

(様式第3号)

## 論文要旨

論文題目：一般化グラミアンを利用したシステムの低次元化に関する研究

A Study on System Order Reduction Using Generalized Gramians

モデルやコントローラの次数が高くなると、制御システムが複雑になり、設計コストが増大する。そのため、高次元のモデルやコントローラは、実際に利用する上で好ましくない。性能劣化がわずかならより低次のものが都合良いため、そのような低次元のモデルやコントローラを得るために、これまで多くの研究がなされてきた。

その中の一つである構造化平衡打ち切り法は Zhou らによって提案された。この手法のアイデアは、グラミアンのかわりにリアプノフ不等式の解であるブロック対角の一般化グラミアンを平衡化することで低次元化を行う点にある。構造化平衡打ち切り法では、このブロック対角の一般化グラミアンを活用することによって、「得られた低次元化コントローラは閉ループシステムの安定性を保証し、また、得られた低次元化モデルは安定となる」、「劣化指標となる誤差上界を容易に得ることができる」などの利点を得られる。その一方で、「誤差上界が最小となる低次元化コントローラ（または低次元化モデル）を得ることが困難である」、「リアプノフ不等式が不可解となり、コントローラの低次元化を行えない場合が多い」などといった問題がある。

そこで本論文では、構造化平衡打ち切り法におけるこの二つの問題の改善を行う。また、その発展として、一般化グラミアンを利用した新しいコントローラ低次元化法を提案する。

まず、本論文では、「構造化平衡打ち切り法における誤差ノルムの低減化」について述べる。上述したように、構造化平衡打ち切り法において、誤差上界が最小となる低次元化コントローラ（または低次元化モデル）を得ることは困難である。これは、解くべき最適化問題の目的関数が凸でないことに起因する。そこで、この目的関数を線形関数で近似し、誤差上界と関連の強い要素を特定して小さくすることにより、誤差上界の低減化を図った誤差上界低減化法を提案する。

つぎに、「新しい閉ループ構造を持つ構造化平衡打ち切り法によるコントローラの手次元化」について述べる。構造化平衡打ち切り法を扱うことにおいて、リアプノフ不等式の可解性の問題は最も重大なものである。そこで、構造化平衡打ち切り法におけるリアプノフ不等式の可解性を高めるために、二つの新しい閉ループ構造を導入する。これらは、拡張コントローラと縮小コントローラによって構成されており、オリジナルの閉ループ構造と等価となっている。そのため、オリジナルの閉ループ特性を陽に考慮することができる。

そして、「構造化平衡打ち切り法における LMI 制約条件の緩和と誤差上界の低減化」について述べる。閉ループ構造を持つコントローラ低次元化問題においても誤差上界低減化法が有効であることを検証するために、上記の二つの閉ループ構造にこれを適用する。

最後に、一般化グラミアンを利用した新たなコントローラ低次元化法として、「一般化グラミアンの組合せによるコントローラの低次元化」について述べる。構造化平衡打ち切り法と同様に、ブロック対角の一般化グラミアンを利用してコントローラの低次元化を行う場合、リアプノフ不等式の可解性の問題が生じる。そこで、この可解性の問題を解決するために、既約分解表現を用いて閉ループシステムを安定な既約因子の積で記述することを考える。このように記述されたシステムにおいては、ブロック対角の一般化グラミアンは常に存在するため、可解性の問題が生じない。また、本提案法では、低次元化後の制御システム全体の  $H_{\infty}$  性能に大きな影響を与えるサブシステムを考慮するために、各サブシステムの一般化グラミアンを組み合わせて平衡化し、性能劣化の小さな低次元化コントローラを求める。

氏名：安里 健太郎

(様式第5-2)

