【研究区分：先端的研究】

研究テーマ：不確かさを考慮したロバスト性のあるファジィシステムの構築	
研究代表者：地域創生学部 地域創生学科 地域産業コース 教授 韓虎剛	連絡先： hhan@pu-hiroshima.ac.jp
共同研究者：	
【研究概要】 本研究はファジィ制御によく使われている T-S ファジィモデルをベースに，ロバスト性のあるシステムの構築を目的としている。その成果が大きく分けて「モデルリング手法」と「制御器の設計」に分かれる。モデリング手法については，テイラー展開を用いてより複雑の対象にも適応できるアフィン T-S ファジィモデリングの手法を確立した。また制御器の設計については，アフィン項など利用可能な情報を最大限に利用し，利用できないもの（例えば外乱など）を観測器で観測して，そのシステムへの影響を抑える新しい制御手法を提案した。	

【研究内容・成果】

曖昧さの処理を可能にするファジィ理論の制御への応用，すなわちファジィ制御は，人間の判断など，曖昧さを含むアルゴリズムを IF-THEN 形式（例えば，IF 車は道路の右側に寄っている，THEN ハンドルを右に回す）で表現し，ファジィ推論を用いてコンピュータに実行させるものである。T-S (Takagi-Sugeno) ファジィモデルの登場を契機に，モデルベース設計の考え方に基づいてシステム全体の安定性を考慮してファジィ制御システムに関する研究は盛んに行われている。

本研究は，従来の T-S ファジィモデルを拡張した，よりシステム表現に優れるアフィン T-S ファジィモデルに，不確かさを考慮したロバスト性のあるファジィシステムの構築を目的としている。

１） アフィン T-S ファジィモデルの同定について

従来の T-S モデルの同定は sector nonlinearity という考え方をベースに，制御対象の動特性を表す非線形微分方程式を，非線形箇所ごとに２つのファジィルールに対応させて線形化するアプローチをとっている。その結果，非線形箇所 m の場合は，ファジィルールの数は 2^m となり，システム複雑さの増大につれルール数も指数的に増大してしまう。また，ある非線形箇所に複数の要素が絡む場合は，上記アプローチがうまく機能しない。本研究では，関心のあるいくつか操作点(operating points)において，テイラー展開による非線形微分方程式を線形化する手法を用いてファジィモデルの同定手法を確立した。その結果，従来の T-S ファジィモデルにおける後件部に状態空間方程式に（余分な）定数項が生じる。このようなモデルを本研究ではアフィン T-S モデルといい，その定数項をアフィン項という。従来の T-S ファジィモデルと比べて，アフィン T-S ファジィモデルの方が，複雑なシステムにも対応でき，また近似能力が高いという特徴をもっている。また，本研究では座標変換によって原点に対応するルールのアフィン項をゼロにする手法も提案している。

２） アフィン項の対応について

ファジィ制御器の設計パラメータは，一般に閉ループ制御システムの安定性条件を LMI (Linear matrix inequalities) にまとめ，それを解くことによって決定される。アフィン T-S ファジィモデルの場合は，アフィン項はシステムの不確かさと違い，既知情報であるため，その有効利用が望ましい。一方，アフィン項をシステム安定条件である LMI に織り込むと，その LMI が解くことができないという問題が生じる。本研究は，まず LMI が解けない理由を解明し，それを解くためにある種の二項不等式の必要性を明らかにした。このことについて，次の 2 つの側面から研究を進めた。

ア．状態空間を原点付近R_0（$||x||^2 \le c$，ただし，x はシステム状態で， c は設計パラメー

タ）とそれ以外の領域R_0^C（図１）に分割し，領域別にアフィン項利用の可否を明らかにする。その結果，原点付近R_0において，アフィン項の利用ができず，システムの不確かさの一部として考える必要がある。また，R_0^Cにおける制御器器を設計する際に，不等式$||x||^2 = x^T x > c$，及び S-procedure を援用して，アフィン項を織り込んだ，システム安定性を保証する実行可能な LMI の構成ができた。

