

射出成形機のスマート制御システムにおけるシステム状態値判定

System State Determination in Smart Control System of Injection Molding Machines



博士(工学) 豊田 大輔
Dr. Daisuke Toyota

要 旨

近年、射出成形機を含む産業機械分野において、データを活用した高度な情報処理・管理能力を持ったシステム（スマートシステム）の開発が注目されている。本開発では、管理・分析を主体とした従来型のスマートシステムではなく、データから新たな価値を提供できるシステム（スマート制御システム）を目指している。射出成形機にスマート制御システムを適用することによって、機械操作者の経験値に依存せず、製造環境に応じて最適な成形条件を導き出すことができるようになる。このようなスマート制御システムを実現するにあたって、成形条件や故障状態を含む運転状態を機械自身が判断できることが必要となる。本開発では、制御対象の特性変化に影響する成形条件や故障状態を表すシステム状態値を制御データから判定する手法（提案法）を検討した。数値解析を用いてこの提案法の有効性を検証した結果、この提案法の利用によって、制御の結果データを蓄積したデータベースからシステムの動作状態を判定可能であることが判明した。

— Synopsis —

In recently, the development of smart systems using data has attracted attention in the industrial machinery including injection molding machine. This development aims at a smart control system that can provide new value from data, not conventional smart system for management and analysis. The smart control system of injection molding machine derives the optimum molding conditions according to the manufacturing environment without depending on the experience of the machine operator. In order to realize such a smart control system, it is necessary for the machine itself to be able to judge the operating conditions, including molding conditions and failure conditions. In this development, the method to determine system state value representing operating conditions and failure conditions that affect characteristics changes of controlled objects from control data is reported. According to the proposed method, system operation status can be determined using a database that stores control result data. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a numerical simulation.

1. 緒 言

射出成形機を含む産業機械では、予め設定した運転方法や動作目標値等の操業条件に従って、自動的に工程が制御される。機械作業者は製品品質を保つため、製造環境条件や機械装置の運転データ、製品品質等から経験と感覚によって操業条件の設定・修正を行う。このような

従来型の生産システムは機械作業者の熟練度に強く依存しているため、機械作業者の変更等によって、製品品質の不均一を招く恐れがある。一方、近年では、操業中の運転データを活用したスマートシステムの開発が産業機械で盛んに行われている⁽¹⁾。我が国が目指すべき未来社会の姿として内閣府が提唱した Society 5.0 でも、フィジカル空間のセンサから得た情報やデータをサイバー空

間で解析し、その結果を新たな価値としてフィジカル空間の人間にフィードバックすることを目指している。このような背景から、射出成形機においても機械作業者の熟練度に依存せず、製造環境に応じて最適な成形条件を導き出す射出成形機のスマートシステム確立が急務の課題となっている。

現在の射出成形機におけるスマートシステムは、管理・分析をベースとした取り組みが多く、成形条件の自動修正等、積極的な価値の提供まで組み込まれたものは実用化には至っていない。本開発では、製造環境に応じて機械が自身の状態を判断し、最適な操業条件を導出し、適応的に機械を制御するシステムをスマート制御システムと定義することとする。図1に射出成形機におけるスマート制御システムの概要を示す。射出成形機におけるスマート制御システムには多様な機能が求められる。例えば、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等の運転データを基にした制御パラメータ調整による制御性能を改善する機能、②運転データを基に機械装置の故障・劣化状態や外部の製造環境条件を推定する機能、③出来上がった製品の画像データや機械の運転データから製品品質の良否を推定する機能、④製品品質の良否から運転方法や成形条件を提案し、調整する機能等が挙げられる。このようにスマート制御システムの機能は、機械自体が自身の状態を判断できること、状態の判断結果に応じて適切な処置を実施することの2つの要素に大別することができる。本開発では、前者の要素への対応として、射出成形機のスマート制御システムに必要なシステム状態の判定手法を開発することを目的とした。ここで扱うシステム状態とは、制御対象において入出力データに含まれない、システムの特長変化に影響する成形条件や故障状態を意味する。また、これらのシステム状態を判定するための数値をシステム状態値と定義する。例えば、射出動作のモータ制御において、トルク指令は対象システムへの制御入力であり、回転速度は対象システムの出力である。溶融樹脂の樹脂温度は溶融樹脂の流動性という射出動作の特性に影響するシステム状態値である。本開発では、対象システムの入出力等の運転データからシステム状態を判定する手法を検討し、数値解析を用いてこの判定手法の有効性を検証した。

