

内 93-19

早稲田大学大学院理工学研究科

2010

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Robust Control With Mixed H_2/H_∞
Performance Objectives : Analysis and Design

(H_2/H_∞ 評価基準を考慮したロバスト制御：
解析及び設計)

申 請 者

バンバン リヤント トリラクソノ
Bambang Riyanto Trilaksono

電気工学専攻, 制御工学研究

平成 5 年 12 月

本論文は線形時不変多変数 (L T I) システムにおける、 H_2/H_∞ 評価基準に対するロバストフィードバック制御の解析と設計の理論に関するものである。この問題は、すべての安定化コントローラの中から、ある閉ループ伝達関数の H_∞ ノルムに関する拘束条件の下で、別の閉ループ伝達関数の H_2 ノルムを最小化するものを求める問題である。このように、 H_2 評価基準だけでなく、 H_∞ 評価基準も同時に扱うことによって、コントローラの設計に際して、 H_2 ノルムで評価される2次の最適性と、 H_∞ ノルムによって保証されるロバスト性のトレードオフを組み込むことができる。

この論文においては、混合 H_2/H_∞ 制御問題を低次元化されたコントローラを持つ一般的な出力フィードバックの場合に対する行列線形不等式 (L M I) を用いて解いている。求めるコントローラは L M I の正定解を含む凸最適化問題とランク条件によって特性づけられている。L M I を用いる方法はこれによって凸集合が定義されることに加えて、内点法に基づく効率のよい数値計算法が開発されている点で有望な方法である。この結果は、コンパクトな集合に属する構造的な不確定性を含む不確定な L T I システムに拡張されている。この問題に対して、凸計画法と変数変化の手法を用いて類似の設計法を導出し、ノルムが有界な構造的な不確定性を有する L T I システムに対する状態フィードバックの形で解が得られることを示している。これによって、設計者は2次評価に加えて、構造的な実パラメータの不確定性と非構造的な不確定性の両方を解決することができる。

標準混合 H_2/H_∞ 制御理論は、ロバスト性と特性のトレードオフを適切に定式化しているにもかかわらず、現実存在するいろいろな設計上の制約を直接的に扱っていない。そこで、混合 H_2/H_∞ 最適化問題にその他の設計上の制約を組み入れる必要がある。この論文では、出力の分散と閉ループシステムの極の配置を特に重視している。前者は確定的な場合の L_∞ 制約に対応し、後者は過渡応答の形に対応している。出力あるいは入力分散の制約がある混合 H_2/H_∞ 制御問題に対しては、L a g r a n g e 乗数法を用いて解いている。また、これに基づいて繰り返し計算するアルゴリズムが示されている。これらの結果は構造的な不確定性を有する L T I システムに対して拡張されている。極配置に制約のある混合 H_2/H_∞ 制御問題の場合には、L a g r a n g e 乗数法、および変数変化法による凸最適化が使われている。前者の場合には出力フィードバックと極配置の可成一般的な領域を扱うことができ、降下法のアルゴリズムを与えることができる。また、後者の方法では状態コントローラと円領域が対象になっている。

さらに、この論文では構造的な非線形時変な (N L T V) 変動を受ける L T I システムのロバスト安定性を、絶対安定の理論と散逸的ダイナミカルシステム概念を用いて解析する手法を与えている。幾種類化の非線形性に対してロバスト安定であるための条件が L M I を用いて導出されている。この条件は N L T V 変動に対する、構造的な特異値 (μ) の上限を与えるものと解釈することができる。この結果に基

づいて、 H_2 評価の最悪な場合を考慮したロバスト制御設計問題を変数変化法による凸最適化を用いて解くことができた。

最後に、混合 H_2/H_∞ 制御問題の結果を L T I 離散時間システムに拡張し、低次元化されたコントローラを導いている。さらに、この結果を不確定性を伴う L T I 離散時間システムへ拡張している。

本論文は8章からなる。以下にその概要を述べる。

第1章では本論文で扱っている混合 H_2/H_∞ 評価基準に対するロバスト制御問題、および関連する解析と設計の問題に対する研究の動機が述べられている。さらに、標準的混合 H_2/H_∞ 制御問題の定式化と関連する文献および本論文の概要が示されている。

第2章では出力(入力)の分散に制約がある混合 H_2/H_∞ 制御を扱っている。この多目的設計問題に対して、L a g r a n g e 乗数法を適用して1次の必要条件および2次の必要十分条件が導出されている。また、この必要条件に基づく繰り返し計算アルゴリズムを導いている。制約に関しては出力と入力の双方に関して検討している。さらにこの結果をプラントに構造的な不確定性が存在する場合に拡張している。

第3章では極配置を考慮した混合 H_2/H_∞ 制御問題を論じている。ここではこの設計問題に対して、2つの方法を提案している。第1は L a g r a n g e 乗数法を用いるもので、静的および動的出力フィードバックと一般的な領域の場合を扱っている。これに対して、線形および非線形行列方程式を含む形で必要条件が導出され、それに基づく最急降下法型の繰り返しアルゴリズムが示されている。ここで、 H_2 特性を犠牲にすることによって別の最適化問題が定式化され、必要条件に現われる行列方程式を単純にすることができ導かれている。第2の方法は変数変化法による凸最適化を用いるもので、リカッチ方程式が関与してくる。この方法では状態フィードバックと円領域の場合が扱われており、最適化問題が凸となるための必要十分条件が導かれている。得られた凸最適化問題は、L M I 法を適用することによって一般化された固有値最小化問題に帰着されるので、内点法に基づく有力なアルゴリズムによって解が求められることが示されている。

第4章ではノルムが有界な構造的な不確定性を含む L T I システムの混合 H_2/H_∞ 状態フィードバック制御問題を凸最適化の方法で扱っている。ここでは、混合 H_2/H_∞ 制御問題がリカッチ方程式と変数変化法によって凸最適化問題に変換され、これにさらに L M I 法を適用することによって一般化された固有値最小化問題に帰着されることが示されている。

第5章では低次元化コントローラによる混合 H_2/H_∞ 出力フィードバック制御問題を L M I 法で解いている。本章では、最初にすべての H_∞ コントローラをパラメタライズし、次にその中から H_2 評価を最小にするものを求めるという方法を取っている。この設計問題に対して2つの最適化問題が導入されている。第1の最適化問題は H_2

ノルムの上限を最小化するもので、いま一つはその上限と実際の H_2 ノルムの凸結合を最小化するものである。これによって、前者の最適化の保守性を緩和することができる。これらの最適化問題に対して、求めるコントローラは L M I の正定解とランク条件から求められる。特にランク条件はコントローラの次数を低減するために必要な条件である。これらの結果と手法はコンパクトな集合に属する構造的な不確定性を含む L T I システムに拡張されている。

第6章では構造的な非線形時変変動を受ける L T I システムのロバスト制御を論じている。ここで対象としている非線形性は、単調な非線形性、奇関数の非線形性、飽和を有する単調な奇関数の非線形性、および非単調な非線形性である。ここでは散逸的ダイナミカルシステム概念と絶対安定理論に基づいてロバスト安定条件を導いている。ロバスト安定条件は、周波数に依存する L a g r a n g e 乗数と L M I の正定解の存在という形で与えられている。非線形性を単調な関数に限定することによって、ロバスト安定条件は、乗数のクラスを一般化できるという意味で緩和することができる。この解析結果に基づいて、最悪の H_2 評価を考慮した場合のロバスト制御を設計する問題が変数変化法による凸最適化によって解かれている。得られた凸最適化問題は L M I 法によってさらに一般化された固有値最小化問題に帰着されることを示している。

第7章では離散時間 L T I に対する低次元コントローラによる混合 H_2/H_∞ 制御問題が扱われている。ここでは、L a g r a n g e 乗数法と L M I 法を用いてこの問題を解いている。前者の方法によって、ノミナルな L T I システムの場合と構造的な不確定性を含む L T I システムの場合に対する必要条件が導出されている。また、後者の方法によって、第5章で得られた結果が離散時間システムに拡張されている。

第8章はこの論文の結論で、得られた結果と今後の研究の課題がまとめられている。