日本複合材料学会誌，**32**，2 (2006)，76-82

研究論文

スマート複合材はりの振動のファジィモデル作成と制御効果

小田　奨*1，高輪　武志*2

(2005年4月4日受付)

Fuzzy Modelling of Vibration of a Smart CFRP Composite Beam and Control Effect by Using the Model

Susumu ODA*1 and Takeshi TAKAWA*2

(Received April 4, 2005)

In this paper, vibration control is investigated for a smart carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite beam embedded by piezoceramics (PZT) and electro-rheological fluids (ERF). A fuzzy model of the controlled element containing two actuators is formed because the application of linear control theory to the vibration control is very difficult due to the intensive nonlinearity in the ERF actuator. The time delay of the response of the actuators is also taken into consideration in this study. A controller for vibration suppression of the composite beam is designed based on the fuzzy model for guranteeing stability of the vibration control system. The effect of the control system is verified by experiment and simulation.

1. 緒　　言

現在2種類以上の基材を組み合わせて使用目的に合った設計が可能な複合材料に関心が寄せられている．特に繊維強化複合材（FRP）は軽くて強い繊維として有名であり，これらの複合材料に機能を内在させてより高度な機能を発揮させようとするスマート化という概念が注目され研究が進められている[1]．著者らはアクチュエータとしてER流体（ERF）とピエゾセラミックスの両者を含むCFRP複合材片持ちはり先端の振動制御について検討した[2]．この場合，低周波領域において効果の大きいER流体と高周波領域で効果を発揮するピエゾセラミックスの特性を引き出すことによりコンパクトでかつ広い周波数範囲で高性能な仕様を満足させるスマートコンポジットを実現できると考えられるからである[3]．今回はさらにアクチュエータの応答として入力電圧の時間遅れ項の影響も考慮した．ER流体は強い非線形特性を持っており従来の線形制御理論の適用によるコントローラの設計は困難である．

ER流体や圧電材料を用いた構造物の振動制御において非線形性や不確かさを考慮した研究は，幾つか見られる[4~8]．たとえば自動車の振動制御の場合にERダンパ速度に比例した電圧の平方根をERダンパに印加して制御系を非線形系から線形化した例がある[4]．

またロバスト制御に基づいてER流体を用いたロボットアームの振動制御[5]や圧電ファイバ埋め込み型スマート構造物の振動制御[6]を実施した例がある．さらに，圧電材料を用いた系に対して知的制御の1種であるニューラルネットワークによる方法[7]や遺伝アルゴリズムによる方法[8]なども研究されている．

ただし，入力電圧の時間遅れ項も含めて考慮した研究例は見当たらない．

非線形性や不確かさに対する制御方法としては，線形特性を抽出する記述関数法と位相面による解析法[9]や，線形系をベースとして扱い不確かさに強いロバスト制御の方法[9]がある．しかし制御対象が多様化し，非線形特性が顕著になってくるとこれらの方法では対処しきれず

*1 大阪工業大学工学研究科機械工学専攻博士後期課程
(535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
Graduate School of Engineering, Osaka Institute of Technology
*2 摂南大学工学部マネジメントシステム工学科教授
(572-8508 寝屋川市池田中町17)
Faculty of Engineering, Setsunan University

柔軟性に欠ける場合が多い．

それに対して非線形記述能力にすぐれたいわゆる知的制御といわれる方法（ファジィ制御，ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズムなど）が最近研究され始めてきた．この中でファジィ制御はパラメータの変動範囲に応じて制御系の特性を変更できるようになっているため，あいまいさを含む系の表現には好都合で制御技術者にとっても理解しやすい理論といえる．さらに制御系設計時に必要な安定性の解析も現在では可能なレベルに達している[10]．本研究では，以上の諸点を考慮してファジィ制御の方法を採用した．

そこで本研究ではまずアクチュエータを含む制御対象をあいまいさの概念を取り入れたファジィ理論を採用してモデル化した．さらにそのファジィモデルにもとづいて，複合材はりの先端におけるたわみを抑制するためのコントローラを振動制御系の安定条件を考慮して設計し，制御効果を確認した．