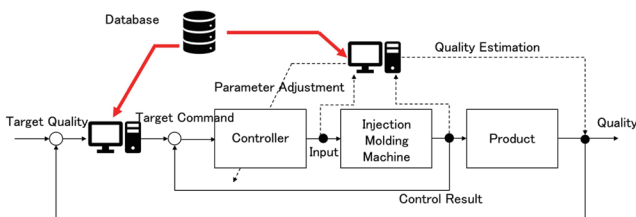


図1 射出成形機におけるスマート制御システム

2. システム状態値の判定手法 (提案法)

2.1 提案法の概要

図2に本開発で検討した提案法におけるシステム状態値の算出フローを示す。

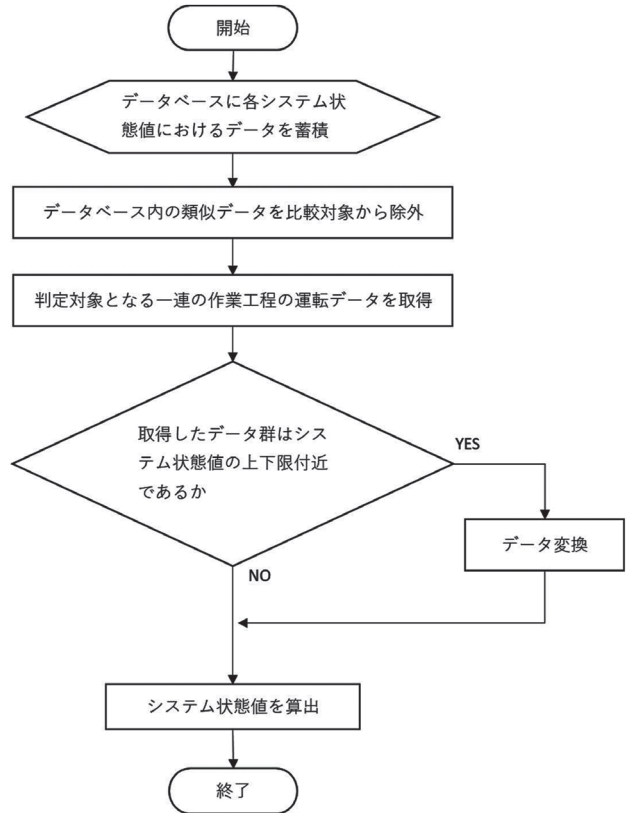


図2 提案法におけるシステム状態値の算出フロー

2.2 共通データの分離

運転データには判定に使用できない共通した類似データも含まれる。データ間の相違度を上げて判定精度を向上させるため、評価データベース内の類似データを比較対象から取り除く。システム状態値別に取得した各データセット $\phi_{a1}(i_1)$ に対し、異なるシステム状態値における各データセット $\phi_{a2}(i_2)$ との距離 d を式(1)から算出する。

$$d(\phi_{a1}(i_1), \phi_{a2}(i_2)) = \sum_{l=1}^{n_t+n_y+n_u+n_x} \left| \frac{\phi_{a1l}(i_1) - \phi_{a2l}(i_2)}{\max \phi_l - \min \phi_l} \right| \quad (1)$$

ここで、添え字 l は各ベクトルの l 番目の要素であり、 $\max \phi_l$ 、 $\min \phi_l$ はそれぞれ評価データベースの全てのデータセットの l 番目要素の最大値と最小値を示す。さらに、 i_1 、 i_2 はそれぞれデータベースの索引を示す。また、各データセット ϕ_{am} は式(2)のように定義される。

$$\phi_{am}(i_m) = [r(t), \dots, r(t - n_t), y(t), \dots, y(t - n_y), u(t), \dots, u(t - n_u), x(t), \dots, x(t - n_x)] \quad (2)$$

