

平成22年4月1日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860040

研究課題名（和文）不確定変動幅非依存型制御系設計の研究

研究課題名（英文）Study on Control System Design Irrespective of Bounds of Uncertain Variations

研究代表者

橋本 智昭（HASHIMOTO TOMOAKI）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：90515115

研究成果の概要（和文）：

本研究では、不確定要素と時間遅れを含むシステムに対して、それらの変動幅の大きさに関わりなく対象システムを安定化させるための制御系設計手法を構築した。特に、システムの状態変数が全て観測可能とは限らない場合を想定して、状態の部分的な出力情報に基づいた安定化制御器の設計法を確立した。不確定要素が任意の大きさの値を取る場合、システムの係数行列における不確定要素の配置が重要となる。不確定変動幅の大きさに関わりなくシステムが安定化可能となるための不確定要素の許容配置構造が明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we examined the problem of designing a controller to stabilize a class of linear uncertain systems with state delays, independently of the bounds of uncertain variations. In particular, we investigated the output feedback stabilization problem of linear uncertain delay systems with limited measurable state variables. It is well known that controllability and observability play a crucial role in the stabilization of systems with limited measurable state variables. Hence, we first investigated the permissible locations of uncertain parameters in the system matrices for a linear uncertain system to be controllable and observable independently of the bounds of the uncertain parameters. Consequently, we derived necessary and sufficient conditions under which a linear uncertain system is controllable and observable irrespective of the bounds of uncertain parameters. Taking it into account, we next examined the stabilization problem of linear uncertain delay system by means of output feedback control. It was shown that if a linear uncertain delay system has a particular configuration with respect to uncertain entries, then the system can be stabilized however larger the given bounds of uncertain parameters might be. For a system satisfying the obtained stabilizability conditions, a systematic design method of the stabilizing controller was constructed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,290,000	387,000	1,677,000
2009年度	1,180,000	354,000	1,534,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,470,000	741,000	3,211,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：制御理論，ロバスト制御，不確定システム，可制御性，可観測性，安定化，

1. 研究開始当初の背景

動的システムの制御問題を考えた場合，対象システムを正確に数学モデルで記述することは難しく，また，ある種の不確かさをシステム自身が内包している場合が多いので，不確定変数を加えて記述されるシステムモデルに対して，その不確定変動に関わりなくシステムをロバストに安定化させる手法を構築しなければならない．また，生態，生物，金融，経済，化学，ネットワークなど様々な分野では，システムの挙動が現在の状態だけではなく過去の状態にも依存しているシステムが多く存在する．これらを背景にして，本研究では基礎的な観点から線形システムを対象として，不確定変数と時間遅れを含むシステムの安定化問題を研究課題としている．

近年，不確定システムのロバスト安定化手法に関する研究成果が数多く報告されている．既存の研究成果を大きく2つに分類することができる．1つはシステムの安定化条件が不確定要素の変動幅に依存しているものであり，もう1つはシステムの安定化条件が不確定要素の変動幅に依存しないものである．前者の安定化条件では，不確定変動幅の大きさがある程度大きくなると，システムの安定化制御器の設計ができなくなるのに対して，後者の条件では，任意の大きさの変動幅に対してシステムの安定化制御器の設計が可能である．既存の研究成果の9割以上が前者に属し，後者の結果は極めて少ない．そこで，本研究課題では後者の枠組みの問題に取り組んでいる．

後者の枠組みに属する希少な先行研究では，システムの状態変数が全て観測可能である場合における安定化制御器の設計法が既に提案されている．しかしながら，状態変数の一部分のみが出力より観測可能となるシステムが多く存在する．状態変数が全て観測可能とは限らないシステムに対しては従来の制御系設計手法が適用できない．そこで，出力からの部分的な情報により，不確定変数と時間遅れの変動幅の大きさに関わりなくシステムを安定化させる手法を構築する必要があるが，その問題は未解決である．

