付加的制御入力を利用した不確定離散時間システムのためのロバスト静的出力フィードバック制御

向谷 博明[†a)] 石井 靖久[††]
坂口誠史郎[††] 田中 良幸[††]
辻 敏夫[††] (正員)

Robust Static Output-Feedback Control for Uncertain Discrete-Time Systems via Additive Control Input

Hiroaki MUKAIDANI[†a)], Yasuhisa ISHII[††], Seishiro SAKAGUCHI[††], Yoshiyuki TANAKA[††], *Nonmembers*, and Toshio TSUJI[††], *Member*

[†] 広島大学大学院教育学研究科，東広島市
Graduate School of Education, Hiroshima University, 1–1–1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, 739–8524 Japan
[††] 広島大学大学院工学研究科，東広島市
Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1–4–1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, 739–8527 Japan
a) E-mail: mukaida@hiroshima-u.ac.jp

あらまし　本論文では不確定要素を含む離散時間システムに対して，付加的制御入力を考慮した静的出力フィードバック制御問題を考える．新規に提案される制御則は，付加的制御入力が存在しても，閉ループシステムの安定性が保証されている．結果として，付加的制御入力を適切に調節させることにより過渡応答性の改善等の要求される制御設計仕様が満足される．

キーワード　静的出力フィードバック制御，二次コスト保証制御，線形行列不等式（LMI），付加的制御入力

1. まえがき

従来より，不確定要素を含む離散時間システムの安定性に対する研究が数多く報告されている．実際のシステムを制御する場合，ロバスト安定性だけでなく過渡応答性を考慮した制御系を設計することが望ましい．この問題に対する一つのアプローチとして，従来から二次コスト保証制御がよく知られている [1]．このアプローチは，最適レギュレータ（LQ）制御と同様に過渡応答性の改善が可能であることが知られている．しかし，制御ゲインを決定するために解く必要のある最適化問題が初期値に依存するため，初期値が変更するたびに最適化問題を解き直す必要がある．また，初期値が不明である場合には，初期値の期待値を仮定して最適化問題を解くので，実際の制御が行われる際，初期値によっては制御結果に大きな影響を及ぼす．一方，固定された制御ゲインでは，不確定要素の影響で過渡応答性に関する制御性能にずれが生じる．したがって，制御ゲインは，オンラインで調整・変更することが，初期値や不確定要素にロバストな過渡状態を達成する近道であると考えられる．

本論文ではノルム有界である不確定要素を含む離散時間システムに対して，ニューラルネットワーク（NN），ファジー推論，PID 制御ゲインの人間による調節等を表現する付加的制御入力を伴う静的出力フィードバック制御問題を考える．従来研究 [10], [11] と本論文との大きな相違は，文献 [10] では，T-S ファジーモデルによって表現された非線形システムに対する安定性しか保証せず，また，文献 [11] では，NN のような人工知能的補償入力をフィードバックした閉ループ系の安定性は証明されていないのに対して，本論文では，付加的制御入力を伴う与えられたシステムに対する大域的な安定性を保証している点である．本論文で新規に提案される制御則は，上記のようなどのような付加的制御入力が存在しても，閉ループシステムの安定性が保証されている．この安定条件は，付加的制御入力を不確定要素として取り扱うことにより導出される．特に，付加的制御入力を不確定要素としてみなすアイデアは，従来の研究に見られない新規なアイデアである．結果として，ロバスト安定性は LMI 条件が保証しているので，付加的制御入力を適切にオンラインで調節することにより，未知な制御対象の初期値と不確定要素に対しても，LQ 制御同様に設計者の好みに合わせて過渡応答性を変更できる．数値例では，付加的制御入力を導入することにより，システムの過渡応答性が改善されていることを確認する．

