

論文審査の結果の要旨

氏名：中 川 清 春

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：不確かさを含む機械系に対するモデリングを統合した制御器設計手法の研究

審査委員：（主査） 教授 渡 辺 亨

（副査） 教授 堀 内 伸一郎 元教授 背 戸 一 登

本論文は、パラメータ変動や高次の弾性モードなどの不確かさを含む柔軟な機械系の運動と振動の制御のための制御器設計手法に関する研究をまとめたものである。

本研究の背景には、近年急速に一般化しつつある「柔軟な機械システムに対する運動と振動の制御」に求められる「制御器のロバスト性」の問題がある。

一般に機械システムにおいては、自重を軽くすることは全般的な性能向上につながる。そこで近年さまざまな機械システムで軽量化が進められているが、これに伴って機械システムの弾性・柔軟性が新たに振動問題を引き起こすこととなり、より積極的な振動制御、すなわちモータなどのアクチュエータを用いた能動的な制御により振動を抑制しようとする「アクティブ振動制御」が登場した。またこれと平行して機械システムの運動をコンピュータ制御する「モーションコントロール」すなわち運動制御が可能となり、「運動と振動の制御」が新たな技術として注目されるようになってきた。

運動と振動とを制御するシステムの核となるのが、センサにより観測された出力を元に、アクチュエータに与える制御入力を算出する制御器（コントローラ）である。制御器の設計は、最初に制御対象の動特性をモデル化し、そのモデルに対し適当な制御理論を適用して制御器を求め、試行錯誤などにより制御特性を調節するという手順で行うのが一般的である。しかし、前述のように対象となる機械システムが柔軟化したり、機械システム自体に質量変動が加わったりすると、モデル化の困難は増大しモデル自体に大きな不確かさが含まれることが避けられず、それが制御系の安定性に悪影響を及ぼすことがしばしばある。不確かさが存在した場合でも閉ループ制御系が安定を保つ、という性質は「ロバスト性」と呼ばれ、これまで多くのロバスト制御器設計手法が研究されている。

代表的なロバスト制御器設計手法として「 H^∞ 制御」が知られている。これは、制御対象の動力学的モデルに、与件として与えられた不確かさと、その他の制御ニーズを組みこんだより包括的なモデル「一般化プラント」を構築し、これに H^∞ ノルムという制御指標を適用し、これを満足する制御器を計算により導出することで制御器を得る手法である。この手法により得られた制御器は高いロバスト性を達成しうるということが示されている。しかしながら、この手法では制御対象は「基本的に既知」、その不確かさは「与件として与えられて」おり、具体的にどのような不確かさをモデル化すれば良いかという点についてはほとんど触れられていなかった。

一方、柔軟な機械システムのモデリングの分野では、最も確からしい、すなわち最も不確かさの少ないモデルを同定する研究が多数行われている。例えば背戸・相根らによって提案されている「低次元化物理モデル」手法は、柔軟な機械システムを多数の剛体要素とばね要素の組合せに置き換えた上で、それら要素のパラメータを未知数とし、その値を元の機械システムの満たすべき力学的拘束を境界条件とする行列方程式を解くことで同定する手法であり、運動と振動とが連成する複雑な力学系であってもその動特性を良くモデル化しうる手法として確立されている。この手法では剛体-ばね系として常微分方程式の形でモデルを得られるため「運動と振動の制御」へ適用することが極めて容易であり、既にその実績も多い。しかし、このモデル化手法は不確かさを明示するものではないため、得られるモデルをそのまま用いて設計された制御器のロバスト性は必ずしも保証されていなかった。

申請者はこれらの先行研究を踏まえ、不確かさを含む柔軟な機械系の運動と振動の制御のための制御器設計手法として、 H^∞ 制御と低次元化物理モデルとを統合的に組み合わせた制御器設計手法を提案している。その際、単にそれら二つの方法を組み合わせるのではなく、低次元化物理モデル手法を

用いて制御対象の動力的なモデルと最も大きな変動を示すモデルとを同定し、両者の差を最大不確かさとみなして不確かさの見積もりを行ない、これを一般化プラントへ定式化する。それに合わせて、運動と振動の制御に際して要求されるさまざまな制御課題（運動制御における定常特性、振動制御における外乱に対する応答抑制、制御器のロバスト性など）を統合的に定式化し、これに H^∞ 制御理論を適用することで実際上問題となる幅広い制御ニーズに対応可能な制御器を得られるようにすることを目標としている。こうすることで示された手法は幅広い汎用性を示すものと期待される。