2. 研究の目的

本研究課題では，不確定変数と時間遅れを含むシステムに対して，それらの変動幅の大きさに関わりなくシステムを安定化させる

手法を構築することを目的としている．特に，状態変数が全て観測可能とは限らない場合を想定して，部分的な情報に基づいた出力フィードバックによる安定化問題に取り組む．

上記課題を達成するためには，不確定変数の変動幅に依存しないで，不確定変数の要素配置のみに依存したシステムの安定化条件を導出する必要がある．その安定化条件により，任意の大きさの不確定要素の存在が許容できるためのシステムの幾何学的構造が明らかにされる．

出力フィードバックの安定化問題を解くための重要な概念として，システムの可制御性と可観測性が挙げられる．本研究課題では，システムの安定化問題を考察する前に，システムが不確定要素の大きさに関わりなく可制御かつ可観測となるための不確定要素許容配置構造を明らかにすることを最初の目的とする．つまり，任意の値を取る不確定要素に対して，システムが可制御かつ可観測となるための必要十分条件を導出することを目的とする．

次に，上で述べたシステムの可制御性と可観測性に関する不確定要素許容配置構造の結果を参考にして，システムの安定化条件を導出することを目的とする．その後，導出された安定化条件を満足するシステムに対して，効率良く安定化制御器を設計するための制御系設計手法を構築することを目的とする．さらに，既存のロバスト安定化制御器設計法との比較を行い，各々の特徴の違いを明らかにすることを目的とする．

3. 研究の方法

(1) システムの可制御性と可観測性

システムが不確定要素の大きさに関わりなく可制御となるための必要十分条件は既に導出されており，システムが Generalized Antisymmetric Stepwise Configuration (GASC) と呼ばれる不確定要素許容配置構造をもつことが，システムが任意の値を取る不確定要素に対して可制御であるための必要十分条件であることが既に証明されている．そこで，本研究では，GASC を有するシステムが不確定要素の大きさに関わりなく可観測であるためには，システムの出力係数がどのような条件を満足する必要があるのかを検討する．Popov-Belevitch-Hautus (PBH) 定理を用いることによって，与えられた不確定要素配置構造に対して，出力係数が満足すべき必要条件が導出される．次に，導出された必

要件を満足するようなシステムクラスを対象にして、GASCを自然に拡張したシステムの不確定要素配置構造を導入する。そして、その不確定要素許容配置構造を持つことが、システムが不確定要素の大きさに関わりなく可制御かつ可観測となるための必要十分条件であることを証明する。

(2) システムの安定化条件

まず、システムの入力係数と出力係数が、システムが不確定要素の大きさに関わりなく可制御かつ可観測となるように与えられているものと仮定する。その仮定の下、システムの安定化問題を定式化する。不確定要素と時間遅れを含むシステムに対して安定性を判別するのに有効なM行列安定定理に基づいて、システムの安定化可能性を検討する。システムの固有根から構成される座標変換を導入することによって、システムの安定化可能性の問題を、M行列安定定理を満足するような座標変換の存在性の問題に帰着することができる。そして、与えられた不確定構造に対して、M行列安定条件を満足するような変数変換が不確定要素の大きさに関わりなく必ず存在することを証明することにより、システムの安定化問題を解決することができる。導出された不確定要素許容配置構造条件を満足するシステムに対して、上記証明で用いられた定式化により、M行列安定条件を満足するような安定化制御器設計法の構築が可能となる。

4. 研究成果

(1) システムの可制御性と可観測性

GASCと呼ばれる不確定要素許容配置構造を持つシステムが不確定要素の大きさに関わりなく可観測となるためには少なくとも、2出力が必要であり、出力係数の適切な位置に非零要素を持つ必要があることが、PBH定理を用いて証明された。さらに、1入力2出力からなるシステムに対して、Complete GASC (CGASC) と呼ばれる不確定構造を導入して、システムがCGASCを有することが、システムが不確定要素の大きさに関わりなく可制御かつ可観測となるための必要十分条件であることが証明された(発表論文[5])。CGASCの概観を図1に示す。ただし、図における記号 θ は非零要素を表しており、記号*は不確定要素を表している。さらに、Aはシステムの係数行列、Bは入力の係数行列、Cは出力の係数行列を表しているものとする。