2. 試験片と実験装置

本研究で用いられた試験片はFig. 1の通りであり，2枚のCFRP積層板，ER流体およびピエゾセラミックスで構成されている[2]．Fig. 1において'A'は試験片の断面図を示している．まず2枚のCFRP積層板の間にER流体を流し込む隙間を作り出すためにスペーサを挟み，エポキシ系接着剤により接着する．毛細管現象を利用してER流体を隙間に注入し，シリコーンゴムで密閉した．次に一組のピエゾセラミックスをCFRP積層板の表面に貼り付ける位置は積層板の固定端近傍とした．ここで積層板が誘電体のためピエゾセラミックスとの間に絶縁物質のカプトンフィルムをはさみこんだ．

この試験片の固定端は振動試験機を用いて，1次曲げモードの固有振動数を持つ正弦波状の強制振動をさせる．片持ちはりのたわみ振動応答を非接触レーザ変位計で計測し，アクチュエータであるピエゾセラミックスとER流体に加える電圧の量をコンピュータで計算する．制御方法ははりの先端変位をフィードバックする方法を採用した．

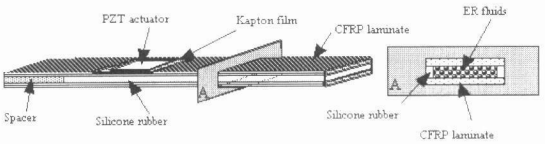

Fig. 1　A schematic view of specimen.

3. ファジィモデリング

3.1 アクチュエータの特性

本研究で用いたアクチュエータの概要を以下に述べる．ピエゾセラミックス（圧電セラミックス）は，力を加えひずませると電圧を発生し，逆に電圧を加えるとひずみあるいは応力を発生する性質を有する物質である．複合材はりとピエゾセラミックスを含めた系を対象として実験的にボード線図を求めた結果，ピエゾセラミックスの伝達関数は1次の位相進み要素と考えるのが妥当と確認されている[11]．

次に，流体に外部電場を加えたとき流体の見かけの粘性が著しく増大し，電場を取り去るともとの粘性に戻る現象をER効果といい，この現象を示す流体をER流体（ERF）という．Fig. 2にERFの特性を示す．図においてyは複合材はりのたわみ量，f_EはERFによる複合材はりへの制御力，v_2はERFに与える入力電圧，k_eは係数を表す．

$$f_E = k_e v_2^2\, sgn(\dot{y}) + n\dot{y} \tag{1}$$

この制御力は電界を作用させないときの粘性減衰力と電界を作用させたときのクーロン摩擦とを合わせたものと考えることができる[3]が（(1) 式参照），この場合ERFの特性を入力v_2と出力f_Eとの間の入出力関係で表すことができず，従前からこのモデル化が困難とされてきた．一方，複合材はり自身も粘性減衰力の特性を有しているので[11]，本論文ではER流体による制御力のうちの粘性減衰力の項$n\dot{y}$を切り離して複合材はりの粘性減衰力に含めて考えることにした．その結果，ERFの特性としては (1) 式の右辺第2項を省いて (2) 式に示すごとくクーロン摩擦のみを考えればよい．

$$f_E = k_e v_2^2\, sgn(\dot{y}) \tag{2}$$

しかし，この場合でも上式に示すごとくERFへの入力v_2と出力f_Eの関係は非常に強い非線形であり簡単に

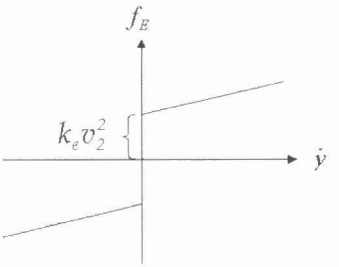

Fig. 2　The characteristics of ERF.

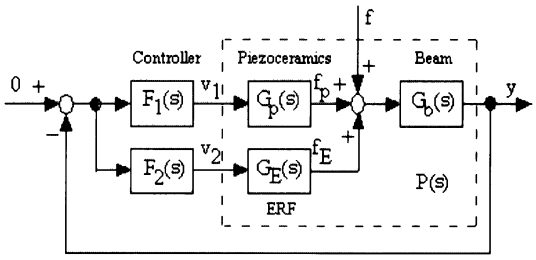

Fig. 3 Block diagram of the vibration control system.

