

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 27日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21760328

研究課題名（和文） ロバスト半正定値計画問題の厳密解法と制御系設計への応用

 研究課題名（英文） Exact Solution Method for Robust Semidefinite Programming Problems
and Its Application to Control System Synthesis

研究代表者

蛭原 義雄 (EBIHARA YOSHIO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80346080

研究成果の概要（和文）：本研究では、不確かさを有する制御対象のロバスト性能解析問題を扱う上で現れるロバスト半正定値計画問題に対して、漸近的に厳密となる（通常の、したがって取り扱いの容易な）半正定値計画問題の列を構成する手法を構築した。また、不確かさを有する離散時間の制御対象に対して、高い（ロバスト）制御性能の達成を可能とするためにはメモリ一型周期時変制御器を用いることが有効であることを示し、半正定値計画に基づいた具体的な設計手法を確立した。本研究に関連する成果で、研究代表者は計測自動制御学会 2009 年度 Annual Conference International Award を受賞した。

研究成果の概要（英文）：In this study we dealt with robust semidefinite programming problems (robust SDPs) that naturally appear when we analyze robust performance of control systems affected by parametric uncertainties. For the robust SDPs, we successfully constructed a sequence of SDPs that is ensured to be asymptotically exact. On the other hand, to achieve better robust performance for uncertain discrete-time systems, we conceived a novel memory-type periodically time-varying controller structure and established a concrete way to design such controllers by means of SDPs. Dr. Yoshio Ebihara received SICE Annual Conference International Award for his paper dealing with robust performance analysis of uncertain discrete-time systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：ロバスト半正定値計画，制御系解析・設計，厳密解法

1. 研究開始当初の背景

本研究では、“ロバスト性”を考慮した制御系の解析や設計問題を扱う際に現れる、ロバスト半正定値計画問題 (Semidefinite

Programming Problem; SDP) に対する厳密解法を確立すると同時に、制御分野において従来より培われてきたシステム論的手法との有機的結合によって、新しいロバスト制御系

設計理論を構築することを目的とした。制御問題の最適化問題への帰着は制御理論における普遍的なアプローチであり、このため古くから制御理論は最適化理論と密接に結び付いて発展を遂げてきた。とくに 1980 年代後半以降、SDP の重要性が制御理論に携わる研究者の間で広く認識されるに至り、制御における解析や設計問題を SDP に帰着させるための行列論、代数学的手法に関する研究が大きな注目を集めた。SDP に帰着可能な制御問題が多数存在する一方で、より実用的な制御系の解析や設計を行なう上で必須となるロバスト性を考慮した制御問題は、ロバスト SDP なる数理計画問題に帰着される。ロバスト SDP は、制約条件を記述する線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality; LMI) がある範囲内を変動するパラメータに依存する形となるものであり、粗くいえば無限個の制約条件を有する最適化問題 (半無限計画問題) であるといえる。ロバスト SDP の厳密な取り扱いには非常に難しいとされてきたが、多項式最適化分野における理論の進展を背景に、本研究開始当初において厳密解法が整備されつつあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、先述のようにロバスト SDP の厳密厳密解法の確立とこれに基づいた新たな制御系設計理論の構築である。具体的には以下の研究課題 (1), (2) の達成を目的とした。

(1) 多項式行列最適化問題 (Polynomial Matrix Optimization Problem; PMOP) に対する階層的な SDP 緩和問題の構成ならびに計算結果の厳密性検証のための条件の導出。制御系のロバスト性を解析する問題を標準的な SDP に基づいて定式化するとロバスト SDP が導かれるが、SDP の“双対”に基づいて定式化するとある特別な構造を有する最適化問題が導かれる。この問題は (通常の、スカラの) 多項式最適化問題と類似する構造を有する一方で、制約条件には変数となる不確かなパラメータの多項式行列と、同じく変数となる半正定値行列の積が含まれるという特別な構造を有している (これを PMOP と称している)。PMOP はロバスト SDP に密接に関連する一方で、通常の多項式最適化問題の拡張とも考えられる非常に興味深い構造を有しており、多項式最適化問題に対して得られている厳密性検証条件をどの程度拡張できるかを明らかにすることを目的とした。

(2) 不確かな物理パラメータを有する制御対象に対するロバストコントローラ的设计法の確立。制御系のロバスト性能解析問題は自然な形でロバスト SDP に帰着されるため、ロバスト

SDP に対する既存の解法を適用することが可能である。しかしながら、ロバストコントローラ的设计問題は本質的に数值的求解が困難な“非凸”の問題であり、この非凸性を何らかの形で回避してロバスト SDP に帰着させるための方策を講ずる必要がある。本研究では設計する制御器の構造にまで踏み込んでこのような非凸性を回避するための方策を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

