

モデル予測制御の機械制御への適用

Application of Predictive Functional Control to Servo-Mechanical System

藤 田 稜 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部
 中 村 恵 子 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部
 鈴 木 俊太郎 技術開発本部総合開発センター電機システム開発部 主幹

モデル予測制御は、制御対象のモデルを利用してシステムの状態値を予測し、操作量を求める制御方式である。もともとは、応答が遅いプラントシステムを対象として開発されたが、応答の速いサーボ制御システムに適用しても、高い制御性能を得ることが可能である。モデル予測制御には、幾つもの手法があるが、そのなかから、PFC (Predictive Functional Control) 手法を選んで、油圧式ダイクッションの制御に適用したので紹介する。

Model predictive control was initially developed for and applied to plant process systems with a slow response. It is able to improve control performance, as it incorporates a model of the system, and it may potentially be applied to mechanical systems that have a shorter response time. We report in this paper an application of model predictive control, specifically Predictive Functional Control (PFC) of a hydraulic die cushion.

1. 緒 言

モデル予測制御は、プロセス制御の分野で発展した制御方式である。制御対象のモデルを利用して将来の状態の予測値を求め、予測値を用いて制御するため、PID (Proportional Integral Differential) 制御方式では制御が困難な長い応答時間や時間遅れをもつシステムに対して高い効果がある。

モデル予測制御には第 1 表に示すように、幾つもの手法があるが、いずれの手法も PID 制御方式と比べると演算量のはるかに多いため、数 ms オーダの短い演算周期が必要な機械 (サーボ) 制御への適用は、技術的・コスト的に難しく、進んでいなかった。

しかし、最近の半導体技術の発展によって、安価なマイ

クロコンピュータの演算処理能力が飛躍的に向上したため、機械を制御対象とするコントローラに対しても、モデル予測制御を比較的容易に実現できるようになった。モデル予測制御方式のなかで、演算量が少ないといわれている PFC (Predictive Functional Control) 手法を選び、機械制御に適用した効果について報告する。

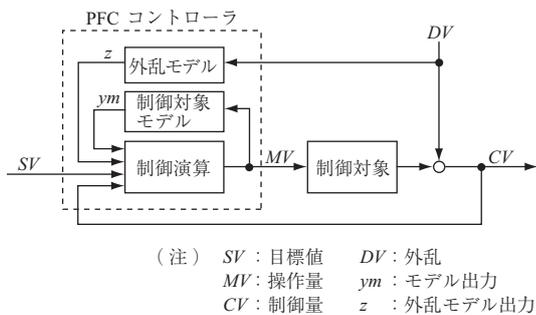
2. PFC の概要

PFC は、制御対象の出力 (制御量) が、現在から将来 (制御周期の数ステップ先) にかけて、どのように変動するかを予測し、制御量の予測値が目標値に収束するように制御する手法である。

第 1 図に、PFC を適用した制御系の構成図を示す。図中の制御対象は、操作量 (MV) に応じて動作する機械装

第 1 表 モデル予測制御⁽¹⁾
 Table 1 Model predictive control⁽¹⁾

項 目	MAC (Model Algorithmic Control)	PFC (Predictive Functional Control)	DMC (Dynamic Matrix Control)	GPC (Generalized Predictive Control)
年 代	1970 年代後半	2000 年代前半	1970 年代後半	1987 年
発 明 者	Richalet	Richalet	Culter	Clark
モ デ ル	インパルス応答	数式、インパルス	ステップ応答	数式モデル
パ ラ メ タ	参照軌道時定数	参照軌道時定数	評価関数重み	評価関数重み
積分プロセス	不可	可	不可	可
不 安 定 系	不可	可	不可	可
特 長	・多入出力対応できる。 ・現場調整しやすい。 ・計算負荷が小さい。	・計算負荷が小さい。 ・応用性が高い。 ・非線形対応可能である。	・多入出力対応できる。	・単入出力対応である。 ・適応制御から発展した。



