

# 論文の内容の要旨

氏名：中 川 清 春

博士の専攻分野の名称：博士（機械工学）

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

## 1 まえがき

近年、機械の省エネルギー化、効率化が重要な課題となっている。機械の効率を上げる方法として、機械を軽量化し、機械を稼働させるエネルギーを低減させることが有効である。しかしながら、機械を軽量化するために、構造を薄くしていくと、剛性は低下し、機械が柔軟性を有するようになる。柔軟な機械系の問題点として、振動の発生があげられる。機械に発生する振動は、安全性の問題のみならず、機械の作業効率の低下の要因となる。そのため、柔軟機械系には運動の制御のみならず、振動の制御が必要となる。前述のような、物理的な変化が発生する機械システムは、ペイロードを搬送する柔軟な機械系が該当する。例としては、長腕のロボットアームや昇降・走行搬送装置などである。

柔軟な機械系の運動と振動の制御を行う場合は、運動と振動双方を考慮した制御設計用の動力学的モデルを作成し、このモデルを基に制御器を導出することとなる。柔軟な機械系の制御は剛体機械系の制御と比較して困難である。

一般に機械制御においては、実機のダイナミクスとモデル化されたダイナミクス間の誤差が避けられない。そのため、制御器設計においては、そのような誤差の存在があっても制御器が安定を保つ、いわゆる、「ロバスト性」が必須とされている。そのような設計を行うためには、誤差自体の特性がある程度把握できている必要がある。剛体機械系、あるいは単純な振動系であれば、その把握は必ずしも困難ではないが、運動と振動を同時に制御する必要がある柔軟な機械系では、運動、振動それぞれの誤差のみならず両者の連成も変動するため、その把握は容易ではない。これが柔軟な機械系の制御が困難となる理由である。

この問題に対しては、これまで主として制御系設計のほうから対策が試みられてきた。パラメータ変化を何らかの関数の形で考慮する手法、パラメータの変化を確率的に考慮する手法、有界なパラメータ変化のみ考慮する手法などである。これらの手法のうち、本研究で想定する柔軟機械系の制御に最も適しているのが、3番目の手法である。なぜなら、機械系におけるモデル変動は、確定的かつ有界でありながら、前述のように、何らかの関数として表されるほど単純ではないからである。しかしながら、この制御系設計手法においては、誤差の定式化についての一般的、抽象的な定義は存在するが、様々な変動、誤差を含む柔軟機械系に対し、どのようにモデル化するべきかという点が必ずしも十分に検討されていなかった。言い換えれば、正確な動特性を同定しようとするこれまでのモデリング研究と、誤差を含む対象を制御しようとする制御設計手法との間に一種のミスマッチがある。それを考慮した制御器を設計することができれば、高い制御効果を発揮することが期待される。

本研究の目的は、有界なパラメータ変動が存在する柔軟機械系を対象に、モデリングを含めた制御器導出のスキームを提示することである。

本スキームの流れの概要は以下のとおりである。

1. 柔軟な機械系を解析し、制御対象のパラメータ変化について標準状態と最大変動状態を選定する。
2. 選定した2つの状態について振動特性を正確に表現可能な低次元化物理モデル作成法にてモデリングする。
3. 作成した変動の前後、2つのモデルを用いて、その差を有界な変動と見積もる。
4. その見積もられた変動量を組み込んだ制御系を構築し、 $H_\infty$ 制御理論を用いて運動と振動の制御器を導出する。

上記スキームは、柔軟機械系の誤差、変動を一括して考慮でき、単一の制御器で様々な変動状態を制御可能である。有界なパラメータ変化のみ考慮する手法について、一般的な制御器導出のスキームを提案するものである。

本研究では、提案手法を3次元2リンク柔軟ロボットアーム及び柔軟昇降・走行搬送装置に適用し、その有効性を検証している。

## 2 研究の内容

第2章では、本論文で使用する低次元化物理モデルについて述べる。本論文では、背戸らが提案した低次元化物理モデルを用いる。本研究では、この物理モデルを運動を表現するモデルと振動を表現するモデルとで個々に作成し、それを結合することで運動と振動を同時に表現する物理モデルを作成する。そこで、この章では振動を表す物理モデル作成方法として用いる低次元化物理モデル作成法について説明する。その後、運動と振動を同時に表現する物理モデルについて説明する。

第3章では、制御系設計手法について述べる。本研究では、 $H_{\infty}$ 制御を用いることで、制御対象に物理的な変動が生じた場合においても、安定した制御を実現している。 $H_{\infty}$ 制御に外乱として、制御対象構造物の物理的変動のパラメータ変動量を組み込むことで、構造的な変動量（構造的誤差）を考慮した制御器を導出している。さらに、ロボットアームや、搬送装置は、その運用の特性上、外部から外乱が加わることが想定される。そのような場合においても、制御性能が大幅に劣化することを防止するために、外乱抑圧も考慮した制御器を導出し、制御の安定性を高めている。