線形化するのは困難である．

3.2 ファジィモデルの構成

振動制御システムのブロック線図をFig. 3に示す．CFRP複合材は$G_b(s)$にピエゾセラミックス$G_p(s)$とER流体$G_E(s)$の2種類のアクチュエータを含めたものを制御対象$P(s)$とみなすと，アクチェータへの入力電圧v_1，v_2と外乱信号fとが制御対象$P(s)$の入力となり，複合材はりの自由端でのたわみyが出力となる．既述したごとくERFが非常に強い非線形特性を持つため線形制御理論の適用はきわめて困難である．したがって今回は，制御対象のファジィモデルを作成し，そのモデルにもとづいて複合材はりの振動抑制のための制御入力を求めることにした．

ファジィモデリングの利点は，かなり複雑な非線形系の場合でも，プロセスを複数の規則に分け，各規則毎に線形近似化して表現できることにある．

この系の運動方程式は，基本的には2次系と考えられ[11]，また，ピエゾセラミックスとER流体の複合材はりへの制御力f_P，f_Eはそれぞれ入力電圧v_1，v_2の関数となるので，下記(3)式で表すことができる．

$$\begin{aligned} m\ddot{y}+c\dot{y}+ly &= f+f_P+f_E \\ &= f+g_1(v_1)+g_2(v_2) \\ &= f+pv_1+qv_2+r \end{aligned} \tag{3}$$

ただし，f_P：ピエゾセラミックスによる複合材はりへの制御力，$g_1(v_1)$，$g_2(v_2)$：それぞれ電圧v_1，v_2の関数，p，q：f_P，f_Eをv_1，v_2で線形化した場合の係数，r：f_P，f_Eの線形化時に生じる定数，m：複合材はりの等価質量，c：粘性減衰係数，l：等価ばね係数

上式の場合，特に$g_2(v_2)$が強い非線形であり，したがってそれを線形近似化した場合のパラメータq，rが規則毎に変わるものと考えることができる．

次に，上式を離散化するために，はりの先端変位yの微分値を中心差分を用いて下式のように近似することにする．

$$\dot{y}(k)=\frac{y(k+1)-y(k-1)}{2h} \tag{4}$$

$$\ddot{y}(k)=\frac{y(k+1)-2y(k)+y(k-1)}{h^2} \tag{5}$$

ただし，hは時間刻みである．(3)式に(4)，(5)式を代入すると，

$$\begin{aligned} y(k+1) &= \frac{4m-2lh^2}{2m+ch}y(k)+\frac{-2m+ch}{2m+ch}y(k-1) \\ &+\frac{2ph^2}{2m+ch}v_1(k)+\frac{2qh^2}{2m+ch}v_2(k) \\ &+\frac{2h^2}{2m+ch}f(k)+\frac{2h^2r}{2m+ch} \end{aligned} \tag{6}$$

よって，この系を2次系の離散化モデルで表すと[2]，

$$\begin{aligned} y(k+1) &= a_1y(k)+a_2y(k-1)+a_3v_1(k) \\ &+a_4v_2(k)+a_5f(k)+a_6 \end{aligned} \tag{7}$$

ここで，a_1〜a_6は係数パラメータである．ただし，アクチュエータの応答として入力電圧$v_1(k)$，$v_2(k)$の時間的変化も考慮する場合は1サンプリング周期分の時間遅れ項$v_1(k-1)$，$v_2(k-1)$を(7)式の右辺に加えた次式を使用するものとする．

$$\begin{aligned} y(k+1) &= a_1y(k)+a_2y(k-1)+a_3v_1(k)+a_4v_1(k-1) \\ &+a_5v_2(k)+a_6v_2(k-1)+a_7f(k)+a_8 \end{aligned} \tag{8}$$

