

平成21年5月28日現在

研究種目： 基盤研究（C）
研究期間： 2006～2008
課題番号： 18560432
研究課題名（和文） 作用素論的アプローチに基づく制御系解析・設計手法の先鋭化と体系化に関する研究
研究課題名（英文） Study on Advanced Development and Systematization of Analysis and Design Methods for Control Systems via an Operator-Theoretic Approach
研究代表者 萩原 朋道 (HAGIWARA TOMOMICHI)
 京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号： 70189463

研究成果の概要：近年、制御系においてコンピュータを活用することが浸透している。しかし、コンピュータは、本質的に連続時間的には動作できず、離散時間的にしか動作し得ない。その一方で、制御系の性能は、時々刻々と連続時間的に変化する信号をいかにうまく制御可能であるかという観点で評価される。そのような事情から、コンピュータを利用した制御系の性能解析や、その考え方に基づく制御系設計においては、連続時間信号と離散時間信号の双方をいかにして一貫性を持たせて取り扱うのか、という視点の取り方が、きわめて重要な役割を果たす。このような観点に関してひとつの明解な解答を提示することのできる数学的枠組みとして、関数解析に基づく作用素理論を援用する方法を対象として研究を行っている。そのような方法について、より洗練された方法への深化と、より一般的な方法への拡張を行い、成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学・制御工学

キーワード： サンプル値系、ロバスト安定解析、高速リフティング、周期時変スケールリング

1. 研究開始当初の背景

制御理論分野において作用素論，ないし関数解析的な手法を利用しようという考え方そのものについては，古くから多くの成功を収めてきた考え方である．本研究課題は，そういった古くからの成果の範囲にとどまらない大きな発展を目指したものであるが，研究開始当初の背景とともに，本研究における作用素論的アプローチの立場について述べておく．

(1) 古くからよく知られているスモールゲイン定理や受動定理に代表される入出力安定性に関する数多くの成果があり，それらも作用素論的アプローチによるものということができる．このようなアプローチは極めて重要な研究テーマとなっている，ロバスト安定性やロバスト性能に関する幾多の成果の根幹を支えている．

(2) 計算機技術の飛躍的發展に伴い重要な研究対象となったデジタル制御系においても，そこに混在する連続時間信号と離散時間信号の厳密な取り扱いを通じたロバスト性解析を行う理論として，サンプル値制御理論が發展してきた．ここでも古くからの成果を利用する形で作用素論的な手法は中心的な役割を果たし，理論的成果の發展に大きく貢献してきた．

(3) しかしながら，サンプル値制御を中心とする本研究課題分野でのこの10年間の大きな進展は，いずれもシステム解析の分野を中心とするものであり，制御系設計という視点に限れば，本質的な難点に直面したまま大きな進展はほとんど得られていなかった．そのため，従来の作用素論的アプローチの枠組みを越え，デジタル制御系の設計にも本質的な貢献をしようとする新たな枠組みが必要とされていた．

2. 研究の目的

作用素論に基づくデジタル制御系の取り扱いを通して，これまでにない新規な方法論である，周期時変スケーリングという手法を導入し，その有効性を示し，従来手法の限界を越えることを明らかにすることを目指す．とくに，本研究課題分野における制御系設計問題に対しても応用可能な形で展開することを目的とする．これにより，申請者がこれまでに展開してきたアプローチの有効性を体系的に明らかにし，あるいは解析や設計のために必要な具体的な数値計算等の手順といった方法論の詳細

までも明らかにしていくことを目指す．

すなわち，申請者がこれまで展開してきた作用素論的アプローチが，新しい軸を着実かつ具体的に拓きつつあり，単に作用素を利用するというだけのアプローチとは本質的に異なる大きな展開を目指した独創的なものであることを，周期的時変スケーリング，ならびにそれに基づく制御系設計，さらには関連する諸問題に関する研究を通して広く深く議論し，明らかにしていく．

具体的な検討項目としては，たとえば，以下のようなものが挙げられる．

(1) ロバスト性解析に関して，どういった場合に従来手法と比べて本研究課題の解析手法である因果的周期時変スケーリングがメリットを発揮するのか，また，制御系設計にこの考え方を組込んでいくことができ，さらにはそのような方法が従来手法を越えるものとなるためには，どのような前提条件が要求されるのか．

