

氏 名	まつだ よしたか <b>松 田 吉 隆</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 4 5 8 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 情報・生産科学専攻
学 位 論 文 題 目	<b>Studies on the Design of Control Systems with Nonlinearities via Matrix Inequalities</b> (非線形性を有する制御系の行列不等式による設計に関する研究)
審 査 委 員	(主査) 教授 大住 晃 教授 森 武宏 教授 黒江康明 助教授 大瀬長門

## 論文内容の要旨

本論文では非線形性を有する制御系の行列不等式を用いた設計手法に関する研究を行っている。現実のシステムは一般に何らかの非線形性を有しているが、制御系設計の際にはその非線形性を考慮せずに線形システムとして設計を行うことが多い。これは非線形性を有する制御系設計の理論が未だ発展途上にあるのに対し、線形システムの設計理論は状態空間モデルに端を発する約半世紀にも及ぶ研究によって十分に発達・成熟し、さまざまな分野に応用されているという経緯によるものである。しかし、制御系設計の際にその非線形性を考慮せずに設計を行うと、その考慮していない非線形性によって制御系の性能が著しく低下し、所望の制御性能を得ることができなくなることがしばしばあり、最悪の場合システム全体の不安定化を招いてしまうことさえあり得る。したがって、そのような制御系の非線形性の影響を無視できない場合には、その非線形性の制御系への影響を考慮した設計手法が必要となる。その設計手法に関する研究は現在さまざまな方面で盛んに行われているが、本論文では動的コントローラに対するアンチワインドアップ補償器の設計問題、多変数 PID（比例・積分・微分）コントローラに対する動的アンチワインドアップ補償器の設計問題、セクター非線形性を有する制御系の動的コントローラの設計問題および入力制約を有する制御系の構造とコントローラの統合設計問題に取り組み、その制御系がもつ非線形性を考慮した設計手法を提案している。

本論文は次の 6 章から成っている。

第 1 章では、導入として本論文で取り扱う設計問題と設計方針を整理し、過去の研究について述べている。

第 2 章では、入力飽和を有する制御系の動的コントローラに対する新たなアンチワインドアップ補償器を提案し、その設計に取り組んでいる。本研究ではこの補償器を、その構造に因んで PD（比例・微分）型アンチワインドアップ補償器と呼んでいる。PD 型アンチワインドアップ補償器設計のために、システムの安定性・性能解析に関する十分条件としての行列不等式を導出し、それに基づいて PD 型アンチワインドアップ補償器設計のための線形行列

不等式条件を導出している．また，この提案補償器の設計により，飽和非線形要素の出力のコントローラの出力への直達項を有する従来の静的アンチwindアップ補償器設計の際に生じるアンチwindアップ制御系の適切性に関する理論的難点を回避でき，さらにその場合の制御入力生成が容易に行えることを示している．本章で提案する PD 型アンチwindアップ補償器とその設計手法の有効性を数値例により確認している．

第 3 章では，入力飽和を有する線形システムに対する低次元動的アンチwindアップ補償器を有する多変数 PID コントローラの設計方法を提案している．その設計過程は 2 段階から成っている．第 1 段階では，入力飽和のない線形システムに対する多変数 PID コントローラの設計を行っている．その際，ある形式の PID コントローラを導入し，かつ閉ループシステムをあるディスクリプタ形式で表現することにより，従来の PID コントローラ設計手法がもつ，PID 制御系の適切性の保証，PID 制御系の信号の次元に課せられる制約条件および多変数 PID コントローラの構造指定に関する欠点を改善している．第 2 段階では，先に設計された PID コントローラに対する低次元動的アンチwindアップ補償器を構成する手法を提案している．通常，低次元動的アンチwindアップ補償器の設計は非凸な最適化問題に帰着され，現時点では線形行列不等式問題のような容易に解くことのできる問題に帰着することは困難であるが，本章では第 2 章で提案された PD 型アンチwindアップ補償器を応用して容易に構成することができることを示している．また，その手法によって構成されるアンチwindアップ補償器の構造指定が容易に行えることも理論的に確認している．提案手法の有効性を確認するための数値例として，分散型アンチwindアップ制御系の設計例を示している．

