モデルに基づくファジィ制御 — これまでの研究成果と将来展望 —

田中 一男*

1. はじめに

本解説ではモデルに基づくファジィ制御のこれまでの研究成果と将来の研究展望について述べる。なるべく数式の使用は避け、制御分野以外の方にも一読いただけるように配慮した。理論的な点に興味のある読者は各文献を参照することをご容赦いただきたい。なお、最近出版されたモデルに基づくファジィ制御に関するリサーチモノグラフ[1]はこれまでの研究成果をサーベイするのに役立つと思われる。

制御分野で権威のある国際会議として知られている 2001 American Control Conference (Arlington, VA) や 2002 IFAC World Congress (Barcelona, Spain) においてワークショップ「Design and Analysis of Fuzzy Control Systems: A System-Theoretic Approach」[2]やパネルディスカッション「Perspective of Fuzzy Control」[3]が行われ、ファジィ制御が Control Society にも受け入れられる状況までとり着いた。しかし、国内のファジィ制御研究者の多くはファジィシステム関連の国際会議の参加にとどまっており、欧米やアジア諸国のファジィ制御研究者に比べると制御分野の国際会議への参加があまりにも少ないことが残念でならない。本解説の中でも触れているが、ファジィ制御研究者は「ファジィ理論」と「制御理論」の両者を熟知することが今後ますます求められよう。本解説が少なからずとも若い世代のファジィ制御研究者の刺激になれば幸いである。

2. Mamdani の制御手法からアドバンストファジィ制御へ

Mamdani[4]によって初めて試みられたファジィ制御は華々しい産業応用全盛の時代を経て、現在では「モデルに基づくファジィ制御」と「高度知的制御」として2極分化しながら発展している。ファジィ制御におけるこれらの新しい流れはアドバンストファジィ制御

[5]と呼ばれている。

モデルに基づくファジィ制御は厳密な線形化手法や backstepping 手法[6]など他の非線形制御手法に比べると「簡単に・自然に・効果的に」非線形制御を実現できることが特徴[7]である。古典的なゲインスケジューリングや最新の linear parameter varying (LPV) 制御と比較されることが多いが、モデルに基づくファジィ制御は

- ・Permutation テクニックによる条件のリラクゼーション[1]
- ・言語表現との親和性によるルールリダクション[7]
- ・Sector nonlinearity に基づくモデル化からオブザーバ設計や非線形追従制御まで統一された設計フレームワーク[1]をもつ

などが特徴となり、独自の発展を遂げている。モデルに基づくファジィ制御では、非線形システムを高木・菅野ファジィモデル[8]表現で簡単に記述し、並列分散的補償[9]を用いて制御系を自然に構成し、線形行列不等式(LMI)によってフィードバックゲインを効果的に求めることができる。モデルに基づくファジィ制御はこの3者が見事に fuzzy blending (巧みにブレンディング) された手法である。これらについては3章で述べる。現在では、モデルに基づくファジィ制御が伝統的な Mamdani のアプローチに代わる新たなファジィ制御手法として認識されている。制御分野の国際会議でのファジィ制御に関するセッションの発表では、90%以上が高木・菅野モデルに基づくファジィ制御を扱った論文であり、Mamdani の制御手法の発表は皆無といってよい。ここ数年、この流れが加速し、制御以外の分野のファジィ研究者が足を踏み入れることが難しくなってしまった。これは、制御の分野に限ることではなく、ファジィという分野の成熟度が高まれば高まるほど、その専門は細分化され、その専門に対する高いスキルが要求される。その意味で、これからのファジィ制御研究者は「ファジィ理論」と「制御理論」の両者を熟知することが必要である。

