

報告番号	甲 第 14144 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

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)

氏 名 佐々木 康雄

論 文 内 容 の 要 旨

航空機の最大揚力上昇や自動車の空気抵抗低減などの工学的な要求を満たすために、流れ場の状態をより望ましい状態へと遷移させる試みが長年なされてきた。近年、流体用デバイスや計算機の発展により、流れ場のフィードバック制御に注目が集まっている。フィードバック制御は、流れ場の安定性を変化させることで、流れ場を所望の状態へと遷移させることができると期待される。

フィードバック制御では、流れ場の状態をセンサで計測し、得られた計測量の情報からアクチュエータの駆動量（制御入力）を決定する。計測量から制御入力を決定する制御則が適切に設計されていなければ、上述の利点は望めない。したがって、流れ場に対するフィードバック制御則の設計は重要な課題であり、これまでさまざまな制御則の設計法が提案されてきた。

流れ場に対する有力な制御手法として、厳密なモデルに基づくモデル予測制御が知られている。このモデル予測制御では、流れ場のダイナミクスを記述する厳密なモデルである Navier-Stokes 方程式に基づく最適制御則が設計される。制御則が厳密なモデルに基づくこと、そして最適性を持つことからモデル予測制御には高い性能が期待される。実際、いくつかの数値実験においてモデル予測制御が高い制御性能を発揮し、チャンネル流れの摩擦抗力を大幅に削減できることなどが確認されている。

上記のように厳密なモデルに基づくモデル予測制御は高い性能を持つものの、現実の流れ場の制御系へと実装されたことはない。これは、厳密なモデル予測制御を現実のシステ

ムへ実装するために解決しなければならない二つの大きな課題があるためである。

一つ目の課題は、制御則のオンラインでの計算コストである。制御則をオンラインで実装するためには、サンプリング周期以内に制御入力を計算することが求められる。厳密なモデルに基づくモデル予測制御の制御則では、各時刻で制御入力を求めるために、Navier-Stokes 方程式を繰り返し数値積分する必要がある。このような Navier-Stokes 方程式の数値計算をサンプリング周期以内に終えることは困難である。

二つ目の課題は、流れ場の状態の取得である。流れ場の状態は各点での流体の速度を表す流速分布である。一般的に実験室外で流速分布を計測することは困難である。したがって、制御のために流れ場の状態を取得するためには、センサで計測される表面圧力のような部分的な物理量から流速分布を推定する必要がある。このとき、センサで得られる計測量にはノイズが含まれる。この計測ノイズは、流れ場のシステムと制御則からなる閉ループ系を乱す要因となる。このため、状態推定ではこの計測ノイズに対するロバスト性が求められる。

本論文では、厳密なモデルに基づくモデル予測制御を利用した制御則の設計法を提案する。この設計法では、機械学習や確率フィルタを用いることで、上記のモデル予測制御の二つの課題を解決する。設計される制御則はオンラインでの計算コストが低く、センサからの部分的な情報から制御入力を計算することができると期待される。

一つ目の、制御則のオンラインでの計算コストの課題は、機械学習を用いることで解決される。厳密なモデル予測制御は、オンラインで用いられるのではなく、オフラインでデータを習得するために用いられる。厳密なモデル予測制御が生成するデータから、機械学習手法を用いることで、状態と制御入力との関係を表す近似式を求める。この近似式を制御則として用いる。この近似制御則はオンラインで Navier-Stokes 方程式の数値計算を必要としないため、計算コストが低い。また、モデル予測制御の最適制御則を近似して得られるため、高い性能が期待できる。

二つ目の、流れ場の状態の取得に関する課題は、Navier-Stokes 方程式に基づく EnKF (Ensemble Kalman Filter)を用いることで解決される。EnKF は大規模システムに対して用いられる状態推定フィルタである。EnKF は Navier-Stokes 方程式に基づいて設計できるため、高い精度で流れ場の状態を推定できると期待される。また、EnKF は確率フィルタでもあるため、計測ノイズのモデルを状態推定に取り入れることができ、計測ノイズが状態推定にもたらす影響を抑えることができる。この EnKF と Navier-Stokes 方程式に基づく最適制御則を合成することで、計測量から制御入力を計算する出力フィードバック制御則を構成する。

本論文では、提案手法の有効性を検証するためのベンチマーク問題として、Reynolds 数 100 の円柱まわり流れの制御問題を扱う。Reynolds 数 100 の円柱まわり流れは、流れ場制御のベンチマーク問題によく用いられる。このため、ほかの手法で設計された制御則と比較しやすい。Reynolds 数 100 の円柱まわり流れの平衡点（定常解）は不安定であるが、こ

の不安定平衡点では円柱の抗力係数が低いことが知られている。このため、フィードバック制御によって流れ場の状態を平衡点に近付けられれば、円柱の抗力係数を減らすことができる。そこで、流れ場の状態を平衡点に近づけられるような制御則を設計する。制御入力とは円柱表面に設置された噴出口から出る噴流の加速度である。提案手法によって設計された制御則にしたがって噴流の加速度を操作することで、流れ場の状態を平衡点に近づけられることを数値実験で確認する。

