

学 位 論 文 題 名

ロバストモデルマッチングによる柔軟構造物の
位置・姿勢制御系設計に関する研究

学位論文内容の要旨

最近、ロボットマニピュレータや宇宙機などの分野で、制御系を構成する際に無視できない柔軟性を持つ機器が現れている。本研究では、このような柔軟構造物の位置・姿勢制御（並進運動と回転運動を制御することに相当）を精度良く高速に行うための制御系設計法の提案を行った。

柔軟構造物の制御の難しさはその低剛性に起因する弾性振動が生じることにある。柔軟構造物の位置決めや姿勢を変えるなどの制御をする場合、弾性振動を抑制しつつその動作を完了する必要がある。柔軟構造物の制御の研究は特に航空宇宙の分野などで盛んであるが、このような研究がされる背景として、宇宙構造物が打ち上げコスト軽減などの理由で非常に軽量化され、そのうえ大型化する傾向にあり、その剛性を高めることが困難であること、その一方でこれらの制御に対してこれまで以上の制御性能が求められていることなどがあげられる。

このような柔軟構造物の制御に対する要求に応えるために、これまで培われてきた現代制御の成果を活かそうと考えるのは当然であろう。柔軟構造系は非線形偏微分方程式で記述される分布系であるため、現代制御理論を適用するためには線形化だけでなく集中化が不可欠である。柔軟構造物の解析に関して、モード解析や有限要素法などの手法が発達し、柔軟系の持つ弾性振動を適当なバネ系に置き換えることで、柔軟構造物のモデルを集中系として表現する手法が確立してくると、現代制御理論の特に最適レギュレータの応用に関する研究が盛んとなった。バネ系によって表現される柔軟構造系の制御設計用の線型モデルは簡潔で理解しやすく、柔軟系の挙動をよく表し、その妥当性が認められてはいるが、実際の制御系ではモデル化されない誤差の影響で、柔軟構造系の弾性振動を要求どおりに抑えられないことがあり、時にはスピルオーバー現象を引き起こし系が不安定となる。モデル化誤差は制御対象の変動に強い制御を一般にロバスト制御と呼ぶが、柔軟構造系の制御では上のような理由からロバスト制御が実用上必要不可欠である。

柔軟構造系の線型制御モデルのモデル化誤差はパラメータ誤差と低次元化による誤差に大きく分けられる。周波数領域ではそれぞれ、パラメータ誤差は低周波域で、低次元化による誤差は高周波域で顕著であるが、最適レギュレータは高周波域のモデル化誤差に対しロバスト安定性の面で十分ではなかった。このため、LQG/LTR, Frequency-Shaped レギュレータなどの手法が低次元化による誤差の対策のために取り入れられている。また、モデル化誤差の性質に着目して、周波数領域での整形がおこなえる H_∞ 制御の適用も試みられている。特に、混合感度問題では感度とロバスト安定性が一つの評価関数で扱え、それらのトレードオフを周波数重みによって合理的に行うことができる。

一方、これらとは別のロバスト制御の考え方にロバストモデルマッチングがある。ロバストモデルマッチングは既存の制御系にロバスト補償器と呼ばれるフィードバック制御器を新たに付加することによって、制御対象のパラメータ変動に対する低感度特性を改善するロバスト制御設計

法である。ロバスト補償器の付加によって制御系の目標値応答は変化せず、低感度特性の調節が既存の制御系とは独立にロバスト補償器のみで行えるという特徴を持っている。

本研究では、モデルマッチング等の手法で希望の目標値応答特性が実現されている柔軟構造物の位置・姿勢制御系に、ロバスト補償器を付加することによってモデル化誤差に対する低感度性とロバスト安定性を考慮する問題について考察した。そして、次の二つの設計法の提案を行った。

一つは、線形モデルで表される柔軟構造物の制御系に一般的に適用できる手法である。一般の柔軟構造物は非最小位相系と呼ばれる、安定性の面で制御しにくい制御対象となり、これに対する従来のロバスト補償器の設計法では十分にロバスト安定性を考慮にいたった設計が難しかった。柔軟構造物の不安定化はその振動モードが原因であることがほとんどである。そこで制御対象の振動モードと制御系全体のモードの関係をうまく調節すれば、この問題を解決できると考え、ロバスト安定性を考慮できるロバスト補償器の設計法を考案した。この手法の設計例として柔軟人工衛星実験装置を用いたシミュレーションを行い、これよりモデル化誤差に対する十分なロバスト安定性と優れた低感度性が確認できた。ここで導入した手法は H_∞ 制御のようにあるクラスの全ての変動に対するロバスト安定化を保証するものではないが、典型的な変動を考慮することによって、本手法によってもロバスト安定性の高い系の設計が可能であると考えられる。

二つ目の方法は、柔軟構造系の力学的な安定条件を満足すると言われている collocated feedback 制御とロバストモデルマッチングを両立させる手法である。この手法によって collocated feedback の制振効果を保持したまま、トルク外乱、モデル誤差等に対するロバスト性を向上できると期待できる。