第4章では、有界なパラメータ変動が発生する柔軟機械系に対する、変動を考慮したロボスタサーボ制御器の導出方法について、モデリングから制御器の導出方法までを統合的に述べる。まず、物理的変動のある制御対象構造物に対して、モデリングすべき状態の選定方法を述べる。次に第2章で述べた低次元化物理モデルにモデル化するとき、制御を効率的に行う留意点、手法について説明する。そして、作成したモデルを使用し、制御器に物理的変動量を構造的誤差として、組込む手法を示す。さらに、機械系の基本性能である目標値追従性能を満たすための、積分特性のある、ローパスフィルタを導入し、振動の制御と同時に運動の制御の目的も満たす手法について述べる。一般的な、柔軟機械系に対して、モデリング、物理的変動の考慮、サーボ制御性能の考慮を統合した一般手法の提案をここで行うものである。

第5章では、第4章で提案した手法を3次元2リンク柔軟ロボットアームに適用し、その有効性を検証する。柔軟ロボットアームは、軸が回転する動きが主であり、回転の動力をもつ制御対象の一般的な例として選定した。柔軟ロボットアームは、関節角が変動することで、その姿勢が変動し、それに伴い振動特性が変動する。特に3次元的な動きをする柔軟ロボットアームは、振動特性に曲げ振動及びねじれ振動が混在し、その振動特性の変化は一様ではない。そのため、関節角可動範囲内という有界な条件の中ではあるものの、非常に複雑な振動特性の変動が発生し、その特性の変動を関節角の関数などで表現することは困難である。そのため、3次元柔軟ロボットアームのような、姿勢の変動する機械系に対しては、想定されるどの姿勢に対しても、安定した運動と振動の制御を可能とする制御器が求められる。そのような、制御対象に対して本提案手法を適用し、モデリング及び制御器導出方法を具体的に示し、導出した制御器の有効性をシミュレーションと制御実験で検証する。

第6章では、柔軟な昇降・走行搬送装置に本研究の提案手法を適用し、その有効性を検証する。第5章のロボットアームが回転運動であったのに対し、柔軟な昇降・走行搬送装置は、並進的な動きをする制御対象の一般的な例として選定した。昇降・走行搬送装置はその運用の特性上、ペイロードの質量や、ペイロード搭載昇降エレベータの位置が変動する。その変動に伴い振動特性も変動する。さらに、一般的にペイロードは、特定のものではないことが多い。また、ペイロードの搭載の仕方も搭載ペイロードの形状によりまちまちである。よって、このような機械系の場合、ペイロードの質量及びペイロード搭載時の昇降エレベータの重心位置が一定ではない。そのため、柔軟な昇降・走行搬送装置は、その装置の運用上想定されたスペックの範囲内という有界な変動の中ではあるものの、その変動は、不確定要素が複数存在し、その状態を正確に予想することは困難である。そのため、このような装置の運動と振動の制御を安定して行うためには、その変動に対処できる制御器であることが必要である。そのような、制御対象に対して本提案手法を適用し、導出した制御器の有効性をシミュレーションで検証する。

第7章では、研究成果をまとめ、今後の課題を述べる。

## 3 研究の成果

1. 一般的な柔軟機械系の運動と振動の制御に対して、ロボスタサーボ制御器導出のスキームを実証した。これを利用することで、「有界なパラメータ変動がある柔軟機械系」に対する、誤差の見積もり手法、モデリングを含めた制御器導出のスキームが示された。
2. 3次元2リンク柔軟ロボットアームと柔軟昇降・走行搬送装置へ本手法を適用し、検証を行い、本提案手法が有効であることを確認した。

#### 4 今後の展望

本研究では、有界な範囲のパラメータ変動において、標準状態と最大変動状態を選定し、それを見積もるべき変動としてモデリングし、制御器を導出している。現状において、その中間の状態については、良好な制御が期待できるものの、その検証には、別途対象の状態をモデル化し、シミュレーションを実施するか、実験的に確認する必要がある。そのため、その確認を容易に行う手法が確立されれば、本手法を使用する場合の利便性が向上する。そこで、安芸や田島らが提案している、拡張低次元化物理モデルなどをモデリング手法に採用し、より運動と振動を正確に表すことが可能な物理モデルを用いて、変動の中間状態について、容易にシミュレーションで制御効果を確認できるようにし、本手法の利便性を向上させることが課題である。