2008年 2月 20日

琉球大学大学院  
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏名 玉城 史朗

副査 氏名 宮城 隼夫

副査 氏名 金城 寛



### 学位（博士）論文審査及び最終試験の終了報告書

学位（博士）の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

#### 記

申請者	専攻名 総合知能工学 氏名 安里 健太郎 学籍番号 058651A		
指導教員	玉城 史朗		
成績評価	学位論文	<input checked="" type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	最終試験 <input checked="" type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格
論文題目	一般化グラミアンを利用したシステムの低次元化に関する研究		
審査要旨（2000字以内）	<p>博士論文「一般化グラミアンを利用したシステムの低次元化に関する研究」では、大別して、「一般化グラミアンを利用した既存手法である構造化平衡打ち切り法の問題点の改善」と「一般化グラミアンを利用した新しい手法の考案」について述べている。</p> <p>前者の研究成果は本論文の第3～5章においてまとめられている。第3章では、「構造化平衡打ち切り法における誤差ノルムの低減化」について述べており、構造化平衡打ち切り法において誤差上界の最小化を行うことは困難であるという問題の解決を図っている。この問題は解くべき最適化問題の目的関数が凸でないことに起因しており、本章では、この凸でない目的関数を線形関数で近似し、誤差上界と関連の強い要素を特定して小さくしていくことにより、誤差上界の低減化を行っている。また、この提案された手法（誤差上界低減化法）の検証は、重みつきモデル低次元化問題の例題を用いて行わ</p>		

(次頁へ続く)

## 審査要旨

れている。その結果から、提案された手法は、誤差上界および実際の誤差ノルムの低減化に有効であることが確認できる。第4章では、「新しい閉ループ構造を持つ構造化平衡打ち切り法によるコントローラの低次元化」について述べており、構造化平衡打ち切り法を扱うことにおいて最も重要となるリヤプノフ不等式の可解性について改善を行っている。制御対象が不安定であるために構造化平衡打ち切り法を適用することができず、コントローラの低次元化を行えないケースは多く存在する。本章では、新しい二つの閉ループ構造を導入することにより、構造化平衡打ち切り法の適用範囲を拡大できることについて言及している。これらの閉ループシステムは、安定となるように新たに定義されたコントローラ（拡張型および縮小型のコントローラ）と一般化プラントによって構成されており、また、オリジナルの制御システムの閉ループ構造と等価となっている。そのため、オリジナルの閉ループ特性を陽に考慮することができる。ここで提案された手法の検証は、不安定な制御対象を含む制御システムを例に行われており、この結果から、導入された二つの閉ループシステムを用いることにより、構造化平衡打ち切り法の適用範囲を拡大できることが確認できる。第5章では、「構造化平衡打ち切り法におけるLMI制約条件の緩和と誤差上界の低減化」について述べており、第3章と第4章の結果を組み合わせ、構造化平衡打ち切り法における二つの問題を同時に解決している。

後者の研究成果は、本論文の第6章においてまとめられている。ここでは、「一般化グラミアンの組合せによるコントローラの低次元化」について述べており、構造化平衡打ち切り法を基礎として、一般化グラミアンを利用した新しいコントローラ低次元化法の提案を行っている。構造化平衡打ち切り法と同様に、ブロック対角の一般化グラミアンを利用してコントローラの低次元化を行う場合、リヤプノフ不等式の可解性の問題が生じるため、提案手法では、既約分解表現を用いて閉ループシステムを安定な既約因子の積で記述し、これの解決を図っている。また、低次元化後の制御システム全体の制御性能に大きな影響を与えるサブシステムを考慮するために、得られた各サブシステムの一般化グラミアンを組み合わせて平衡化し、性能劣化の小さな低次元化コントローラを求めている。この提案された手法の検証は数値例を用いて行われており、その結果から低次元化による性能劣化の抑制に有効であることが確認できる。

本研究の成果は、制御工学の発展に付与する可能性を示している。また、最終試験の結果、上記の学生は専門および関連分野の知識を十分有していることが判明した。よって、博士の学位論文および最終試験をそれぞれ合格とする。