2. LMI を用いたコントローラの設計

まず，静的出力フィードバックによる安定化制御則が存在するための十分条件を二次コスト保証制御理論によって導出する．以下の不確定要素を含む離散時間システムを考える．

$$x(k+1) = [A + \Delta A(k)]\, x(k) + Bu(k) \tag{1a}$$

$$y(k) = Cx(k) \tag{1b}$$

$$u(k) = Ky(k) + f(y(k)) \tag{1c}$$

ここで $x(k) \in \Re^n$，$y(k) \in \Re^l$，$u(k) \in \Re^m$ はそれぞれシステムの状態ベクトル，出力ベクトル，制御入力である．行列 A，B 及び C はそれぞれ適切な次元をもつ既知である定数行列を表す．K は固定フィードバックゲインであり，$f(y(k))$ は NN，ファジー推論，PID 制御ゲインの人間による調節等による付加的制御入力を表す．更に，不確定要素 $\Delta A(k)$ び付加的制御

入力 $f(y(k))$ は以下の構造をもつと仮定する．

$$\Delta A(k) = D_1 F(k) E_1 \tag{2a}$$

$$f(y(k)) = D_2 N(k) E_2 y(k) \tag{2b}$$

ここで，D_1, E_1, D_2, E_2 はそれぞれ適切な次元をもつ定数行列であり，$F(k) \in \Re^{p_1 \times q_1}$ は未知関数行列，$N(k) \in \Re^{p_2 \times q_2}$ は任意関数行列でそれぞれ以下の関係を満足すると仮定する．

$$F^T(k)F(k) \le I_{q_1},\ N^T(k)N(k) \le I_{q_2} \tag{3}$$

条件 (2a) は，かなり厳しい制約条件であるため，得られる結果の適用範囲が狭まることに注意されたい．一方，付加的制御入力 $f(y(k))$ に関する条件 (2b) も保守的であるが，従来研究の結果 [6], [12] を考慮して，ゲイン変動 $\Delta K(k) = D_2 N(k) E_2$ と観測値 $y(k)$ の積で表現されると仮定される．

本論文では，出力フィードバック制御則 (1c) に $f(y(k)) = D_2 N(k) E_2 y(k)$ といった付加的制御入力が含まれている点に注意を要する．ここで，実際のプラントでの付加的制御入力は，NN，ファジー推論，PID 制御ゲインの人間による調節等を表す．また，このような知的補償入力等を付加的制御入力に置き換えたアイデアは，従来の研究に見られない新規なシステムの概念である．システム (1) に関係して，評価関数 (4) を定義する．

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left[x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)\right] \tag{4}$$

ここで Q，R は正定対称行列として与えられる．不確定要素を含んだシステム (1) 及び評価関数 (4) に対して，二次コスト保証制御の定義を与える．

［定義 1］ 不確定離散時間システム (1) を満足するすべての解 $x(k) \neq 0$，不確定要素 (2a) 及び付加的制御入力 (2b) に対して，

$$\begin{aligned} &x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)Px(k) \\ &\quad + x^T(k)\big[Q + C^T(K + D_2N(k)E_2)^T R \\ &\quad \times (K + D_2N(k)E_2)C\big]x(k) < 0 \end{aligned} \tag{5}$$

が成立すれば，制御則 (1c) は不確定離散時間システム (1) 及び評価関数 (4) に対して，コスト行列 P を伴う二次コスト保証制御と呼ぶ．ただし，$P > 0$ である．

次の補題は，二次コスト保証制御の物理的特徴を与える [5]．

［補題 1］ 不確定離散時間システム (1) 及び評価関数 (4) を考える．また，制御則 (1c) はコスト行列 P を伴う二次コスト保証制御であると仮定する．このとき，閉ループ不確定離散時間システム (6)

$$\begin{aligned} x(k+1) = &[(A + D_1F(k)E_1) \\ &+ B(K + D_2N(k)E_2)C]x(k) \end{aligned} \tag{6}$$