ここで、 $r(t)$ は時刻ステップ t における対象システムの目標値、 $y(t)$ は対象システムの出力、 $u(t)$ は制御入力、 $x(t)$ はシステム状態値とは異なる観測可能な対象システムの状態量（以下、観測状態量）、 n_t 、 n_y 、 n_u 、 n_x はそれぞれ目標、出力、入力、観測状態量の次数である。観測状態量は必ずしも必要ではないが、対象とするシステムによってはデータセット間の相違度が上がり、データによる局所モデル精度向上が期待でき⁽²⁾、⁽³⁾、システム状態の判定精度向上に寄与する。前節で例として紹介した射出動作のモータ制御では、樹脂圧力値等がこれに該当する。

距離 d がある一定の値 d_c よりも近いデータが評価データベース内の全てのシステム状態値のデータ群に存在する場合、これらのデータを比較対象から取り除く。また、計測された一連の作業工程の運転データ群（被判定対象データ群）に対しても、評価データベース内の比較対象から取り除かれた共通データに近いデータを判定処理の前に取り除く。

2.3 データ群の分類

計測された被判定対象データ群に対して、評価データベース内のシステム状態値別のデータ群ごとに分類を行う。本開発では、式(3)によって求まるデータ群同士の最近傍距離の積算値 S を用いて分類を行う。

$$S = \sum_{i_t=1}^{n_{\max}} \min(d(\phi_t(i_t), \phi(j))) \quad (3)$$

ここで、 n_{\max} は評価対象のデータ数、 j はシステムの運転状態別のデータ群における索引である。

積算値 S が一番小さいデータ群を該当のデータ群として分類する。

2.4 ロジット変換

ロジット変換の制約のため、式(4)よりシステム状態値を正規化する。

$$z'(i) = \frac{z(i) - z_{\min} + z_{\text{mm}}}{z_{\max} - z_{\min} + 2z_{\text{mm}}} \quad (4)$$

ここで、 z_{\min} はシステム状態値の最小値、 z_{\max} はシステム状態値の最大値である。 z_{mm} は観測できる最小の有効数値であり、 $z(i)$ に最小値か最大値が入力されてもゼロの対数やゼロ除算にならないよう、ロジット変換が数値処理できるようにしている。

正規化の逆変換は式(5)の通りである。

$$z = (z_{\max} - z_{\min} + 2z_{\text{mm}})z' + z_{\min} - z_{\text{mm}} \quad (5)$$

システム状態値に範囲制限があるため、上下限付近は判定されたシステム状態値が中央の値に寄りやすく、誤差が大きくなる。前項で上下限付近と分類された被判定対象データ群に対し、式(6)に示すロジット変換を行う。

$$z^{\text{logit}} = \ln \frac{z'(i)}{1 - z'(i)} \quad (6)$$

次節で記述するシステム状態値の算出後、得られた値に対して式(7)に示す逆ロジット変換を行い、現在のシステム状態値とする。

$$z_{\text{tave}} = \frac{\exp(z_{\text{tave}}^{\text{logit}})}{1 + \exp(z_{\text{tave}}^{\text{logit}})} \quad (7)$$

2.5 システム状態値の算出

一連の作業工程分の動作を行った運転結果に対し、評価データベースの全てのデータから式(1)より距離 d を求める。次に、距離 d が小さいものから k 個のデータセット集合を近傍データとして、時刻 t におけるシステム状態値を式(8)に基づいて算出する。

