

論文の要旨

題目 射出成形機におけるデータベース駆動型スマート制御システムの設計
(Design of a Database-Driven Smart Control System for Injection Molding Machines)

氏名 豊田 大輔

射出成形機などの産業機械において、目標の製品品質を維持するために、豊富な経験と知識を持った熟練者が、製品精度や環境条件などの様々な要因を考慮して、機械装置の目標値や運転方法、運転条件を決定している。この熟練者に強く依存した従来の生産システムは、生産品質の不均一を招くだけでなく、将来起こりうる労働人口の減少に対応できない課題がある。また、近年では、データを活用したスマートシステムの研究が注目され、産業機械の制御分野においても研究開発が加速している。内閣府が我が国の目指すべき未来社会の姿として提唱された **Society 5.0** でも、フィジカル空間のセンサーから膨大な情報（データ）をサイバー空間で解析し、高付加価値な情報や機器への提示などの新たな価値としてフィードバックすることを実現していこうとしている。このような背景から機械操縦者の経験値に依存せず、製造環境に応じて最適な操業条件を導き出す産業機械のスマートシステム確立は急務の課題である。

射出成形機におけるデータを活用したスマートシステムを考えた場合、例えば下記のような様々なシステムが求められる。

- 1) 射出動作におけるモータのトルク制御値や回転速度の計測値などの動作データを基にした、制御パラメータの調整による制御性能を改善するシステム
- 2) これらの動作データを基にして機械装置の故障・劣化状態や外部運転条件を推定するシステム
- 3) 画像など出来上がった製品から得られるデータや動作データを基にした製品品質の良・不良を推定するシステム
- 4) 製品品質の推定結果を加味して射出押し出し速度などの目標値や多段速度制御などの運転方法を提案し、調整するシステム

上記システムを大きく分類すると、射出成形機の動作条件や故障状況を機械自体が判断できること、判断したシステムの状態に応じて適切な処置を実施することの二つの要素が必要となる。

運転データを活用して制御性能の調整を行う手法としてデータベース駆動型 (**Database-Driven**) **Proportional-Integral-Derivative (PID)** 制御がある。この **DD-PID** 制御は、産業機械で広く用いられている **PID** 制御のパラメータをオンライン調整する手法であり、非線形なシステムでも特性の変化に応じて制御性能を改善できる。しかし、**DD-PID** 制御法は制御周期中に大量のデータを探索してパラメータを調整するため、計算負荷の大きい。産業機械のモータ駆動システムでは高いサンプリング周波数を採用し計算可能時間が短いため、そのような制御方式は適用が難しい。

そこで、産業機械の複雑な一連の動作工程を繰り返すサイクル運転に着目し、工程全体でみれば制御周期谷ではシステムの特性が大きく変化しないと仮定する。制御周期とは異なる長い周期で **PID** パラメータを調整することで全体的な計算コストを削減できる。

また、DD-PID 制御でパラメータを調整することはシステムの特性変化をデータから掴んでいることを示している。工程毎の操業データ群を用いることで機械装置の非線形性システムの時変性を判定することも可能であると考えられる。データは DD-PID 制御のデータ構造を共有できる。多くの状態判別システムは制御とは独立しているため、異なるデータベースを構築する必要があるが、制御用と状態判別用で同一のデータベースを用いることができる。

本研究では、上記の要素を内包した射出成形機の高速度制御周期でも適用可能な機械の運転データを活用するスマートシステムを構築する。

まず、高速度制御周期システムに適用可能なデータベース駆動型アプローチに基づく PID パラメータの実用的なオンライン調整法を提案する。提案法では、複数回の制御周期に相当する遅い周期で PID パラメータの調整計算を行う。調整周期ごとにその区間で得られた計測結果の平均データを用いて調整計算を行うが、パラメータのオフライン学習もこの計測区間平均データを使用する。従来の DD-PID 制御のパラメータ学習では、疑似参照信号と参照モデルの出力を採用しており、制御周期の時系列データが必要となる。提案法では、モデル予測制御で用いられる目標値に対する出力値の追従誤差が指数関数的に減少する参照軌道を採用する。これにより、制御周期の時系列データがなくてもパラメータ調整周期の計測区間平均データで学習が行える。また、提案法では、クラスター分析法である k 平均法によって類似データを削除する。クラスターの中心データ数を指定することで、データ数を変動させることなくデータベースの更新が行える。数値例では Hammerstein モデルを対象に固定 PID 法と従来の DD-PID 制御との応答性、計算時間の比較を行い、有効性を示した。また、Hammerstein モデルを運転ごとにシステム特性が変化するように拡張し、サイズ一定のままデータベース更新が有効に機能していることを確認した。さらに、実機試験としてモータ駆動システムであるスライドクランク機構システムへ提案法を適用し、有効性を示した。

次に、制御対象の入出力値に直接係わらない観測可能な状態量を考慮し、上記提案法を拡張した PID パラメータオンライン調整法を提案する。提案手法では、システムの状態変化に係る状態量を操業データとしてデータベースの情報ベクトルに加えることで、より適当なデータが近傍データとして選択される。数値例、実機試験としてスライドクランク機構システムへ提案法を適用し、有効性を検証した。速度制御システムに対し、クランクの回転角度を観測可能な状態量として情報ベクトルに加えた。パラメータを変動させ、角度依存の振動を低減させていることを確認した。

最後に、DD-PID 制御の操業データを用いたシステムの運転状態判定法を提案する。ここで、判定するシステムの運転状態は、制御対象において制御入出力データに含まれない運転条件や環境条件、故障状況を指す。提案法では、DD-PID 制御の情報ベクトルに評価する運転状態値を加えることで、制御と状態判定のデータベースを共有することができる。また、提案法では一連の運転結果から運転状態を判定する。変化の小さい似通ったデータによる誤判定を防ぐため、類似データを判定用データから取り除く。さらに、運転状態の値は事前に入力したデータの範囲を超えないため、上下限付近において、誤差が大きくなりやすい。提案法では、データを無限範囲に変換するロジット変換によって上下限付近での精度向上を図る。数値例によって、スライドクランク機構システムの運転データから重り重量を推定し、提案法の有効性を検証した。機械学習法である回帰木の推定値と同程度の重量判定ができ、上下限では誤差がより小さくなることを確認した。

データベース駆動型 PID 制御手法をベースとして、制御性能の向上とシステムの診断による、新

たな価値をフィードバックする産業機械が実現可能であることが本研究により示唆された。基本的な手法の構築に注力したため、機械装置ごとの具体的な課題、情報に絞っておらず、このままの適用では十分な性能向上は見込めないと考えられる。より具体的な制御対象に絞り、特有の課題を抽出し、実際の産業機械へ実装可能な手法に発展する必要がある。産業機械への機能要求は年々高度なものとなっており、それを扱う機械操縦者にも様々な知識・経験が必要となる。データを活用したスマート制御システムは、この課題を解決するものであり、今後、需要が高まるとともに発展していくことが予想される。