



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A study of direct data-driven control and its application to automobile systems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	矢作, 修一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14737号
Issue Date	2021-12-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/83883
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shuichi_Yahagi_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 矢作 修一

学 位 論 文 題 名

A study of direct data-driven control and its application to automobile systems

(データ駆動制御と自動車システムへの応用に関する研究)

今日までに、古典制御や現代制御、ポスト現代制御といった制御理論が構築されてきた。現代制御やポスト現代制御は制御対象の数式モデルを用いた設計法であり、古典制御と比べると、より体系的に制御系が設計される。しかしながら、専門的な知識が必要なことや、実システムに対して精度の高いモデルを得ることの難しさから、産業システムへの適用にハードルがある。事実、産業界で使用されている 90% 以上のフィードバック制御器は、古典制御の枠組みで扱われる PID 制御やそれに基づいた制御器である。これは、直観的な理解のしやすさと実装の容易さに起因している。一方で、制御器パラメータを試行錯誤的に調整する必要があり、得られる制御性能は調整者の経験や熟練度に依存する。また、電子制御の急速な発展により制御器の数が増加し、制御器パラメータを調整する適合工数の増加も課題となっている。

このような背景から、制御対象モデルを用いずに直接的に制御系を設計するデータ駆動制御が注目されている。特に、Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) や Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) と呼ばれる手法は、PID 制御器等の構造が固定された制御器に対して、1 回の実験から取得した制御対象の入出力データを用いて、最適パラメータが得られることから、産業システム、特に自動車システムと親和性が高いといえる。一方で、線形システムを前提としていることや安定性が保証されていないことが理論面の課題であり、実用面では、自動車システムへの適用事例が少ないことが課題である。

本研究では、産業システム、特に自動車システムへの適用範囲を広げるため、理論面では、従来手法である VRFT/FRIT の拡張を行った。具体的には、閉ループ系の安定性保証や非線形システムへの対応が可能なデータ駆動制御の構築である。実用面では、自動車システムが有する課題に対して、データ駆動制御を用いた制御系を構築し、実機検証を行った。具体的には、経年変化の対応が求められる自動変速機のスリップ制御と非線形特性を有する空気圧クラッチアクチュエータの位置決め制御を題材とした。

安定性を考慮したデータ駆動制御の理論構築では、線形システムに対して BIBO 安定性を保証する手法を提案した。従来手法では、極情報が失われた評価関数を使用しているため、閉ループ系の安定性が保証されていないことが課題であった。これに対し、提案手法では、制御器パラメータの関数である擬似参照信号を入力とし、制御対象の応答を出力とした伝達関数を時間領域で推定することで、極情報を保存した評価関数を導出した。さらに、モデルマッチングを実現するために参照モデルの自動調整法を構築したことで、ノイズ除去以外では設計者が設定するパラメータがなくなり、多くのエンジニアが容易に使用可能になる。提案手法の効果をシミュレーションおよび実験により検証した。その結果、制御器および参照モデルのパラメータが自動調整されるとともに、BIBO 安定性を保証した制御器パラメータが得られることを確認した。

非線形システムへ対応したデータ駆動制御の理論構築では、スパース性を考慮したゲインスケ

ジュール PID 制御器の直接的設計法を提案した。ゲインスケジュール制御は、非線形システムに対して最も効果的な手法であることが知られており、PID 制御は産業界の 90% 以上のフィードバックシステムで使用されている。これより、制御器はゲインスケジュール PID 制御を用いた。PID 制御はゲインスケジュール制御に適した速度型 PID 制御器を用い、スケジューリング関数は多項式を用いた。さらに、過学習の抑制に加え、コントローラの計算コストおよび ROM 容量の削減を目指し、LASSO 回帰を導入することで、スパース性を考慮した。スパース性とは、特徴を表す情報が少ない成分が零になる性質である。提案手法を 2 種類のシステムに対してシミュレーション検証を行った。その結果、制御対象の特性を知ることなく、スパース性が高いゲインスケジュール制御器が得られることを確認した。

自動変速機のスリップ回転数制御へのデータ駆動制御の適用では、エンジンとクラッチの協調制御および制御器パラメータのオンライン自動調整法を構築した。協調制御に関して、従来手法では、制御入力をクラッチトルクとしていたが、変速中にトルク変動が発生するという問題があった。これに対し、提案手法では、クラッチトルクをドライバの操作量とし、スリップ制御を実現するための制御入力をエンジントルクとした。協調制御システムは、実装が容易な PID 制御器と外乱オブザーバで構成した。さらに、経年変化に対応するために、オンライン FRIT を導入した。提案法を実車試験により検証し、その結果、1 回の変速で制御パラメータがリアルタイムで最適化され、所望のスリップ回転数制御が実現された。これより、快適な変速フィーリングが実現され、ドライバの満足度を高めることができる。

空圧クラッチアクチュエータの位置制御へのデータ駆動制御の適用では、ゲインスケジュール制御パラメータの自動調整法を有する制御システムを構築した。まず、空圧クラッチアクチュエータシステムは、ON/OFF バルブ、空気圧システム、ばね特性等から構成され、強い非線形性を有することを示した。次に、ゲインスケジュール PD 制御やバルブの不感帯補償等から構成される制御システムを導出した。さらに、制御対象モデルを用いないゲインスケジューラパラメータの自動調整法を構築した。実車試験により、制御対象の入出力データから直接的にゲインスケジューラのパラメータを得ることができた。また、制御対象の状態により PD ゲインは適応しており、所望の制御性能が得られることを確認した。これより、非線形特性を有する空圧クラッチアクチュエータに対し、産業界で求められる計算負荷が小さく、適合負荷が少ない制御が実現できた。

本研究によって、自動車産業で求められるデータ駆動制御の理論構築およびデータ駆動制御の実践的な自動車システムへの適用が検討された。データ駆動制御の理論的発展では、閉ループ系の安定性保証やスパース性を考慮したゲインスケジュール制御に関する直接的設計法を提案した。産業界への貢献では、自動変速機のスリップ制御および空圧クラッチアクチュエータの位置決め制御に対して、開発効率の向上および製品性能の向上につながる結果を得た。以上より、本研究はデータ駆動制御の学術的発展および産業界への貢献に寄与したといえる。