$$z_t(t) = \sum_{i=1}^k \omega_i z'(i) \quad (8)$$

ただし、重み係数 ω_i は式(9)を満たす。

$$\sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad (9)$$

一連の作業工程分の運転結果に対して得られた $z_t(t)$ の平均値 z_{tave} を現在のシステム状態値として扱う。

3. 数値解析を用いた提案法の有効性の検証

図3に数値解析において検証モデルとした、射出成形機の型開閉システムにおける各要素を模擬したスライドクランク機構システムを有するステージ移動装置を示す。

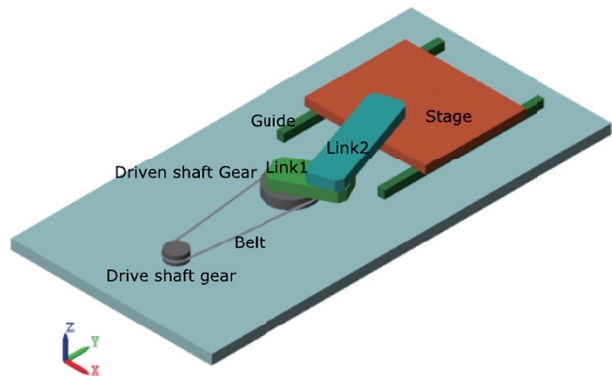


図3 検証解析における検証モデル
(スライドクランク機構システムを有するステージ移動装置)

このモデルは、Mathworks社のMATLAB、Simulink、Simscape Multibodyを用いて作成した。このモデルでは、ベルトを介してモータ駆動軸の回転を従動軸に伝えている。従動軸にはクランクが連結されており、従動軸の回転に伴ってクランクが回転することによって、ステージが前後へ移動する仕組みとなっている。ステージに載せる重りの質量を調整することによって、クランクおよび従動軸が回転する際の負荷が変化するため、モータ駆動トルクに変化が生じる。このモータ駆動トルクの変化などからステージ上の質量を推定できる。モータ駆動軸の回転角速度制御にはデータベース駆動型Proportional-Integral-Derivative制御(DD-PID制御)⁽⁴⁾を適用し、その制御結果(図4)を用いてステージ上の質量というシステム状態を提案法で判定する。ここで、モータ駆動軸の回転角速度を $y(t)$ 、目標回転角速度を $r(t)$ 、駆動トルクを $u(t)$ 、従動軸の絶対角度を $x(t)$ とする。

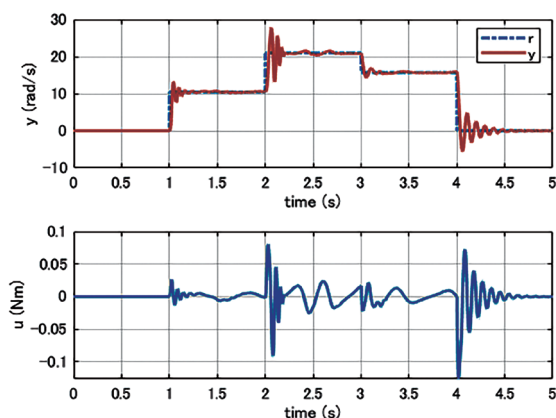


図4 DD-PID制御による制御結果

評価データベースには、ステージ上の重り質量 M_s を0 gから1000 gまで200 gごとに変更した場合の運転データ($r(t)$, $y(t)$, $u(t)$, $x(t)$)を格納する。表1に提案法の各種設計パラメータを示す。システムの運転状態値の有効数値 z_{mm} は、判定性能に影響を及ぼさない値を試行錯誤的に選定した。また、上下限付近の分類を $M_s = 0, 200, 800, 1000$ gのデータ群とした。

表1 提案法の各種設計パラメータ

Variable	Value	Description
d_c	0.01	Distance of common data
z_{min}	0	Minimum value
z_{max}	1000	Maximum value
z_{mm}	0.1	Significant digits
N	30006	Number of data
k	5	Number of neighbors

被判定対象データ側では、 $M_s = 0, 100, 200, 400, 500, 600, 800, 900, 1000$ gについてそれぞれシステム状態値を判定した。さらに、提案法との比較のため、機械学習手法である回帰木を使用したシステム状態値推定を行った。回帰木の推定には、Mathworks社のMATLABの拡張機能であるStatistics and Machine Learning Toolboxを用いて回帰モデルを作成した。回帰モデルの作成には提案法と同じ評価データベースを使用した。

