



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	自動車駆動系における非線形性と制御周期制約を考慮した振動制御手法に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	米沢, 平成
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14437号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81379
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Heisei_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 平成

学 位 論 文 題 名

自動車駆動系における非線形性と制御周期制約を考慮した振動制御手法に関する研究
(A Study on Vibration Control Considering Nonlinearity and Control Period Constraint in
Automotive Drive System)

自動車駆動系はエンジンからタイヤまでトルクを伝達するパワートレインであり、特にトルク急変時に発生するねじり振動が快適性を著しく劣化させる。この振動に対して、制御理論に基づきアクチュエータからパワーを付与することで低減を図るアクティブ制御は、今や必須の基盤技術である。これは車両重量の増加を伴わずに、高性能の振動低減を可能にするため、燃費改善を補助しつつ生産車に重要な付加価値を与えるものである。以上より、自動車駆動系の制御は近年盛んに研究されているが、性能向上を阻む2つの課題がある。1つは非線形特性を持つギヤのバックラッシュである。バックラッシュは機械系全般に渡る課題でもあるため、これに対処する様々な制御系が提案されているが、設計が煩雑でかつ計算負荷の大きいものが大半である。2つ目の課題は、アクチュエータとして用いるエンジンの制御周期制約である。エンジンが発生トルク値を更新する機械的メカニズムについて、その動作速度は遅い。よってデジタル制御器と同期したタイミング、つまり短く一定の周期で制御入力を更新できないという問題がある。しかし、先行研究の制御周期制約に対する補償は不十分であり、特に長い制御周期で実行される離散化の影響が陽に考慮されていない。また著者の知る限り、バックラッシュと制御周期制約を全て同時に補償する制御系は未だ存在しない。

以上より、本研究はバックラッシュによる影響を陽に補償しつつ、アクチュエータの制御周期制約も考慮した自動車駆動系のアクティブ振動制御系を提案する。本論文の目的は、提案手法の有効性を基礎実験装置によって示すことである。本研究の主な貢献は、より簡便かつ実装に適したバックラッシュの補償や、サンプル値制御器を用いた予測処理による制御周期制約の補償、およびこれらを組み合わせることで上記課題全てに対処した点にある。

本研究では、まず、制御対象として用いる基礎実験装置を開発した。これは自動車駆動系の基本構造を反映しつつも、バックラッシュによる影響に焦点を当てるために、実車を抽象化した機構を有する。具体的にこれは、本質的な特性に対する寄与が小さい要素を除外し、バックラッシュで発生するショック現象を評価するための並進駆動位置決めシステムである。次に、実験装置を物理機能モデルの手法に従いモデル化し、時変線形状態方程式を導出した。これは後に制御系設計に使用される。実験装置のアクチュエータはリニアモーターである。そのため、エンジンと等価な制御周期制約のみをデジタルシグナルプロセッサ内のプログラム処理によってモーターに付与する実験システムを構築した。このソフトウェアによる方針によって、実車をより一般化した本質的課題のみを抽出でき、条件設定から検証までを容易に行うことが可能となった。

次にバックラッシュの補償を検討した。これは簡便な制御モード切換えアルゴリズムであり、バックラッシュで駆動側と被駆動側が切断している不可制御状態へ対処する。具体的には、目標値の切換えと制御器に対するアンチwindアップを含む4つのモードを切り換えることで、偏差の蓄積回避と衝突時のショック低減を図る。これらは単一の線形モデルベース制御器に対して共通して適用さ

れる。よって、従来の適応制御やモデル予測制御と比較して、設計が容易でかつ計算負荷も軽く、実装に適した手法であると言える。本研究は最初に、積分器を含む線形モデルベース制御器を設計し、これを用いたバックラッシュ補償を実験で検証した。その結果、オーバーシュートを抑制した良好な改善効果を確認した。

さらに、制御周期制約が引き起こす課題の 1 つである離散化の影響に対処した。エンジンの制御周期は非常に長いため、この周期で制御器を実装する際に伴う離散近似誤差が特性を劣化させる。本研究はこの課題に対して、サンプル値制御理論を適用した。サンプル値制御は実装の際に離散化を伴わないため、サンプル点間応答が陽に考慮される。本研究はこの優位性に着目し、関連先行研究の中で初めて、自動車駆動系の制御入力更新間隔の延長にサンプル制御を応用した。またサーボ型サンプル値制御器を設計する際に、振動抑制と目標値追従を両立するための周波数重み関数を提案した。提案手法は実験装置に実装され、離散化を伴う従来のデジタル制御器と比較された。その結果、長い制御周期下においても、サンプル値制御器が高い制御性能を維持できる点を明らかにした。

最後に、制御周期制約による 2 つ目の課題である時変周期への対処を検討した。制御系を検討する前に、エンジンの制御周期制約を DSP のプログラムで等価的に再現した。これは、制御器からの指令に関わらず、強制的にモーターの推力更新周期を長くかつ時変動させるものである。次にシミュレーション結果から、時変制御周期が引き起こす悪影響は、実際に更新される制御入力の位相遅れである点を示した。これを補償するために、本研究はサンプル値制御器を用いた 1 ステップ先に対する予測処理を提案した。本手法は、制御器から得られた過去と未来の指令値に基づく制御入力の最近傍補間とも見なせる。また、予測シミュレーションに必要となる状態ベクトルは、物理機能モデルを活用した時変線形カルマンフィルタによって推定できることを示した。線形モデルベース制御器に対する制御モード切換えアルゴリズムはサンプル値制御器に応用した後に、予測処理にも含めることで、バックラッシュと制御周期制約を同時に補償した。最後に、提案した制御系を実験によって検証した。その結果、上記の課題全ての悪影響を抑制した良好な制御性能が確認された。

以上より、提案した制御系は先行研究に対する新規性および独創性を有しており、上記の課題に有用であることが示された。制御系の検証には一貫して、自動車駆動系をより一般化した基礎実験装置が使用された。機械システムの中には同様の課題、すなわち不感帯や、制御系とハードウェア間に生じる遅れを有するプラントも多数存在する。よって、本手法はエンジン・自動車駆動系に限らず、より幅広い別の機械系にも応用が期待される。本研究で得られた成果物は、制御理論の応用という観点から学術的意義を有するとともに、日本の基幹産業である自動車産業の発展に貢献し、燃費改善から環境問題の解決にもつながるものである。