最近、後件部にシングルトンをもつファジィモデルに基づく制御についても多くの成果[10]が得られてい

* Kazuo TANAKA

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

る。後件部がシングルトンのファジィモデルは point-wise な特徴を活かすことによって解析のみならず制御器設計においても威力を発揮するものと期待される。また、言語記述レベルの安定性についても研究[11, 12]が始まっている。このアプローチではファジィ(言語)規則の特徴を活かした結果が得られており、制御の分野以外にも社会システムや経済システムの安定性を論ずる強力なツールとなりえる。

3. これまでの研究成果

図1はモデルに基づくファジィ制御のこれまでの研究成果と将来展望を示したものである。これまでの研究成果[1, 13]は大きく分けて以下の2つである。

- ・さまざまな制御性能条件の LMI 表現とそれを利用した多目的制御

- ・Sector nonlinearity によるファジィモデル化と universal approximation

前者については3.2で、後者については3.1で述べる。

将来展望については、上記の研究成果に対応した2つの流れが考えられる。

- ・Single Lyapunov function approach から multiple Lyapunov function approach へ

- ・新しいモデルに基づく設計フレームワーク

これらについては4章で述べる。

3.1. Sector nonlinearity によるファジィモデル化と universal approximation

高木・菅野ファジィモデル[8]は制御の分野に限らず、さまざまな分野で用いられている。高木・菅野ファジィモデルの特徴は後件部に linear あるいは affine なモデル記述を持つ点である。オリジナルな文献では affine の一般系が扱われているが、制御では定数項をゼロとした linear モデルを後件部にもつ高木・菅野ファジィモデルが用いられる。その理由は安定性などの解析が格段に容易になるためである。

さて、(後件部に定数項を持たない) r 個の規則からなる高木・菅野ファジィモデルを見てみよう。

Plant Rule i : If $z_1(t)$ is M_i^1 and $\cdots$ and $z_p(t)$ is M_i^p then $sx(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$ $i = 1, 2, \dots, r$ (1)

(1)式は r 個の Plant Rule の中で i 番目の Plant Rule を示したものである。ここで、 $sx(t)$ は連続系の場合 $\dot{x}(t)$ を、離散系の場合 $x(t+1)$ を表す。 M_i^j はファジィ集合である。 $z_1(t) \sim z_p(t)$ は前件部変数であり、状態変数に依存してもよく他の外部変数でもよい。(1)式は次のように計算(推論)される。

図1：これまでの研究成果と将来展望

$$sx(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \quad (2)$$

ここで、 $z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \cdots \ z_p(t)]^T$,

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_j^i(z_j(t))$$

である。ただし、メンバーシップ関数の特性上、

$$w_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0,$$

となる。また、

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{k=1}^r w_k(z(t))}, \quad \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1,$$

である。後件部には状態方程式を用いているが、状態方程式ではなく一般化プラント表現を用いるファジィモデルも提案され、このモデルに対する H^∞ 制御[14], [15]も行われている。

Remark 1 後件部に定数項を持たない高木・菅野ファジィモデルは定数項をもつモデルよりも記述能力が劣るという指摘が長年なされてきた。実際、後者は universal であることが知られている。しかし、最近になって前者も universal であることが証明され[16], この種の議論は意味がなくなった。制御システム解析や設計という観点から考えると、解析や設計が困難となる定数項をもつファジィモデルを用いるメリットはあまりないと言える。実際、ロボット、機械システム、電気シ

システム、カオスシステムなど多くの非線形システムが厳密にあるいは高い近似精度で後件部に定数項を持たないファジィモデルに置き換えられている[1], [5], [17]–[19]. なお、ファジィモデルへの置き換えには sector nonlinearity という概念が用いられる. Sector nonlinearity のアイデアは初めて[20]で示された. しかし、ここでは一次元の簡単な場合のみが扱われ、多次元の場合に起こる問題点については認識されていなかったようである. 文献[21]でその問題が指摘され、より一般的なアイデアが示され、この考え方を sector nonlinearity と呼んだ. sector nonlinearity の概念を用いて非線形モデルを厳密に表現するファジィモデルの構築法は文献[1]に多くの例題を添えて示されているので参考になろう. ここでは、global と semi-global の概念が重要であるが、詳細は省略する.