本論文は全7章で構成される。第3章と第4章では全状態が計測できるという仮定のもとでの状態フィードバック制御問題が扱われ、第5章と第6章では部分的な物理量しか計測できないという仮定のもとでの出力フィードバック制御問題が扱われる。各章の概要を以下に記す。

第1章では、まず流れ場をフィードバック形式で制御することの利点とフィードバック制御則の設計法の重要性について述べる。そして、これまで提案されてきたフィードバック制御則の設計法について紹介する。これによって、これまで提案されてきた設計法における、厳密モデルに基づくモデル予測制御の位置付けが明らかになる。その後、厳密なモデル予測制御のオンラインでの計算コストと状態取得という二つの問題点と、それらを解決する提案手法の概要について説明する。

第2章では、まず円柱まわり流れの制御問題が設定する。非圧縮性 Newton 流体が想定される。このとき、流れ場の支配方程式は Navier-Stokes 方程式と静的な連続式となる。流れ場を制御するために、二つの噴出口から出る噴流を操作する。制御目標はわずかな噴流の操作によって流れ場の状態を平衡点に近づけることである。つぎに、Reynolds 数 100 の流れ場の平衡点が数値的に求められ、この平衡点が不安定であるが、平衡点における円柱の抗力係数は小さいことが確認される。この結果は、フィードバック制御によって流れ場の状態を平衡点に近づけることができれば、円柱の抗力係数を低減させられることを示唆している。

第3章では、流れ場の厳密なモデルに対してモデル予測制御が設計する。モデル予測制御では各時刻で評価関数が最小となるような最適制御入力決定される。そこで、まず評価関数を所望の制御目標が達成されるように設定する。つぎに、制御入力が評価関数を最小化するとき満たされるべき必要条件である随伴方程式を導出する。この随伴方程式は、最適制御入力を数値的に求めるために利用される。数値実験において、設計したモデル予測制御によって、わずかな制御量で Reynolds 数 100 の円柱まわり流れの流速分布を平衡点に近づけられることが確認される。また、同時に円柱の抗力係数が減少することも確認される。しかしながら、このモデル予測制御では制御入力の計算に各制御周期において 167 s もの時間がかかる。この計算時間では現実の制御系へと実装することは困難である。

第4章では、厳密なモデルに基づくモデル予測制御の計算コストを低減するための手法を提案する。提案手法では、厳密なモデル予測制御の入出力の時系列をオフラインの数値実験で取得する。そして、入出力の時系列に回帰手法を適用することで、モデル予測制御

の最適制御則を近似する。回帰手法には Gauss 過程回帰を使用する。Gauss 過程回帰はカーネル法の一つであるため、流速分布のような空間的に分布する独立変数を持つ回帰問題にも適用可能である。数値実験において、提案手法で得られた近似制御則が、ある初期値集合に対してモデル予測制御と同程度の性能を示すことを確認する。また、この近似制御則はモデル予測制御と比べてわずかな時間で制御入力を計算することができることも確認する。

第 5 章では、流れ場の厳密なモデルに基づく出力フィードバック制御則が提案する。この出力フィードバック制御則は第 3 章の最適制御則と EnKF を合成することで構成される。数値実験において、提案する出力フィードバック制御則が、ノイズが付加された円柱表面の圧力の情報のみから、流速分布を平衡点に近づけるような制御入力が計算されることを確認する。この出力フィードバック制御則もやはり制御入力の計算に長い時間がかかる。

第 6 章では、厳密な出力フィードバック制御則のオンラインでの計算コストを低減する手法を提案する。提案手法ではまず、厳密な出力フィードバック制御則に関する時系列をオフラインの数値実験で取得する。そして、得られた時系列から、閉ループ制御系の低次元な部分空間を特定し、制御則を低次元化する。この低次元な制御則は低次元モデルに基づいて導出される。一般的に低次元モデルには残差システムからの外乱が加わるが、この外乱によって状態推定が乱される場合がある。この問題点に対処するために、Gauss 過程回帰によって外乱モデルを生成し、この外乱モデルを組み込んだオブザーバを設計する。数値実験において、この外乱モデルを組み込んだ低次元制御則が、ある初期値集合に対して厳密な出力フィードバック制御則とほぼ同程度の性能を示すことを確認する。また、低次元制御則がわずかな時間で制御入力を計算できることも確認する。

第 7 章では、本論文の結論と今後の展望について述べる。Reynolds 数 100 の円柱まわり流れに対する制御の結果から、ほかの流れ場に対しても、制御則の作動域を限定すれば、厳密な制御則と同程度の性能を持つ計算コストの低い制御則が設計できる可能性が示唆される。本論文では低 Reynolds 流れを扱ったが、実応用では高 Reynolds 数の流れが重要である。高 Reynolds 数の流れ場に対する提案手法の適用には、データ取得のための計算コストや流体運動のマルチスケール性に対する対処が必須となる。