

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560545

研究課題名(和文)作用素論・代数論的研究に基づく制御系解析・設計のためのスケーリング手法の高度化

研究課題名(英文)Enhanced scaling technique for control system analysis/synthesis based on operator theoretic and algebraic approaches

研究代表者

萩原 朋道(Hagiwara, Tomomichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70189463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：サンプル値制御系およびむだ時間系の作用素論的な取り扱い、とくにスケーリングに基づく安定解析において重要な役割を果たす compression 作用素に関して、その入出力の関数空間を、従来扱われてきた空間から本質的に有界な関数からなる空間に置き換えた場合の解析と設計について論じた。むだ時間系に関しては、安定性の定義は空間の違いによらず等価となる一方で、数値計算上はより効果的な扱いとなり得ることを示した。サンプル値制御系の場合には、信号の階段関数ならびに区分的1次関数近似を通したL_∞性能の上下界値解析等へと発展させた。さらに関連した技法の離散時間系における有効性を実システムにおいて検証した。

研究成果の概要(英文)：This paper aims at an operator theoretic approach to sampled-data and time-delay systems, in which compression operators play a key role especially when we deal with their stability analysis through scaling-based approaches. It studies such operators defined on a space different from those in conventional studies and covers analysis and synthesis problems relevant to essentially bounded signals. For time-delay systems, such a change in the space does not affect the stability definition itself but could be effective in alleviating some numerical issues in the stability analysis. In sampled-data systems, the use of the new space is connected to the upper/lower bounds analysis of the L_∞ induced norm and a relevant synthesis problem, which can be tackled through piecewise constant and piecewise linear approximations of signals. The effectiveness of the discrete-time arguments relevant to the scaling approach is also confirmed through experiments with a real system.

研究分野：制御工学

キーワード：サンプル値制御系 むだ時間系 compression 作用素 高速リフティング スケーリング 作用素近似

1. 研究開始当初の背景

作用素論や関数解析は数学の基本的な分野のひとつであり、その豊富な成果を制御理論の研究において活用することは極めて意義深い。当研究代表者もそのような立場でこれまで様々な研究の展開を図ってきた。とくに、サンプル値制御系ならびにむだ時間系と呼ばれるタイプの制御系の研究において、基本となる数学的道具立てとして利用されてきたリフティング手法の上に立ち、高速リフティングという新たな考え方を導入し、それがさまざまな問題への取り組みにおいて有用であることを明らかにしてきた。とくに、制御系に関する信号の非因果的な取り扱いを通して安定解析などに関して新しいスケールリング手法が構築できることを示すとともに、その考え方を比較的取り扱いの容易な離散時間系における代数的枠組みにも適切に移行して発展させてきた。そのような研究全体を通して、このようなスケールリング手法の性質についてより深い理解を得るとともに、本スケールリング手法を含めた作用素論的な制御理論のアプローチのさらなる高度化を図るための研究を目指すものである。

そのような研究を進展させる上で、サンプル値制御系やむだ時間系において鍵を握る形で現れる compression 作用素というものに着目してその周辺の研究を進めるとともに、離散時間系においてはロバスト安定性のみならずロバスト性能を目指すためのスケールリング手法というものに焦点を定めた。また、むだ時間系の解析をスケールリング手法と結び付ける上で重要となる研究として、むだ時間系の微分差分方程式表現とむだ時間要素を介したフィードバック系表現との関係を明らかにすることにも着目することとした。

このような背景のもと、以下のような目的で研究を進めることとした。

2. 研究の目的

まず、高速リフティング手法をサンプル値制御系およびむだ時間系において活用するための研究の展開について述べる。

むだ時間系とは、信号の伝搬に遅延を有する系のことであり、その遅延時間に関して、フィードバック系においても有限時間区間での開ループの状況が生じる。同様のことは、デジタル機器を利用してサンプリング周期ごとに

