

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500287

研究課題名(和文) ファジィ双線形システムに対する制御系設計と実システムへの応用

研究課題名(英文) Control Design for Fuzzy Bilinear Systems with Application to Physical Systems

研究代表者

米山 淳 (YONEYAMA, JUN)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：30283344

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：局所的に双線形システムで与えられるファジィ双線形システムに対して、制御系設計を行った。ファジィ双線形システムは高木・菅野ファジィシステムを自然に拡張したシステムである。まず、状態フィードバック則の設計とフィルタの設計を行い、さらに、出力フィードバック則を用いた制御系の設計を提案した。その後、得られた制御則による数値シミュレーションを行い、実システムに適用してその有効性を検証した。最終的に得られた結果は満足いく結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Control design methods have been proposed for a fuzzy bilinear system whose local systems are given by bilinear systems. A fuzzy bilinear system is a natural extension of a Takagi-Sugeno fuzzy system. For such a system, state feedback control design, and filter design have been made. Then, control design methods via output feedback control have been proposed. Numerical simulation by the proposed controller has been carried out. Finally, the proposed control design methods have been applied to physical system, and the effectiveness of the control design methods has been confirmed. Experimental results are well satisfying.

研究分野：制御工学

キーワード：ファジィシステム 双線形システム 出力フィードバック則 ロバスト制御 サンプル値制御 むだ時間

## 1. 研究開始当初の背景

あるクラスの高木・菅野ファジィシステムにおいては、従来の高木・菅野ファジィシステムで厳密に表現できても、制御系の設計が非常に困難となることが示された。具体的には、従来の高木・菅野ファジィシステムでは、局所的な表現であるサブシステムはすべて線形システムで与えられる。そして、並列分散補償という制御則による制御系設計がなされる。この手法では、すべての線形サブシステムは可制御(可安定)などの制御系設計条件が満たされなければ、制御系設計が不可能となる。しかしながら、ある非線形システムにおいては、この設計条件を満たさないことがある。このような非線形システムでは、従来の高木・菅野ファジィシステムによる表現が可能だとしても、制御系設計が不可能となるという点が指摘されている。そこで、本研究では、局所的なサブシステムが双線形システムであるファジィ双線形システムを考える。ファジィ双線形システムにおいては、上記のような非線形システムでも制御系設計が可能となる表現となる。また、双線形の項を取り除くと、従来の線形システムとなるから、従来の高木・菅野ファジィシステムを一般化したシステム表現にもなっている。これにより、従来の高木・菅野ファジィシステムにより制御系設計が不可能な非線形システムの制御系設計が可能となる。前述の通り高木・菅野ファジィシステムはすでに世界的認知を得ている。したがって、そのモデルを拡張したファジィ双線形システムの制御系設計は非常に価値の高いものである。その上、現在までに、世界的にはこの分野の研究結果は少ない。

## 2. 研究の目的

局所的なサブシステムが双線形システムであるファジィ双線形システムを考える。このファジィ双線形システムに対し、理論的な発展のみならず、実システムに適用して制御することも研究目的とする。理論的な発展として、ファジィ双線形システムに対して、実システムに実装可能な制御則である出力フィードバック則による制御系設計、システムの状態変数を推定するフィルタ設計、およびサンプル値入力やむだ時間を考慮した制御系設計を主な研究目的とする。実際、実システムにおいて観測可能であるのは出力値であるため、システムの観測出力のみを用いた出力フィードバック則による制御系の設計が必要となる。また、出力フィードバック則を用いる際には、出力値からシステムの状態変数を推定するフィルタも必要となる。さらに、信号遅れやシステムに混入する外乱に対応し、むだ時間やロバスト性を考慮した制御系設計も研究目的とする。最終的には、数値シミュレーションにより制御則の制御性能を確認した後、得られた制御則を倒立振子の制御ヘリコプタの姿勢制御などの実システムに適用し、その有効性も検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) フィルタ設計

前件部変数は未知変数である場合と測定不可能なシステムの状態変数である場合とする。並列分散補償の概念を用いると、ファジィフィルタの重み関数は前件部変数に依存する。しかし、前件部変数が未知である場合、重み関数の値が計算不可能となり、フィルタの構築も不可能となる。このことがこれまでの研究における問題点であった。そこで、本研究では、前件部変数も同時に推定するフィルタを設計する。これにより重み関数の値が正確にわからなくても、時間とともにその値を推定する機構が構成できる。ここで設計するフィルタの種類は、推定誤差が漸近安定となるフィルタのみならず、コスト保証フィルタ、外乱抑制フィルタなどの設計を行う。また、ノミナルなファジィシステムに対するフィルタのみならず、システムパラメータに同定誤差を持つファジィシステムに対するロバストフィルタの設計も行う。