(2) 適切な周期時変スケーリングを具体的に求めるためには，あるいは，これに基づく制御系設計を行うためには，どのような計算手順を踏めばよいのか．

これらの観点を目的とした研究を行う．

3. 研究の方法

申請者は，一般的で適用範囲の広いナイキスト型安定判別法を導出することに成功している．このような安定判別法を導くことの意義は，それをロバスト制御において活用できる点にあると考えており，実際，これを拡張することにより，一般性の高いロバスト安定条件を得ることができる．この条件は，そこに含まれる“パラメータ”を適切に選ぶことにより，さまざまな不確かさに応じたロバスト安定性の判別を可能としうるものであり，さらにはロバスト制御系設計への応用も可能であると考えられる．このような観点から周期時変スケーリングに基づく作用素論的アプローチの整備を進め，とくにサンプル値制御系に重点をおきながら，ただしこれに限定することなく，以下のような方向で研究を進める．

(1) もっとも単純ないわゆる D -スケーリングのみを用いる場合だけではなく，いわゆる (D, G) -スケーリングなどのより一般的な形の周期時変スケーリングの適用について，まずは解析問題での利用を中心として検討を行い，

一般的な周期時変スケーリングを利用した場合に関してどのような性質や特徴があるのかを明らかにする。

(2) 続いて、一般的なロバスト安定条件の導出過程における作用素論的アプローチの役割、なかでも(真性)スペクトルに関する解析結果が果たした役割について、そのもっとも本質的な点がどこにあるのかに関して再検討を行う。このような検討を通して、上記(1)で用いる周期時変スケーリングとして、因果則を満たさないようなものを考えることも妥当であることが示せると予想されるため、それを確認するための研究を行う。そういった非因果的スケーリングは、従来の研究においてはほとんど検討されなかったことがないが、本研究のアプローチではそのような非標準的な手法も標準的な場合とほとんど同様に扱えることに大きな特徴があるといえる。そこで、この特徴を活かした検討を深く進め、非因果的スケーリングの妥当性と有用性、すなわち、ロバスト性解析における保守性の改善においていかなる役割を果たすのかについて明らかにする。

(3) 因果的および非因果的周期時変スケーリングの最適化問題について検討する。これらは、不確かさや周期時変スケーリングに関する何らかの然るべき仮定のもとでは厳密に求解可能であると予想されるため、これについて検討する。すなわち、厳密に求解可能となるための条件を明らかにし、また、その際の最適なスケーリングを求めるために必要となる離散化等の方法ならびに計算手順を導く。また、それを制御系設計法にも展開する。

(4) 以上のような検討を通して、とくにサンプル値制御における周期時変スケーリングという新しい独自の考え方を中心として、申請者の進めてきた形での作用素論的アプローチのとくにロバスト制御における有効性をさらに明らかにしていく。このようにして作用素論的アプローチの先鋭化を図るとともに、設計ならびに解析に関する計算可能なより具体的な成果を導くこと、さらには適用可能な対象の拡大を通して、その一般化を図る。

4. 研究成果

テクニカルな内容になるので、詳細は次項目の発表論文に譲ることとするが、一部について、それらとの関係を含めて簡略に紹介し

ておく。

(1) 前項目(1)の点に関しては、たとえば雑誌論文(3)や学会発表(24),(25)などで解決されており、少なくとも一つの静的な不確かさを有する系に対しては、周期時変スケーリングが従来手法の限界を大きく越えるものであることが明らかにされている。

(2) 前項目(2)の点に関しても、たとえば雑誌論文(1)や学会発表(24),(27),(28)などで解決されている。とくに、非因果的周期時変スケーリングが、因果的周期時変スケーリングと比べて、線形系においては極めて有効な手段となることが明らかにされている。その一方で、後者は非線形制御系にも適用可能であることが、学会発表(9)で明らかにされている。

(3) 前項目(3)の点については、周期時変スケーリングの最適化に関しては学会発表(13)などで、また、制御系設計への展開については、学会発表(3),(4),(5),(12),(20)などで成果発表されている。

(4) 上記のような研究を推進するなかで、高速リフティングならびに補正型 Fast-Sample/Fast-Hold 近似という考え方を提示し、その有効性について、多くの成果を得た(たとえば、雑誌論文(2),(4)や、学会発表(8),(15),(17),(23))。また、作用素論的アプローチや周期時変スケーリングが、デジタル制御系(サンプル値制御系)以外の解析にも非常に有効であることを明らかにした(それぞれ、たとえば、学会発表(6),(10),(11),(24)、および、学会発表(1),(4),(5),(14),(16))。