ロバスト制御では柔軟構造系の不確かさを非構造的なものとして取り扱うが、柔軟構造系の力学的な構造を積極的に利用する DVFB (Direct Velocity FeedBack) 制御や DVDFB (Direct Velocity and Displacement FeedBack) 制御等の collocated feedback 制御がある。Collocated feedback 制御はセンサとアクチュエータが同位置に配置される collocation と呼ばれる条件が成り立つ場合、力学系固有の安定条件を利用し柔軟構造系のロバスト安定性や制振性を保証する。Collocation 系は最小位相であることが知られており、その意味からも制御に都合のよい性質を持つ。Collocated feedback 制御の有効性は既に多くの研究で明らかであるが、そのみではトルク外乱、モデル誤差に対する低感度特性が十分に得られないことが指摘され、上述のロバスト制御と併用する LAC/HAC (Law Authority Control/ High Authority Control) の手法や最適レギュレータの逆問題の応用が研究されている。

ここでは、collocation 系が最小位相であることに着目し、最小位相系に適用可能なロバスト補償器の設計法、ゼロイング法を、collocated feedback 制御系に適用し、DVFB 制御によって達成される collocated feedback の制振効果を保持したまま、トルク外乱、モデル誤差等に対するロバスト性を向上させるためのロバスト補償器の設計条件を示した。さらに、片持ち柔軟アームの位置制御系を構成し、実験により本手法の効果を確認した。本手法によって得られる制御系は、既存の collocated feedback 制御系にロバスト補償器を付加する構造であるので、現在実際に用いられている collocated feedback 制御系に本手法を適用することで、ロバスト性の向上が比較的容易に実現できる。

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

学 位 論 文 題 名

ロバストモデルマッチングによる柔軟構造物の 位置・姿勢制御系設計に関する研究

近年、ロボットマニピュレータや宇宙機などの分野で柔軟性を持つ機器の制御系構成法に関する研究が盛んである。しかし、これまで提案された方法の多くは、最適制御を拡張するといった手法が多く、これらの方法では制御系の応答を望みのものに設計することが困難である。また、制御系の極配置が任意に設定できないために、外乱に対する応答特性において望みの性能が得られないことが多い。本論文は、ロバストモデルマッチングと呼ばれる制御系設計法を用いてこの問題の解決を図ったものである。

柔軟構造物の位置決めや姿勢を変えるなどの制御をする場合、その柔軟性に起因する弾性振動を抑制しつつ、その動作を完了する必要がある。柔軟構造系の制御設計用の線形モデルは柔軟系の挙動をよく表すが、実際のモデルに含まれないモデル化誤差の影響で、柔軟構造系の弾性振動を抑えられないなどの制御性能の劣化が問題となる。制御対象の変動に強い制御を一般にロバスト制御と呼ぶが、柔軟構造系の制御ではロバスト制御が実用上必要不可欠である。

ロバストモデルマッチングは既存の制御系にロバスト補償器と呼ばれるフィードバック制御器を新たに付加し、制御対象の低感度特性を改善するロバスト制御設計法である。ロバスト補償器の付加によって制御系の目標値応答は変化せず、低感度特性の調節が既存の制御系とは独立にロバスト補償器のみで行えるという特徴がある。また、系の極配置が任意に設定できるという特徴も持つ。本論文では、このロバストモデルマッチングの特徴を活かし、一般的な柔軟構造物に対して適用できる設計手法と、柔軟構造物がある物理的な構造を有する場合に適用できる設計手法とを提案している。

まず一つ目の方法は、線形モデルで表される柔軟構造物の制御系に一般的に適用できる手法である。一般の柔軟構造物は非最小位相系と呼ばれる、安定性の面で制御しにくい制御対象となり、これに対する従来のロバスト補償器の設計法では十分にロバスト安定性を考慮にいたした設計が難しかった。柔軟構造物の不安定化はその振動モードが原因であることがほとんどである。そこで制御対象の振動モードと制御系全体のモードの関係を調節し、ロバスト安定性を考慮できるロバスト補償器の設計法を考案することで、この問題の解決を試みている。この手法の設計例として柔軟人工衛星実験装置を用いたシミュレーションを示し、これよりモデル化誤差に対する十分なロバスト安定性と優れた低感度性を確認している。

二つ目の方法は、柔軟構造系の力学的な安定条件を満足すると言われている collocated feedback 制御とロバストモデルマッチングを両立させる手法である。ロバスト制御では柔軟構造系の不確か

さを非構造的なものとして取り扱うが、柔軟構造系の力学的な構造を積極的に利用する collocated feedback 制御がある。Collocated feedback 制御はセンサとアクチュエータが同位置に配置される collocation と呼ばれる条件が成り立つ場合、力学系固有の安定条件を利用し柔軟構造系のロバスト安定性や制振性を保証する。ここでは、collocation 系が最小位相であることに着目し、最小位相系に適用可能なロバスト補償器の設計法、ゼロイング法を、collocated feedback 制御系に適用し、DVFB 制御によって達成される collocated feedback の制振効果を保持したまま、トルク外乱、モデル誤差等に対するロバスト性を向上させるためのロバスト補償器の設計条件を示している。さらに、片持ち柔軟アームの位置制御系を構成し、実験により本手法の効果を確認している。

これを要するに、著者は柔軟構造物の制御系設計にロバストモデルマッチングと呼ばれる手法を巧みに適用することによって、これまで得ることが難しかった制御特性の実現を可能にし、産業応用上有益な知見を得ており、制御工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。