(2) 可制御性と可観測性の双対構造

CGASCは1入力2出力から構成されおり、その入力と出力の次元の不均衡に着目して、2入力1出力からなるシステムに対して同様の解析を行い、そのシステムが不確定要素

の大きさに関わりなく可制御かつ可観測となるための必要十分条件を導出した。DCGASCと呼ばれるCGASCの双対構造を導入して、双対定理を用いて、システムがDCGASCを有することが、2入力1出力システムが可制御かつ可観測となるための必要十分条件であることが証明された(発表論文[2])。DCGASCの概観を図2に示す。図1と比較することにより、DCGASCとCGASCが許容できる不確定要素の配置には、整然とした対称性が存在することが明らかにされた。システム論の観点から意義深い事実が示された。



図1

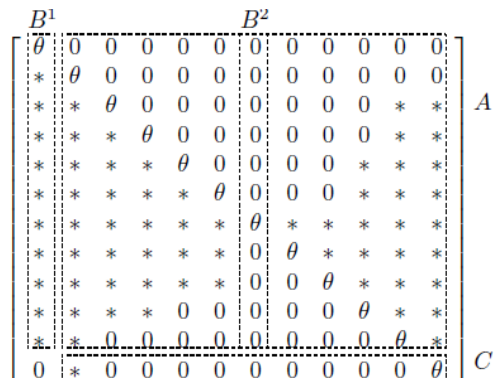


図2

(3) M行列安定条件の判別法

システムの安定化可能性は、変数変換を用いることによって、M行列安定条件を満足するような変数変換の存在性に帰着される。そこで、変数変換で用いるパラメータの次数で表現される要素をもつ行列がM行列であるのかどうかを、数値的ではなく解析的に判別する必要がある。この問題を解決するために、ある変数の次数構造を持つ行列がM行列となるための必要十分条件が導出された(発表論文[4])。これにより、変数変換後のシステムがM行列の安定定理を満足するかわかを解析的に判別することが可能となった。

(4) システムの安定化条件

可制御性と可観測性が保障されたシステムを考えるため、1入力2出力システムを対象にして、出力係数は図1に示されるような適切な構造を有するものと仮定する。その上で、不確定変数と時間遅れを含むシステムに対して、そのシステムがある不確定要素配置構造を満足する場合、そのシステムは不確定変動幅と時間遅れの大きさに関わりなく安定化可能であることが証明された(発表論文[3])。その証明は発表論文[4]で導出されたM行列判別法に基づいており、ある三角形を基本とする不確定要素配置構造を満足する場合、必ずM行列安定定理を満足するような変数変換が存在することが示された。

1入力2出力システムに対して導出された三角不確定要素配置構造は、2入力1出力システムに対しては、その構造が反対称になることが自然に導かれる。そこで、2入力2出力システムでは、三角不確定構造がどのように構成されるのかを検討した。その結果、2重三角不確定構造が導出された。システムがその構造を満足する場合、不確定変動幅と時間遅れの大きさに関わりなく、システムは安定化可能であることが証明された(発表論文[1])。2重三角不確定構造の概観を図3に示す。

一方、システムが導出された安定化条件(不確定要素許容配置構造)を満足する場合、安定化制御器を煩雑なチューニングをしないで効率よく設計するための制御系設計法が構築された。また、例題を通してその手法の有効性が確認された(発表論文[1])。