前述のごとくERFの入出力関係は強い非線形特性を有しており，$\dot{y}>0$の場合と$\dot{y}<0$の場合とでは出力特性が異なるので，ファジィモデリングの際に$\dot{y}$の正負に応じて上式の係数を変えるようにしておく必要がある．ここでは，$\dot{y}$の代わりに(9)式で示されるΔyを用いると(8)式は(10)式のように書きなおされる．

$$\Delta y(k)=y(k)-y(k-1) \tag{9}$$

$$\begin{aligned} y(k+1) &= a_1'y(k)+a_2'\Delta y(k)+a_3v_1(k)+a_4v_1(k-1) \\ &+a_5v_2(k)+a_6v_2(k-1)+a_7f(k)+a_8 \end{aligned} \tag{10}$$

ここで，$a_1'=a_1+a_2$，$a_2'=-a_2$となる．

また，ファジィ推論プロセスを導入するため，「IF-THEN」規則[12]を用いて表すとi番目の規則は次式で表される．

IF $y(k)\in A_{i1}$, $\Delta y(k)\in A_{i2}$, $v_1(k)\in A_{i3}$, $v_1(k-1)\in A_{i4}$, $v_2(k)\in A_{i5}$, $v_2(k-1)\in A_{i6}$, $f(k)\in A_{i7}$

$$\begin{aligned} \text{THEN } y(k+1) &= a_{i1}'y(k)+a_{i2}'\Delta y(k)+a_{i3}v_1(k) \\ &+a_{i4}v_1(k-1)+a_{i5}v_2(k) \\ &+a_{i6}v_2(k-1)+a_{i7}f(k)+a_{i8} \\ &= h_i(k) \end{aligned} \tag{11}$$

ただし，$A_{ij}(j=1,2,\cdots,7)$ はそれぞれ i 番目の規則における $y(k)$, $\Delta y(k)$, $v_1(k)$, $v_1(k-1)$, $v_2(k)$, $v_2(k-1)$, $f(k)$ のファジィ集合を表し，$h_i(k)$ はサンプリング回数 k の関数で，$a_{ij}(j=1,2)$ と $a_{ij}(j=3,4,\cdots,7)$ は i 番目の規則における後件部の線形方程式のパラメータを表す．

本研究では基本メンバシップ関数にガウス曲線を用いたので，$y(k)$ のメンバシップ値 $B\{y(k)\}$ は次式で表される．

$$B\{y(k)\}=\exp\left[\frac{-\{y(k)-c\}^2}{2\sigma^2}\right] \tag{12}$$

ここで，c：ガウス曲線における横軸データの平均値，σ：ガウス曲線における横軸データの標準偏差を表す．

その他の変数のメンバシップ値についても同様である．

このとき，i 番目の規則における出力変数に対する重み係数 ω_i（適合度）は各入力変数のメンバシップ値の積で与えられ次式になる．

$$\begin{aligned}\omega_i(k)=&B_{i1}\{y(k)\}\cdot B_{i2}\{\Delta y(k)\}\cdot B_{i3}\{v_1(k)\}\\&\cdot B_{i4}\{v_1(k-1)\}\cdot B_{i5}\{v_2(k)\}\\&\cdot B_{i6}\{v_2(k-1)\}\cdot B_{i7}\{f(k)\}\end{aligned} \tag{13}$$

ただし，$B_{ij}(j=1,2,\cdots,7)$ はファジィ集合 $A_{ij}(j=1,2,\cdots,7)$ における $y(k)$, $\Delta y(k)$, $v_1(k)$, $v_1(k-1)$, $v_2(k)$, $v_2(k-1)$, $f(k)$ でのメンバシップ関数の値を示す．この場合の出力変数の推論値は規則の数を r とすると次式で表される[12]．

$$y(k+1)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)\,h_i(k)}{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)} \tag{14}$$

3.3　モデルの同定

2個のアクチュエータを含む制御対象のファジィモデルの作成のためのシステム同定を行う場合，入力 $v_1(k)$, $v_2(k)$ としては理想的な白色雑音が望ましいがその実現が困難なので，擬似不規則2値信号であるM系列信号[13]を採用した．外乱入力 $f(k)$ にはM系列信号でなく複合材はりの1次曲げモードの固有振動数をもつ正弦波信号を用いた．Fig. 4 に同定の場合のピエゾ，ERF に与える入力信号を示す．

