



Title	Active Vibration Control Without Using Mathematical Model of Actual Controlled Object [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	米沢, 安成
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15358号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89519
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ansei_Yonezawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 米沢 安成

学 位 論 文 題 名

Active Vibration Control Without Using Mathematical Model of Actual Controlled Object (実制御対象の数値モデルを使用しないアクティブ振動制御)

振動は、機械構造物など様々なシステムに悪影響を与えると同時に、騒音の発生や快適性・安全性の低下、疲労破壊などを招く。そのため、これらの安全性や性能の向上のためには、振動低減技術が必要不可欠である。なかでも、アクティブ振動制御は、パッシブ振動制御よりも高い性能を発揮することができるため、こうした振動問題の有効かつ実用的な解決策になる。しかし、過度に複雑な制御器設計は、制御系の開発コストを増大させ、アクティブ振動制御の実用性を低下させる。アクティブ振動制御の利点を生かすためには、適切な制御則の策定が肝要である。

一般にアクティブ振動制御では、実制御対象の数値モデルに基づき制御系を構成するモデルベース制御が用いられる。当該手法は、モデルベース制御理論に基づき、高性能な制御系を体系的に得ることが可能であるという利点を有する。しかし、モデルベース制御に必要な不可欠である制御対象のモデル化は、設計者の負担や制御系開発コストの増大を招く。また、モデルを基に設計した制御系は、実システムとそのモデルの間に必ず存在するモデル化誤差や、制御対象の変更に対して脆弱である。

こうした課題の解決法として、制御対象の数値モデルを使用しない制御系設計体系（モデルフリー制御）が注目を集めており、様々な手法が提案されている。しかし、既存のモデルフリー制御系は、設計手順が極めて煩雑である、制御則の設定に体系的な方法が欠如しており設計者の経験や勘に依拠する、などの問題がある。こうした欠点は、モデルフリーである点に由来する利点を相殺する。そのため、既存のモデルフリー制御は実システムにおけるアクティブ振動制御への適用が困難であり、モデルベース制御に付随する上記課題を解決することはできない。

本研究は、簡便かつ実用的なモデルフリーアクティブ振動制御法を提案するものある。提案手法は、1 自由度系 (single-degree-of-freedom: SDOF) でモデル化されるアクチュエータを、対象となる構造物における制振点に設置することで簡便に実装することが可能であり、様々な構造物における振動問題の解決に貢献することができる。論文は以下に示す 6 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景を示している。アクティブ振動制御の有効性を述べ、モデルベース制御とモデルフリー制御の利点と課題を概説した。

第 2 章は、本研究の核となる、仮想構造物 (virtual controlled object: VCO) に基づくモデルフリー振動制御 (model-free active vibration control based on VCO: VCO-MFC) の基礎概念を提案している。VCO は SDOF で定義された構造物であり、設計者が定義する仮想的な制御対象である。まず、VCO と実制御対象の間の周波数伝達特性を解析し、VCO の設計条件を導出した。そして、アクチュエータ及び VCO の運動方程式から、モデルフリー制御器を設計するための状態方程式を構築した。VCO-MFC の設計例として、導出した状態方程式に対して混合 H_2/H_∞ 制御理論を適用し、モデルフリー制御器を設計した。さらに、設計した制御器の有効性を振動制御実験により検証した。また、VCO-MFC が制御対象の特性変動に対して高いロバスト性を有することが実験により確認された。

第3章は、VCO-MFCにおけるアクチュエータのパラメータの不確かさの補償手法を提案している。初めに、アクチュエータの剛性及び減衰に不確かさを含む場合を想定し、これらを定量的にモデル化した。続いて、線形 H_∞ 制御理論に基づくアクチュエータの不確かさを補償した VCO-MFC の設計手法を構築した。また、VCO-MFC におけるアクチュエータの不確かさを、スライディングモード制御理論に基づき補償する手法を提案した。提案する2つの手法の有効性を、シミュレーション及び実験により検証した。最後に、両手法について実用性の観点から考察した。

第4章は、VCO-MFCのための、制御器のオフラインチューニング手法を構築している。まず、VCO-MFC が有する、制御対象の変更に対するロバスト性に着目し、制御性能評価のための参照制御対象 (reference controlled object: RCO) を提案した。RCO は、実制御対象のモデルを代替させた、設計者が設定する構造物である。そして、最適化アルゴリズムの一種であり計算効率に優れる同時摂動確率近似 (simultaneous perturbation stochastic approximation: SPSA) 及び RCO に基づく、VCO-MFC のための制御器のオフラインチューニングアルゴリズムを提案した。提案手法を、VCO に基づき設計した線形2次最適レギュレータ (linear quadratic optimal regulator: LQR) のチューニング問題に適用し、有効性を確認した。

第5章は、VCO-MFC の制御性能を向上するべく、制御対象の特性に合わせて制御器をオンライン最適化する適応型 VCO-MFC を提案している。初めに、SPSA の計算効率及びノイズ耐性に着目し、観測出力及び SPSA に基づく制御器のオンラインチューニング機構を構成した。次に、当該機構を、VCO に基づく LQR と組み合わせることで、制御対象の振動応答 (観測出力) に応じて制御器を適応的にチューニングする VCO-MFC を構築した。シミュレーションによって、提案手法を、適応機構を持たない VCO に基づく LQR と比較し、その有効性を確認した。

第6章は結論である。本研究で得られた成果および知見をまとめ、今後の課題を述べた。

本研究の核となる VCO-MFC は、実制御対象の数理モデルを必要としない。一方、本手法は VCO の設計後に、従来のモデルベース制御理論をそのまま適用することで制御器を簡便に設計できるため、その設計手順は極めて簡便かつ体系的である。よって、提案する VCO-MFC は、モデルフリー制御及びモデルベース制御両方の優位性を併せ持つ。また、アクチュエータのパラメータの不確かさの補償手法や制御器の簡便なオフラインチューニングアルゴリズム、更には制御対象の特性への適応機構などによって、当該手法の有用性が向上されている。以上から、本研究は、様々な機械システムにおける振動問題に対する強力な解決策となりうる、簡便かつ実用的な新しい振動制御手法を提案するものであり、先行研究に対する新規性・独創性を有する。加えて、本研究は、モデルベース制御とモデルフリー制御の橋渡しとなる新たな制御の枠組みを探索するという観点からも、学術的意義を有する。