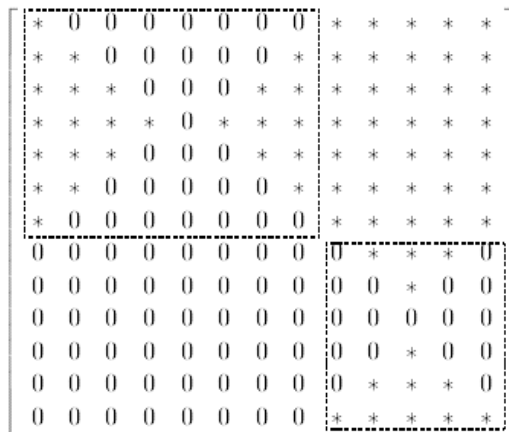


図3

以上の研究成果により、不確定変動幅と時間遅れの大きさに関わりなくシステムを安定化させることが可能となるようなシステムのクラスが明らかにされ、また、そのようなシステムクラスに対して、安定化制御器の設計法が構築された。他の手法では、不確定

変動幅がある程度大きくなると安定化制御器の設計が不可能となり、また、他の手法では、不確定要素配置の構造を制御器の設計に陽に考慮していないので、本提案手法により導出された安定化制御器より非合理的な制御器が導出される場合がある。以上の観点から、本研究課題で得られた成果はシステムの安定化手法に関して有意義な知見を導いているものと考えられる。

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5件)

- ① Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Stabilization of Linear Time-varying Uncertain Delay Systems with Double Triangular Configuration, WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol. 4, No. 9, pp. 465-475, 2009. (査読有)
- ② 橋本智昭, 雨宮孝: 線形不確定システムの可制御性と可観測性の双対不変構造, 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 9, pp. 491-493, 2009. (査読有)
- ③ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Output Feedback Stabilization of Linear Time-varying Uncertain Delay Systems, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2009, Article ID 457468, 2009. (査読有)
- ④ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: A Note on a Criterion for M-matrix, Computational Mathematics and Modeling, Vol. 20, No. 3, pp. 318-325, 2009. (査読有)
- ⑤ 橋本智昭, 雨宮孝, 藤井裕矩: 線形時不変不確定システムの可制御不変性と可観測不変性, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 8, pp. 654-662, 2008. (査読有)

[学会発表] (計8件)

- ① Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Dual Invariance Structure of Controllability and Observability, Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, CHINA, pp. 4276-4281, Dec. 17, 2009.
- ② Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Double Triangular Configuration for Stabilization of Linear Time-varying Uncertain Delay Systems, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Systems Theory and

- Scientific Computation, Moscow, Russia, pp. 108-113, Aug. 21, 2009.
- ③ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Output Feedback Stabilization of Linear Time-varying Uncertain Delay Systems, Proceedings of the ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, JAPAN, pp. 316-321, Aug. 18, 2009.
 - ④ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Stabilization of Linear Uncertain Delay Systems Irrespective of Bounds of Uncertain Variations, Proceedings of the 2009 American Control Conference, St. Louis, Missouri, USA, pp. 4892-4897, Jun. 12, 2009.
 - ⑤ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Controllability and Observability Invariance of Linear Time-Invariant Uncertain Systems, Proceedings of the 2008 International Automatic Control Conference, Tainan, Taiwan, FA06-4, Nov. 21, 2008.
 - ⑥ Tomoaki HASHIMOTO, Takashi AMEMIYA: Complete Generalized Antisymmetric Stepwise Configuration for Linear Time-Invariant Uncertain Systems, IEEE Multi-conference on Systems and Control, San Antonio, Texas, USA, ThCC-12, Sep. 4, 2008.
 - ⑦ 橋本智昭, 雨宮孝: 可制御不変性と可観測不変性の双対構造, 第9回計測自動制御学会制御部門大会, 広島, 3月5日, 2009.
 - ⑧ 橋本智昭, 雨宮孝: LMIとM行列に基づく各制御系設計法に関する考察, 第52回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, 京都, 5月18日, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 智昭 (HASHIMOTO TOMOAKI)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号：90515115

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：