システム同定実験において，M系列より発生した0と1の信号の代わりにピエゾセラミックスへそれぞれ −50 (v)，50 (v)，ERF へ 0 (v)，100 (v) を与えた．

システム同定実験の結果にもとづき，ニューラルネットワークの学習機能を用いてファジィ推論システムのパラメータを調整するソフトである ANFIS（適応ニューロファジィ推論システム）[14]を利用して，ファジィモデルの前件部のメンバシップ関数と後件部の線形方程式を同定する．その結果のメンバシップ関数の一例を Fig. 5 に示す．なお，入力変数 $y(k)$, $\Delta y(k)$, $v_1(k)$, $v_1(k-1)$, $v_2(k)$, $v_2(k-1)$, $f(k)$ の基本メンバシップ関数の数はシミュレーションの結果それぞれ 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1 とした．したがって，この場合の規則 i の総数は $1\times2\times2\times1\times2\times1\times1=8$ である．

その場合アプリケーションソフト MATLAB[15]を用いてパラメータ同定を行った結果の複合材はりのたわみの推定精度を Fig. 6 に示す．

Fig. 6 よりファジィ推論結果は実績データによく一致していることがわかる．なお，Fig. 7 に推論値と実績値との相関図を示す．

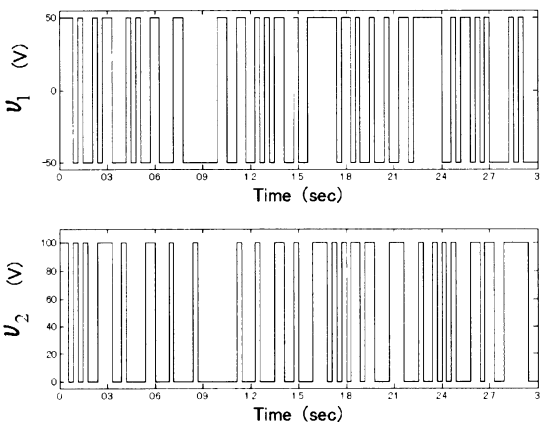

Fig. 4　Input signal of the controlled element.

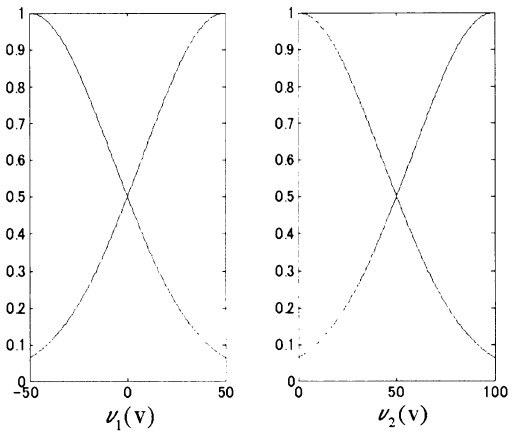

Fig. 5　Examples of membership functions.

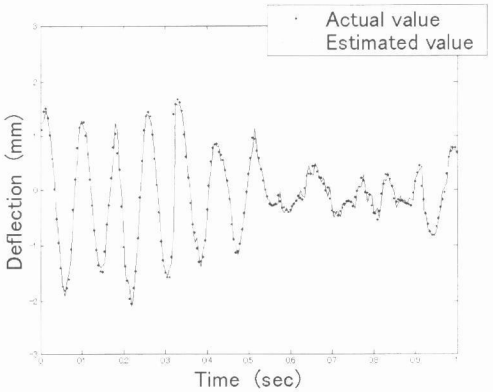

Fig. 6　Accuracy of the fuzzy model of the controlled element.