は安定で，その評価関数 (4) の上限値は，すべての不確定要素及び付加的制御入力に対して

$$J < x^T(0)Px(0) \tag{7}$$

を満足する．ただし，$x(0) \neq 0$ である．

以上の準備のもと，不確定要素を含むシステム (1) に対する LMI を利用した二次コスト保証制御問題の結果を与える [5]．

［補題 2］ 不確定要素 (2a) 及び付加的制御入力 (2b) を含んだ離散時間システム (1) を考える．すべての不確定要素 $F(k)$ 及び任意の関数行列 $N(k)$ に対して，LMI (8)，(9) 及び条件 (10) を満足する正定対称行列 $X \in \Re^{n \times n}$，$Y \in \Re^{n \times n}$ 及び正定数 ε_i，$(i = 1,\ 2)$ が存在すると仮定する．このとき，(1c) における K は，二次コスト保証制御ゲインである．更に，コストの上限は (11) で与えられる．

$$J < x^T(0)Yx(0) \tag{11}$$

補題 2 の証明は，文献 [9] で紹介された類似のテクニック，及び出力フィードバックに関する結果 [3] を利用すれば容易に行えることに注意されたい．詳細は文献 [5] に示されている．

従来研究 [10] では，与えられた非線形システムを T-S ファジーモデルによって表現し，この T-S ファジーモデルに対する安定性しか保証しないことに注意されたい．すなわち，与えられた非線形システムの安定性を証明しているわけではない．更に，文献 [11] では，NN のような人工知能的補償入力をフィードバックした閉ループシステムの安定性は証明されていないことにも注意されたい．しかしながら，本論文では，付加的制御入力を伴う与えられたシステムに対する大域的な安定性を保証している．

LMI (8)，(9) 及び条件 (10) は解の集合 $(\varepsilon_1,\ \varepsilon_2,\ X,\ Y)$ より構成されている．ここで，LMI (8)，(9) 及び条件 $X = Y^{-1} > 0$ を満足するような行列 $(X,\ Y)$ を求めるために MATLAB の LMI コント

$$\begin{bmatrix} 0 \\ B \\ 0 \\ I_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp} \begin{bmatrix} -Y & A^T & I_n & 0 & E_1^T & [E_2C]^T \\ A & -X+\varepsilon_1 D_1 D_1^T + \varepsilon_2 B D_2 D_2^T B^T & 0 & \varepsilon_2 B D_2 D_2^T & 0 & 0 \\ I_n & 0 & -Q^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 D_2 D_2^T B^T & 0 & -R^{-1}+\varepsilon_2 D_2 D_2^T & 0 & 0 \\ E_1 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I_{q_1} & 0 \\ E_2 C & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I_{q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ 0 \\ I_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp T} < 0 \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} C^T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp} \begin{bmatrix} -Y & A^T & I_n & 0 & E_1^T & [E_2C]^T \\ A & -X+\varepsilon_1 D_1 D_1^T + \varepsilon_2 B D_2 D_2^T B^T & 0 & \varepsilon_2 B D_2 D_2^T & 0 & 0 \\ I_n & 0 & -Q^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 D_2 D_2^T B^T & 0 & -R^{-1}+\varepsilon_2 D_2 D_2^T & 0 & 0 \\ E_1 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I_{q_1} & 0 \\ E_2 C & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I_{q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\perp T} < 0 \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix} \geq 0,\ \mathrm{rank} \begin{bmatrix} X & I_n \\ I_n & Y \end{bmatrix} \leq n \tag{10}$$

ロールツールボックス [7] 等を利用して最適化を実行する．そこで，LMI (8)，(9) 及び条件 (10) に対する二次コスト保証制御ゲイン行列 K を得るために以下の最適化問題を考える．

［問題 1］ 拘束条件である LMI (8)，(9) 及び条件 (10) と等価である $X = Y^{-1} > 0$ のもと，これらを満足する組の集合のうち，不等式 (11) の上限を最小にする組 (ε_1，ε_2，X，Y) を求めよ．また，このときの静的出力フィードバックゲイン K を求めよ．

