



2025年7月7日

兵庫県立大学

革新的な制御技術でさらなる安定性と性能を実現 一次世代コントローラー設計手法を提案

● 研究の概要

兵庫県立大学大学院工学研究科、コスタリカ大学の共同研究グループは、操業データから直接制御器を設計する革新的な方法を開発しました。本研究は、制御システムの設計において設計仕様を満たす制御方式を追求する中で、モデルベース手法とデータ駆動型手法を包括的に検討し、新たな非整数階比例・積分・微分 (Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative:FOPID) 制御器設計手法を提案するものです。FOPID は、従来の整数階 PID (Integer-Order Proportional-Integral-Derivative:IOPID) 制御では実現できなかった設計の柔軟性を提供しつつ、ロバスト安定性を確保する外乱抑制性能の最適化を目的としています。本研究では、この新手法の有効性をシミュレーションにより実証し、既存の手法に対する優位性を明らかにしました。この成果は、複雑なシステムやモデル化が困難な状況における制御システム設計において、重要な可能性を示しています。

● 研究の背景

制御システム設計は、設計目標を達成するために多くの手法が提案されてきました。これらは大きく、制御対象のモデルを使用して制御器を設計するモデルベース手法と、制御対象のモデルを使用せずに制御器を設計するデータ駆動型手法に分類されます。モデルベース手法はモデルから得られる重要な情報を活用することで高度な設計を可能にしますが、その一方でモデルの導出が最大の課題となっています。一方で、データ駆動型手法は入力・出力データから直接制御器を設計するため、モデルの特定が困難な場合に特に効果を発揮します。従来のデータ駆動型制御器設計手法は、主にサーボ性能の向上に焦点を当ててきましたが、実用的な制御システムにおいては外乱抑制性能の最適化も重要です。PID 制御器は、その単純な構造と制御アルゴリズムから、産業界をはじめとする多くの分野で広く採用されています。これらの背景を踏まえ、本研究では、PID 制御器の非整数階版である FOPID 制御器を用いたデータ駆動型設計手法を提案します。

● 研究の内容

本研究では、FOPID 制御器をデータ駆動型手法に基づいて設計する新しい方法を提案しました。従来の IOPID 制御器では実現できなかった非整数階微分および積分の設計自由度を

活用することで、制御器の性能を向上させています。本手法は、外乱抑制性能の最適化を目指し、ロバスト安定性を確保するために感度関数の最大値に対する安定余裕制約を導入しています。さらに、サーボ設計手法と比較し、それぞれの制御特性をシミュレーションによって検証しました。本手法では、単一の実験データセットから設計を実現できるため、従来の反復実験を必要とする手法と比較してコストや時間を大幅に削減できる利点があります。これにより、FOPID 制御器が従来の IOPID 制御器を凌駕する性能を持つことを具体的な数値例を通じて示しました。

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

従来の整数階制御則

(s はラプラス演算子。 s で割ると積分操作、 s をかけると微分操作)

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s^{\alpha_i}} + K_d s^{\alpha_d} \right) E(s)$$

本研究の非整数階制御則

(s の α^i 乗 ($0 \leq \alpha^i \leq 1$) が非整数階積分であり、 s の α^d 乗 ($0 \leq \alpha^d \leq 1$) が非整数階微分を表す)

● 研究の展望

今回の研究で提案された FOPID 制御器設計手法は、今後の制御システム設計の分野において多大な貢献を果たす可能性があります。特に、モデル化が困難なシステムや、複雑な制御要求を満たす必要がある産業用アプリケーションへの応用が期待されます。また、提案手法の実用性をさらに向上させるため、実機を用いた実験やさらなる設計パラメータの最適化を進める予定です。さらに、本手法を他の種類の制御器や多変数制御システムへ拡張する可能性についても検討し、制御技術全般への波及効果を目指していきます。

● 研究成果の発表

本研究の成果は、2025年6月20日に Fuji Technology Press 社の国際学術雑誌「Journal of Robotics and Mechatronics」にオンライン (open access) 掲載されました。

Volume 37, No. 3, pp. 688-699, DOI: 10.20965/jrm.2025.p0688

タイトル: Data-driven Design of Fractional Order PID Controllers: Optimization of Robust Servo-Regulator Performance

著者名: Kota Jinai, Yusuke Tsunoda, Natsuki Kawaguchi, Orlando Arrieta and Takao Sato

地内 洗太^{*1}, 角田 祐輔^{*1}, 川口 夏樹^{*1}, オーランド アリエッタ^{*2}, 佐藤 孝雄^{*1}

^{*1}兵庫県立大学大学院工学研究科

^{*2} コスタリカ大学

● 用語説明

- ※1 非整数階微積分：微分や積分を整数階から実数階（分数階と呼ぶ場合がある）へ拡張した計算方法を表したものを。
- ※2 フィードバック制御：操作を行った結果を確認することで動作を修正しながら操作する制御方法。
- ※3 モデルベース法：伝達特性を数式モデルで表し、その数式に基づいて設計する方法。
- ※4 データ駆動制御：伝達特性の数式モデルを利用せず、運動データから直接設計する方法。
- ※5 サーボ：外部から与えられる情報に追従することを目的とした設計。
- ※6 外乱抑制：外部からの影響を排除することを目的とした設計。一般にはサーボと外乱抑制は相反する設計目的となる。

【研究に関するお問い合わせ】

兵庫県立大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
佐藤 孝雄 教授
E-mail: tsato@eng.u-hyogo.ac.jp

【広報に関するお問い合わせ】

兵庫県立大学姫路工学キャンパス・総務課
南葉 忠彦（ナンバ タダヒコ）
TEL: 079-266-1661
E-mail: tadahiko_namba@ofc.u-hyogo.ac.jp