

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500212

研究課題名（和文） ファジィシステムに対するサンプル値制御系設計と実システムへの応用

研究課題名（英文） Sampled-Data Control Design for Fuzzy Systems with its Application

研究代表者

米山 淳 (YONEYAMA JUN)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：30283344

研究成果の概要(和文):高木・菅野ファジィシステムに対するサンプル値制御系の設計を行い、得られた制御則を実システムに応用した。サンプル値制御系の設計においては、状態フィードバック則の設計とオブザーバ・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サンプル値制御系の設計を行った。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の結果であった。

研究成果の概要(英文): Sampled-data control design for Takagi-Sugeno fuzzy systems has been made. First of all, design methods of state feedback controller, observer, and filter have been proposed. Then, a design method of output feedback controller has been given. Furthermore, numerical simulation of a fuzzy system by proposed sampled-data controllers has been carried out. Finally, such sampled-data controllers have been applied to a physical system, and the effectiveness of the controllers has been confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：制御工学、システム工学

科研費の分科・細目：情報学 感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ファジィモデル、非線形システム、サンプル値制御、むだ時間、ロバスト制御

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) オブザーバ・フィルタの設計

オブザーバやフィルタの設計法は、限定されたシステムに対してのみ提案されていた。これは、実システムに適用することを考えると不十分であり、オブザーバやフィルタの一般的な設計方法が求められていた。

## (2)出力フィードバック則による制御系設計

状態フィードバック則による制御系設計は多くの結果が与えられていたが、出力フィードバック則による制御系の設計は限定されたシステムに対してのみ提案されており、オブザーバやフィルタの設計方法と同様、不十分であった。しかし、これは一般的ではないため、実システムに適用することを考えると不十分であり、出力フィードバック則による制御系の一般的な設計方法が求められてい

た。

### (3) サンプル値制御系の設計

サンプル値入力による制御則の一般的な設計法が求められていた。デジタル機器を用いた実システムへの適用を考慮すると、連続時間システムに対する制御系設計の理論を直接、実装できない。それまでもサンプル値制御系の研究がなされていたが、理論が複雑すぎて、実システムへの制御則の実装は容易ではなかった。

## 2. 研究の目的

高木・菅野ファジィモデルに対する制御系設計理論の発展と、その理論を実システムに適用して制御することを研究目的とする。理論的な発展においては、オブザーバとフィルタ設計、出力フィードバック則による制御系設計、サンプル値入力による制御系設計の3点を主な研究目的とした。実際、実システムにおいて観測可能であるのは出力値のみであり、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構成が必要となる。また、その際には、観測可能な出力値からシステムの状態変数を推定するオブザーバとフィルタも必要となる。さらに、実システムに制御則を実装する場合、デジタル機器を使用して入力を構築するため、それに対応したサンプル値制御系の設計法が必要とされる。本研究では、これらの問題を解決し、理論的な設計法を実システムに効果的に適用することを目的とする。なお、それぞれの研究課題において、対象システムとなるファジィシステムのシステムパラメータに未知の変数を含む場合も合わせて考慮し、ロバストな制御系の設計方法も検討する。最後に、実用的な研究目的として、得られた理論を、倒立振り子、ヘリコプタモデルの実システムに適用し、有効性を確認する。

## 3. 研究の方法

### (1) オブザーバ・フィルタ設計

一般性を保つため、対象システムであるファジィシステムの前件部変数は未知変数、もしくは測定不可能なシステムの状態変数であるとする。本研究では、前件部変数に依存する重み関数をシステムの不確かさと捉える。重み関数の性質より、どんな前件部変数に対しても重み関数は0から1の間の値を取る。このことにより、前件部変数が未知であるファジィシステムは、システムパラメータに未知の値を取る構造的な不確かさを含むファジィシステムとして扱うことができる。これにより、オブザーバやフィルタの設計条件も保守性が軽減され、より広いクラスのシステムに対してオブザーバとフィルタが設計できる条件となる。ここで設計したオブザーバとフィルタの種類は、推定誤差が安定となるオ

ブザーバと外乱抑制フィルタである。また、ノミナルなファジィシステムに対するオブザーバやフィルタのみならず、同様の方法を用いて、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オブザーバと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

この場合もファジィシステムの前件部変数は未知変数、もしくは測定不可能なシステムの状態であるとする。出力フィードバック則を施した閉ループシステムの安定性を考察することで、安定化出力フィードバック則の構成法を与えることができる。ここでも、出力フィードバック則の設計条件の保守性が軽減されるような手法を用い、汎用性の高い制御系の設計方法を確認する。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予定している。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、同様の方法を用いて、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) サンプル値制御系の設計

