

**京都大学教育研究振興財団助成事業
成 果 報 告 書**

平成30年 4月 2日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団
会 長 辻 井 昭 雄 様

所属部局 工学研究科・電気工学専攻

職 名 准教授

氏 名 蛭原義雄

助成の種類	平成 29 年度 ・ 研究活動推進助成			
研究課題名	制御工学分野における革新的な半正定値計画アプローチ			
共同研究者	(所属・職名・氏名)			
発表学会文献等	(この研究成果を発表した学会・文献等) Y Ebihara, "Reduction of SDPs in H-infinity Control of SISO Systems and Performance Limitations Analysis," The IFAC Workshop ``Robert Tempo'' on Uncertain Dynamical Systems (WUDS), Banyuls-sur-mer, France (2017).			
成果の概要	研究内容・研究成果・今後の見通しなどについて、簡略に、A4版・和文で作成し、添付して下さい。(タイトルは「成果の概要／報告者名」)			
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	1,000,000 円		
	使用した助成金額	1,000,000 円		
	返納すべき助成金額	0 円		
	助成金の使途内訳	費 目	金 額	
		国際会議参加に関する経費	509,600	
		消耗品購入	73,517	
		指導助言謝金	57,600	
	国際会議参加に関する経費 (2018年使用見込)	359,283		
当財団の助成について	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) 京都大学教育研究振興財団の助成により本年度の研究を円滑に進めることができた。助成額は次年度の外部資金を獲得するまでの研究を継続して行う上で十分であったと考える。なお、助成金の利用に関して、次年度に本研究に関連する国際会議での研究発表があるため年度を超えての使用を見込んでいるが、この点をお認め頂いているところは非常に有難い。			

成果の概要／蛭原義雄

「制御工学分野における革新的な半正定値計画アプローチ」と題した本研究課題では、応用数学分野における半正定値計画 (Semidefinite Programming, SDP) と呼ばれる最適化手法に関する最新の成果を取り入れ、制御工学分野における諸問題の解法に関する新たなアプローチを構築することを目的とした。制御工学分野において、システムの性能を解析する問題や、所望の制御性能を達成する制御器を設計する問題の多くを SDP に帰着できることがよく知られている。しかしながら制御分野において現れる SDP を数値計算によって解こうとすると、数値的不安定性により信頼のおける結果が得られないことが多い。この点に関して、本研究を共同で進めた脇隼人准教授 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所) と瀬部昇教授 (九州工業大学情報工学部知能情報工学科) らは、制御において現れる SDP の双対 SDP には内点許容解がないことが多く、これが数値的不安定性の要因であることを指摘していた。さらにこの数値的不安定性の回避に関連して、脇隼人教授は応用数学分野において SDP に対する Facial Reduction (FR) という手法を提案していた。SDP に対する FR とは、解きたい SDP の主問題ないし双対問題に内点許容解がない場合に、目的関数値を変化させることなく主問題と双対問題の双方を内点許容解を有する問題に変換するアルゴリズムを提供するものである。本研究では、1 入出力の制御対象に対する最適 H_∞ 性能制御器設計問題において現れる SDP に FR を適用し、FR の適用によって確かに数値的不安定性が回避されることを示した。さらに FR を適用した後に制御理論的考察に基づいて SDP の構造を解析することで SDP が劇的に単純化され、達成可能な H_∞ 性能限界を (もはや SDP を解くことなく) 線形方程式によって定まる行列の固有値で表現できることを明らかにした。この研究成果は、古くから複素解析的な手法により研究が進められてきた“達成可能な H_∞ 性能限界解析問題”に対して、SDP に基づく新たな解法を提供するものである。本研究成果は、IFAC Workshop on Uncertain Dynamical Systems (July 5-7, 2017, Banyuls-sur-mer, France) にて発表した。この Workshop はロボスト制御分野の世界の主要研究者 30 名程度が集い開催されるものであり、オーガナイザからの招聘を受けての参加であった。発表に対して、聴衆からは複素解析的手法により得られる結果との関係や Riccati 方程式によるアプローチとの相違点などに関して多くの質問が寄せられ、本研究の注目の高さがうかがえた。今後は、脇隼人教授、瀬部教授とともに本研究成果を学術論文としてまとめ、国際学術雑誌に投稿する予定である。

一方、上記の SDP に対する FR の適用と並行して、非負システムに対する SDP に基づく制御系設計にも積極的に取り組んだ。非負システムとは、任意の非負の初期状態と任意の非負の入力に対して、状態と出力が常に非負となる動的システムである。このような非負性は、資源量、エネルギー、製品生産量、化学物質の濃度といった負の値を取り得ない物理量によって記述されるダイナミクスに普遍的に現れるものであり、非負システム理論は経済学や社会システム工学、生物学といった多彩な分野で重要な研究対象になっている。非負システムに対する制御系設計問題は、制御を施した閉ループ系を非負に留めるという自然な要請があるため、通常の (閉ループ系に非負性を課さない) 制御系設計問題よりも難しい問題になる。とくに非負システムに対する状態フィードバック H_2 最適制御器設計問題は非凸最適化問題と考えられており、最適な H_2 制御器の設

計手法は知られていない。このような非凸最適化問題に対する標準的なアプローチは、局所探索によって準最適な制御器を求める（達成可能な H_2 ノルムの上界値を求める）というものである。しかしながらこのような上界値計算のみに頼る手法では、算出された制御器によって達成される H_2 ノルムが最適なものにどれだけ近いのかということに関して、何ら定量的な評価を与えることができない。一方で、達成可能な H_2 ノルムの下界値を精度よく求めることができれば、上界値計算と組み合わせることで算出された制御器の性能を定量的に評価できる。すなわち、算出された制御器によって達成される H_2 ノルムが下界値に十分近ければ、算出された制御器が最適制御器に十分に近い性能を発揮するものであると結論づけることができる。本年度は、非負システム分野で著名な研究者である Prof. Patrizio Colaneri (Politecnico di Milano, Italy), Prof. J. C. Geromel (University of Campinas, Brazil)らとともにこの下界値の計算手法に関する検討を進め、SDP を用いて制度の良い下界値を計算できることを明らかにした。本研究成果は SICE International Symposium on Control Systems (March 9–11, 2018, Tokyo, Japan)にて発表した。さらに発展的な結果を別途国際会議論文として投稿した。

公益財団法人京都大学教育研究振興財団の助成により報告者（蛭原）の非負システムに関する研究は着実に進展しており、2018年8月に Hangzhou (China) で開催される非負システムに関する主要な国際会議である The 6th International Conference on Positive Systems において Plenary Speaker に選出されている他、国際学術雑誌 IET Control Theory and Applications における Special Issue on Theory of Positive Systems and Applications（非負システムの理論と応用に関する特集号）のゲストエディタに選出されるなど、国際的な活動も徐々に進展してきている。公益財団法人京都大学教育研究振興財団からの助成に改めて深く御礼申し上げます。