]。この増幅メカニズムが両者の大きな違いとなっている。

3. センサレス閾値法の提案

本研究では、閾値法[16]を用いるが、そのままではなく、改良したセンサレス閾値法を提案する。閾値法[16]は、一つの圧電アクチュエータで複数モードの振動制御が行えるという利点があるので、複数モードの振動制御に閾値法を採用した。しかしながら、従来の閾値法[16]は外乱変化に対するロバスト性が低いという問題点が存在していた。そこで、本論文では、閾値法を用いながらもロバスト性を向上させる手法を提案する。まず、セミアクティブ振動制御において重要となるのは制振回路の選択スイッチの切替えタイミングである。このタイミングが制振効果に大きく影響を与えるため、そのスイッチ制御則について様々な手法が研究されてきた。スイッチ制御則に閾値を設け、センシング値が閾値を越えた瞬間にスイッチングを行う閾値法[16]に着目する。

重要なことであるが、従来の閾値法[16]では変位センサを用いて、変位と変位の閾値を比較して制御を行っていた。それに対し、本研究では、センサを不要とする更に高度なセンサレス制御系を構築する。アクチュエータとして機能している圧電素子をセンサとしても機能させる。そこで、閾値法の制御ロジックに圧電アクチュエータの電圧を用いる。このセンサレス制御系構築によって、別途センサが不要という簡略化のみならず、アクチュエータ・センサのコロケーションが自動的に成立するという2つの大きなメリットがある。

閾値は(3.1)式で表す圧電素子のセンシング電圧の二乗平均値と係数 β を用いて(3.2)式で表される。ここの N はサンプリング数である。

$$V_{\text{rms}} \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3.1)$$

$$V_{\text{th}} \equiv \beta V_{\text{rms}} \quad (3.2)$$

図1の制振回路における閾値を用いたセンサレス・スイッチ制御則を以下に示す。

$V \leq -V_{\text{th}}$ になれば、スイッチをPoint 1へ切り替え
 $V_{\text{th}} \leq V$ になれば、スイッチをPoint 2へ切り替え
 $-V_{\text{th}} < V < V_{\text{th}}$ の間、スイッチはそのまま

閾値法を用いたセミアクティブ制御の電圧とスイッチの挙動を図3に示す。電圧が電圧閾値を超えると、スイッチが切り替わり、エネルギー回生メカニズムにより、電圧の符号反転が生じている。

図3 閾値法を用いた場合の履歴

4. ファジィ制御

前章では閾値を用いたセミアクティブ振動制御について述べたが、従来の研究においては(3.2)式で表される閾値の係数 β の値は実験で最も制振効果が高い値を定数として用いていた。しかし、係数を定数として決めることには欠点がある。予めどの振動が加振されるかわかった上で β の値を求めるため、励振される振動が既知の場合に対してのみしか最大の制振効果を示さないことである。そこで本研究では、 β を定数とせずに、その時々を外乱入力に最も適した係数 β の値を自動的に算出するために、Mamdani 推論法[17]を取り入れる。

実際の振動制御実験に於いて、外乱入力が変わった場合に、 β の値を変化させて、最適な制御特性を実験解析より見つけ出した。その際に、それぞれのモード振幅の状態に応じた推論を行い、それに対する β の値を対応させた。このような方法は言語的に記述できるが、単純な線形式では記述できないために、ファジィ理論を用いた。

従来から、Mamdani 推論法やファジィ理論を用いた振動制御は存在する。Kwakとsciulli[18]は、片持ち梁の振動制御に、可変構造物のフィードバック制御の安定性を基に導出されたファジィルールを用いた。Cohenら[19]は、柔軟構造物の能動的振動制御を行う目的で、リアルタイムの適応型ファジィ制御を適用した。Jnifene[20]は、ファジィ理論を適応して、二自由度でモデル化された柔軟梁の終端の振動制御を行い、終端制御の高い適応性を示した。Yuksekら[21]は、高架橋道路の振動特性を抑制する目的で、ファジィ制

御器を構築した。そのファジィ制御器は従来型の比例・微分・積分項から構成されているものの、高いロバスト性を示すことに成功した。GucluとYazici[22]は、地震によって引き起こされる土壌・構造物の非線形の連成振動を抑えるために、ファジィロジックを組み込んだPID制御器を構築した。ファジィ組み込みの制御器は多層階の構造物に対して振動制御効果を示した。

本研究で用いる制御規則を以下に示す。

IF x is NB and THEN y is NB

IF x is NM and THEN y is NM

IF x is NS and THEN y is NS

IF x is ZO and THEN y is ZO

IF x is PS and THEN y is PS

IF x is PM and THEN y is PM

IF x is PB and THEN y is PB

図4にファジィ規則の前件部(上図)と後件部(下図)のメンバーシップ関数を示している。

$|V_1|_{amp}$, $|V_2|_{amp}$ はモードフィルタ処理後の圧電電圧値の1次モード振幅と2次モード振幅を表す。ファジィ入力を以下の様に決定した。

$$\bar{x} \equiv \frac{|V_1|_{amp} - |V_2|_{amp}}{|V_1|_{amp} + |V_2|_{amp}} \quad (4.1)$$

非ファジィ化にも、Mamdani推論法[17]を用いる。出力ファジィメンバーシップ関数の山の面積と重心値を用いて、ファジィ出力値を以下の式で求める。

$$y_0 \equiv \frac{S_1 y_{01} + S_2 y_{02}}{S_1 + S_2} \quad (4.2)$$

図4 上図：前件部メンバーシップ関数
下図：後件部メンバーシップ関数

図5 ファジィを用いた振動制御の流れ

ここで、 S と y_0 は2つのファジィメンバーシップ関数の山の面積と重心値をそれぞれ示す。これらのステップを踏み、ファジィ理論を振動制御に用いた場合の制御流れを図5に示す。

5. 振動制御実験

5.1 実験概要

実験装置の概要図を図6に示す。実験対象には積層構成 $[90/45/-45/0]_2$ のCFRP 積層平板を用いた。宇宙構造物のパネルにはCFRP 積層平板が多用される。このCFRP 積層平板の特性を表1に示す。今回の実験では1つの制御用圧電素子で複数振動モードの同時制御を行う。制御用圧電素子は $30 \times 30 \times 0.25 \text{ mm}$ の圧電素子1枚で行い、1次加振用圧電素子も同じ大きさを用いた。また2次加振用圧電素子には $10 \times 40 \times 2 \text{ mm}$ の大きさを用いた。多彩な外乱入力を作り出すために、1次・2次加振用圧電素子を用いた。加振用圧電素子

図6 実験装置の概要

表1 実験に用いたCFRP板の特性

E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}	ρ [kg/m ³]
127.0	11.0	6.3	0.3	1540.0

を制御用圧電素子と混同しないように注意されたい。各圧電素子の貼付位置を図6に示す。ここで2次加振用圧電素子を表裏それぞれに貼付してあるのは、振れの2次モードを出し易くするためである。なお、このCFRP平板の等電荷固有振動数は1次モード14.2 Hz、2次モード19.2 Hzである。試行錯誤の結果から、インダクタの値は20 mHと決定した。

ファジィ理論に基づくスイッチング型セミアクティブ振動制御実験の手順を以下に示す。

- ① 1次モードと2次モードそれぞれの固有振動数にて2つのファンクションジェネレータから加振用圧電素子に加振力を加える
- ② 制御用圧電素子のセンシング電圧をアナログフィルタに入力する
- ③ アナログフィルタで1次と2次のモード成分に分離し、分離後の各電圧値をPCに入力する
- ④ PC内にてMamdani 推論法によるファジィ推論を行い、閾値の β 値を算出する
- ⑤ PC内にて電圧の二乗平均値 V_{rms} に β 値を掛け閾値 V_{th} を算出する
- ⑥ PC内にて計測圧電電圧が閾値を越えた点で、切り替えスイッチへ、スイッチング信号を出力する
- ⑦ スwitching切り替え直後に、電圧・電荷の反転が行われ、制御用圧電素子により効果的にセミアクティブ制振が行われる