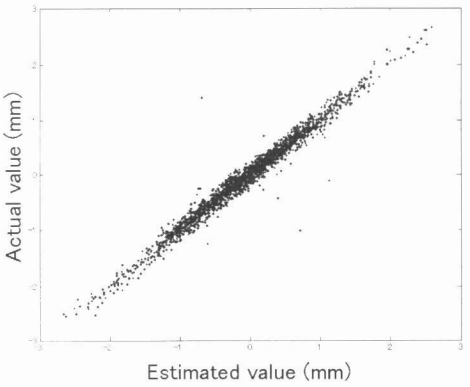

Fig. 7　The correlation between the actual value and the estimated value.

4.　ファジィモデルにもとづく制御

4.1　制御入力の計算

(8) 式を状態方程式で表すと以下のようになる．

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{A}\mathbf{y}(k)+\mathbf{B}\mathbf{v}_1(k)+\mathbf{C}\mathbf{v}_2(k)+\mathbf{d}f(k)+\mathbf{e} \tag{15}$$

ただし

$$\mathbf{y}(k)=\begin{pmatrix} y(k) \\ y(k-1) \end{pmatrix},\ \mathbf{v}_1(k)=\begin{pmatrix} v_1(k) \\ v_1(k-1) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{v}_2(k)=\begin{pmatrix} v_2(k) \\ v_2(k-1) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},\ \mathbf{B}=\begin{pmatrix} a_3 & a_4 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},\ \mathbf{C}=\begin{pmatrix} a_5 & a_6 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{d}=\begin{pmatrix} a_7 \\ 0 \end{pmatrix},\ \mathbf{e}=\begin{pmatrix} a_8 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで

$$\mathbf{G}=(\mathbf{B}\quad \mathbf{C}) \tag{16}$$

$$\mathbf{v}(k)=\begin{pmatrix} \mathbf{v}_1(k) \\ \mathbf{v}_2(k) \end{pmatrix} \tag{17}$$

とおくと，i 番目の規則では上式は下式のように書ける．

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{A}_i\mathbf{y}(k)+\mathbf{G}_i\mathbf{v}(k)+\mathbf{d}_if(k)+\mathbf{e}_i \tag{18}$$

ただし，$\mathbf{A}_i$，$\mathbf{G}_i$，$\mathbf{d}_i$，$\mathbf{e}_i$ は i 番目の規則の後件部における係数パラメータである．上式の左辺 $\mathbf{y}(k+1)$ を安定化させるための制御入力 $\mathbf{v}(k)$ は，i 番目の規則では状態変数 $\mathbf{y}(k)$ のフィードバックを用いて下式のごとく表すことができる．

$$\mathbf{v}(k)=-\mathbf{F}_i\mathbf{y}(k) \tag{19}$$

ただし $\mathbf{F}_i$ は i 番目の規則でのフィードバック係数である．

各規則での制御入力を統合すると (20) 式となる．

$$\mathbf{v}(k)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)\{-\mathbf{F}_i\mathbf{y}(k)\}}{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)} \tag{20}$$

このときファジィモデルの後件部の線形方程式を統合して推論結果を求めると下式が得られる．

$$\begin{aligned}\mathbf{y}(k+1)&=\frac{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)\{\mathbf{A}_i\mathbf{y}(k)+\mathbf{G}_i\mathbf{v}(k)+\mathbf{d}_if(k)+\mathbf{e}_i\}}{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)}\\&=\frac{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)[\{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}_j\}\mathbf{y}(k)+\mathbf{d}_if(k)+\mathbf{e}_i]}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)}\end{aligned} \tag{21}$$

上式は下式のように表される．

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{H}(k)\mathbf{y}(k)+\mathbf{d}(k)f(k)+\mathbf{e}(k) \tag{22}$$

ただし

$$\mathbf{H}(k)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)[\{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}_j\}]}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)}$$

$$\mathbf{d}(k)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)\mathbf{d}_i}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)}$$

$$\mathbf{e}(k)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)\mathbf{e}_i}{\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\omega_i(k)\,\omega_j(k)}$$

下記 (23) 式の線形離散時間システムは Lyapunov の安定理論にもとづいた (24) 式を満足する正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在するならば大域的漸近安定である[10]．