基本的には、本研究に関連する論文や書籍を収集し、また国際会議に出席するなどして最新の研究成果に関する情報収集に努めた。また、共同で研究を進めている Dimitri Peaucelle, Denis Arzelier (ともに LAAS-CNRS, France) と頻りに意見交換を行い、研究成果の精練と進展に努めた。さらに研究室に配属される修士課程の学生の研究テーマとして本研究に関連するものを希望により選択してもらい、各年度ごとに明確な成果が得られるよう試みた。得られた研究成果は国際会議で学会発表を行うとともに国際学術雑誌に積極的に論文投稿を行い、広範な研究者への情報発信を行った。

4. 研究成果

2009 年度から 2012 年度までの 4 年間の取り組みにより、以下の研究成果が得られた。

(1) 多項式行列最適化問題 (PMOP) に対する、漸近的に厳密となる (通常の、したがって取り扱いの容易な) SDP の列を構成する手法の確立。および SDP の解のランクに基づいた、厳密性検証条件の導出 (次項 5. 雑誌論文⑦, ⑧)。

(2) 不確かさを有する離散時間の制御対象に対する、高いロバスト制御性能の達成を可能とするメモリー型周期時変制御器設計手法の確立 (次項 5. 雑誌論文①, ②, ⑤, ⑥)。

(3) 多目的制御問題や分散制御問題といった非凸の制御系設計問題における達成可能な制御性能の解析 (次項 5. 雑誌論文④および国際会議論文⑬, ⑭)。

(4) 凸最適化に基づく非負システムの L1 誘導ノルムの解析・設計手法と大規模結合非負システムの安定性・パーシステンス性解析に関する基礎理論の構築 (次項 5. 雑誌論文③および国際会議論文①, ③, ④, ⑤, ⑧)。

(1), (2) に記した研究成果は当初その達成を研究目的としたものであり、十分な成果が得られたと考える。一方 (3), (4) に記した成果は本研究において凸最適化に関する研究を進める上で得られた着想に基づくものであり、とくに (4) で記した結合非負システムの解析と設計に関する研究は今後のさらなる発展が期待される実りあるものとなっている。

本研究で得られた成果に関連して、4年間で8件の論文発表(採録決定を含む)と18件の国際会議における学会発表を行った。同じく関連する研究成果・業績に対して、2009年度計測自動制御学会 Annual Conference International Award, 2012 Outstanding Paper Award in International Conference on Control, Automation and Systems (held in Jeju, Korea)および2013年度計測自動制御学会制御部門パイオニア賞を受賞した。

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8件) すべて査読あり

- ① J.F. Tregouet, D. Peaucelle, D. Arzelier and Y. Ebihara: Periodic Memory State-feedback Controller: New Formulation, Analysis and Design Results, IEEE Transactions on Automatic Control, 14 pages, accepted for publication, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6475980&tag=1> (2013).
- ② Y. Ebihara: Periodically Time-Varying Memory State-Feedback for Robust H2 Control of Uncertain Discrete-Time Linear Systems, Asian Journal of Control, Vol. 15, No. 2, pp. 409-419 (2013).
- ③ 松村大気, 蛭原義雄, 萩原朋道: LMIを用いた離散時間非負システムの安定性とH-infinity性能解析, システム制御情報学会論文誌, Vol. 26, No. 1, pp. 45-51 (2013).
- ④ Y. Ebihara, Y. Yamaguchi and T. Hagiwara: Periodically Time-Varying Controller Synthesis for Multiobjective H2/H-infinity Control of Discrete-Time Systems and Analysis of Achievable Performance, Systems and Control Letters, Vol. 60, No. 9, pp. 709-717 (2011).
- ⑤ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Periodically Time-Varying Memory State-Feedback Controller Synthesis for Discrete-Time Linear Systems, Automatica, Vol. 47, No. 1, pp. 14-25 (2011).
- ⑥ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Analysis of Uncertain Discrete-Time Linear Periodic Systems based on System Lifting and LMIs, European Journal of Control, Vol. 16, No. 5, pp. 532-544 (2010).
- ⑦ 松田雄介, 田原雅人, 蛭原義雄, 萩原朋道: 単一の不確定パラメータを有する線形時不変系のロバストH ∞ 性能解析-双対LMIに基づく緩和問題の漸近的に厳密な階層的構成と非漸近的な厳密性検証-, システム制御情報

学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 46-55 (2010).

⑧ Y. Ebihara, Y. Onishi and T. Hagiwara: Robust Performance Analysis of Uncertain LTI Systems: Dual LMI Approach and Verifications for Exactness, IEEE Transactions on Automatic Control, Special Issue on Positive Polynomials in Control, Vol. 54, No. 5, pp. 938-951 (2009).

