（様式第６号）

論　文　要　旨

2026 年　1 月　7 日

※報告番号	甲 第　396 号	氏　名	鶴原　理司

主論文題名

非持続的励起条件下における適応同定/制御系の忘却要素に基づく実用化

内容の要旨

本論文では，適応同定/制御系において信号に要求されるデータの質の緩和とその忘却要素に基づいた新しい適応制御系を提案し，制御対象の特性変化および外乱に対するロバスト性の改善を行うことで実用化の可能性について述べた．近年の制御系設計ではモデルベース制御，データ駆動型制御の二つに大別され研究が進められているが，お互いのメリット/デメリットを補完するためにそれらの融合についても研究が進められている．本研究ではこれら両手法において重要な条件となるデータの質に着目し，その効果的な活用法を中心とする性能の改善手法の提案と評価を行った．

データの質を評価する一つの重要な概念として持続的励起（以下，PE）条件が知られている．特に，適応同定/制御においてパラメータの真値収束性を保証するには，PE 条件やそれに準ずる条件が要求され，忘却要素を用いた場合のロバスト性にも大きく影響を及ぼすが，この条件を満足することは実用上大きな制約となる．本研究ではこの問題に対し，適切なデータの忘却方法を検討することでこれらの問題を解決した．前半は，データ駆動型制御および PE 条件を要求しない Directional forgetting（以下，DF）法に着目し，適応系を介することでデータ駆動型制御とモデルベース制御を融合させる新しい手法を提案した．後半では，PE 条件を必要とせずにパラメータの真値収束性を達成できる Concurrent learning（以下，CL）法に着目し，外乱や特性変化に対するロバスト性を改善するとともに，推定パラメータ収束の高速化のための検討を行った．

第 5 章では，制御器ゲインを一回の事前実験データから調整することのできる Fictitious Reference Iterative Tuning（以下，FRIT）に着目し，この調整をオンライン化した Adaptive FRIT（以下，A-FRIT）アルゴリズムに DF を組み合わせることで，非 PE 条件下においても推定ワインドアップを回避した制御が行えることを，水道水圧駆動人工筋の制御実験により示した．さらに，FRIT とモデル予測制御の融合手法（以下，FMPC）に対し，この A-FRIT アルゴリズムをデータ駆動型適応モデルマッチングとして活用することで，特にゲイン調整のための事前実験条件と制御時の条件が異なる場合においても高い制御性能を達成できるよう改善を行った．一般に，データ駆動型制御では制御性能が事前実験データに強く依存することが知られており，この緩和は実用化に向けた一つの成果である．

（次項に続く）

（様式第６号）

※印欄記入不要

論　文　要　旨

2026 年　1 月　7 日

※ 報告番号	第　　号	氏　名	鶴原　理司

内容の要旨

第 6 章では，CL 法の概要を述べた後，忘却要素を含むいくつかのアルゴリズムを組み合わせた手法を提案し，その安定性解析を行った．また，同定対象がパラメータジャンプを有するような時変系に対し，DF に基づく CL 法は効果的にパラメータの推定を行えることを数値シミュレーションにより示した．従来の CL 法は，特性変化が発生した場合に推定パラメータが真値収束はおろか，不安定化してしまうことが知られており，提案手法の有効性が主張できる．さらに，離散時間系で述べられた研究は非常に少ないため，実応用における進展も期待できる．

第 7 章では，CL 法の外乱に対するロバスト化と適応制御化について検討を行った．特に，複数の忘却要素と情報行列の正定性を維持する機能を検討することでロバスト化を実現し，安定性解析によりパラメータ誤差および追従誤差に対する大域的一様終局有界性が保証されることを示した．提案手法は一般に用いられる勾配法と異なり，非 PE 条件下においてこれを達成することができ，さらに，外乱の情報を設計には用いないこと，外乱が存在しない場合における大域的指数安定性が保証されること，などから従来のロバスト適応制御と比較しても実用上有効な手法である．

特に大きな成果として，第 8 章では，推定パラメータの収束速度を改善するために，CL 法の概念を活用した二層忘却逐次最小二乗法（以下，TLF-RLS）法を提案し，第 7 章と同様にそのロバスト化や適応制御化およびその安定性解析を行った．提案手法である TLF-RLS 法は，リグレッサ行列を生成する層と推定パラメータを更新する層の二層に分かれており，それぞれに忘却要素を導入することで，リグレッサベクトルに対する有限励起（以下，FE）条件を満たせば，推定パラメータ誤差の大域的指数安定性が保証される上，CL 法と比較して非常に高速な推定パラメータの真値収束を達成できる．加えて，提案手法に含まれる指数忘却係数の値を不安定化させることなく任意に設定することができるため，推定パラメータの収束速度を設計者が指定でき，従来の RLS 法と比べても高速なパラメータ収束性が達成された．さらに，ロバスト化を行った TLF-RLS 法に基づく間接法適応制御では，水道水圧駆動人工筋において，モデル化できない動特性が存在することを前提にしたうえで制御系設計を行い，正弦波/矩形波の両方において良好な制御性能が達成されることに加えて，忘却要素の効果によりシンプルなモデル構造のみで制御が可能となった．したがって，提案手法は非 PE 条件下において安定性を保証しつつ，シンプルなモデル構造のみで動作点変化や不確かさに対して高いロバスト性を持つため，実用的な制御手法である．