ここで重要なことは、複数モード振動を抑制する高度な振動制御でありながら、そのフィードバック系構築に於いて、構造物の固有振動数の情報しか用いていないことである。多くの複数モード振動制御の研究や提案では、正確な数学モデルを駆使した複雑な制御系を構築している現状を考えると特筆に値する。

固有振動数の情報は、圧電電圧の値を1次モード成分と2次モード成分に分ける為に用いている。アナログフィルタはパワーソース特性バンドパスフィルタ(2次IIR)を用いており、1次モードが14Hz、2次モードが19Hzを中心周波数とするバンド幅がそれぞれ3.22Hzと4.37Hzのフィルタを使用する。

5.2 ファジィ制振実験での制御器構築

予め、外乱入力を変化させた外乱パターンの全点検索により、最適 β の値を求めておく。 β は0から2までの範囲で、0.1刻みで変化させた。一つの外乱パターンに対して20点の検索を行い、制振効果が高いという意味での最適 β 値を選んだ。この全点検索による最適値の決定は、ファジィ制御のロバスト性を相対的に比較評価する目的とその内3外乱パターンをファジィ制御構築の設計基準点とする目的に用いる。各外

乱入力に対するそれぞれの最適 β 値を最適値と呼び、“Optimum”と表記する。また、加振入力を分かり易く示すために、[1次モード加振：2次モード加振]と表記する。例えば、[1：0]は1次モード振動だけを加振したことを意味し、[0：1]は2次モード振動だけを加振したことを意味する。[1：0]と[0：1]では加振される振動モードは異なるが、変位計で測定する変位振幅が等しくなるように加振力を調整した。従来の閾値法に従って一定 β 値を用いた制御を“Threshold”と表記し、ファジィ制御を用いた制御を“Fuzzy”と表記する。

加振振幅比[1：1]の場合のFFT解析結果を図7に示す。この加振振幅比の“Threshold”の β 値は最も制振効果の高い値として1.05とした。ファジィ制御では[1：1]で加振したときの最適 β 値1.05を出力するようにプログラムしたので、“Threshold”と“Fuzzy”の制振効果は等しくなり、図7に見られるように、1次モードが約8%、2次モードが約19%の制振効果が得られた。

[1：1]、[1：2]、[2：1]の3パターンの最適 β 値を用いて、経験則に基づいたファジィ推論の制御器を構築した。“Threshold”は β 値を変化させない従来閾値手法[16]であるために、 β 値は1.05と一定値とした。他の外乱入力では、それぞれに最適値を出した一定値の β 値を用いた。過去論文[16]では、どのような外乱の場合でも、 β 値は一旦決定した一定値使っていた。ここでは従来手法[16]を改善させた上で、提案手法と比較した。ここで、[1：2]、[2：1]の2パターンについては、[1：1]と同様で冗長なので割愛する。纏めると、[1：1]、[1：2]、[2：1]の3つの外乱パターンに対し、それぞれの状況で最適の β を計3種類用意し、各最適 β 値による閾値法と本提案で

図7 加振入力[1：1]に於けるFFT

構築したファジィ推論の制御器（1種類）とを各々の状況で比較した。

5.3 想定外の外乱印加時のファジィ制振実験

本論文では、制御器の設計時に[1:2]から[2:1]までの加振モード比を考慮した。そこで、[1:2]から[2:1]までの加振モード比が制御器の設計時に想定した外乱モードとしている。また、[1:3]と[3:1]の加振モード比が制御器の設計時に想定範囲外の外乱モードとしている。これまで、ファジィ制御を設計構築する上で、[1:2]から[2:1]までの加振モード比が想定外乱モードであることを見てきた。次に、構築に用いた設計外乱モード比の外挿部分の外乱入力（例えば、[1:3]、[3:1]）の加振が印加された場合でも、上記で設計したファジィ制御が有効であることを確認した。加振入力パターンを更に大きく変えて振動制御実験を行った。