(2) 出力フィードバック則による制御系設計  
基本的な設計方法としては、フィルタと状態フィードバック則を組み合わせる方法がある。フィルタの設計法が確立されれば、フィルタと状態フィードバック則を合わせて、出力フィードバック則を設計することができる。この際に組み合わせる状態フィードバック則は、新たに提案する非線形な制御則である。この制御則により、従来は困難とされてきたファジィ双線形システムの制御系設計が可能となると大いに期待できる。もし前件部変数が未知の場合には、分離定理が成り立たないため、フィルタと状態フィードバック則を同時に設計することを考える。ここでは、上記のフィルタの導出で行った方法と同様に、前件部変数を同時に推定する出力フィードバック則を設計する。さらに、出力フィードバック則の設計条件を緩和する設計条件を求め、汎用性の高い制御系の設計方法確立する。設計する制御則の種類も、安定化出力フィードバック則のみならず、コスト保証制御則、外乱抑制制御則などの設計を行う。また、ノミナルなファジィシステムに対する制御則のみならずシステムパラメータに同定誤差を仮定したファジィシステムに対するロバスト制御則の設計も行う。

### (3) サンプル値制御系設計とむだ時間を考慮した制御系設計

実システムを制御する場合、通常、デジタルコンピュータやデジタルセンサなどデジタル機器を使用する。したがって、システムの状態は連続的に変化する動特性を持っていても、システムの出力はサンプリング時間毎にのみ値が得られる。サンプル値制御はシステムの動特性と制御に用いるハードウェアを考慮した制御であり、ハードウェア

の変更などによりサンプリング時間を変更しても、それに対応した制御系の設計ができるため、連続時間システムに対する制御則より有効な制御系設計が可能である。本研究代表者はサンプル値制御系の設計法を得ている。この結果は、これまでのサンプル値制御系設計法に比べて非常に容易で、一定でないサンプリング時間にも対応した設計が行えた。さらに、最近の研究結果を利用すると、さらなる設計条件の緩和が期待でき、より広いクラスの非線形の実システムに対しても設計が可能となる。また、むだ時間は理論的には無視できても、実システムにおいてはむだ時間も考慮すべき対象である。したがって、むだ時間とロバスト性を考慮した制御系の設計も検討する。

#### (4)実システムへの応用

理論的な制御系設計法の有効性を確かめるために数値シミュレーションと実システムへの適用を行う。実システムとして、既存の倒立振り子やヘリコプタの姿勢制御への適用を行う。これらのシステムはファジィ双線形システムで表現されることがわかっている。したがって、上述の理論に従ってロバスト性を有するサンプル値制御系を設計し、数値シミュレーションにより理論の有効性を確認すると共に、制御則をこれらの実システムに適用する。これらのシステムは、回転運動を含むため制御入力に非線形性を有し、従来の手法では正確な制御系設計が困難であるが、本研究で提案する手法で大きな改善が見込まれる。

## 4. 研究成果

### (1)フィルタ設計

ファジィシステムの前件部変数が未知変数、もしくは測定不可能なシステムの状態変数である場合、従来の並列分散補償の概念を用いると、ファジィフィルタの重み関数は未知となりフィルタの設計が不能となる。しかし、フィルタの前件部変数に依存する重み関数を不確かさと捉えることで、フィルタの設計が可能となった。また、フィルタゲインを従来のそれよりも一般化したため、従来の方法よりも保守性の低いフィルタ設計条件が得られた。また、これにより広いクラスのシステムに対するフィルタの設計が可能となった。

(2)出力フィードバック則による制御系設計  
一般に、ファジィシステムは非線形システムであるため、分離原理が成り立たない。分離原理とは、状態フィードバック則とフィルタをそれぞれ別々に設計し、それらを統合することで出力フィードバック則を設計できる原理である。これが、出力フィードバック則の設計を妨げていた理由である。しかし、本研究の方法を用いることで、一般的なファジィシステムに対しても出力フィードバック

則を設計できることが示された。また、従来の制御則を一般化することで、制御系の設計条件はより数値的に解きやすい線形行列不等式を導出できた。このアプローチは非常に画期的な研究結果と言える。それは、対象とするファジィシステムが広いクラスの非線形システムを扱えるため、一般的な非線形システムに対する設計法と言えるが、設計手法は容易な条件で与えられた。さらに、システムパラメータやフィードバックゲインに不確かさを含むファジィシステムに対するロバスト制御系の設計法も提案した。これにより、実システムに対応した制御系も設計することができた。