図5に提案法によって判定したシステム状態値 M_{st1} 、および回帰木によって推定したシステム状態値 M_{st2} をそれぞれ示す。 M_{st1} は、真値 M_s と概ね一致する判定結果となった。一方、 M_{st2} は $M_s = 500$ g付近では M_s とよく一致したが、上下限付近では M_s との乖離が大きくなった。上下限付近では、 M_{st1} の方が M_{st2} よりも M_s との乖離が小さくなっていることから、提案法ではロジット変換による効果が得られていることが確認された。

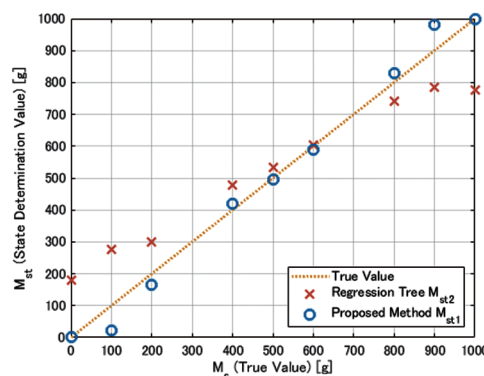


図5 システム状態値の判定結果

図6に提案法によって判定したシステム状態値 M_{st1} と真値 M_s との絶対誤差をそれぞれ示す。 $M_s = 100, 900$ gにおける絶対誤差は、他の M_s における絶対誤差に比べて、大きくなる傾向が見られた。これは、評価データベース内に $M_s = 100, 900$ gにおける運転データが存在しないため、 $M_s = 100, 900$ gにおける M_{st1} の算出の際に

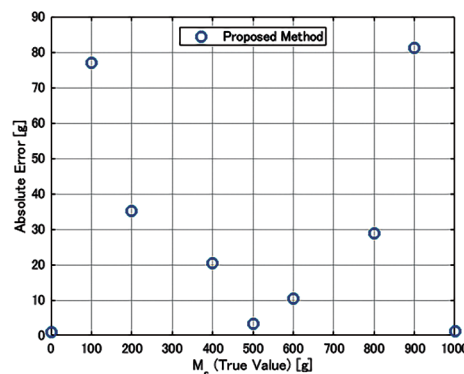


図6 絶対値差分結果

$M_s = 0$ 、1000 g の運転データの影響を強く受けていることに起因している。そのため、提案法によるシステム状態値の判定精度を向上させるためには、また評価データベースに格納する上下限付近の運転データを充足させることが必要である。

4. 結 言

本開発では、機械装置の運転データを用いて、システム状態を数値的に判定する方法を開発した。提案法は制御の結果データやデータベースをそのままシステム状態判定に用いることができる。また、システム状態値の定義範囲において上下限付近の精度を向上できる。

提案法により、射出成形機のスマート制御システムにおける判定機能を満たすことができた。また、運転データを基にした制御性能の改善機能⁽⁵⁾を含め、スマート制御システムの基本要素を構築することができた。今後、実際の機械装置における具体的な課題を抽出し、実用化への開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 花山和寛, 佐伯明彦, 高橋将行, 小末将吾: "J-Wise[®]-射出成形機のIoTソリューション-", 日本製鋼所技報, No.73 (2022), pp.73-80
- (2) S. Wakitani and T. Yamamoto: "Design and application of a sparse GMDH-PID controller", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 36 (2022) No. 6, pp.1353-1372
- (3) D. Toyota, K. Nakano, K. Ochi, T. Kinoshita, S. Wakitani, and T. Yamamoto: "Design of a Practical Database-Driven PID Control System Considering State Variable", Proceeding of the 13th Asian Control Conference, (2022), pp. 1282-1285
- (4) T. Yamamoto, K. Takao, and T. Yamada: "Design of a Data-Driven PID Controller", IEEE Transactions on control systems Technology, Vol. 17 (2009) No. 1, pp. 29-39
- (5) 豊田大輔, 中野耕太郎, 越智清史, 木下拓矢, 脇谷伸, 山本透: "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オンライン調整法", 日本製鋼所技報, No.73 (2022), pp. 24-31