図8 加振入力 [1:3] に於ける FFT

図9 加振入力 [3:1] に於ける FFT

加振振幅比 [1:3] の場合のFFT 解析結果を図8に示す。ファジィ制御で算出した β 値は0.67となり、“Threshold”では1次モードが3.2%、2次モードが26.2%、“Fuzzy”では、1次モードが2.1%、2次モードが38.2%の制振効果が得られた。

次に、加振振幅比 [3:1] の場合のFFT 解析結果を図9に示す。ファジィ制御で算出した β 値は0.3~0.5となり、“Threshold”では1次モードが5.8%、2次モードが13.8%、“Fuzzy”では、1次モードが6.7%、2次モードが11.2%の制振効果が得られた。

加振振幅比 [1:3] では、ファジィ理論を導入したことで2次モード制振に性能向上が見られるが、1次モードについては、どの制御方法でも、制振が効いていない。一方、加振振幅比 [3:1] では、有意な制振効果は見られなかった。これは、ファジィ設計点が3パターンのみであったことや、ファジィ推論に更なる改善の余地があることを示唆している。最適化や性能改善は時間をかけて取り組むために、今後の課題とする。

5.4 ファジィ理論に基づくセミアクティブ制御のロバスト性

ファジィ理論に基づくスイッチング型セミアクティブ制御のロバスト性を大域的に調べた。各外乱入力における従来の一定 β 値を用いた“Threshold”と、ファジィ制御を用いた“Fuzzy”と、それぞれに最適値を用いている“Optimum”の3通りの制御手法の制振効果の比較を行った。比較結果を図10に示す。データのばらつきを減らすために、それぞれの制振効果は5回のデータの平均値を用いている。外乱入力が変化した場合でも、ファジィ制御は各最適値に近い制振効果を示している。従来型の閾値法に比べると制振効果の高さは明らかである。構築したファジィ制御システムには

図10 LR-circuitを用いたスイッチング型セミアクティブ制御の制振効果

図 11 R-circuitを用いたスイッチング型セミアクティブ制御の制振効果

外乱入力の変化に対するロバスト性が認められる。スイッチング型セミアクティブ制御のロバスト性を高めるといふ本研究の目的を達成したと言える。

5.5 電気パラメータ変化に対するロバスト性実験

次に、電気パラメータ変化に対するロバスト性を確認する。インダクタ有りの電気回路を用いた状態でファジィ制御器を構築した後に、その制御器とインダクタを抜いた回路を使って振動制御を行う。電気パラメータ変更に対するファジィ制御のロバスト性を調べる。図11に R-circuit 回路における制振効果の比較を示す。図11を図10と比較すると、全体的に 5～10% 程度の制振効果の落ち込みが見られる。これは抵抗回路であるためインダクタが無いので、エネルギー回生メカニズムが働かず、圧電電荷・電圧が増幅しないので、制振効果が向上しないためである。

図10において着目すべきは加振入力が増加した場合のファジィ制御効果が最適値を用いた制御効果とほとんど同じであることである。Mamdani 推論法により、外乱入力に対応した適切な β 値の算出ができていることが制振効果より分かる。つまり、提案するファジィ制御は、外乱入力変化に対するロバスト性のみならず、電気パラメータの変化に対するロバスト性があることが実証された。

6. 結言

本論文では、外乱入力が増加した場合にも幅広く制振効果を得るロバスト性の高い制御システムの構築を目指して、スイッチング型セミアクティブ振動制御手法にファジィ理論を導入した。閾値法を用いながらも、制御係数を定数とせず、その時々外乱入力に最適な係数の値を自動的に算出するために、Mamdani 推論法を取り入れた。また、構築した制御系は、複数