制御入力を更新を行うサンプル値制御系でも生じ、1 サンプリング区間に相当する有限時間区間での開ループの状況がやはり生じる。そのような状況における有限時間区間での入出力関係を記述したものが compression 作用素と呼ばれるものであり、その性質を十分に把握して活用することは、サンプル値制御系やむだ時間制御系の作用素論的視点からの研究において極めて重要である。

(1) そのような問題に取り組む上で重要となるのが、信号の高速リフティングに基づく取り扱いと、compression 作用素を定義する上で背景となるその入出力信号の空間である。後者に関しては、さまざまな互いに異なる関数空間を選んだ異なる compression 作用素が導入できるということに関連したものであり、関数空間の選び方の違いにより、扱う制御問題が数学的に互いにいかなる関係にあるという状況になるのか、また、ある空間での取り扱いが他の空間での扱いよりも有用であるといったことが生じるのか、といったことが重要になる。したがって、そのような関数空間について、これまでに取り組んでこなかったものを選んだ場合について検討するとともに、そのような場合に対して、高速リフティングに基づく compression 作用素の新たな取り扱いについて研究することを目指す。

(2) これらに加えて、むだ時間系の研究の場合には、そのような作用素論的なアプローチを適用可能とするための前提として、微分差分方程式表現されたむだ時間系についてはむだ時間要素を含むフィードバック系表現と結び付けて取り扱うことが必要となる。したがって、この2つの表現間の関係や相互変換に関連した研究にも必要に応じて取り組むことになる。

(3) また、離散時間系に対するスケールリング手法に関しては、作用素論を直接的には必要とせず代数的に比較的容易な扱いが可能であることからすでにある程度以上の研究が進んでいる。したがって、この方向に関しては、実対象に適用して有効性検証を行うことまでも目指すものとする。

3. 研究の方法

前項で述べた各目的に関する課題に取り組むための方法について、いずれもテクニカルなものとなるが、簡単に述べておく。

(1) まず, compression 作用素に関連した関数空間に関して, これまでは, 有限時間区間で定義され 2 乗可積分な関数からなる空間を考えてきた. これは, サンプル値制御系やむだ時間系そのものに立ち返り, 無限時間区間上の入出力を考える視点でいえば, いわばエネルギーが有界な入出力のみを考えていることになる. これに対して, 工学的には持続的な外乱(時間の経過とともに必ずしも減衰しない外乱)であって, 形式的にはエネルギーが有界とは限らないという扱いをすることに相当する)も有用であることに鑑み, 各時刻における値が(本質的)有界な関数からなる空間を入出力にとったときの compression 作用素を考える.

このとき, サンプル値制御系においては, 従来考えてきた関数空間のもとではいわゆる H_∞ 制御問題を考えたことに対応するのに対して, 新たな関数空間では L_∞ 制御問題という別の問題を考えることに相当する. 後者の問題は前者に比べてはるかに厄介な問題と考えられており, これまでになされた研究も限定的である. そこで, まずは解析問題に限定した上で取り組むことを目指し, とくに, 新しい関数空間のもとでの compression 作用素の近似手法について検討を進める. 具体的には, 関数の階段関数近似と区分的 1 次関数近似を念頭におき, それを適切に適用するための理論的枠組みを構築するとともに, 得られた成果の制御系設計への拡張についても検討を進める.

一方, むだ時間系の場合については, 安定解析問題を考える限り, compression 作用素に関連した関数空間を新たなものに変更しても, 安定解析問題それ自体は本質的には変化しないことが予想される. このことを作用素のスペクトル解析を通して明らかにすることを目指す. このように, 関数空間の変更が理論的には問題の取り扱いに影響しないと期待される一方で, それはあくまでもむだ時間制御系が安定か否かの問いが初期関数のクラスに依存しないことを意味するだけであって, 安定解析の容易さが関数空間の取り方に依存しないことは意味しない.むしろ, 新たな関数空間で安定解析を行うことには数値計算上やその他の視点で有効になりうる側面があると考えられ, そのような点についても検討を進める.