0次ホールドによるサンプル値入力を入力遅れと捉え、むだ時間システムの結果を利用したサンプル値システムの制御系設計法を与える。これは、これまでのサンプル値制御系設計法に比べて、非常に容易に設計が行える。さらに、むだ時間システムに対する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可能となり、より広いクラスのシステムに対しても設計が行える。なお、不確かさを含むシステムに対し、ロバスト性を考慮したロバストサンプル値制御則の設計する際にもむだ時間システムを利用した方法を用いる。

### (4) 実システムへの応用

与えられた結果の有効性を確かめるために、まず数値シミュレーションと実システムへの応用を行う。理論的に得られた制御則の数値シミュレーションを行い、過渡応答も加味した制御系の設計を行う。実システムを考慮して、擬似的な外乱や変動を加えて、制御則の性能を検証する。実システムの応用として、既存の倒立振り子モデルやヘリコプタの姿勢制御への応用を行う。倒立振り子は、簡素な実験装置であるが、制御則の制御性能を確認するのに非常に適している。また、ヘリコプタの姿勢制御実験においても、機体に対する気流や突風が与える影響を考慮する必要がある。また、乗客の人数や乗客の搭乗する位置により機体自体の動特性が変動する。したがって、上述の理論に従ってロバスト制御系を

設計し、理論の有効性を確認すると共に、ヘリコプタの姿勢制御を実現する。

#### 4. 研究成果

##### (1) オブザーバ・フィルタ設計

一般に、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、ファジィオブザーバやフィルタの重み関数は未知となりオブザーバ・フィルタの設計が不能となる。したがって、オブザーバや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、オブザーバおよびフィルタの設計が可能となった。また、対象システムとそのオブザーバ・フィルタからなる誤差システムを、従来の方法よりも的確に表現することで、保守性の低いオブザーバと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オブザーバと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、分離原理が成り立たない。これは、一般的な非線形システムに対して分離定理が成り立たないことを表している。分離原理とは、状態フィードバック則とオブザーバ・フィルタをそれぞれ設計し、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、その設計条件は数値的に解きやすい線形行列不等式で表された。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、そのファジィシステムに対する出力フィードバック則の設計は、一般的な非線形システムに対する設計法と言える。したがって、この研究結果は有意義である。さらに、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

0次ホールドされたサンプル値入力による制御系の設計方法を提案した。従来、解法が困難であったハイブリッドな行列方程式・行列不等式に基づく設計方法が与えられていたが、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、従来は一定のサンプリング時間によるサンプル値制御系の設計のみが与えられていたが、

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、設計条件も緩和することができた。サンプル値制御系においても、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考える前に、数値的なシミュレーションを行った。シミュレーションにより、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子モデル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 25 件)

1. Makoto Nishigaki and Jun Yoneyama, Stabilization for Sampled-Data Systems by First-Order Hold Input, Applied Mathematical Sciences, 査読有, Vol.5, No.2, 2011, pp.79-90
2. Jun Yoneyama, Robust Guaranteed Cost Control of Uncertain Fuzzy Systems under Time-Varying Sampling, Applied Soft Computing, 査読有, Vol.11, No.1, 2011, pp.249-255
3. Shusaku Nishikawa and Jun Yoneyama, Guaranteed Cost Output Feedback Control of Fuzzy Systems via LMI Approach, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, Vol.14, No.6, 2010, pp.567-573
4. Jun Yoneyama, Robust Stability for Descriptor Systems with Time-Varying Delay, Applied Mathematical Sciences, 査読有, Vol.4, No.20, 2010, pp.977-989
5. Jun Yoneyama, Robust  $H^\infty$  Control of Uncertain Fuzzy Systems under Time-Varying Sampling, Fuzzy Sets and Systems, 査読有, Vol.161, No.6, 2010, pp.859-871
6. Jun Yoneyama, LMI Approach to Output Feedback Stabilization for Fuzzy Systems with Immeasurable Premise Variables, 日本知能情報ファジィ学会誌, 査読有, Vol.22, No.3, 2010, pp.390-395
7. Tomoaki Ishihara and Jun Yoneyama,

- Robust Sampled-Data Control for Uncertain Fuzzy Systems with Discrete and Distributed Delays, *Advances in Fuzzy Sets and Systems*, 査読有, Vol. 5, No. 2, 2010, pp. 137-151
8. Tomoaki Ishihara and Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Sampled-Data Control for Fuzzy Systems with Discrete and Distributed Delays, *International Review of Automatic Control*, 査読有, Vol. 2, No. 6, 2009, pp. 654-660
  9. Jun Yoneyama, Robust Stabilization For Uncertain Time-Delay System Under Time-Varying Sampling, *Applied Mathematical Sciences*, 査読有, Vol. 3, No. 38, 2009, pp. 1873-1883
  10. Masatoshi Hara and Jun Yoneyama, Robust  $H^\infty$  Disturbance Attenuation for Uncertain Discrete-Time Systems with Time-Varying Delay, *Applied Mathematical Sciences*, 査読有, Vol. 3, No. 27, 2009, pp. 1303-1313
  11. Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Filtering for Fuzzy Systems with Immeasurable Premise Variables: An Uncertain System Approach, *Fuzzy Sets and Systems*, 査読有, Vol. 160, No. 12, 2009, pp. 1738-1748
  12. 米山淳, サンプル値ファジィシステムに対するロバストオブザーバ設計, *日本知能情報ファジィ学会誌*, 査読有, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 549-556
  13. Jun Yoneyama, Robust Guaranteed Cost Control of Uncertain Fuzzy Systems under Sampled-Data Inputs, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 査読有, Vol. 13, No. 2, 2009, pp. 150-154
  14. Masatoshi Hara and Jun Yoneyama, An Improved Robust Stability Condition for Uncertain Discrete Time-Varying Delay Systems, *Journal of Cybernetics and Systems*, 査読有, Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 23-27
  15. 米山淳, 中立型むだ時間および分布むだ時間を含むファジィシステムに対するロバスト安定性と安定化制御器設計, *日本知能情報ファジィ学会誌*, 査読有, Vol. 21, No. 1, 2009, pp. 143-150
  16. Jun Yoneyama, Sampled-Data Control for Fuzzy Time-Delay Systems under Time-Varying Sampling, 査読有, *International Journal of Computational Intelligence in Control*, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 1-5
  17. Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Sampled-Data Control of Fuzzy Systems with Input Delay, *Journal of Computers*, 査読有, Vol. 3, No. 11, 2008, pp. 25-31
  18. Jun Yoneyama and Takuo Tsuchiya, New Delay-Dependent Conditions on Robust Stability and Stabilisation for Discrete-Time Systems with Time-Delay, *International Journal of Systems Science*, 査読有, Vol. 39, No. 10, 2008, pp. 1033-1040
  19. Jun Yoneyama, Robust Stability and Stabilizing Controller Design of Fuzzy Systems with Discrete and Distributed Delays, *Information Sciences*, 査読有, Vol. 178, No. 8, 2008, pp. 1935-1947
  20. Jun Yoneyama, Risk-Sensitive Control for Systems with Input Delays, *Applied Mathematical Sciences*, 査読有, Vol. 2, No. 48, 2008, pp. 2363-2376
  21. 米山淳, 時変むだ時間をもつ不確かな線形システムの  $H^\infty$  フィルタ設計, *電気学会誌*, 査読有, Vol. 128, No. 6, 2008, pp. 970-975
  22. Jun Yoneyama, Robust Stabilization of Uncertain Fuzzy Systems under Sampled-Data Inputs, *Advances in Fuzzy Sets and Systems*, 査読有, Vol. 3, No. 3, 2008, pp. 301-314
  23. 米山淳, 不確かさを含む時変むだ時間システムに対するロバスト  $H^\infty$  外乱抑制, *電気学会誌*, 査読有, Vol. 128, No. 4, 2008, pp. 613-617
  24. 米山淳, 時変むだ時間をもつ離散時間システムの  $H^\infty$  外乱抑制, *計測自動制御学会誌*, 査読有, Vol. 44, No. 3, 2008, pp. 285-287
  25. Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Output Feedback Control for Fuzzy Systems with Immeasurable Premise Variables: Discrete-Time Case, *Applied Soft Computing*, 査読有, Vol. 8, No. 2, pp. 2008, 949-958
- [学会発表] (計 26 件)
1. 西垣真琴, 内田ゆず, 米山淳, 1次ホールドサンプル値入力による出力フィードバック制御, *電気学会全国大会*, 3-083, 2011年3月16日, 大阪
  2. 西川周作, 内田ゆず, 米山淳, ファジィシステムに対する  $H^\infty$  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, 札幌
  3. Jun Yoneyama and Yuzu Uchida, Robust Sampled-Data Stabilization for Fuzzy Systems with Nonlinear Perturbation by First-Order Hold Input, *Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 11th International Symposium on*