モード振動を抑制する高度な振動制御でありながら、そのフィードバック系構築に於いて、構造物の固有振動数の情報しか用いない大きな特長もある。

提案したロバスト振動制御の妥当性を検証するため、CFRP積層平板を用いた制振実験を行った。外乱入力が増加した場合でも、ファジィ制御は各最適値に近い制振効果を示した。従来型の閾値法に比べると高い制振効果を得ることが出来た。本研究で導入したファジィ制御により、外乱入力に最適な β 値を自動的に算出する制御システムを構築することができた。その可変値により、外乱入力が増加した外れで変化した場合でも制振効果を得ることができた。構築したファジィ制御システムが外乱入力の変化に対するロバスト性を有することを確認した。スイッチング型セミアクティブ制御のロバスト性を高めるといふ本研究の目的を達成した。また、本ファジィ制御は電気パラメータの変化に対するロバスト性もあることが実証された。

更に、センサを不要とする更に高度なセンサレス制御系構築も達成した。別途変位計などのセンサが不要という簡略化のみならず、アクチュエータ・センサのコロケーションが自動的に成立するという2つの大きな利点を有する。

参考文献

- [1] Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S., and Moskalik, A., "Piezoelectric Actuation: State of the Art," Shock and Vibration Digest, Vol.33, No.4, pp.269-280 (2001).
- [2] 奥川雅之, 田中亨, "スーパーバイザを適用したスマートワッシャによるボルト締結体の緩み検知," 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.747, pp.2669-2676 (2008).
- [3] 梶原逸朗, 上原学, "スマート構造における圧電アクチュエータ形状と制御系の同時最適設計(複数の圧電アクチュエータを有する多入力系における検討)," 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.684, pp.2093-2100 (2003).
- [4] 西垣勉, 井上博文, 遠藤満, "圧電フィルムセンサ/アクチュエータによるはりの振動制御," 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.633, pp.1937-1945 (1999).
- [5] Hagood, N. W., and von Flotow, A., "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks," Journal of Sound and Vibration, Vol.146, No.2, pp.243-268 (1991).
- [6] Wu, S., "Piezoelectric Shunts with a Parallel R-L Circuit for Structural Damping and Vibration Control," Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference: Passive Damping and Isolation, San Diego, CA, Vol.2720, pp.259-269 (1996).
- [7] Clark, W. W., "Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.11, No.4, pp.263-271 (2000).

