

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14144 号
------	---------------

氏 名 佐々木 康雄

### 論 文 題 目

流れ場に対するフィードバック制御則の機械学習を用いた設計  
(Design of Feedback Control Laws for Flow Fields Using Machine Learning Techniques)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	原 進
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	長田 孝二
委員	南山大学	理工学部	教授	坂本 登
委員	名古屋大学	工学研究科	講師	椿野 大輔

## 論文審査の結果の要旨

佐々木康雄君提出の論文「流れ場に対するフィードバック制御則の機械学習を用いた設計」は、工学的に悪影響を及ぼす流れ場に対して、限られた入力作用で大きな制御効果を得るために、センサ情報に基づき入力量を定めるフィードバック制御器の設計法について考察している。特に、モデルに基づき設計された制御器において、実用化を阻む要因である計算コストの問題を機械学習を援用することで解決している。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、流れ場の制御におけるフィードバック制御の重要性を述べ、流体現象の厳密な数理モデルである Navier-Stokes 方程式に基づいた制御器設計法の利点と課題について説明している。その上で、当該論文の目的について言及し、全体構成を示している。

第2章では、提案するアプローチを適用する対象として、円柱周りの流れ場について述べている。特に、制御入力がどのように設定されているかという点や安定化を行う平衡流れ（平衡解）とその性質について説明している。

第3章では、提案する制御器設計法の基礎となるモデル予測制御について説明している。モデル予測制御の一般論から始め、第2章で定式化した円柱周り流れの制御問題にどのように適用されるかを述べている。そして、数値シミュレーションを行い、モデル予測制御によって流れ場の有効なフィードバック制御が可能であることを示している。同時に、計算時間の問題についても言及している。流れ場のスケールとモデル予測制御で必要となる計算時間の関係を定量的に評価し、モデル予測制御の直接的な実装困難性と本研究の必要性を明確にしている。

第4章では、計算時間の問題を解決するために、複数のモデル予測制御のシミュレーションデータから Gauss 過程回帰を用いて陽的なフィードバック制御器を再設計する手法を提案している。そして、提案する手法により、モデル予測制御とほぼ同等な性能を持ち、さらに計算時間も  $1/1000$  以下に抑えることができる制御器が得られることを示し、実用上有用な結果を得ている。また、設計で使用したデータとは異なる Reynolds 数の流れ場にも適用し、設計した制御器のロバスト性についても論じている。

第5章では、第4章で設計した制御器やそもそもモデル予測制御自体が、流れ場の全ての状態が観測できることを前提としていることを緩和するため、円柱表面の圧力値のみから流れ場を推定し、制御入力を決定する出力フィードバック制御器の設計手法について考察している。具体的には、アンサンブル Kalman フィルタとモデル予測制御を組み合わせた制御器を設計し、その有効性について述べている。また、第3章と同様に、アンサンブル Kalman フィルタでは現実的な計算時間でフィードバック制御に必要な推定が行えないことを示し、次の章の結果につなげている。

第6章では、第5章で問題であった推定の計算コストの問題を解決するために、固有直交分解と Gauss 過程回帰を用いて、現実的な計算時間で制御入力が計算可能な出力フィードバック制御器の設計法を提案している。得られた出力フィードバック制御器を用いた閉ループシミュレーションにより、制御器の制御性能と計算時間について議論を行っている。これにより、少なくとも Reynolds 数が  $100$  程度の流れ場に対しては、十分な制御性能を持ち、現実的な計算時間で実装可能な出力フィードバック制御器の設計可能性について、肯定的な知見を得ている。

第7章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では、少なくとも低 Reynolds 数の流れ場に対しては、制御理論に機械学習を援用してフィードバック制御器を設計するアプローチが有効であることを明らかにしている。これらの設計手法、並びに得られた結果は、流れ場のフィードバック制御を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である佐々木康雄君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。