Remark 2 文献[8]において、高木・菅野ファジィモデルが提案され、入出力データを用いたモデルの同定手法が示された. その後、Kang, 菅野により構造同定とパラメータ同定を組合せたアルゴリズムに関する研究[22, 23]が精力的に行われた. これが契機となりさまざまなファジィモデリング法が提案されたのは周知の通りである. 最近、高木・菅野・Kang のファジィモデルというような呼び方を耳にするが、このような背景を理解すれば、後件部に線形関数を有するファジィモデルを高木・菅野のファジィモデルと呼び、このモデルの同定手法を Kang・菅野のファジィモデリング手法と呼び分ける方が的確である.

並列分散的補償[9], [24]の考え方に基づく(1)式に対するファジィ制御器を次のように設計できる. (1)式のファジィモデルが r 個の規則を有していることから(3)式のファジィ制御器も r 個の規則から構成される.

Control Rule i : If $z_1(t)$ is M_1^i and $\cdots$ and $z_p(t)$ is M_p^i then $u(t) = -F_i x(t)$ $i=1, 2, \dots, r$ (3)

(3)式の非ファジィ化表現は次のようになる.

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \quad (4)$$

ファジィ制御器の設計は(4)式の F_i を求める問題である. (3)式の後件部には状態フィードバックを用いているが、必要に応じて出力フィードバック、動的出力フィードバックなどを用いることもできる.

Plant Rule の (A_i, B_i) から線形制御理論を用いて F_i を求めることが最も簡単だが、この設計では制御系全体の安定性が保証されない[1], [5], [24], [25], [26].

したがって、制御系全体のグローバルな安定性や制御性能を考慮して F_i を求める必要が生じる. これが非線形システムの安定解析の難しい点である. これまでに制御系全体のグローバルな安定性や制御性能を考慮した数多くの設計法が提案されている. 最近ではさすがに見なくなったが、以前はファジィモデルの各サブシステム（各規則の後件部の線形システム）の安定性をチェックするだけで、システム全体の安定性を議論している論文が見受けられた.

3.2. さまざまな制御性能条件の LMI 表現とそれを利用した多目的制御

1990年にリアプノフ安定論を用いた安定条件の導出[25, 26]が行われ、本格的なファジィ制御系の解析・設計の時代へ突入した. さらに、ファジィ制御系の安定条件が LMI で表現できることが文献[9]ではじめて示され、数値的に解ける設計問題となった. これらの一連の研究が契機となってモデルに基づくファジィ制御が急速に発展し、海外では数えきれないほど多くの論文が発表されている. 設計条件が LMI で表現されている場合、解集合が存在すれば凸最適化手法によりその集合に含まれる一つの解を求めることができる. LMI で表現できる制御性能条件は

- ・安定条件
- ・Decay rate
- ・入力値制限と出力値制限
- ・外乱除去, H_∞ 制御
- ・ロバスト安定性
- ・二次形式評価関数の最小化制御
- ・ファジィオブザーバの設計
- ・動的出力フィードバック
- ・最適動的出力フィードバック

など[1]が知られており、これら以外にもさまざまな制御性能が LMI で表現されている. LMI の特徴はこれらを組合せることによって多目的な制御性能を満足する制御系を設計できる点であり、これは3.3で紹介するような実対象への適用では大いに役立つ.

モデルに基づくファジィ制御における設計条件の導出では

- ・条件の段階で permutation が的確に行われているか

・ $h_i(z(t))$ の情報が設計条件に活かされているか
 ということが重要である. これらは $h_i(z(t))$ の中に含まれる制御対象の非線形情報を設計条件の導出に利用することを意味しており、古典的なゲインスケジューリング制御に比べてきめ細かな設計条件が導出できる.