申請者は以上のアイデアに則り、制御系設計の具体的な手続きを示し、その有効性を実証すべく2通りの実験用柔軟機械システム、すなわち柔軟2リンクロボットアーム実験装置と移動エレベータ式搬送システム実験装置とを対象として実際に制御器設計を行い、得られた制御器の制御特性をコンピュータシミュレーションと実験により検討した。その結果、得られた制御器は、ロボットアームにおける関節角の変化や把持質量の変化、あるいは搬送システムにおけるエレベータ位置の変化や搭載質量の変化などに対して安定したロバスト性を示す一方、ロボットあるいは搬送装置として必要な運動制御・振動制御性能を兼ね備えていることが確認された。これらの結果により、提案された制御器設計手法が汎用性を有するロバスト制御器設計手法としての有用性を備えていることが示されている。

本論文は緒言と結言を含め7章で構成されている。

第1章では、本論文の背景、関連研究、論文テーマとこれに関する基本概念の説明、本研究の目的、論文の構成などが述べられている。

第2章では、低次元化物理モデル（作成）手法の概要が述べられている。はじめに低次元化物理モデル概念について説明し、その未知パラメータを決定するためのさまざまな拘束条件とそれらの定式化、得られた式を用いての未知パラメータの決定、および得られた質量行列の反復法による誤差の低減方法などについて述べている

第3章では、 H^∞ 制御理論を用いた制御器設計手法について言及している。はじめに力学的な運動方程式の、制御で用いる状態方程式への定式化について説明し、次いで H^∞ 制御理論の基本概念についてその概略を説明し、代表的な H^∞ 制御問題（感度低減問題、ロバスト安定化問題）についてあわせて説明している。さらに、制御対象に含まれる不確かさの表現（構造的な不確かさ、非構造的な不確かさ）と、それらに対応したロバスト安定化のための定式化について解説している。最後に解すなわち制御器を得るための解法について述べている。

第4章では、第2章・第3章の内容を踏まえ、モデリングを統合した制御器設計手法を提案している。はじめに提案する手法の概要を示し、これに従って2つのモデル（最も不確かさの少ない『ノミナルモデル』と、最大の変動を示す『変動モデル』）を同定する。その際のモデル質点の配置についてもその指針を示している。両モデルの差を最大不確かさとして定式化し、合わせて運動制御のための近似積分器、外乱に対する振動応答抑制のためのローパスフィルタ、高次モード振動による不安定化回避のためのハイパスフィルタ、アクチュエータの動特性をモデル化した伝達関数などの一般化プラントへの組み込みなどについても解説している。それらフィルタの調整と、リッカチ方程式による解計算とを反復することで制御器を得ることも説明している。

第5章では、前章で示された手法の有効性を実証するため、2リンク柔軟ロボットアーム実験装置に提案した手法を適用している。実験装置と実験条件について概要を説明し、低次元化物理モデル手法によるモデル化と不確かさの見積もりを行い、これらの結果と各種フィルタの設計を行い、それらを一般化プラントに統合的に定式化する手続きを示している。得られた制御器はまずシミュレーション、次いで制御実験により性能を評価されており、提案した制御器設計手法で得られた制御器が好ましい制御特性と高いロバスト性を兼ね備えていることが明示されており、提案手法の有効性が評価できる。

第6章では、直線（並進）運動する移動エレベータ式搬送システム実験装置に対して提案する制御器設計手法を適用している。第5章同様、実験装置と実験条件について概要を説明し、低次元化物理モデル手法によるモデル化と不確かさの見積もりを行い、これらの結果と各種フィルタの設計を行い、それらを一般化プラントに統合的に定式化する手続きを示している。得られた制御器はシミュレーションにより性能を評価されており、第5章同様に得られた制御器が好ましい制御特性と高いロバスト性を兼ね備えていることが明示されており、提案手法の有効性が確認できる。

第7章は結言である。

機械システムの軽量化・柔軟化は今後ますます進展し、「柔軟機械システムに対する運動と振動の制御」に対するニーズも今後ますます増大していくと予想される。それにかかる制御器設計手法は、これまでは制御工学からの理論的なアプローチと、機械工学からの力学的なアプローチが別個に進められてきたが、本研究のように両者を俯瞰してその長所を組み合わせる統合的な設計手法とするシステム的なアプローチは、個々の学問分野単独では解決し得ない問題に対する有力な方法である。そのようなアプローチに則って示された統合的な制御系設計手法が有望であることを実証した本研究の意義は大きく、新しい可能性を拓いたものとして高く評価される。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成27年2月19日