第1図 PFC コントローラ ブロック図⁽²⁾
 Fig. 1 Block diagram of PFC controller⁽²⁾

置やシステムのことを指し、制御対象の出力に外乱 (DV) を加えたものが制御量 (CV) である。PFC コントローラ (図中の破線部) は、制御量 (CV) が目標値 (SV) に収束するように操作量 (MV) を制御する。PFC コントローラ内部は、制御量を予測するための制御対象モデル、外乱モデルと、これらのモデルからの出力である予測値 (ym, z) を基にして最適な操作量を求める制御演算ブロックで構成される。

PFC コントローラが、モデルを使って制御量の予測を行い、その予測値から操作量を算出する手順を以下に示す。

2.1 ステップ 1: 制御対象モデル、外乱モデルの作成

制御対象モデルと外乱モデルは、どちらも制御量を予測するための数式モデルである。制御対象モデルが操作量に依存するモデルであるのに対し、外乱モデルは操作量に依存しないモデルである。

制御対象のシステムを数式化して、操作量に依存する部分とそうでない部分に分類する。前者が制御対象モデルであり、操作量と経過時間を引数とする制御量を求める数式である。一方、操作量に依存しない数式は外乱モデルとして取り扱う。外乱モデルの数式には、外乱による影響度を推定するためのセンサ値と経過時間が必要である。

2.2 ステップ 2: 参照軌道と予測ステップの設定

制御演算ブロックでは、予測値が目標値に収束するように操作量を計算する処理を行うが、制御量の現在値と目標値の差が大きい場合、操作量の変動が過大になり制御が不安定になる可能性がある。そこで、PFC では制御量が現在の値から目標値に収束するまでの過渡応答を参照軌道として設定する。具体的には、一次遅れ系のステップ応答 (目標値に対して誤差が指数関数的に減衰する関数) を参照軌道として使用する。参照軌道を設定することで、制御量を目標値に収束させるまでの過程が明確になるので、制

御量の現在値と目標値の差が大きい場合でも安定した制御をすることができる。

また、どの程度先の未来を予測するかを、予測ステップ数 (h) で設定する。予測ステップ数 (h) にコントローラの制御周期を掛けた値が予測時間となる。

2.3 ステップ 3: 操作量計算式の導出

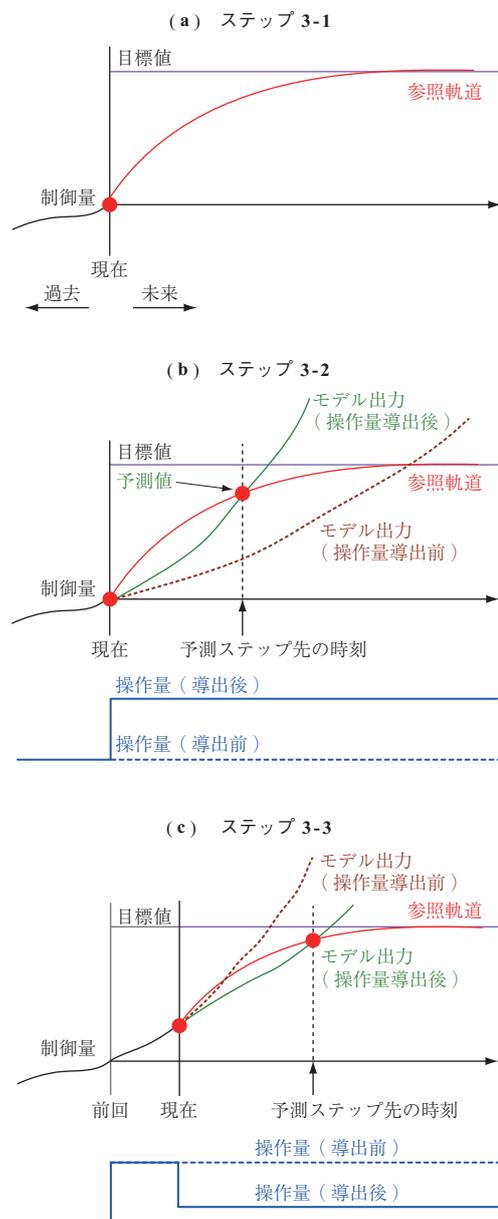
操作量は第2図に示す、ステップ 3-1 (- (a)), ステップ 3-2 (- (b)), ステップ 3-3 (- (c)) の手順で計算する。