### (3)サンプル値制御系設計とむだ時間を考慮した制御系設計

サンプル値入力を遅れ信号と捉えて、むだ時間システムに対する制御系設計法を適用する設計方法を提案した。従来、解法が困難であった設計方法が、本研究により解法が容易な線形表列不等式により設計方法が与えられた。また、本研究の結果により可変なサンプリング時間によるサンプル値制御系の設計も可能とした。さらに、システムの状態変数にもむだ時間があるシステムに対する制御系設計法を提案し、設計条件も緩和することができた。サンプル値制御系設計やむだ時間システムの制御系設計においても、システムに混入する外乱や変動を考慮したロバスト制御系の設計も行った。

### (4)実システムへの応用

実システムへの制御則の実装を行う前に、数値的なシミュレーションを行った。制御性能を調整する設計パラメータを変更しシミュレーションを行い、過渡応答、定常特性などの制御性能を考慮した制御則を設計した。また、ノミナルな制御則の設計のみならず、ロバスト性を考慮した制御則による数値シミュレーションも行った。つぎに、これらの制御則を倒立振り子の倒立制御やヘリコプタの姿勢制御などの実システムの制御に適用した。本研究で得られた制御則による制御性能は高く、非常に有益な研究結果を得られた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

飯田哲平, 内田ゆず, 米山淳, 不確かさを含む離散時間システムに対する Non-fragile 制御系設計, 電気学会誌, 査読有, Vol.134, No.9, pp.1287-1292, 2014.

[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieej-eiss/134/9/\\_contents/-char/ja/Jun\\_Yoneyama](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieej-eiss/134/9/_contents/-char/ja/Jun_Yoneyama), Nonlinear Control Design Based on Generalized

Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, Journal of the Franklin Institute, 査読有, Vol.351, No.7, pp.3524-3535, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2013.09.016>

Ryutaro Takada, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Output Feedback Guaranteed Cost Control for Fuzzy Bilinear Systems, Applied Mathematical Sciences, 査読有, Vol.7, No.27, pp.1303-1318, 2013.

<http://www.m-hikari.com/ams/ams-2013/ams-25-28-2013/yoneyamaAMS25-28-2013.pdf>

Jun Yoneyama, Robust H Filtering for Sampled-Data Fuzzy Systems, Fuzzy Sets and Systems, 査読有, Vol.217, pp.110-127, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2012.08.014>

高田隆太郎, 内田ゆず, 米山淳, 双線形ファジィシステムに対するコスト保証制御則設計, 電気学会誌, 査読有, Vol. 132, No. 12, pp.1949-1954, 2012.

[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieej/eiss/132/0/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieej/eiss/132/0/_contents/-char/ja/)

Jun Yoneyama, Robust Sampled-Data Stabilization of Uncertain Fuzzy Systems via Input Delay Approach, Information Sciences, 査読有, Vol.198, pp.169-176, 2012.

DOI:10.1016/j.ins.2012.02.007

Syota Yamagishi, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, H Output Feedback Controller Design for Sampled-Data Systems, Applied Mathematical Sciences, 査読有, Vol. 6, No. 46, pp.2273-2287, 2012.

<http://www.m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-45-48-2012/yoneyamaAMS45-48-2012.pdf>

Yusuke Suzuki, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Robust H Non-Fragile Control Design for Descriptor Delay Systems, Applied Mathematical Sciences, 査読有, Vol. 6, No. 28, pp.1381-1395, 2012.

<http://www.m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-25-28-2012/yoneyamaAMS25-28-2012.pdf>

Shunsaku Nishikawa and Jun Yoneyama, H Output Feedback Control for A Class of General Fuzzy Systems, 日本知能情報ファジィ学会誌, 査読有, Vol.23, No.3, pp.332-338, 2011.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsoft/23/3/23\\_3\\_332/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsoft/23/3/23_3_332/_pdf)

野ファジィシステムに対する静的安定化出力フィードバックコントローラーの設計, 第2回制御部門マルチシンポジウム, PS-22, 2015年3月5日, 東京電機大学(東京都足立区).

Jun Yoneyama, Non-Fragile Output Feedback Control Design of Uncertain Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, The 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp.6764-6769, December 17th, 2014, Los Angeles(USA).

Jun Yoneyama and Kenta Hoshino, Output Feedback Control Design with Guaranteed Cost of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems(SCIS & SISIS 2014), pp.1170-1174, December 5th, 2014, 北九州国際会議場(福岡県北九州市).

Jun Yoneyama and Kenta Hoshino, Static Output Feedback Control Design with Guaranteed Cost of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, 14th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, pp.39-43, November 27th, 2014, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県恩納村).