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6件)

(1) T. Hagiwara, Separator-Type Robust Stability Theorem of Sampled-Data Systems Allowing Noncausal LPTV Scaling, *Automatica*, to appear, 査読あり。

(2) T. Hagiwara and K. Okada, Modified Fast-Sample/Fast-Hold Approximation and γ -Independent H_∞ -Discretization for General Sampled-Data Systems by Fast-Lifting, *International Journal of Control*, to appear, 査読あり。

(3) T. Hagiwara and R. Mori, Linear Period-

ically Time-Varying Scaling and Its Properties, *Systems & Control Letters*, Vol. 57, No. 10, pp. 816–821 (2008), 査読あり.

(4) T. Hagiwara and H. Umeda, Modified Fast-Sample/Fast-Hold Approximation for Sampled-Data System Analysis, *European Journal of Control*, Vol. 14, No. 4, pp. 286–296 (2008), 査読あり.

(5) T. Hagiwara and K. Horiguchi, An Iterative Method with Guaranteed Convergence for Robust Performance Analysis of Sampled-Data Systems against Parameter Uncertainties, *International Journal of Control*, Vol. 80, No. 9, pp. 1471–1480 (2007), 査読あり.

(6) T. Hagiwara, Discussion on: “Transfer Functions and Statistical Analysis of FDLCP Systems Described by Higher-Order Differential Equations,” *European Journal of Control*, Vol. 12, No. 5, pp. 574–575 (2006), 査読あり.

〔学会発表〕(計 30 件)

(1) 細江陽平, 萩原朋道: 非因果的周期時変スケーリングに基づく離散時間ロバスト安定化コントローラ的设计; 計測自動制御学会 第 9 回制御部門大会, 平成 21 年 3 月 5 日, 広島

(2) 平田健太郎, 系数篤, 萩原朋道: 非因果的ホールドによる積分作用素のスペクトル計算について; 計測自動制御学会 第 9 回制御部門大会, 平成 21 年 3 月 5 日, 広島

(3) 大原康宏, 萩原朋道: (D, G) -scaling タイプの非因果的周期時変スケーリングを用いたサンプル値系のロバスト安定解析/安定化; 計測自動制御学会 第 9 回制御部門大会, 平成 21 年 3 月 4 日, 広島

(4) 大原康宏, 蛭原義雄, 萩原朋道: LMI を用いた強正実化出力フィードバックコントローラ的设计 Part 1, Part 2; 計測自動制御学会関西支部若手研究発表会平成 21 年 1 月 14 日, 大阪

(5) 細江陽平, 大原康宏, 蛭原義雄, 萩原朋道: 静的セパレータにより表現される不等式制約を満たす離散時間コントローラ的设计; 計測自動制御学会関西支部若手研究発表会平成 21 年 1 月 14 日, 大阪

(6) T. Hagiwara, Fast-Lifting Approach to Time-Delay Systems: Fundamental Framework, 47th IEEE Conference on Decision and Control, December 10, 2008, Cancun

(7) T. Hagiwara and Y. Ohara, Frequency-

Dependent Scaling Induced by Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Discrete-Time Systems, 17th IFAC World Congress, July 8, 2008, Seoul

(8) T. Hagiwara and K. Okada, γ -Independent H_∞ -Discretization of Sampled-Data Systems by Modified Fast-Sample/Fast-Hold Approximation with Fast Lifting, 2008 American Control Conference, June 13, 2008, Seattle

(9) 守岡賢一, 萩原朋道: 因果的周期時変スケーリングを用いた非線形サンプル値系の安定解析; 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, 平成 20 年 5 月 17 日, 京都

(10) T. Hagiwara: Fast-Lifting Approach to LTI Systems Described by Delay Differential Equations, Part 1: Fundamental Framework; 計測自動制御学会第 8 回制御部門大会, 平成 20 年 3 月 6 日, 京都

(11) T. Hagiwara: Fast-Lifting Approach to LTI Systems Described by Delay Differential Equations, Part 2: Numerical Method via Reduction to a Finite-Dimensional Convex Problem; 計測自動制御学会第 8 回制御部門大会, 平成 20 年 3 月 6 日, 京都