問題 1 の解法は，まず，Cone Complementarity Algoritm [4] を用いて，拘束条件を満たし，$X = Y^{-1} > 0$ を満足する解集合 (ε_1，ε_2，X，Y) を求める．そして，LMI コントロールツールボックス [7] を用いることにより，(11) の上限を最小化する K を求めることが可能となる(注1)．

以上から，LMI を用いた表現により，不確定要素及び付加的制御入力を含む閉ループシステムに対して，評価関数の上限値を最小にする固定フィードバックゲイン K を求めることが可能となる．

3. 過渡応答性の改善

不確定要素を含まないノミナルシステムを考える．

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B\hat{u}(k) \tag{12a}$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \tag{12b}$$

$$\hat{u}(k) = \hat{K}\hat{y}(k) \tag{12c}$$

ここで $\hat{x}(k) \in \Re^n$，$\hat{y}(k) \in \Re^l$，$\hat{u}(k) \in \Re^m$ はそれぞれノミナルシステムの状態ベクトル，出力ベクトル，制御入力である．$\hat{K}$ は (12c) のための固定フィードバックゲインである．ここで，ノミナルシステム (12) に対して評価関数を定義する．

$$\hat{J} = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\hat{x}^T(k) Q \hat{x}(k) + \hat{u}^T(k) R \hat{u}(k) \right] \tag{13}$$

ノミナルシステム (12)，評価関数 (13) に対して文献 [2] で示されている LMI の拘束条件を用いることにより固定フィードバックゲイン $\hat{K}$ を求めることができる．

本論文では，付加的制御入力として，ファジー制御を導入する．ファジー制御を用いて過渡応答性を改善するためには，適切な入出力変数を設定する必要がある．そこで，不確定要素を含んだシステム (1) の応答をノミナルシステム (12) の応答に近づけることを考える．本論文では不確定要素を含むシステム (1) とノミナルシステム (12) の応答の差 $E_r(k)$，及びその変

> (注1)：拘束条件である (8)，(9) 及び (10) をコマンド **lmiedit** によって記述し，最適化問題をコマンド **mincx** を利用して，Cone Complementarity Algoritm により再帰的に解けばよい．最終的にコマンド **basiclmi** を利用して固定フィードバックゲイン K を求めることが可能となる．また，提案されている解法は MATLAB に依存しない．すなわち，フリーウェアである Scilab (**http://www.scilab.org/**) にある LMITOOL によって解くことも可能であることに注意されたい．

動した値 $\Delta E_r(k)$（2 階差分）を入力とし，任意関数行列 $N(k)$ を出力するファジー推論の適用方法を検討する．以下のように $E_r(k)$，$\Delta E_r(k)$ を定義する．

$$E_r(k) = \hat{y}(k+1) - y(k+1) \tag{14a}$$

$$\Delta E_r(k) = E_r(k) - E_r(k-1) \tag{14b}$$

また，IF-Then 形式のルールを用いてファジー推論における出力 $N(k)$ を以下のように表現する．

$$\begin{aligned} &\text{If} \quad E_r(k) \text{ is } L_{1i}(k) \text{ and } \Delta E_r(k) \text{ is } L_{2i}(k), \\ &\quad \text{then } N(k) \text{ is } h_i(k) \ (i = 1, 2, \cdots, M) \end{aligned} \tag{15}$$

ここで，M は制御ルールの数であり，$L_{1i}(k)$，$L_{2i}(k)$，$h_i(k)$ はそれぞれステップ k における $E_r(k)$，$\Delta E_r(k)$，$N(k)$ のファジー集合である．制御ルールにより得られたファジー集合 $h_i(k)$ $(i = 1, 2, \cdots, M)$ を，OR 演算して得られたファジー集合の重心をとることにより任意関数行列 $N(k)$ を求める．すなわち $N(k)$ は，合成したファジー集合を $H(\phi)$，その横軸を ϕ とすると

$$N(k) = \frac{\displaystyle\int \phi \, H(\phi) \, d\phi}{\displaystyle\int H(\phi) \, d\phi} \tag{16}$$