(1) ステップ 3-1 (第2図 - (a))

現時刻の制御量を始点とする参照軌道を設定する。

(2) ステップ 3-2 (第2図 - (b))

2.1 節のステップ 1 で作成したモデルを用いて予



第2図 PFC コントローラ 概要⁽²⁾
 Fig. 2 Outline of PFC controller⁽²⁾

測ステップ先の時刻における制御量の予測値を求め、予測値が参照軌道に一致するように現時刻以降の操作量を決定する。操作量は、次の制御周期まで一定値に保持する。

(3) ステップ 3-3 (第 2 図 - (c))

次の制御周期になったら現時刻を 1 ステップ先に進めて、ステップ 3-1 (第 2 図 - (a))、ステップ 3-2 (第 2 図 - (b)) の手順を繰り返す。

PFC では、予測ステップ先の時刻でのみ、参照軌道と予測値が一致するように操作量を計算するため、計算負荷を小さくすることができる。また、モデルを使った予測値や参照軌道は、制御周期の度に毎回計算するため、制御対象モデルに誤差がある場合や突発的な外乱がある場合でも、制御可能である。

3. 機械制御への適用例

3.1 油圧式ダイクッション

PFC の機械制御への適用例として、油圧式ダイクッションを対象にした。ダイクッションとは、プレスを構成する装置の一つであり、プレスがスチール製パネルを金型に挟み込んで特定の形状に成形する際に、上向きの力（クッション力）を発生させてパネルを抑える役割を担っている。第 3 図に油圧式ダイクッション装置の概要を示す。本装置の特徴を以下に列挙する。

- (1) クッション力は、スライド（プレス可動部）が油圧シリンダを押し込む間、スライドを押し返す方向に作用する。
- (2) クッション力は、シリンダの上下室の差圧から算出する。
- (3) サーボ弁の開度 (u_{cmd}) で、シリンダへの油の流

入/流出量（流量）をコントロールする。

- (4) 油圧シリンダへの油の流量 (Q) を積分したものが圧力 (P) になるため、サーボ弁の開度によって、圧力（クッション力）を制御することができる。

本装置の制御量はクッション力、操作量はサーボ弁開度であり、数十～数百 t の範囲で任意のクッション力を目標値として設定する。

クッションは、スライドが接触するまでは位置を保持し、接触後は、クッション力が、即座に目標値に到達するように制御する（整定時間 100 ms 以下）。クッション力の応答特性は、スライド速度の影響を受ける。そのため、従来の制御方式（PID 制御 + フィードフォワード制御の併用）で、常に最適な応答を得るには、運転条件（スライド速度など）ごとに制御調整する必要がある。

3.2 モデル構築

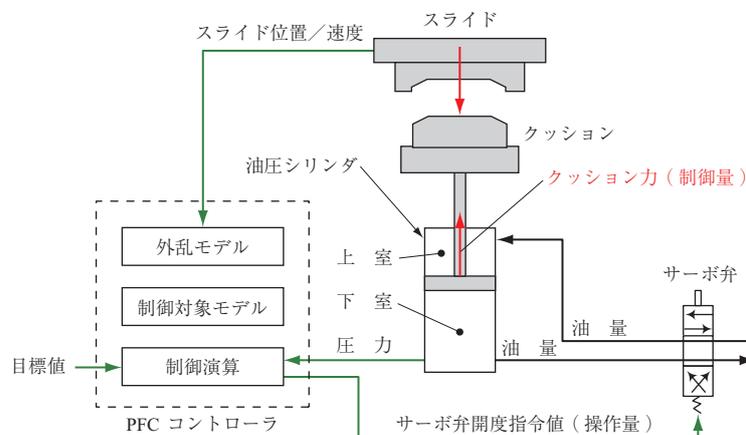
油圧式クッションを制御対象とする PFC コントローラ（以下、C-PFC と呼ぶ）に使用する制御対象モデルおよび外乱モデルを以下に示す。