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{H}(k)\mathbf{y}(k) \tag{23}$$

$$\mathbf{H}^T(k)\mathbf{P}\mathbf{H}(k)-\mathbf{P}<0 \tag{24}$$

この不等式は (25) 式を満足するとき成立する．

$$\forall i, j \in \{1, 2, \cdots, r\}\ \{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}_j\}^T\mathbf{P}\{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}_j\}-\mathbf{P}<0 \tag{25}$$

この場合入力 $f(k)$ が有界であれば，(22) 式に対応する $\mathbf{y}(k)$ は有界である[16]．

したがって，(25) 式を満足する正定対称行列 $\mathbf{P}$ が存在するならば (22) 式で表されている制御システムは有界入力有界出力安定である．ここで最適レギュレータ理論により各規則毎の $\mathbf{F}_j$ を求めてから (25) 式より $\mathbf{P}$ を求める場合，全ての $\mathbf{F}_j$ に対して同一の $\mathbf{P}$ の値が得られるとは限らない．そこで (25) 式より $\mathbf{P}$ と $\mathbf{F}_j$ を同時に求めることができればその方が得策である．その場合フィードバックゲイン $\mathbf{F}_j$ は j の値に関係なく同じ値が得られるので $\mathbf{F}_j$ を $\mathbf{F}$ と置き換えることができて (26) 式の様に書ける．

$$\forall i, j \in \{1, 2, \cdots, r\}\ \{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}\}^T\mathbf{P}\{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}\}-\mathbf{P}<0 \tag{26}$$

ただし，このとき上式は $\mathbf{P}$ と $\mathbf{F}$ について線形ではなく，このまま解くことは困難であるが，ここで

$$\mathbf{X}=\mathbf{P}^{-1} \tag{27}$$

$$\mathbf{Y}=\mathbf{F}\mathbf{X} \tag{28}$$

とおいて (26) 式に Schur Complement[17] を適用すれば下記の線形行列不等式 (LMI) が得られる．

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X} & (\mathbf{A}_i\mathbf{X}-\mathbf{G}_i\mathbf{Y})^T \\ \mathbf{A}_i\mathbf{X}-\mathbf{G}_i\mathbf{F} & \mathbf{X} \end{pmatrix}>0 \tag{29}$$

上式は未知変数 $\mathbf{X}$ と $\mathbf{Y}$ の双方に関して線形であるので $\mathbf{X}$ と $\mathbf{Y}$ を求めことができる．

(28) 式よりフィードバックゲイン $\mathbf{F}$ が求まり，$\mathbf{F}$ は規則に関係なく同じ値を取るので制御入力は (19) 式の代わりに (30) 式となる．

$$\mathbf{v}(k)=-\mathbf{F}\mathbf{y}(k) \tag{30}$$

(30) 式を (21) 式に代入すれば，制御対象の出力である複合材はりの変位が次式のように計算できる．

$$\mathbf{y}(k+1)=\frac{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)[\{\mathbf{A}_i-\mathbf{G}_i\mathbf{F}\}y(k)+\mathbf{d}_i f(k)+\mathbf{e}_i]}{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(k)} \tag{31}$$

4.2 制御結果

以上の方法により得られたコントローラを用いて，振動制御システムの応答を調べた結果を Fig. 8～Fig. 10 に示す．いずれも 0.5 秒以降に制御を開始した例を示している．Fig. 8 はアクチュエータの応答として入力電圧 v_1，v_2 の時間遅れ項を考慮しない場合（すなわち，(8) 式の代わりに (7) 式を使用した場合）のシミュレーション結果，Fig. 9 は制御入力として時間遅れ項を考慮せずに算出された電圧 v_1，v_2 を実際にアクチュエータに与えて実験した結果，Fig. 10 は入力電圧の時間遅れ項を考慮した場合のシミュレーション結果である．

これらの図より，以下のことが分かった．

(1) アクチュエータの応答として入力電圧の時間遅れ項を考慮しない場合，シミュレーション結果と実験結果とも良好な精度が得られており，ファジィモデルの妥当

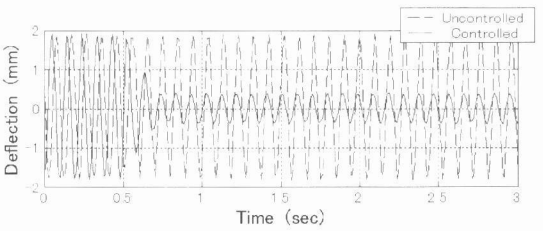

Fig. 9 Deflection response of the beam taking into no consideration of time delay (experimental result).