林健太, 星野健太, 米山淳, 不確かさを含むファジィシステムにおけるnon-fragile出力フィードバックコスト保証制御, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会, pp.1724-1726, 2014年9月5日, 島根大学(島根県松江市).

Jun Yoneyama, Output Feedback Control Design for Nonlinear Systems Based on a Generalized Takagi-Sugeno Fuzzy System, 2014 World Automation Congress, EDAS No.1569916731, August 5th, 2014, Hawaii(USA).

Shunsuke Ochiai, Jun Yoneyama and Yuzu Uchida, Guaranteed Cost Control Design Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Nonlinear Subsystems, 2013 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.4712-4717, October 16th, 2013, Manchester(UK).

落合俊介, 米山淳, 内田ゆず, 一般化高木・菅野ファジィシステムの安定化制御系設計, 第29回ファジィシステムシンポジウム, pp.1002-1005, 2013年9月11日, 大阪国際大学(大阪府枚方市).

Jun Yoneyama and Yuzu Uchida, Nonlinear Control Design Based on Generalized Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, 2013

[学会発表](計20件)

芳賀建太, 米山淳, 星野健太, 高木・菅

IEEE International Conference on Fuzzy Systems, July 8th, 2013, Hyderabad(India).

Jun Yoneyama and Yuzu Uchida, Non-Fragile Control for Discrete Fuzzy Descriptor Systems, Joint 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.2268-2271, November 22nd, 2012, 神戸コンベンションセンター(兵庫県神戸市).

Ryutaro, Takada, Jun Yoneyama and Yuzu Uchida, Non-Fragile Control for Uncertain Takagi-Sugeno Fuzzy Bilinear Systems with Delays, 2012 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.1627-1632, October 16th, 2012, Seoul(South Korea).

米山淳, 高田隆太郎, 内田ゆず, 高木・菅野ファジィシステムを用いた非線形制御の一考察, 第28回ファジィシステムシンポジウム, pp.865-866, 2012年9月14日, 名古屋工業大学(愛知県名古屋市).  
高田隆太郎, 内田ゆず, 米山淳, 双線形ファジィシステムに対するコスト保証・出力フィードバック制御則設計, 第22回インテリジェントシステムシンポジウム, 2C1-3, 2012年8月31日, 沖縄県浦添市てだこホール(沖縄県那覇市).

Ryutaro Takada, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Non-Fragile Control for Fuzzy Bilinear Systems, SICE Annual Conference 2012, pp.1102-1105, August 21st, 2012. 秋田大学(秋田県秋田市).

Ryutaro Takada, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Observer-Based Stabilization of Takagi-Sugeno Fuzzy Bilinear Systems, International Conference on Electrical Engineering, pp.1752-1755, July 11th, 2012, ANA クラウンプラザホテル金沢(石川県金沢市).

Ryutaro Takada, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Output Feedback Stabilization of Takagi-Sugeno Fuzzy Bilinear Time-Delay Systems, 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.300-307, June 11th, 2012, Brisbane(Australia).

上野那央, 内田ゆず, 米山淳, 離散時間ファジィシステムに対するコスト保証制御系の設計, 電気学会電子・情報・システム部門大会, pp.1373-1378, 2011年9月8日, 富山大学(富山県富山市).

高田隆太郎, 内田ゆず, 米山淳, 双線形ファジィシステムに対するコスト保証制御則設計, 電気学会電子・情報・システ

ム部門大会, pp.1379-1381, 2011年9月8日, 富山大学(富山県富山市).

Nao Ueno, Yuzu Uchida and Jun Yoneyama, Output Feedback Control for Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems, 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.315-321, June 28th, 2011, Taipei(Taiwan).

西川周作, 内田ゆず, 米山淳, ファジィシステムに対するH制御, 第43回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, pp.91-94, 2011年3月2日, 北海道大学(北海道札幌市).

〔図書〕(計2件)

Jun Yoneyama, Yuzu Uchida and Ryutaro Takada, Robust Control Design of Uncertain Discrete-Time Descriptor Systems with Delays in: the book "Advances in Discrete Time Systems, IN-TECH, ISBN 980-953-307-589-6, p.256, 2012.

Jun Yoneyama, Yuzu Uchida and Shusaku Nishikawa, Robust Control Design of Uncertain Discrete-Time Systems with Delays in: the book "Discrete Time Systems", IN-TECH, ISBN 978-953-307-200-5, p.538, 2011.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ee.aoyama.ac.jp/Labs/yoneyama-www/yoneyama.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

米山 淳 (YONEYAMA, Jun)  
青山学院大学・理工学部・教授  
研究者番号: 30283344

### (2) 連携研究者

内田ゆず (UCHIDA, Yuzu)  
北海学園大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80583575