と表すことができる．ファジー推論は，厳密な数値ではなく，主観的な考えに基づく制御規則を定め制御手順を決める手法である．したがって，数値による記述ではなく，「大きい」，「小さい」といったあいまいかつ定性的な特性に注目する．実際にシステムを制御することを考えた場合，制御ゲインの絶対値を大きくすると制御入力も大きくなるので，応答の変動が大きくなり収束が早くなる．逆に制御ゲインの絶対値を小さくすると制御入力も小さくなることで，応答の変動が小さくなり収束が遅くなる．これらを踏まえた主観的な考えに基づき，表 1 のようにファジールールを決定する．ここで，$E_r(k)$，$\Delta E_r(k)$，$N(k)$ の大きさの度合や符号を表す記号として，Negative Big（NB），Negative Middle（NM），Negative Small（NS），Zero（ZO），Positive Small（PS），Positive Middle（PM），Positive Big（PB）のように設定する．

次に入力変数のメンバシップ関数を定義する．$E_r(k)$ の幅を出力の初期値と原点の差，$\Delta E_r(k)$ の幅を $E_r(k)$ の幅の 2 倍と設定し，三角型メンバシップ関数を NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB のように設定する（図 1）．また，実システムへの適応を想定して計算の高速化を実現するため，出力変数のメンバシップ関数はファジー推論の簡略化推論法 [8] に基づいて図 2 のようなシングルトン型とした．なお，各メンバシップ関数の設計パラメータは，状態変数の初期値に対して $E_r(k), \Delta E_r(k)$ が取り得る範囲をあらかじめ算出した後，急激なゲイン変動を避けるように試行錯誤的に決定した．このように，定義された制御規則を用いて制御ゲイン変動を調整することで直接過渡応答性を改善することが可能となる．

表 1　不確定システムに対するファジールール
Table 1　The fuzzy rule for uncertain system.

		$\Delta E_r(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB				PB	PM		
	NM				PM	PS		
	NS				PS	ZO		NM
$E_r(k)$	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PS	PM		ZO	NS			
	PM			NS	NM			
	PB			NM	NB			

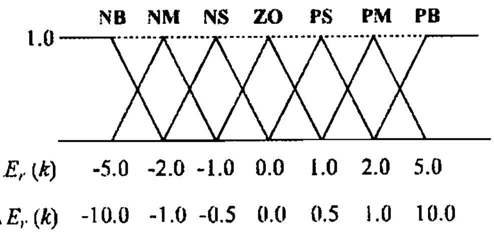

図 1　メンバシップ関数の入力
Fig. 1　Input of membership function.

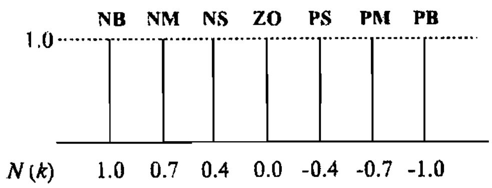

図 2　メンバシップ関数の出力
Fig. 2　Output of membership function.

4. 数　値　例

本章では，ファジー制御を用いた付加的制御入力の調節が有効であることを示すために数値シミュレーションを行う．次数が $n = 2$, $l = m = p_1 = p_2 = q_1 = q_2 = 1$ であるシステムを考える．システム (1) に対応する行列を以下に記述する．