図 2 : 3 台のトレーラを有する移動体

図 3 : シミュレーション結果 (簡単な初期位置)

3.3. 応用

モデルに基づくファジィ制御の次の段階として、複雑システムへの適用可能性を議論することが必要である。本稿では、筆者の研究室で行ってきた以下の内容を紹介するが、他にも興味深い応用研究が数え切れないほどある。これらについては制御関連の国際会議の proceeding などを参照してほしい。

- ・複数台のトレーラを有する移動体の後退制御[27, 28]

- ・R/C ヘリコプタの姿勢安定化[29, 30]

- ・次世代超高速エレベータのモーション制御[31]

いずれも複数の LMI 条件を連立して解くことにより実应用到に適した多目的制御が実現されている。

3.3.1. 複数台のトレーラを有する移動体の後退制御

LMI 制御性能条件を用いた多目的制御の一例として複数台のトレーラを有する移動体の後退制御が実現されている。この後退制御はジャックナイフ現象を防止し、目標軌道に追従させることが目的である。しかし、

図 4 : シミュレーション結果 (難しい初期位置)

図 5 : シミュレーション結果 (外乱除去)

実際の制御系設計を考えると様々な制約を考えなければならない。ここでは、

- ・安定条件
- ・Decay rate 条件
- ・入力値制限 (ステアリング角飽和防止条件)
- ・出力値制限 (ジャックナイフ現象防止条件)
- ・ L_2 ノルムに基づく外乱除去条件

を考慮した多目的制御が実現されている。図 2 は実験に用いた 3 台のトレーラを有する移動体を示している。車両間の相対角度 $x_1(t)$, $x_3(t)$ および $x_5(t)$ が 90 [deg.] あるいは -90 [deg.] になるとジャックナイフ現象を引き起こし、後退不可能になる。制御目的は後退制御だけでジャックナイフ現象 (およびステアリング角度の飽和) を回避しながら, $x_7=0$ のラインに軌道を安定化させることである。

図 3 および図 4 は簡単な初期位置と難しい初期位置からの後退制御のシミュレーション結果を示している。図 3 の Decay rate を考慮した制御では、すばやく目標軌道に安定化されていることがわかる。一方、難しい初期位置からの制御結果を示している図 4 では、Decay rate を考慮した制御にはいくつかの問題が発生している。一つはステアリング角度の飽和であり、もう一つ

図 6 : 実験システム

図 7 : 実験結果

はジャックナイフ現象の発生である。図 4 の Decay rate を考慮した制御では制御開始直後にジャックナイフ現象に陥っていることがわかる。この問題に対して、Decay rate 条件だけではなく、入力値制限（ステアリング角飽和防止条件）、出力値制限（ジャックナイフ現象防止条件）も考慮した制御では、ジャックナイフ現象とステアリング角の飽和を回避しながらすばやく目標軌道に追従できていることがわかる。一方、図 5 は車両間の相対角度に sin 波外乱を混入させたときの外乱除去の結果を示している。外乱除去条件を考慮した制御器はふらつきながらもジャックナイフ現象に陥ることなく後退制御を実現している。図 6 は実験システムの概要を、図 7 は実験結果を示している。これらの結果は複数の LMI 制御性能条件を用いた多目的制御の有効性を示している。

図 8 に示すような 10 台のトレーラを有する場合の制御系設計[28]も行われ、制御系の安定性も保証されている。図 9 にシミュレーション結果を示す。シミュレーションのみではあるが、10 台のトレーラ車両を有する移動体の安定化に成功していることは興味深い事実

図 8 : 10 台のトレーラを有する移動体

図 9 : シミュレーション結果

である。オペレータの操作知識により制御規則を作成するという Mamdani のような古典的なアプローチでは、このような複雑なシステムをグローバルに安定化するような制御器を設計することは不可能である。