(1) 制御対象モデル

クッション力は、油圧シリンダへの油の流出/流入量に依存するため、サーボ弁および油圧シリンダが制御対象モデルとなる。

サーボ弁モデルは、流量特性を線形特性に一次遅れを加えたモデルとする。サーボ弁の流量特性は非線形であるが、C-PFC の計算負荷を軽減するため、流量特性テーブルを用い、線形モデルに近似する。

油圧シリンダモデルは、サーボ弁の開度と油圧シリンダの圧力値からオリフィスの流量計算式を基にして流量を計算する。油の流量を積分してクッション力を算出する。



第 3 図 油圧式ダイクッション装置
Fig. 3 Hydraulic die cushion

(2) 外乱モデル

油圧シリンダの圧力は、操作量であるサーボ弁の開度に関係なく、スライドに押し込まれると変動する。そこで、スライドを外乱モデルとして扱う。スライドの位置や速度はプレス装置のセンサ値で推定できる。油圧シリンダのピストンはスライドによって強制的に押し下げられるので、ピストン位置はスライド位置、ピストン速度はスライド速度と等価である。ピストン速度からシリンダの圧力変動を求め、それを積分してクッション力を算出する。

また、スライド速度 (V_{slide}) は、クッション接触時に、接触の影響で一瞬減速するため、速度の減速分を指数関数で近似する。

3.3 クッション用 PFC (C-PFC)

以上のモデルを基にして C-PFC を設計する。(1)式は、制御対象モデルと外乱モデルを用いてクッション力を算出する数式である。PFC では予測ステップ (h) 先の状態で (1) 式と参照軌道が一致するように制御するので、(2) 式の等式が成り立つ。(2) 式を操作量 (サーボ弁開度) について解くと、C-PFC の出力である (3) 式が得られる。

汎用的な PLC (Programmable Logic Controller) に C-PFC を組み込むため、(3) 式の各項を、演算周期ごとに計算すべきものと、そうでないものに分類し、後者については演算頻度を減らすことで、演算負荷を低減する。

(1) ~ (3) 式を以下に示す。

$$F_c(t) = \int_{t_0}^t \frac{K}{V_{lens}} \{Q(q_{sv}(u_{cmd}, t), P(t)) + V_{slide}(t)\} dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

- F_c : クッション力
- K : 体積弾性率
- V_{lens} : シリンダ体積
- Q : 油の流量
- u_{cmd} : サーボ弁の開度指令値
- q_{sv} : サーボ弁流量
- P : シリンダ圧力
- t : 経過時間
- t_0 : 現在の時刻
- V_{slide} : スライド速度

$$F_{ref}(SV, T_{rbf}, h) = (F_{c10}(P, h) + u_{cmd} \cdot F_{c11}(P, h) + F_{dv}(V_{slide}, h) \dots\dots\dots (2)$$

- F_{ref} : 参照軌道
- SV : 目標値

- T_{rbf} : 参照軌道時定数
 - h : 予測ステップ
 - u_{cmd} : サーボ弁の開度指令値
 - P : シリンダ圧力
 - F_{c10}, F_{c11} : 油圧クッションモデルから求めたクッション力変動量
 - F_{dv} : スライドモデルから求めたクッション力変動量
- $$u_{cmd} = \frac{F_{ref}(SV, T_{rbf}, h) - F_{c10}(P, h) - F_{dv}(V_{slide}, h)}{F_{c11}(P, h)} \dots\dots\dots (3)$$

- u_{cmd} : サーボ弁の開度指令値
- F_{ref} : 参照軌道
- SV : 目標値
- T_{rbf} : 参照軌道時定数
- h : 予測ステップ
- P : シリンダ圧力
- V_{slide} : スライド速度
- F_{c10}, F_{c11} : 油圧クッションモデルから求めたクッション力変動量
- F_{dv} : スライドモデルから求めたクッション力変動量

3.4 評価試験

評価試験では、汎用 PLC に C-PFC を実装し、実物の油圧式ダイクッションを制御する試験を実施した。コントローラ制御周期は、従来の制御方式と共通にしている。