(2) むだ時間系の微分差分方程式表現と, むだ時間要素を有するフィードバック系表現と

の関係を論じることは, 本研究テーマ全体の中で大きな位置を占めるものとはいいがたい. しかし, この点を完全に切り離してしまつては議論がかなり偏った側面を有することになる懸念も否めない. そのため, 必要に応じてそのような研究を行う. 具体的には, 有理比を有する複数のむだ時間をもつむだ時間系を考え, さらに, 適宜, 非線形なむだ時間系も考え, 両表現における解の表現を解析的に比較しつつ, それらを一致させるために両表現が満たすべき関係を明らかにする.

(3) 離散時間系を対象としたスケーリング手法に関しては, ロバスト安定性のみならず, ロバスト性能も考慮できる形での理論整備を行う. さらに, それを台車型倒立振子の実験装置に適用して周期時変制御装置の設計とその有用性の検証を実験を通して行う.

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) 新たな関数空間のもとで定義される compression 作用素の扱いについては, まず, むだ時間系に関する成果を記す. 安定解析そのものに関しては, 従来取り扱ってきた関数空間のもとで考えた場合と同じになる, すなわち, 安定性の定義自身がむだ時間系の初期関数のクラスによらないことを, 学会発表 [8] で示した. このことに基づき, 雑誌論文 [1] において compression 作用素の区分的定数近似に基づく有限ランク近似手法を与え, その考え方に基づく安定解析が, 従来扱ってきた関数空間を通しての安定解析よりも数値的に有効になり得ることを明らかにした.

次に, そこでの考え方を発展させ, さらに区分的 1 次関数近似の考え方も適用することができるようにした上でサンプル値制御系において新たな関数空間での compression 作用素の取り扱いを論じたのが雑誌論文の [2] などである. 高速リフティングを通して現れる compression 作用素ならびに関連する他の 2 つの作用素に対して, 平均化作用素や 1 次関数化作用素といった作用素を適切に定義される形で導入し, それらを利用することで, 制御系の性能の上下界値が厳密に計算でき, しかも両者の間の誤差

を所望する任意の値以下にまで抑えた計算が可能であることなどを示している。

さらに、これらの成果の制御系設計への発展に関連する成果などを学会発表 [2], [4] など得ている。

(2) むだ時間系の微分差分方程式表現と、むだ時間要素を有するフィードバック系表現との間の関係に関する成果などは、雑誌論文 [3], [7] や学会発表 [7] など得られており、本研究全体としての意義を明確化する上で、理論的にも重要な成果と位置づけられる。

(3) 離散時間系を対象とした具体的なスケールリング手法に関しては、雑誌論文 [8] で理論的成果をより確固たるものとするための基礎的な成果を得た他、雑誌論文 [4] においてそのような手法の持つ意義を他の手法との関係において明らかにしている。さらに、雑誌論文 [6] においてロバスト性能を達成するための制御器設計法について理論的に論じるとともに具体的な設計手順を与えている。その手順は雑誌論文 [5] で実際に台車型倒立振子の設計において活用され、実験を通して本手法を通して得られる制御器、とくに周期時変制御器の有効性が明らかにされた。さらに学会発表 [5] においてもさらなる発展的な設計が行われ、その有効性について検証実験が行われている。

(4) むだ時間系の安定解析手法について、上記の成果とも密接に関係する形で、学会発表 [6] などの成果が得られている。

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 8 件)

[1] J. H. Kim and T. Hagiwara: Quasi-Finite-Rank Approximation of Compression Operators on $L_\infty[0, h)$ with Application to Stability Analysis of Time-Delay Systems, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 8, No. 2, pp. 77–85 (2014). 査読あり. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-cta.2013.0458>