3.3.2. ヘリコプタのロバスト姿勢安定化

ヘリコプタのファジィ制御としては菅野らの報告[32, 33, 34, 35, 36]が有名であるが、安定性などの解析はなされていない。文献[29, 30]では一点を固定して自由度を落とした R/C ヘリコプタを対象にしているが、

- ・ロバスト安定性
- ・Decay rate
- ・入力値制限（プロペラの回転速度飽和防止条件）

を考慮した制御系設計を行っている。これらの LMI を連立して解くことにより多目的制御が実現されている。一点支持状態の R/C ヘリコプタの運動方程式は文献[29, 30]を参照されたい。モデルの方程式の導出時にプロペラの角速度の平衡点周りのモデル化を行っており、このモデル誤差を補償するためにロバスト安定性を考慮する必要がある。図 10 に一点を固定した R/C ヘリコプタモデルを示す。図 11, 12 に Robust stability & Decay

図10：R/C ヘリコプタ

rate 制御と Decay rate 制御によるシミュレーション結果を示す。図12に示したモデル化誤差を考慮しない Decay rate 制御では速応性が不十分で Decay rate の条件が十分に働いていないことがわかる。これに対して、図11に示したモデル化誤差を考慮した Decay rate 制御では十分な速応性が得られている。

図13は R/C ヘリコプタの実機による実験結果を示している。このように、R/C ヘリコプタのロバスト姿勢安定化に成功したため、現在は1点支持をはずしたフリーの状態での安定飛行の実験を行っている。

3.3.3. その他

数百メートルのロープ長を有する超高層・高速次世代エレベータのモーション制御に関する研究[31]なども行われている。

4. 今後の研究展開

4.1. Single Lyapunov function approach から multiple Lyapunov function approach へ

3章で述べたファジィ制御系の制御性能条件の導出には単純な2次形式リアプノフ関数が用いられている。しかし、安定である非線形システムに対しても2次形式リアプノフ関数が存在しない場合があることも知られている。このような2次形式リアプノフ関数による解析の保守性を和らげるため、piecewise Lyapunov function[37, 38, 39, 40]の研究が盛んに行われている。piecewise Lyapunov function のアプローチで問題となるのが、piecewise な領域境界の boundary condition (連続性または微分可能性) を考慮しなければならない

図11：Robust stability & Decay rate control.

図12：Decay rate control.

いことである。これが条件を複雑にし、LMI に帰着させることの障害になったり、結果的に保守的な条件になってしまうこともある。一方、ファジィモデルの特徴をうまく捉えた fuzzy Lyapunov function[41]が提案されている。このアプローチは boundary condition を必要としないことが特徴であるが、その代わりにその微分は前件部のメンバーシップ関数の時間微分を含んでおり、それをいかに扱うかが重要なポイントである。ファジィリアプノフ関数は以下のように定義されている。

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) x^T(t) P_i x(t), \quad (5)$$

ここで、 P_i は正定対称行列である。ここでは、 $z(t)$ は $x(t)$ の関数であるとする。(5)式のように新たに定義したリアプノフ関数(の候補)を考える場合、その well-definedness[42]をチェックすることを忘れてはならな

図13：実機による実験の連続写真

い。文献[41]ではファジィリアプノフ関数が2次形式リアプノフ関数よりも広いクラスの非線形システムに適用可能であることが示されている。

また、文献[43]では、ファジィリアプノフ関数による解析に適した(6)式のような新しいファジィ制御器も提案されている。

$$u(t) = - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) - \sum_{i=1}^r \dot{h}_i(z(t)) T_i x(t) \quad (6)$$

この制御器は $h_i(z(t))$ の時間微分が状態から計算可能な場合にのみ適用できる。これらは常に計算可能というわけではないので注意を要する。新しいファジィ制御器は $\dot{h}_i(z(t))$ の項を持っているため、制御器設計条件の保守性を緩めることができる[43]。 $T_i=0$ とおくと従来のファジィ制御器(4)式に帰着する。従来のファジィ制御器(4)式に対する設計条件が解けない場合でも、新しいファジィ制御器(6)式に対する設計条件が解けることが示されている。