- [8] Cunefare, K. A., Rosa, S. D., Sadegh, N., and Larson, G., "State-Switched Absorber for Semi-Active Structural Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.11, No.4, pp.300-310 (2000).
- [9] Larson, G. D., and Cunefare, K. A., "Quarter-Cycle Switching Control for Switch Shunted Dampers," *Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.126, pp.278-283 (2004).
- [10] Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D., Bassaler, H., "Enhanced Semi Passive Damping using Continuous Switching of a Piezoelectric Device on an Inductor," *SPICE Optical Engineering Press*, pp.288-299(2000).
- [11] Onoda, J., Makihara, K., Minesugi, K., "Energy-Recycling Semi-Active Method for Vibration Suppression with Piezoelectric Transducers," *AIAA Journal*, Vol.41, No.4, pp.711-719 (2003).
- [12] Zadeh, L., "Fuzzy Sets," *Information and Control*, Vol.8, pp.338-353 (1965).
- [13] 高木賢太郎, 大嶋和彦, 稲垣大雄, "インピーダンス計測のみに基づく圧電素子のパラメータ推定と受動制振への応用," *日本機械学会論文集C編*, Vol.76, No.772, pp.3495-3503 (2010).
- [14] Makihara, K., Onoda, J., and Minesugi, K., "Comprehensive Assessment of Semi-Active Vibration Suppression Including Energy Analysis," *Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.129, No.1, pp.84-93 (2007).
- [15] Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D., and Ching, G., "Semi-Passive Damping Using Continuous Switching of a Piezoelectric Device," *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials Conference: Damping and Isolation*, San Diego, CA, Vol. 3672, pp.104-111 (1999).
- [16] Guyomar, D., Richard, C., Mohammadi, S., "Semi-passive Random Vibration Control based on Statistics," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.307, pp.818-833 (2007).
- [17] Mamdani, E. H., "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant," *Proceedings of IEE*, Vol.127, No.12, pp.1585-1588 (1974).
- [18] Kwak, M. K., and Sciulli, D., "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression Control Experiments on Active Structures," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.191, No.1, pp.15-28 (1996).
- [19] Cohen, K., Yaffe, R., Weller, T., and Ben-Asher, J. Z., "Experimental Studies on Adaptive Fuzzy Control of a Smart Structure," *Journal of Vibration and Control*, Vol.8, No.8, pp.1071-1083 (2002).
- [20] Jnifene, A., and Andrews, W., "Fuzzy Logic Control of the End-Point Vibration in an Experimental Flexible Beam," *Journal of Vibration and Control*, Vol.10, pp.493-506 (2004).
- [21] Yuksek, I., Kepceceler, T., Guclu, R., and Yagiz, N., "Cluster PID Control of Viaduct Road Vibration," *International Applied Mechanics*, Vol.41, pp.1204-1209 (2005).
- [22] Guclu, R., and Yazici, H., "Fuzzy Logic Control of a Non-linear Structural System against Earthquake Induced Vibration," *Journal of Vibration and Control*, Vol.13, No.11, pp.1535-1551 (2007).

(2012年11月15日 受付)

(2013年 4 月25日 採録)

[問い合わせ先]

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-6-1

東北大学 航空宇宙工学専攻

槇原 幹十朗

TEL : 022-795-4109

E-mail : makihara@ssl.mech.tohoku.ac.jp

著者紹介

まきはら かんじゅうろう
榎原 幹十郎 [非会員]

2004年3月東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。宇宙航空研究開発機構航空宇宙プロジェクト研究員、ケンブリッジ大学研究員を経て2011年1月から東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻准教授。振動・形状制御、エネルギーハーベスティングなどの研究に従事。博士(工学)。

くろいし ちかこ
黒石 千香子 [非会員]

2012年3月東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士課程修了。修士(工学)。同年4月より東日本旅客株式会社入社。

ふくなが ひさお
福永 久雄 [非会員]

1980年3月東京大学工学系研究科航空学博士課程修了。東京大学宇宙航空研究所、科学技術庁航空宇宙技術研究所、東北大学助教授を経て1996年11月から東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻教授。複合材構造の最適構造設計、構造ヘルスマモニタリング、振動・形状制御の研究に従事。工学博士。

Robust Control of Multi-modal Vibrations based on Mamdani Method by

Kanjuro MAKIHARA, Chikako KUROISHI and Hisao FUKUNAGA

Abstract :

A new robust semi-active method is proposed to suppress various multimodal vibrations. The robust control consists of Mamdani method and semi-active threshold control. We demonstrate it to be applicable to multimodal vibration suppression for vibrating structures. Our proposed control only requires the information of natural frequencies for the real-time feedback control. We carried out experiments of vibration suppression using our Mamdani-logic-based control and conventional threshold control, and compared their suppression performances. The experiment indicates that our proposed control can adapt to conditions outside the assumed range of excitations. The proposed control displays good robustness when faced with sudden changes in vibrations, and also displays high suppression performance.

Keywords : Mamdani Method, Semi-Active Vibration Control, Switching Control, Piezoelectric, Sensor-Less

Contact Address : **Kanjuro MAKIHARA**

Department of Aerospace Engineering, Tohoku University
6-6-1, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-Ward, Sendai, Miyagi, 980-8579, JAPAN
TEL : 022-795-4109
E-mail : makihara@ssl.mech.tohoku.ac.jp