(12) K. Okada and T. Hagiwara: Robust Stability Analysis and Stabilization of General Sampled-Data Systems with Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling; 計測自動制御学会第 8 回制御部門大会, 平成 20 年 3 月 6 日, 京都

(13) T. Hagiwara and H. Umeda, Robust Stability Analysis of Sampled-Data Systems with Noncausal Periodically Time-Varying Scaling: Optimization of Scaling via Approximate Discretization and Error Bound Analysis, 46th IEEE Conference on Decision and Control, December 14, 2007, New Orleans

(14) 大原康宏, 萩原朋道: 離散時間系の非因果的周期時変スケーリング: 静的セパレータから誘導される周波数依存スケーリングに基づくロバスト安定解析; 計測自動制御学会 第 36 回制御理論シンポジウム, 平成 19 年 9 月 7 日, 札幌

(15) 岡田幸一郎, 萩原朋道: サンプル値系の高速度リフティングに基づく補正型 Fast-Sample/Fast-Hold 近似による γ に依存しない

H_∞ 離散化; 計測自動制御学会 第 36 回制御理論シンポジウム, 平成 19 年 9 月 5 日, 札幌

(16) T. Hagiwara and Y. Ohara, Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Discrete-Time Systems, IFAC Workshop on Periodic Control Systems, August 29, 2007, St. Petersburg

(17) T. Hagiwara and H. Umeda, Modified Fast-Sample/Fast-Hold Approximation for Sampled-Data System Analysis, European Control Conference 2007, July 4, 2007, Kos

(18) 大原康宏, 萩原朋道: 非因果的周期時変スケーリングを用いた離散時間系のロバスト安定解析; 第 51 回システム制御情報学会研究発表講演会, 平成 19 年 5 月 16 日, 京都

(19) 梅田紘章, 萩原朋道: 非因果的周期時変スケーリングに基づくサンプル値系のロバスト安定解析; 第 51 回システム制御情報学会研究発表講演会, 平成 19 年 5 月 16 日, 京都

(20) 梅田紘章, 萩原朋道: 非因果的周期時変スケーリングに基づくサンプル値系のロバスト安定解析と安定化; 計測自動制御学会 第 7 回制御部門大会, 平成 19 年 3 月 7 日, 東京

(21) T. Hagiwara, H. Umeda and M. Sawada: Discretization of Continuous-Time Controllers Based on the Hilbert-Schmidt Norm of the Sampled-Data Frequency Response, 45th IEEE Conference on Decision and Control, Dec 14, 2006, San Diego

(22) T. Hagiwara and H. Tanaka: A Study on Robust Stability Analysis of Sampled-Data Systems against Parametric Uncertainties via a Separator-Type Stability Theorem, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, October 20, 2006, Pusan

(23) 梅田紘章, 萩原朋道: サンプル値系の H_∞ ノルム解析における補正型 Fast-Sample/Fast-Hold 近似; 計測自動制御学会第 35 回制御理論シンポジウム, 平成 18 年 9 月 21 日, 大阪

(24) T. Hagiwara, Causal/Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robust Stability Analysis and Their Properties, Proc. the 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, July 25, 2006, Kyoto

(25) T. Hagiwara and R. Mori, Robust Stabil-

ity Analysis of Sampled-Data Systems via Periodically Time-Varying Scaling, 2006 American Control Conference, June 14, 2006, Minneapolis

(26) T. Hagiwara, H. Umeda and M. Sawada: Discretization of Continuous-Time Controllers Based on the Hilbert-Schmidt Norm of the Sampled-Data Frequency Response; 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, 平成 18 年 5 月 31 日, 名古屋

(27) T. Hagiwara: Causal/Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robust Stability Analysis, Part I. Robust Stability Condition Allowing Noncausal Scaling; 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, 平成 18 年 5 月 31 日, 名古屋

(28) T. Hagiwara: Causal/Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling for Robust Stability Analysis, Part II. Properties of Causal/Noncausal Scaling; 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, 平成 18 年 5 月 31 日, 名古屋

(29) 田中寛朗, 萩原朋道: セパレータ型安定定理に基づくサンプル値制御系のロバスト安定解析に関する考察; 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会, 平成 18 年 5 月 11 日, 京都

(30) 堀口和洋, 萩原朋道: パラメータの不確かさに関するサンプル値系のロバスト強正実解析; 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会, 平成 18 年 5 月 11 日, 京都

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 朋道 (HAGIWARA TOMOMICHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70189463

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし