

論文の内容の要旨

論文題目	ノンパラメトリック制御器に対する正則化最小二乗法を用いたデータ駆動制御
学位申請者	鈴木元哉

制御対象の数学モデルを活用せずに制御器を直接獲得可能な手法として、データ駆動制御と呼ばれるデータ駆動型のパラメータチューニング手法が提案されている。先行研究では、Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT), Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT), Virtual internal model tuning (VIMT)と呼ばれる手法が提案されている。これらの手法は制御対象を開ループ/閉ループ実験で稼働させ、オフライン取得した一組の入出力データ、または出力データと初期制御器を用いて制御器パラメータを調整する手法である。規範モデルと閉ループ伝達関数の応答を近づけるような制御器パラメータをオフライン最適化問題の解として得られるため、適切な数理最適化手法と組み合わせることで所望の制御応答を実現することができる。一方、これらの制御器更新法はあらかじめ制御器構造が既定された制御系に対するパラメータ調整法である。したがって、モデルマッチングを達成するような制御器構造でない場合には、適切な制御器を獲得できないことがある。制御対象の動特性の次数が未知であるケースでは、適切な次数の制御器を仮定することが困難であり、このような課題を解決するような手法を提案できればデータ駆動制御全般の学術的な貢献となる。

以上の背景のもと、本博士論文では一組の実験データを用いてモデルマッチングを達成するようなノンパラメトリック制御器の獲得法に関する研究をまとめる。ここで提案する方法では制御器の構造をFIRフィルタとして与え、その可調整パラメータをデータ駆動制御にて調整する。さらに、回帰分析に基づく正則化最小二乗法を適用することにより、ノイズや外乱等による過剰適合の影響を抑制する。本論文のアプローチではデータ駆動制御に回帰分析の考えを取り入れることにより、制御対象の次数情報が未知の状況下でも確実なモデルマッチングを達成できる。本論文では、5章で構成される。

1章では研究背景について述べ、データ駆動制御器調整手順と研究課題を述べる。2章ではデータ駆動制御および数値最適化に関する準備事項をまとめる。第3章ではFRITとLASSO回帰を用いたノンパラメトリック制御器更新法を述べ、有効性を実験例にて検証する。同じく、VRFTとLASSO回帰を用いたノンパラメトリック制御器更新法も述べ、有効性を実験例にて検証する。第4章では申請者によ

り提案された入力型VIMTを説明した後、その入力型VIMTに対し、Ridge回帰を用いたデータ駆動制御を提案し、有効性を数値シミュレーションにて検証する。最後に第5章に本博士論文のまとめを述べる。

主結果としての第3章ではLASSO回帰を用いたFRITを提案する。制御器のモデルをFIRフィルタの逆モデルとして与え、そのパラメータをFRITにて調整することにより、所望の目標値応答を達成可能な制御器更新を達成できる。ただし、可調整パラメータの次数が過大な値となるため、そのままFRITを適用すると過学習による汎化性低下が生じる。そこで、FRITの評価関数に対してLASSO回帰を適用することにより、本質的に意味のあるパラメータのみを獲得する。実験による検証にて、通常FRITにてモデルマッチング誤差を十分できない条件下で所望の制御応答を実現できることを確認する。また、これらと同様なことを、VRFTに対しても提案し、その有効性を検討している。

第4章ではプラントモデルをFIRフィルタで構成し、FIRフィルタでパラメータライズされた内部モデル制御を調整することでノンパラメトリックな制御器更新することを提案する。まず、申請者による提案手法である入力型VIMTを紹介する。この方法は入力データと初期制御器により適切な制御器パラメータを得る方法である。この更新法に対し本手法ではLASSO回帰ではなく、Ridge回帰を適用することによって簡単な行列計算のみで制御器獲得を実現することができる。実験による検証にて、モデルマッチング誤差を十分できない条件下で所望の制御応答を実現できることを確認している。

最後に、5章では本博士論文の結果についてまとめている。提案したFIR型制御器に対するデータ駆動制御の特に産業応用分野における貢献と今後の課題について述べる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 鈴木元哉

審査委員主査 金子 修

委員 田中 一男

委員 小木曾 公尚

委員 澤田 賢治

委員 定本 知徳

(*自筆署名の場合に限り、押印省略可)

制御対象の数学モデルを活用せずに制御器を直接チューニングする手法として、データ駆動型のパラメータチューニング手法が提案されている。これまで提案されている手法は制御対象を開ループ/閉ループ実験で稼働させ、オフライン取得した一組の入出力データ、または出力データと初期制御器を用いて制御器パラメータを調整する手法である。規範モデルと閉ループ伝達関数の応答を近づけるような制御器パラメータをオフライン最適化問題の解として得られるため、適切な数理最適化手法と組み合わせることで所望の制御応答を実現することができる。ただし、これらの制御器更新法はあらかじめ制御器の構造がIIR型の伝達関数として自由度の少ない形で既定された制御系に対するパラメータ調整法である。したがって、目標応答にマッチングを実現するような制御器構造でない場合では、適切な制御器を獲得できないことがある。また産業応用または実応用の観点から、ユーザが設定するパラメータが少ないことが望ましい。そして、実応用で頻繁にみられる制御対象の動特性の次数が未知であるケースでは、適切な次数の制御器を仮定することが困難であり、このような課題を解決するような手法が望まれる。

このような背景から、本博士論文では、おもに実応用を考える上で、可能な限り目標とする応答に追従する制御器を得るために、より自由度の大きなノンパラメトリックなFIR型の制御器に対するデータ駆動型のパラメータチューニングに関する研究をまとめる。ここで提案する方法ではFIRフィルタとして与えた制御器の可調整パラメータをデータ駆動制御にて調整する。さらに、回帰分析に基づく正則化最小二乗法を適用することにより、ノイズや外乱等による過剰適合の影響を抑制する。本論文のアプローチではデータ駆動制御に回帰分析の考えを取り入れることにより、制御対象の次数情報が未知の状況下でも確実なモデルマッチングを達成できる。本論文では、これらの点に取り組んだ成果をまとめたものである。

まず主結果の一つとしての第3章では、制御器のモデルをFIRフィルタの逆モデルとして与え、そのパラメータをFRITというデータ駆動制御器チューニング法を用いて調整することにより、所望の目標値応答を達成可能な自由度の高い制御器更新を達成することを検討している。ここで大きな問題としては、可調整パラメータの次数が過大な値となるため、そのままFRITを適用すると過学習による汎化性低下が生じる可能性がある。そこで、本博士論文では、FRITの評価関数に対してLASSO回帰を適用することにより、本質的に意味のあるパラメータのみを獲得する方法を提案している。実験による検証にて、通常FRITにてモデルマッチング誤差を十分できない条件下で所望の制御応答を実現できることを確認している。

主結果のもう一つとしての第4章ではプラントモデルをFIRフィルタで構成し、FIRフィルタでパラメタライズされた内部モデル制御を調整することでノンパラメトリックな制御器更新することを提案している。申請者による提案手法である、入力データと初期制御器により適切な制御器パラメータを得る入力型VIMTという方法を紹介し、この更新法に対しRidge回帰を適用することによって簡単な行列計算のみで制御器獲得を実現することができる。実験による検証にて、モデルマッチング誤差を十分できない条件下で所望の制御応答を実現できることを確認している。制御器のみでなくモデルを求められることにより、保守点検に際しても、対象の動特性変化を検出するユーザビリティの高い実用で臨まれる方法として提案している。

5章では本博士論文の結果についてまとめている。本博士論文では回帰分析に基づく正則化最小二乗法とデータ駆動制御を利用することにより、モデルマッチングを達成するような制御器構造が既定されていない状況下にて、一組の実験データから良好な制御器を獲得する手法を提案した。データ駆動制御と正則化最小二乗法を適用し、制御対象の次数情報を特定せずに制御応答を改善できることを確認した。さらに、プラントモデルをFIRフィルタで構成し、FIRフィルタでパラメタライズされた内部モデル制御をRidge回帰とデータ駆動制御の枠組みで調整することでノンパラメトリックな制御器更新を実現できることを示した。

以上より、本博士論文のデータ駆動制御の分野における貢献は、データ駆動制御全般の課題である確実なモデルマッチングを達成可能な手法・運用の提案である。提案手法により、制御対象の次数情報が未知の条件下においてデータ駆動制御の恩恵を享受することが可能となる。そして、システム同定の手順を要さずにこれまでのパラメトリックな制御器に対するデータ駆動制御で困難であったモデルマッチングの課題を克服できることから、本内容における知見やアプローチはデータ駆動制御の分野に対する貢献となる。したがって、当該分野における学術的な知見の提供に大きく貢献すると考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものとして判定した。