第 4 章では，セクター非線形性を有する制御系に対する動的コントローラの設計問題を取り扱っている．コントローラ設計のために，セクター非線形性を有するシステムの解析に関する行列不等式条件を導出している．それに基づいて，コントローラの設計問題を双線形行列不等式問題として定式化し，それを解くための繰返し線形行列不等式アルゴリズムを導入している．その設計アルゴリズムを，非線形性を有する不安定なボール・オン・ホイールシステムの制御問題に応用し，設計されたコントローラの有効性を数値シミュレーションによって検証している．

第 5 章では，入力制約を有する線形システムの構造とコントローラの統合設計問題を考え，その設計のための手法を提案している．制約を有するあるクラスのディスクリプタシステムの，外乱と初期状態を考慮した解析に関する行列不等式条件を導出し，それを統合設計問題に適用することによって，設計問題を行列不等式を制約条件とする最適化問題として定式化している．その行列不等式は決定変数に関して非凸であるが，その行列不等式に現れるある行列の構造を適切に選ぶことにより行列不等式を分割し，それを線形行列不等式に変換して解くことにより設計を行っている．数値例によりその有効性を検証している．

第 6 章では本論文で得られた結果をまとめている．

## 論文審査の結果の要旨

本論文では，非線形性を有する制御系の設計問題としてアンチwindアップ補償問題，セク

ター非線形性を有する制御対象に対する動的コントローラの設計問題および入力制約を有する制御系の構造パラメータとコントローラの統合設計問題を考え、それに対する行列不等式による設計手法を提案している。本論文で提案されたアンチwindup補償器は従来の静的補償器設計の際に生ずる理論的難点を回避する方策を与えているが、それだけに止まらず直接的に設計することが一般に困難な低次元動的アンチwindup補償器の構成をも容易にしていることから、理論・実用の両面で優れており高く評価される。また、統合設計の際に現れる非線形行列不等式問題の線形行列不等式による解法は前例がなく、これも評価される。

本論文の基礎となったのは以下の8編の学術論文であり、そのうち6編は申請者が筆頭著者である。8編の学術論文のうち、2編（判定待ちの1編を含む）は国内の学術雑誌に、6編は査読制度のある国際会議の *Proceedings* にそれぞれ掲載されている。以上より、本論文の内容は学術的価値を有し、独創性、有効性も認められることから、本論文は学位論文としての水準を満たしていると判定する。なお、学位論文の基礎となった学術論文は下記のとおりである。

1. N. Ohse and Y. Matsuda: Integrated Design of Structure and Controller for a Class of Descriptor Systems with Input Saturation, *Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Roanoke, Virginia, USA, Nov., 2003, pp. 1546-1551.
2. Y. Matsuda and N. Ohse: Total Synthesis of Structure and Control Systems with Restricted Control Input, *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, Nov., 2004, FD6-4.
3. Y. Matsuda, N. Ohse, and K. Tanaka: Anti-windup PID Controller Synthesis for Linear Systems with Actuator Saturation, *Proceedings of the SICE Annual Conference 2005*, Okayama, Japan, Aug., 2005, pp. 3372-3377.
4. Y. Matsuda and N. Ohse: Synthesis of Dynamic Controllers for a Class of Nonlinear Systems: An Application to a Ball-on-Wheel System, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, Munich, Germany, Oct., 2006, pp. 1061-1066.
5. Y. Matsuda and N. Ohse: An Approach to Synthesis of Low Order Dynamic Anti-windup Compensators for Multivariable PID Control Systems with Input Saturation, *Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, Busan, Korea, Oct., 2006, pp. 988-993.
6. 松田吉隆, 大瀬長門: 入力飽和を有する制御システムのPD形anti-windup補償器の設計, 日本機械学会論文集, C編, 72巻, 722号, 2006, pp. 3139-3146.
7. N. Ohse, Y. Matsuda, and K. Tanaka: On a Synthesis of Multivariable PID Controllers for a Class of Linear Systems, *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Paris, France, Nov., 2006, pp. 549-554.
8. 松田吉隆, 大瀬長門, 田中綱基: 飽和非線形要素をもつ多変数線形システムの低次元動的補償器を用いたPID制御, 日本機械学会論文集, C編 (投稿中)