[2] J. H. Kim and T. Hagiwara: Computing the $L_\infty[0, h)$ -Induced Norm of a Compression Operator via Fast-Lifting, *Systems & Control Letters*, Vol. 67, pp. 1–8 (2014). 査読あり. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167691114000309>

[3] T. Yamazaki and T. Hagiwara: Conversion of Linear Time-Invariant Time-Delay Feedback Systems into Delay-Differential Equations with Commensurate Delays, *International Journal of Systems Science*, Vol. 45, No. 8, pp. 1643–1656 (2014). 査読あり. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207721.2012.748942>

[4] Y. Hosoe and T. Hagiwara: Unified Treatment of Robust Stability Conditions for Discrete-Time Systems through an Infinite Matrix Framework, *Automatica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1488–1493 (2013). 査読あり. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109813000812>

[5] 片山啓, 細江陽平, 萩原朋道: 台車型倒立振子制御実験による非因果的周期時変スケールリングに基づくロバスト性能設計の有効性検証, *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 26, No. 5, pp. 165–173 (2013). 査読あり. https://www.jstage.jst.go.jp/article/iscie/26/5/26_165/_pdf

[6] Y. Hosoe and T. Hagiwara: Robust Performance Controller Synthesis Based on Discrete-Time Noncausal Linear Periodically Time-Varying Scaling, *Asian Journal of Control*, Vol. 14, No. 5, pp. 1194–1204 (2012). 査読あり. DOI: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asjc.473/abstract>

[7] T. Yamazaki and T. Hagiwara: Conversion of Linear Time-Invariant Delay-Differential Equations with External Input and Output into Representation as Time-Delay Feedback Systems, *SICE Journal on Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 5, No. 4, pp. 200–209 (2012). 査読あり. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/5/4/5_200/_article

[8] T. Hagiwara: Note on Well-Posedness and Separator-Type Robust Stability Theorem of LTI Systems, *SICE Journal on Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 5, No. 3, pp. 169–174 (2012). 査読あり. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/5/3/5_169/_article

〔学会発表〕(計 19 件)

[1] J. H. Kim and T. Hagiwara: Computing the L_∞ -Induced Norm of LTI Systems, Proc. 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, pp. 2404–2409 (2014).

[2] J. H. Kim and T. Hagiwara: L1 Optimal Control of Sampled-Data Systems via Piecewise Linear Approximation, 計測自動制御学会 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 電気通信大学, 5E5-5 (平成 26 年 3 月).

[3] J. H. Kim and T. Hagiwara: Characterization of the Induced Norms from L_2 to L_∞ and from l_2 to l_∞ and Their Computations, Proc. SICE Annual Conference 2014, Hokkaido University, pp. 636–641 (2014).

[4] J. H. Kim and T. Hagiwara: A Study on Piecewise Linear Approximation in the L_1 Optimal Control Problem of Sampled-Data Systems, Proc. 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Groningen, pp. 215–222 (2014).

[5] R. Yamamoto, Y. Hosoe and T. Hagiwara: Introducing Integral Compensation into Controller Synthesis Based on Noncausal LPTV Scaling and Control Experiments with Card Inverted Pendulum, Proc. SICE Annual Conference 2013, Nagoya University, pp. 446–451 (2013).

[6] Y. Saito and T. Hagiwara: Stability Analysis of Time-Delay Systems Based on a Power of the Monodromy Operator, Proc. 2013 European Control Conference, Zurich, pp. 4424–4429 (2013).

[7] T. Yamazaki and T. Hagiwara: A Note on Representation of Nonlinear Time-Varying Delay-Differential Equations as Time-Delay Feedback Systems, Proc. Asian Control Conference 2013, Istanbul, Post-A.4 (2013).

[8] J. H. Kim, T. Hagiwara and K. Hirata: A Study on the Spectrum of Monodromy Operator for a Time-Delay System, Proc. Asian Control Conference 2013, Istanbul, MoA1.1, (2013).

他 11 件

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