[学会発表] (計18件)

- ① Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Stability and Persistence Analysis of Large Scale Interconnected Positive Systems, Proc. of the European Control Conference, Zurich, Switzerland, to be presented, July 19, 2013.
- ② J.F. Tregouet, D. Arzelier, D. Peaucelle, Y. Ebihara, C. Pittet and A. Falcoz: Robust H-infinity Performance of Periodic Systems with Memory: New Formulations, Analysis and Design Results, Proc. of the 51th IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, pp. 7781-7786, December 13, 2012.
- ③ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Decentralized Control of Interconnected Positive Systems Using L1-induced Norm Characterization, Proc. of the 51th IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, pp. 6653-6658, December 13, 2012.
- ④ Y. Ebihara: Dual LMI Approach to Linear Positive System Analysis, Proc. of 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2012), Jeju, Korea, pp. 887-891, October 18, 2012.
- ⑤ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Optimal L1-Controller Synthesis for Positive Systems and Its Robustness Properties, Proc. of the American Control Conference, Montreal, Canada, pp. 5992-5997, June 29, 2012.
- ⑥ J.F. Tregouet, Y. Ebihara, D. Arzelier, D. Peaucelle, C. Pittet and A. Falcoz: Robust Stability of Periodic Systems with Memory: New Formulations, Analysis and Design Results, Proc. of the 7th IFAC Symposium on Robust Control Design, Aalborg, Denmark, June 22, 2012.
- ⑦ J.F. Tregouet, D. Arzelier, D. Peaucelle, Y. Ebihara, C. Pittet and A. Falcoz: Periodic H2 Synthesis for Spacecraft Attitude Control with Magnetorquers and Reaction Wheels, Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control,

Orlando, Florida, USA, pp. 6876-6881, December 15, 2011.

⑧ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: L1 Gain Analysis of Linear Positive Systems and Its Application, Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, pp. 4029-4034, December 13, 2011.

⑨ J.F. Tregouet, D. Arzelier, D. Peaucelle, Y. Ebihara, C. Pittet and A. Falcoz: Periodic FIR Controller Synthesis for Discrete-Time Uncertain Linear Systems, Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, pp. 1367-1372, December 12, 2011.

⑩ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Some Conditions for Convexifying Static H-infinity Control Problems, Proc. of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, pp. 9248-9253 August, 31, 2011.

⑪ Y. Ebihara, Y. Matsuda and T. Hagiwara: Asymptotic Exactness of Dual LMI Approach for Robust Performance Analysis of Uncertain LTI Systems, Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1472-1477, December 15, 2010.

⑫ Y. Ebihara: Robust H2 Control of Uncertain Discrete-Time Linear Systems with Periodically Time-Varying Memory State-Feedback, Proc. of the IEEE Multi Conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, pp. 357-362, September 8, 2010.

⑬ Y. Ebihara, J. Yamaguchi and T. Hagiwara: Periodically Time-Varying Controller Synthesis for Multiobjective H₂/H-infinity Control of Discrete-Time Systems and Analysis of Achievable Performance, Proc. of the 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS2010), Budapest, Hungary, pp. 2321-2328, July 9, 2010.

⑭ Y. Ebihara and N. Sebe: Decentralized Control for Discrete-Time LTI Systems: Lower Bound Analysis of H-infinity Performance Achievable via LTI Controllers, Proc. of the American Control Conference, Baltimore, Maryland, USA, pp. 5602-5607, July 2, 2010.

⑮ Y. Matsuda, Y. Ebihara and T. Hagiwara: Constructing a Sequence of Relaxation Problems for Robustness Analysis of Uncertain LTI Systems via Dual LMIs, Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and

Control, Shanghai, China, pp. 2174-2179, December 16, 2009.

⑯ Y. Ebihara, Y. Kuboyama, T. Hagiwara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Further Results on Periodically Time-Varying Dynamical State-Feedback Controller Synthesis for Discrete-Time Linear Systems, Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, pp. 702-707, December 16, 2009.

⑰ Y. Ebihara, D. Peaucelle and D. Arzelier: Robustness Analysis of Uncertain Discrete-Time Linear Systems based on System Lifting and LMIs, Proc. of the ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka Japan, pp. 3908-3913, August 20, 2009.

⑱ Y. Ebihara: An Elementary Proof for the Exactness of (D,G) Scaling, Proc. of the 47th American Control Conference, St. Louis, Missouri, USA, pp. 2433-2438, June 11, 2009.

[図書] (計1件)

蛭原義雄: LMIによるシステム制御, 森北出版, 236 ページ (2012).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蛭原 義雄 (EBIHARA YOSHIO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80346080

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし