

学位論文題名

パラメータ変動に対するロバスト制御系設計法に関する研究

学位論文内容要旨

設計とは合成されたシステムが、全体として望ましい特性をもつように、与えられたシステムに付加すべきシステムを構築することである。このとき与えられたシステムに関する情報がある程度不正確でも、合成後のシステムの特性が設計時の目的を満たしていることが望まれる。制御系の設計においては、与えられる制御対象のモデルは、(1)係数パラメータの同定誤差、(2)高周波数領域の同定誤差、(3)低次の制御器を設計するための簡略化、(4)非線形要素や雑音の無視、(5)環境の変化などによる変動、などにより実際の制御対象とは異なる(以下、これら相違を変動または不確かさと総称する)。したがって、実際の制御対象が設計時に用いたモデルと異なっても所期の制御性能が保存されることが実用上極めて重要である。このとき、より大きな制御対象の変動に対して着目する制御特性の変化が少ない程、制御系はその制御特性に関してロバストであるという。

制御対象の変動は大きく構造的変動(structured uncertainties)と非構造的変動(unstructured uncertainties)に分類される。前者は状態方程式の係数パラメータの変動や特異摂動などある種の構造的特徴を保存する変動であり一般に時間領域で扱うため時変・非線形変動を考慮できる。一方後者は変動の構造を規定せず、その大きさだけが制約を受ける変動であり、その意味ではクラスが広いが、周波数領域で記述されるため時変・非線形変動を扱いにくい。保存すべき制御特性として、(a)定常特性、(b)有限(または全)周波数帯域における信号伝達特性、(c)安定性、が重要である。

変動のクラスや保存すべき制御特性をさらに特定して多数のロバスト制御系設計法・解析法が研究されているが、最も基本的な変動であるパラメータ変動に対し制御特性(a)~(c)を同時にかつ適切に考慮できる汎用的なロバスト制御系設計法に関する研究はほとんどないように思われる。

本研究の目的は、制御対象の状態方程式における係数パラメータ変動に対し、上記の制御特性(a)~(c)の保存の度合いを適切に考慮できる汎用的かつ実用的なロバスト

制御系設計法を構築することである。以下に論文の構成に従い、本研究の主要な成果を示す。

第1章は緒論であり、本研究の背景、動機、目的、意義を明らかにし、論文の構成を示す。

第2章では従来の主なロバスト制御系設計法について概観し、分類する。またこれに基づいて本研究の位置付けを示す。さらに、ロバスト制御系の設計法として重要と思われる条件を(a)ベースとする設計法、(b)ロバスト制御方策、それぞれについてつぎのようにまとめた。すなわち、(a)ベースとする設計法に望まれる性質として、(1)多様な変動のクラスが表現できること、(2)広いクラスの制御系を包含し、理論限界までの制御特性を実現できること、(3)与えられたロバスト性実現条件を満足する制御器を容易に導出できること、(4)従来の研究で得られた結果を容易に取り入れられること、(b)ロバスト制御方策に望まれる性質として、(1)広いクラスの実際的な変動に効果があり、その効果の度合いを調節できること、(2)与えられた変動のクラスに(保守的にならず)必要かつ十分に対応するロバスト性実現条件であること、(3)ロバスト性と他の制御仕様が設計上(できれば制御器の構造上も)分離できること、(4)実用上重要な次の諸問題、すなわち、制御器の次数の指定、過大なゲインや操作量飽和、デジタル化に伴う問題、現場での調整、などに適切な対応(必要なら合理的なトレードオフ)ができること、が重要である。またこの観点から本研究で開発した設計法の特徴を示した。

第3章では最小位相特性を持つ制御対象のパラメータ変動に対する実用的なロバスト制御系設計法であるロバスト・モデル・マッチングを体系的に整理し、残されている問題を指摘する。さらに非最小位相特性を持つ制御対象に適用できるように拡張する。すなわち、3.1においてロバスト・モデル・マッチングの目的・原理・特徴を示し、3.2で設計に必要な基本的概念の定義を行う。これらの準備のもとで、3.3で最小位相系の制御対象に対する設計法の標準的設計手順を示す。さらに実用上重要ないくつかの応用的問題を扱う。また3.4では従来提案されている H_∞ 制御や2-Delay制御の手法を用い、非最小位相特性を持つ制御対象に適用できるロバスト・モデル・マッチング設計法を提案する。

第4章ではデュアル・モデル・マッチングによる新しいロバスト制御系設計法を提案する。まず、4.1でデュアル・モデル・マッチングの原理を示す。つぎに4.2では、これに基づいてロバストな定常特性を得るための制御器の必要十分条件を導出し、従来得られていた安定有理関数行列による既約分解表現による必要十分条件と比較してその特徴を示す。さらに4.3においてロバスト・モデル・マッチングの原理を、一般的2自由

度制御系設計法であるデュアル・モデル・マッチングによって実現するロバスト制御系設計法を提案する。

第5章では第3章および第4章で示した設計法を用い、電気位置サーボのロバスト制御系設計法を確立する。5.1で電気位置サーボ系におけるロバスト制御問題について整理し従来の研究を紹介する。5.2でロバスト・モデル・マッチングおよびデュアル・モデル・マッチングを適用した設計手順をまとめる。5.3では前節の設計手順を現実のDCモータに適用した実際の設計例を示す。5.4で本設計例について数値シミュレーションおよび実験によって検討する。5.5では新たにEdge定理に基づくロバスト安定性の必要十分条件を導出した。これを用い電気位置サーボ系は、ロバスト・モデル・マッチングおよびデュアル・モデル・マッチングの適用によって、任意の有界なパラメータ変動に対して、常にロバスト安定化可能であることを明らかにする。また5.6で従来の設計法との比較を行い本設計法の特徴を示す。5.7は本章のまとめである。

第6章ではこれまでと立場を替え、ディジタル制御系の制御器の有限語長実現による量子化誤差を扱う。有限語長実現は制御器のパラメータ変動として捉えることができ、その対策は制御器に関するロバスト制御系構成問題として位置付けることができる。すなわち自分自身の変動に対してロバストな制御系構成問題であり、制御対象の変動に対するロバスト制御系構成問題より難解な問題である。まず6.1で問題を整理する。つぎに6.2で制御系における2種類の量子化誤差を定義する。6.3で設計の考え方を提示し、6.4でその1つの実現法を示す。6.5で2つの設計例を用いた数値シミュレーションによってその有効性を検討する。6.6は本章のまとめである。

第7章は結言であり研究の成果をまとめ、今後の課題について述べる。

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

主 査 教 授 土 谷 武 士

副 査 教 授 長 谷 川 淳

副 査 教 授 島 公 脩

副 査 教 授 田 川 遼 三 郎 (旭川工業高等専門学校長)

制御系の設計においては、与えられる制御対象のモデルは、様々な要因により実際の制御対象とは異なる。したがって、実際の制御対象が設計時に用いたモデルと異なっても所期の制御性能が保存される、いわゆるロバストな制御系を実現することが実用上極めて重要である。

これまで、制御対象のモデルの変動のクラスや保存すべき制御特性を特定して多数のロバスト制御系設計法および解析法が研究されているが、最も基本的な変動である制御対象の状態方程式におけるパラメータ変動に対し、次の基本的制御特性、すなわち、(a)定常特性、(b)過渡特性、(c)安定性、を同時に適切に考慮できる汎用的なロバスト制御系設計法は提案されていない。

制御対象のパラメータ変動による制御系の内部変数の変化は、ある種の外乱によって等価的に置き換えることができる。したがって、この等価外乱から制御量までの伝達関数行列をできるだけゼロに近づけること(近似ゼロイング)によって、ロバストな制御系を得ることができる。

本論文は、このことに着目し、希望する目標値応答特性を実現するとともに、制御系の自由度を利用して、等価外乱に対する近似ゼロイングを達成することによって、パラメータ変動に対し、上記の制御特性(a)~(c)を適切に考慮できる汎用的かつ実用的なロバスト制御系設計法を構築したものである。

第1章は緒論であり、本研究の目的、意義を明らかにし、論文の構成を示している。

第2章では、従来の主なロバスト制御系設計法について概観し、本研究の位置付けを示すとともに、ロバスト制御系設計法の、考慮すべき重要な観点について考察している。

第3章ではまず、最小位相特性を持つ制御対象のパラメータ変動に対する実用的なロバスト制御系設計法であるロバスト・モデル・マッチングについて、多入力多出力系の標準的設計手順をまとめている。さらに、以下の拡張的問題、すなわち、(1) 非最小位相系の制御対象への適用、(2) 厳密にロバストな定常特性の実現方法、(3) ロバスト補償器の低次元化、(4) 制御器の構造の改良、について考察し、それぞれ解決方法を提案している。

第4章では、線形制御系を包含する設計法であるデュアル・モデル・マッチングを基に、 H_2 および H_∞ ノルムを導入した新しいロバスト制御系設計法を提案している。また一般的フィードバック制御系においてロバストな定常特性を実現する方法を明らかにしている。

第5章では、第3章および第4章で示した設計法を用い、新たにロバスト安定化のための必要十分条件を導入して、電気位置サーボのロバスト制御系設計法を確立している。また、計算機シミュレーションと実験により、摩擦やトルク外乱などの非線形要素に対する効果も含め、提案した設計法の有効性を確認している。また、第3章および第4章で示した設計法の特徴を論じている。

第6章では、デジタル制御系において、制御器の有限語長実現に起因して発生する量子化誤差を、操作量に加わる外乱とみなすことにより、量子化誤差の影響を受けにくい制御アルゴリズムの設計指針を与え、計算機シミュレーションによりその有効性を検証している。

第7章は結言であり本研究の成果を総括している。

これを要するに、本論文は、パラメータ変動に対する新しい体系的ロバスト制御系設計法を提案したものであり、制御工学の進展に寄与するところ大である。よって著者は工学博士の学位を授与される資格あるものと認める。