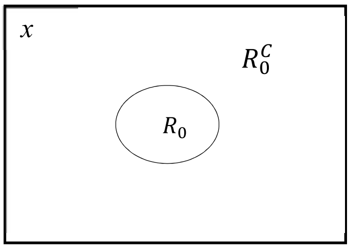

図１　システム平衡点付近 R_0 及びそれ以外の領域R_o^C

イ．ファジィルールの前件部にあるファジィ集合は，よく使われている図 2 のような三角型（ $F(x\,|\,l,c,r)$, ここで，$\mu_F(l) = \mu_F(r) = 0$, $\mu_F(c) = 1$）を前提に，次のような不等式：

$$(x-l)(x-r) < 0 \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & -\frac{l+r}{2} \\ -\frac{l+r}{2} & lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} < 0$$

を活かす。即ち，$lr < 0$の場合は，そのファジィ集合が原点付近に，また$lr \geq 0$の場合は原点付近以外に属すると判断する。これを拡張して，本研究ではアフィン T-S ファジィルール全体を原点付近とそれ以外の領域に整理した上, 原点付近以外における制御器器を設計する際に，上記不等式のような関係を援用して，アフィン項を織り込んだ実行可能な LMI の構成ができた。

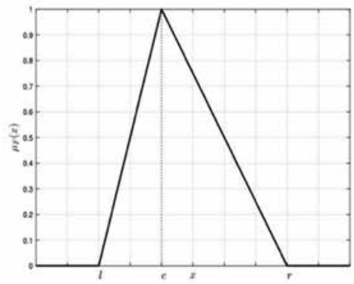

図２　ファジィ集合 $F(x)$

３） 不確かさ観測器設計について

システムの不確かさを対処するために，従来の研究では不確かさの有界性を仮定したうえ，その不確かさの限界値をシステムの安定条件 LMI に入れて，制御器の設計がなされるが，その安定条件は保守的で，場合によって満足できないことがある。本研究では，まず，不確かさを仮想的に変動する部分と変動しない部分に分割し，その変動しない分（すなわち，定数）を観測するというアプローチを提案した。提案手法は，一見して定数である変動しない部分しか観測できず，常に変動すると思われるシステムの不確かさを対応することができないという懸念があるが, 実際はに本研究の観測器は，図 3 に示しているように部分的に変動する“定数”及び，ゆっくり変動する“定数”にも対応できる。その結果，当観測器が激しく変動する不確かさに対しても，その軌道を上手くとらえることがきできるようになった。また，観測した不確かさ情報が，制御器の設計に直接に援用され，不確かさのシステムへの影響を抑える役割を果たしている。

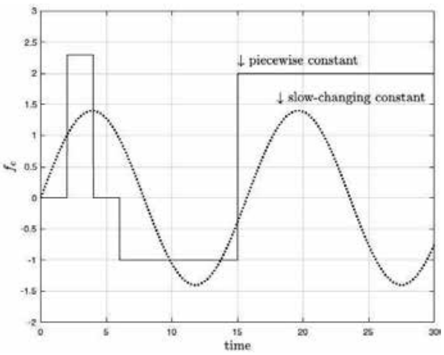

図３　部分的変動しない“定数” とゆっくり変動する“定数”

４） ファジィ制御器の設計について

ロバスト性のある制御システムを構成するため，本研究における制御器の設計指針は，アフィン項のような既知の情報をだきるだけ利用し，また不確かさのような未知の情報に対しても観測器を設計して，その観測情報を利用することである。具体的には，本研究のファジィ制御器設計が，原点付近とそれ以外の領域に分けて行われた。原点付近において，ファイン項がシステム安定性に直結する LMI に織り込めないため，それを観測した不確かさの一部として捉えて，制御器の構成に使われた。そして，不確かさ観測器で観測しきれない部分については, Nussbaum 関数及び適応制御理論を援用して大域漸近安定性を保証する制御器の設計ができた。また，原点付近以外の領域における制御器の構成について，ファイン項をシステム安定性に直結する LMI に織り込むことができるため，不確かさのみ考える必要があり，残りは原点付近に制御器の構成と同じである。なお，本研究では提案のアプローチを連続槽型反応器（CSTR）に応用し，その有効性を検証し明らかにした。