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

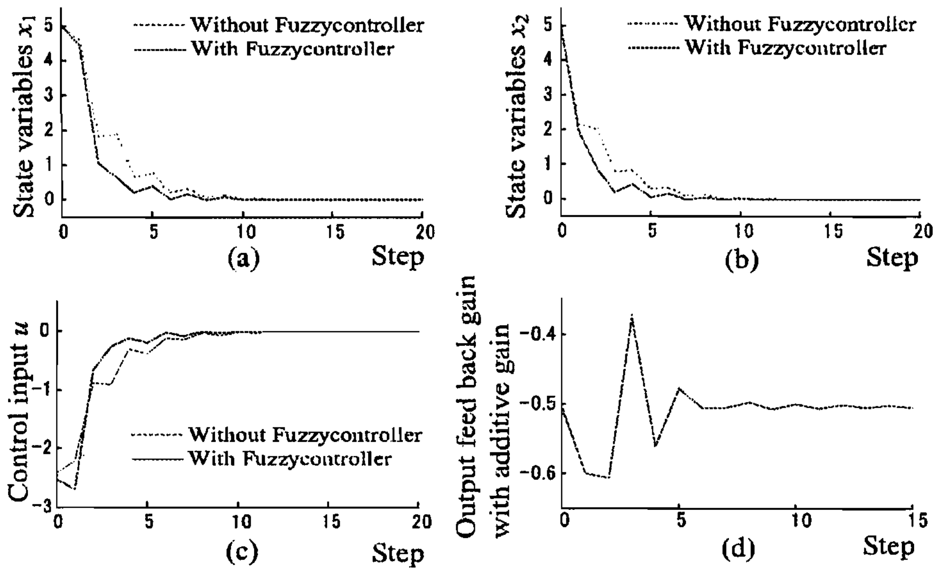

図 3 $F(k)=1.0$ におけるファジーコントローラによるシミュレーション結果．(a)，(b) 状態変数．(c) 制御入力．(d) 付加的制御入力を伴う出力フィードバック．

Fig. 3 Simulation results by using the fuzzycontroller ($F(k)=1.0$). (a), (b) State variables. (c) Control input. (d) Output feedback gain with additive gain.

$$D_1=\begin{bmatrix}2\\2\end{bmatrix},\quad E_1=\begin{bmatrix}0.2 & 0\end{bmatrix},\quad D_2=0.15$$

$$E_2=1,\quad Q=\mathrm{diag}\begin{pmatrix}1 & 2\end{pmatrix},\quad R=1.0 \tag{17}$$

また，各システムにおける状態の初期値を $x(0)=[5.0\ 5.0]^T$ とし，システムの不確定要素を表す関数 $F(k)$ を以下のように設定した．

$$F(k)=1.0 \tag{18}$$

不確定要素及び付加的制御入力を含むシステム (1)，評価関数 (4) に対して，提案手法を用いて導出した静的出力フィードバックゲイン K は以下のように与えられる．

$$K=-0.5036 \tag{19}$$

ここで，制御入力 (1c) において

$$\begin{aligned}u(k)&=Ky(k)+f(y(k))\\&=[-0.5036+0.15N(k)]\,y(k)\\&\quad -1\le N(k)\le 1\end{aligned} \tag{20}$$

を満足する範囲でファジー制御を用いて制御入力ゲインを変化させることが可能である．

ノミナルシステム (12)，評価関数 (13) に対して，文献 [2] における LMI の拘束条件を用いて導出した静的出力フィードバックゲイン $\hat{K}$ は以下のように与えられる．

$$\hat{K}=-0.4644 \tag{21}$$

$F(k)=1$ とした場合のシミュレーション結果を図 3 (a)，(b) に示す．いずれも提案法を用いたシステムの応答の方が早く収束していることが分かる．一方，図 3 (c)，(d) より，$K+\tilde{K}$ が不確定要素を補償し，応答をノミナルシステムの応答に近づけるように変化している．以上より，ファジー制御を用いて制御ゲイン変動の調節を行うことにより過渡応答性の改善が達成された．

［注意 1］ D_2，E_2 の大きさ，構造の決定については，まず，不確定要素の境界値を端点にもつにノミナルシステム (12) を表現する．続いて，各境界値でのそれぞれのノミナルシステム (12) に対して，評価関数 (13) を設定し文献 [2] における LMI の拘束条件を用いて導出した静的出力フィードバックゲイン $\hat{K}$ の集合 $\mathcal{S}$ を求める．これらの集合 $\mathcal{S}$ から静的ゲインの幅を不確定要素とみなすことにより，変動部分から構造を抽出し，変動幅から D_2，E_2 の大きさを決定すればよい．最後に，拘束条件 (8)，(9) 及び (10) を満足する解が存在するまで，D_2，E_2 の大きさ，構造を少しずつ変化させて，最終的な付加的制御入力を定式化すればよい．