- Advanced Intelligent Systems, pp.1585-1590, December 12th, 2010, Okayama
4. Jun Yoneyama, Output Feedback Control Design for Takagi-Sugeno Fuzzy Bilinear Time-Delay Systems, 2010 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.1671-1677, October 12th, 2010, Istanbul
  5. 西垣真琴, 内田ゆず, 米山淳, 1次ホール入力による $H^\infty$ サンプル値制御, 第20回インテリジェントシステムシンポジウム, S1-2-2, 2010年9月25日, 東京
  6. 西川周作, 内田ゆず, 米山淳, ファジィシステムに対するロバストコスト保証制御, 第20回インテリジェントシステムシンポジウム, S1-2-1, 2010年9月25日, 東京
  7. Jun Yoneyama, Yuzu Uchida, and Makoto Nishigaki, Sampled-Data Stabilization of Fuzzy Systems by First-Order Hold Input, 第26回ファジィシステムシンポジウム, pp.955-958, 2010年9月15日, 広島
  8. Jun Yoneyama, Stabilization of Takagi-Sugeno Fuzzy Bilinear Time-Delay Systems, 2010 IEEE Multi-Conference Systems and Control, pp.111-116, September 8th, 2010, Yokohama
  9. Jun Yoneyama, LMI Approach to Output Feedback Control for Fuzzy Systems, 2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.2174-2179, July 22nd, 2010, Barcelona
  10. Tomoaki Ishihara and Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Control for Fuzzy Sampled-Data Systems with Discrete and Distributed Delays, 2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.1828-1834, July 20th, 2010, Barcelona
  11. 西垣真琴, 米山淳, 1次サンプル値入力によるシステムの安定化, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 東京
  12. 石原知明, 米山淳, ファジィむだ時間システムに対するロバスト $H^\infty$ サンプル値制御則の設計, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 東京
  13. 江原崇之, 米山淳, 入力遅れを用いた出力フィードバック則設計, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 東京
  14. 島崎祐一, 米山淳, サンプル値システムに対する $H^\infty$ フィードバック制御則の設計, 電気学会全国大会, 2010年3月17日, 東京
  15. Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Filtering for Sampled-Data Systems, 2009 IEEE International Conference on Control and Automation, pp.1728-1733, December 11th, 2009, Christchurch
  16. Jun Yoneyama, Robust Stability and Stabilization for Uncertain Discrete-Time Fuzzy Systems with Time-Varying Delay, 7th Asian Control Conference, pp.1022-1027, August 28th, 2009, Hong Kong
  17. Jun Yoneyama, Output Feedback Control for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Immeasurable Premise Variables, 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.802-807, August 23rd, 2009, Jeju Island
  18. 石原知明, 米山淳, 分布型むだ時間を含むファジィシステムに対するサンプル値制御則の設計, 第25回ファジィシステムシンポジウム, 3B2-05, 2009年7月16日, つくば
  19. Jun Yoneyama,  $H^\infty$  Filtering of Sampled-Data Fuzzy Systems, IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp.434-439, July 8th, 2009, St. Petersburg
  20. Hara, Masatoshi and Jun Yoneyama, Stabilization of Discrete-Time Delay Systems, 平成21年度電気学会全国大会, pp.132-133, 2009年3月19日, 札幌
  21. Jun Yoneyama, Sampled-Data Stabilization of Fuzzy Systems with Multiple Time-Delays, Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.1436-1441, September 20th, 2008, Nagoya
  22. Jun Yoneyama, Filtering for Sampled-Data Fuzzy Systems, 第24回ファジィシステムシンポジウム, pp.303-306, 2008年9月3日, 大阪
  23. Jun Yoneyama, Uncertain Fuzzy System Approach to Mechanical System Control, 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, pp.45-48, August 28th, 2008, Sapporo
  24. Masatoshi Hara and Jun Yoneyama, New Robust Stability Conditions for Uncertain Discrete-Time Systems with Time-Varying Delay, SICE Annual Conference 2008, pp.743-747, August 20th, 2008, Tokyo
  25. Jun Yoneyama, Sampled-Data Control for Time-Delay Systems, International Conference on Electrical Engineering

- 2008, P-018, July 7th, 2008, Okinawa
26. Jun Yoneyama, Robust Stabilization of Fuzzy Systems under Sampled-Data Control, 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp.1236-1241, June 4th, 2008, Hong Kong

[図書] (計 2 件)

1. Jun Yoneyama, Yuzu Uchida and Makoto Nishigaki, Robust Sampled-Data Control Design of Uncertain Fuzzy Systems with Discrete and Distributed Delays in: the book "Ferroelectrics", IN-TECH, ISBN 978-953-307-439-9, p. 450, 2010
2. Jun Yoneyama and Tomoaki Ishihara, Control Design of Fuzzy Systems with Immeasurable Premise Variables in: the book "Fuzzy Systems", IN-TECH, ISBN 978-953-7619-92-3, pp.210, 2010

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・准教授

研究者番号 : 30283344