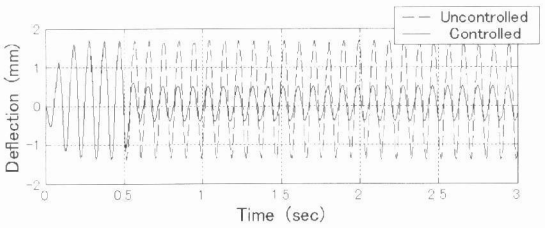

Fig. 8 Deflection response of the beam taking into no consideration of time delay (simulation result).

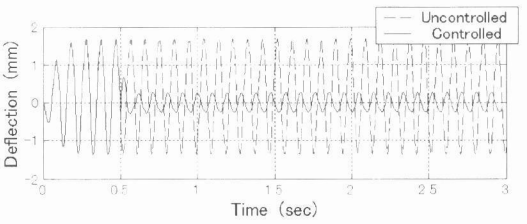

Fig. 10 Deflection response of the beam taking into consideration of time delay (simulation result).

性が確認できた (Fig. 8 と Fig. 9 を参照).

(2) 入力電圧の時間遅れ項を考慮した場合，さらに制御精度が向上することがシミュレーションにより確かめられた (Fig. 8 と Fig. 10 を参照).

5. 結　　言

アクチュエータとして，ER 流体とピエゾ素子を埋め込んだ CFRP 複合材はりに強制振動を与えたときの制御を考える際，ER 流体の強い非線形特性を考慮して制御対象のファジィモデルをニューロファジィの手法を用いて作成し，そのファジィモデルにもとづいて，振動系の安定性を保証する制御入力を求めた．検討の結果，精度の良いファジィモデルが得られ，アクチュエータの応答として入力電圧の時間遅れ項を考慮すれば制御精度がさらに改善されることがシミュレーションにより確認出来た．

参 考 文 献

1) M.V. Gandhi & B.S. Thompson : *Materials and Structures*, Chapman Hall (1992), pp. 71-79.
2) T. Takawa, T. Fukuda & K. Nakashima : *Smart Mater. Struct.*, **9**, 2 (2000), 215-219.
3) 福田武人：日本複合材料学会誌，**23**, 2 (1997), 50-53.
4) 中野政身：計測と制御，**34**, 9 (1995), 707-711.
5) 古荘純次：計測と制御，**34**, 9 (1995), 687-691.
6) 高木清志，佐藤宏司，西郷宗玄：日本機械学会第8回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集，(2003), pp. 101-104.
7) 韓　載興，谷　順二，尹　世鉉，李　　仁：日本機械学会第76期全国大会講演論文集 (1998), pp. 341-342.
8) S.M. Silva, R. Ribeiro, J.D. Rodrigues & M.Vaz : 13th International Conference on Composite Materials, (2001), p. 556.
9) 細江繁幸：システムと制御，オーム社 (1997).
10) 田中一男：インテリジェント制御システム，共立出版 (1996).
11) 福田武人，高田俊弘，高輪武志：日本材料学会論文集，**44**, 505 (1995), 1255-1260.
12) 田中一男：アドバンストファジィ制御，共立出版 (1994).
13) 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 (1993).
14) J.-S.R. Jang : *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, **23**, 3 (1993), 665-685.
15) J.-S.R. Jang & N. Gulley : *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*, The Math Works, Inc. (1995).
16) 浜田　望，松本直樹，高橋　徹：現代制御理論入門，コロナ社 (1997).
17) 杉江俊治：LMI によるロバスト制御系の解析と設計，システム制御情報学会 (1999).