4.2. 新しいモデルに基づく設計フレームワーク

制御理論の発展を見ると伝達関数から状態空間表現へのモデル、さらに一般化プラントの記述法の提案という節目ごとに制御理論が急速に発展している。対象

を記述するモデルの情報を利用して制御器を設計する場合、モデル記述は重要である。制御向きのファジィモデルが提案されれば、新しいファジィ制御の展開が期待できる。最近、switching fuzzy model[44,45]やpiecewise fuzzy model[46]などが提案され、新しいファジィモデルとその設計法が議論されている。

4.2.1. Switching fuzzy model を用いたホバークラフトの軌道安定化

ホバークラフトに代表される浮遊移動体は難しい制御対象として知られている。文献[44]ではスイッチングファジィモデルとこれに基づくスイッチングファジィ制御を提案し、R/C ホバークラフトへの適用を行っている。大変興味深いことはR/C ホバークラフトのような特性を持つシステムへは高木・菅野のファジィモデルに基づく制御手法（もちろん、線形制御手法も）の適用は困難である。ここでは、スイッチングファジィモデルに基づくスイッチングファジィ制御によって本制御対象の安定化に成功している。

図14は実験に用いた R/C ホバークラフトとその座標系を示す。制御目的は x 軸に沿わせることであり、 $y(t) \rightarrow 0$, $\theta(t) \rightarrow 0$ のレギュレータ問題である。ダイナミクスの平衡点（原点）で線形化したモデルは不可制御となり、線形化モデルによる制御器設計は困難である。図15に実験システムの概要を示す。2台のカメラから得られる画像情報よりホバークラフトの位置・姿勢角を求める。シミュレーションおよび実験結果を図16, 17に示す。図18に示した実験の連続写真よりホバークラフトが直線軌道に追従していることがわかる。なお、R/C ホバークラフトを任意の地点で停止させる制御は2階の非ホロミック特性を考慮した制御が必要になる。

5. まとめ

図14：R/C ホバークラフトと座標系

図15：実験システム

図16：シミュレーション結果

図17：実験結果

ファジィ制御はファジィの閉じた舞台ではなく、広く制御分野の舞台（制御関連の国内外の会議）でぜひ活発に議論したいものである。いまだにファジィ制御が日本のお家芸だと誤解している風潮もあるようだが、本稿で述べたようなファジィ制御の新しい流れに乗り遅れれば日本は確実にファジィ制御後進国となってしまう。「ファジィ制御日本」のお家芸を守るためにも若い世代の力がぜひとも必要である。

参考文献

- [1] K. Tanaka and H. O. Wang, Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach, JOHN WILEY & SONS, INC. (2001).
- [2] H. O. Wang, M. Sugeno and K. Tanaka, Design and Analysis of Fuzzy Control Systems: A System-Theoretic Approach, 2001 American Control Conference Workshop, Arlington, Virginia, June (2001)
- [3] Perspective of Fuzzy Control (with Open Forum), 2002 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July (2002)
- [4] E. H. Mamdani, Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588 (1974)
- [5] 田中, アドバンストファジィ制御, 共立出版 (1994)
- [6] R. Sepulchre, M. Jankovic and P. Kokotovic, Constructive Nonlinear Control, Springer (1997)
- [7] T. Taniguchi, A Fuzzy Model-based Approach to Analysis and Design of Nonlinear Control Systems, Ph. D. Thesis, The University of Electro-Communications (2001)
- [8] T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, IEEE SMC-15, pp.116-132 (1985)
- [9] H. O. Wang et. al., Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by T-S Fuzzy Model, FUZZ-IEEE'95, pp.531-538 (1995)
- [10] M. Sugeno, On Stability of Fuzzy Systems Expressed by Fuzzy Rules with Singleton Consequents, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.7, No.2, April, pp.201-224 (1999)
- [11] 古橋, 長谷川, 離散事象表現を用いたファジィ制御系の安定解析と近似の妥当性の検討, 第40回自動制御連合講演会, pp.103-106 (1997)
- [12] 古橋, 各務, J. Peters, W. Pedrycz: 一般化ファジィベトリネットモデルを用いたファジィ制御系の安定解析とファジィ制御器設計指針について, 第14回ファジィシステムシンポジウム, pp.61-64 (1998)