5. むすび

本論文では，ノルム有界である不確定要素を含む離

散時間システムに対して，静的出力フィードバックによる二次コスト保証制御の存在条件を導出した．更に，システムにおける付加的制御入力を不確定要素に置き換えることによって，LMI 条件を導出した．主要な貢献として，システムに付加的制御入力を新規に仮定し，それらを不確定要素とみなして従来研究にある制御ゲインの不確定要素に対する理論展開を行ったことが挙げられる．結果として，付加的制御入力が含まれていても，ロバスト安定性を保証する．また，オンラインで制御ゲインを調整することにより，従来の固定フィードバックゲインのみによる二次コスト保証制御と比較して過渡応答性を改善することに成功した．

近年，人間と機械システムが接触して協調作業を行うマン・マシンシステムの研究開発が活発に行われている．このようなシステムの制御系を設計するには，機械システム側の不確定要素を考慮し，操作者のすぐれた運動能力を適切な入力として利用することが考えられる．そこで本論文の応用として，これらの優良な人間情報を付加的制御入力としてとらえることにより，安定性を考慮したマン・マシンシステムの設計が可能である．

最後に，本研究の一部は平成 17 年度スズキ財団科学技術研究助成によって行われた．ここに謝意を表します．

文　献

[1] I.R. Petersen and D.C. McFarlane, “Optimal guaranteed cost control and filtering for uncertain linear systems,” IEEE Trans. Autom. Control, vol.39, no.9, pp.1971–1977, Sept. 1994.

[2] T. Iwasaki, R.E. Skelton, and J.C. Geromel, “Linear quadratic suboptimal control with static output feedback,” Systems and Control Letters, vol.23, no.6, pp.421–430, Dec. 1994.

[3] 岩崎徹也，LMI と制御，昭晃堂，東京，1997.

[4] L.E. Ghaoui, F. Oustry, and M. AitRami, “A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems,” IEEE Trans. Autom. Control, vol.42, no.8, pp.1171–1176, Aug. 1997.

[5] Y. Ishii, H. Mukaidani, Y. Tanaka, N. Bu, and T. Tsuji, “LMI based neurocontroller for output-feedback guaranteed cost control of discrete-time uncertain system,” Proc. 2004 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, vol.III, pp.141–144, Hiroshima, July 2004.

[6] H. Mukaidani, Y. Ishii, N. Bu, Y. Tanaka, and T. Tsuji, “LMI based neurocontroller for state-feedback guaranteed cost control of discrete-time uncertain system,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E88-D, no.8, pp.1903–1911, Aug. 2005.

[7] P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, and M. Chilali, LMI Control Toolbox, For Use with MATLAB, The MATH WORKS Inc., Massachusetts, 1995.

[8] 菅野道夫，ファジィ制御，pp.84–90，日刊工業新聞社，1988.

[9] M.S. Mahmoud, “Resilient control of uncertain dynamical systems,” Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol.303, pp.83–98, Berlin, 2004.

[10] H.-N. Wu, “Reliable LQ fuzzy control for nonlinear discrete-time systems via LMIs,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B, Cybern., vol.34, no.2, pp.1270–1275, Feb. 2004.

[11] Y. Iiguni, H. Sakai, and H. Tokumaru, “A nonlinear regulator design in the presence of system uncertainties using multilayered neural networks,” IEEE Trans. Neural Netw., vol.2, no.4, pp.410–417, July 1991.

[12] B.C. Ding, H.X. Sun, and P. Yang, “Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno's form,” Automatica, vol.42, no.3, pp.503–508, March 2006.

（平成 18 年 5 月 26 日受付，7 月 6 日再受付，
8 月 7 日最終原稿受付）