

## 論文内容の要旨

博士論文題目 Multi-input Multi-output Feedback Error Learning Control:  
Theory and Applications

(多入出力フィードバック誤差学習制御:理論と応用)

氏名 ALALI BASEL ABDRABALAMEER A.

(論文内容の要旨)

本論文は、ヒトの動作習熟のモデルとして川人らによって提案されたフィードバック誤差学習(Feedback Error Learning; FEL)の手法を制御工学の面から考察し、多入出力システムへの拡張と安定性の証明、閉ループ同定への応用、2リンクマニピュレータへの適用実験などを行ったものである。

FEL は制御対象の数理モデルを用いず、フィードフォワード制御器を学習によって調整し、優れたトラッキング特性を得るという手法であり、フィードバック誤差に基づいて学習が行われる点に著しい特徴がある。本論文ではまず、この手法を線形多入出力系に拡張する。そのためには相対次数の補償とパラメータ調整則を拡張する必要があるが、前者はインタラクタ多項式行列の逆行列を用いてプレフィルタを構成することによって達成し、後者はベクトル調整則を行列に拡張することで実現される。その有効性はシミュレーションによって検証された。

次に、上記の調整則をクロネッカ積で記述することにより、この手法の安定性を適応制御の分野でよく知られた正実条件に基づいて証明する。その際、信号の持続的励振(Persistent Excitation; PE)が満たされていれば調整パラメータも真値に収束するが、たとえPE性が満たされなくても出力誤差は0に整定されることが示される。つまり、参照信号によらずトラッキングの目的は達成できる。

さらに、出力誤差の収束が非常に早いことに注目し、この手法を周波数応答と結びつけて閉ループ同定法として提案する。制御対象のパラメータが閉ループ系から同定され、初めに粗く設計されたフィードバック制御器をより高性能のものに再設計することが可能となる。

最後に、2リンクマニピュレータによって提案手法の有効性を検証する。一筆書きで書ける簡単な文字を参照信号として指定し、これにマニピュレータをトラッキングさせる実験を行い、プレフィルタの存在によって角は丸くなるもののオンラインで機械が手書きに習熟することを確認した。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、ヒトの動作習熟のモデルであるフィードバック誤差学習 (Feedback Error Learning; FEL) の手法を制御工学の観点から考察することにより、理論と応用に関して幾つかの知見を与えたものである。その主な成果は次の 3 点に要約される。

1. 近年、複数の研究者によって FEL の制御工学的な研究がなされているが、多入出力システムに拡張したのは本論文が初めてである。現代制御のツールである行列演算や状態空間表現を活用することによって達成されている。これにより FEL の適用対象が格段に広がるとともに、一般的議論が見通しよく行えるようになった。また、この枠組みにおいて収束性も証明され、理論面からの有効性が実証された。
2. 持続的励振 (Persistently Excitation; PE) 条件がなくても出力誤差が 0 に整定されることから、これを周波数応答と結びつけて閉ループ同定の新たな手法を提案している。閉ループでの同定は、入出力信号が相関を持つことから極めて困難であると言われているが、本研究によって FEL が同定にも有用であることが示された。
3. 機械への適用実験を通じて、制御手法としての有効性を検証している。フィードフォワード制御器の切換によって、マニピュレータに複数の文字の一筆書きを教えることは、学習の例として説得力あるものである。2 リンクマニピュレータは 2 入力 2 出力系であり上記の手法の対象としてまさに相応しいが、線形システムを対象とした本理論を用いるにあたっては、その非線形特性が問題になる。本研究では局所的なハイゲインフィードバック等の実装上の工夫によりこの影響を低減し、検証実験に成功した。

以上のように、本論文は学習制御に関する理論と応用の両面から今後の工学に大きく貢献する研究である。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値があるものと認める。