図18：連続写真

ms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, Vol.121, No.12, pp.1585-1588 (1974)

- [13] 日本ファジィ学会編集, ファジィとソフトコンピューティングハンドブック, 共立出版 (2000)
- [14] J. Li, D. Niemann et. al., Parallel Distributed Compensation for Takagi-Sugeno Fuzzy Models: New Stability Conditions and Dynamic Feedback Designs, 1999 American Control Conference, San Diego, June, pp.1832-1836 (1999).
- [15] S. Hong and R. Langari, Synthesis of an LMI-based Fuzzy Control System with guaranteed Optimal H^∞ Performance, FUZZ-IEEE'98, pp.422-427 (1998)
- [16] H. O. Wang, J. Li, D. Niemann and K. Tanaka, T-S fuzzy Model with Linear Rule Consequence and PDC Controller: A Universal Framework for Nonlinear Control Systems, 9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Antonio, May, pp.549-554 (2000)
- [17] Ishigame et al., Design of Electric Power System Stabilizer Based on Fuzzy Control Theory, Proc. of First IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.973-980 (1992)
- [18] 川路ほか, ファジィモデル追従制御系の設計, 第9回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.293-296 (1993)
- [19] K. Suzuki, Y. Naka and K. Bito, Fuzzy Multi-Model Control of a High-purity Distillation System, in Proceeding of IFES'91, Vol.2, pp.684-693 (1991)
- [20] 川本ほか, 非線形システムの厳密なファジィシステム構成と安定性解析, 第8回ファジィシステムシンポジウム論文集, pp.517-520 (1992)
- [21] 田中, 大竹, Sector Nonlinearity の概念を用いたファジィモデルの同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.4 pp.372-378 (2001)
- [22] 姜, 菅野, ファジィモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.6, pp.650-652 (1987)
- [23] M. Sugeno and G. T. Kang, Structure Identification of Fuzzy Model Fuzzy Sets and Systems, Vol. 28, pp.329-346 (1986)
- [24] H. O. Wang et al., An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and Design Issues, IEEE Transactions. on Fuzzy Systems, vol.4, no.1, pp.14-23, (1996)
- [25] K. Tanaka, and M. Sugeno, Stability Analysis of Fuzzy Systems Using Lyapunov's Direct Method, Proc. of NAFIPS'90, pp133-136 (1990)
- [26] K. Tanaka and M. Sugeno, Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems, Fuzzy Sets and Systems 46, no.1, pp.135-156 (1992)
- [27] K. Tanaka, T. Taniguchi and H. O. Wang, Trajectory Control of an Articulated Vehicle with Triple Trailers, 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Hawaii (1999)
- [28] K. Tanaka, T. Kosaki and H. O. Wang, Backing Control Problem of a Mobile Robot with Multiple Trailers, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C, Vol.28, No.3, August pp. 329-337 (1998)
- [29] K. Tanaka and H. Ohtake, Stable Control for R/C Helicopter, Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver (2001).
- [30] 大竹, 田中, R/C ヘリコプタのロバスト姿勢安定化, 第11回インテリジェントシステムシンポジウム, 大阪, pp.111-114 (2001)
- [31] K. Tanaka, M. Nishimura and H. O. Wang, Multi-objective Fuzzy Control of High Rise/High Speed Elevators using LMIs, 1998 American Control Conference, pp.3450-3454 (1998).
- [32] 景山ほか, 飛行モニタを用いた無人ヘリコプタのFBW制御, 第13回ファジィシステムシンポジウム, pp.271-274 (1997)
- [33] 中村ほか, GPS 及び画像情報を用いた無人ヘリコプタの知的誘導制御, 第13回ファジィシステムシンポジウム, pp.275-278 (1997)
- [34] 中村ほか, 無人ヘリコプタの安定化制御に関する研究, 第14回ファジィシステムシンポジウム, pp.221-224 (1998)
- [35] M. Sugeno et al., Intelligent Control of an Unmanned Helicopter Based on Fuzzy Logic, Proc. of American Helicopter Society 51st Annual Forum, Texas, May (1995)
- [36] M. Sugeno, Development of an Intelligent Unmanned Helicopter, in: H. T. Nguyen and N. R. Prasad eds., Fuzzy Modeling and Control: Selected Works of M. Sugeno. CRC Press (1999).
- [37] S. G. Cao, N. W. Rees and G. Feng, Analysis and design of a class of continuous time fuzzy control systems, Int. J. Control, vol.64, 1996, pp.1069-1087.
- [38] S. G. Cao, N. W. Rees and G. Feng, Analysis and design for a class of complex control systems, Part 2: fuzzy controller design, Automatica, vol. 33, no.6, 1997, pp.1029-1039.

- [39] M. Johansson, K-E Arzen and A. Rantzer, Piecewise Quadratic Stability of Fuzzy Systems, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.7, No.6 (1999) pp. 713-722.
- [40] A. Rantzer and M. Johansson, Piecewise Linear Quadratic Optimal Control, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.45, No.4 (2000) pp.629-637.
- [41] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang, A Fuzzy Lyapunov Approach to Fuzzy Control System Design, 2001 American Control Conference, Arlington, June, pp.4790-4795 (2001)
- [42] H. K. Khalil, Nonlinear Systems (Second Edition), Prentice Hall (1996).
- [43] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang, New Parallel Distributed Compensation using Time Derivative of Membership Functions, 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Dec., pp. 3942-3947 (2001)
- [44] K. Tanaka, M. Iwasaki and H. O. Wang, Switching Control of an R/C Hovercraft: Stabilization and Smooth Switching, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, Vol.31, No.6, pp.853-863 (2001)
- [45] H. Ohtake, et. al., A Construction Method of Switching Lyapunov Function for Nonlinear Systems, 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Hawaii, May (2002)
- [46] T. Hori, et. al., A Piecewise Takagi-Sugeno Fuzzy Model Construction and Relaxation of Stability Conditions, 2002 IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, Dec. (2002)
(2002年6月5日 受付)

[問い合わせ先]

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

電気通信大学 知能機械工学科

田中 一男

TEL/FAX : 0424-43-5425

E-mail : ktanaka@mce.uec.ac.jp

著者紹介

たなか かずお
田中 一男

1990年3月東京工業大学総合理工学研究科システム科学専攻博士後期課程修了。同年金沢大学工学部機械システム工学科助手, 1994年同学科助教授, 1996年人間・機械工学科助教授, 1998年4月電気通信大学機械制御工学科助教授, 1999年知能機械工学科助教授, 2002年知能機械工学科教授, 現在に至る。1992年 University of North Carolina 客員研究員, NAFIPS'90, HJSFSA'91にて優秀論文賞, 日本機械学会賞奨励賞, 日本ファジィ学会奨励賞および著述賞, 1999 IFAC World Congressにて The Best Poster Paper Prize, 2000 IEEE Transactions on Fuzzy Systems Outstanding Paper Awardなどを受賞。現在, IEEE Control Systems Society Editorial Board の Associate Editor。知的制御システム/非線形制御システムの解析と設計およびこれらの応用に関する研究に従事。(工学博士)