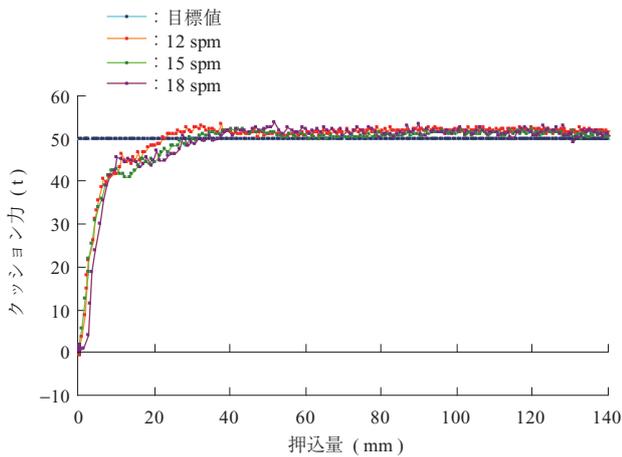
(1) 処理時間

C-PFC の演算処理時間の計測値は 178 μ s であった。従来の制御方式 (PID 制御 + フィードフォワード制御の併用) の演算処理時間は 79 μ s であり、2 倍以上に増加しているが、機械制御に適用可能な処理時間 (1 ms 程度) に収まることを確認できた。

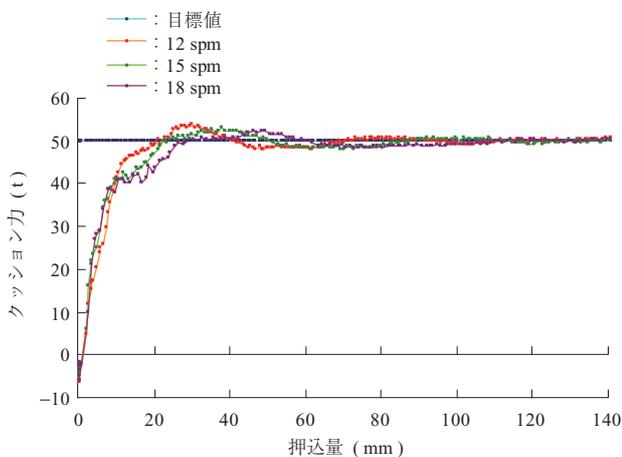
(2) 制御性能

C-PFC と従来制御方式の制御性能を比較するため、同じ条件 (クッション力目標値: 50 t, スライド速度: 12 spm (毎分ストローク数), 15 spm, 18 spm) で、評価試験を実施した。

従来制御方式では、異なるスライド速度ごとに、制御パラメタの調整が必要だったが、C-PFC は、コントローラ内部のモデルを用いて、スライド速度に応じた制御を実施する。この結果、スライド速度ごとの制御パラメタの調整は不要であった。



第4図 C-PFCによるダイクッションの応答例
Fig. 4 Die cushion response under C-PFC



第5図 従来制御方式によるダイクッションの応答例
Fig. 5 Die cushion response under conventional control

第4図にC-PFC、第5図に従来制御方式のダイクッションの応答例を示す。図中の横軸は、クッションがスライドと接触する位置を原点とした押込

量、縦軸はクッション力である。

第4図と第5図の結果から、C-PFCが、最適な制御調整済みの従来制御方式と同等の制御性能になることが分かった。また、所望の制御性能に至るまでの調整時間を比べると、C-PFCは、従来制御方式よりも短い時間で実現できることが分かった。

(3) ロバスト性

試験では、制御対象モデルの誤差は、4%程度であれば制御性能にほとんど影響を及ぼさないが、外乱モデルに誤差がある場合や操作量にオフセットがある場合、誤差やオフセットに応じた定常偏差が発生した。これは、制御対象が外乱を含んだ積分系モデルであり、誤差の量だけ収束値にオフセットが生じるためと考えられる。

4. 結 言

モデル予測制御の一手法であるPFCを機械制御に適用した効果について紹介した。制御周期が短いシステムに対しても有効な制御方式であることを確認した。今後は、ほかのIHI製品への適用を視野に入れ、制御性能や設計効率の向上に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- (1) 黒谷憲一：計測と制御を一体化したモデル予測制御 電気学会誌 第117巻 第10号 1997年9月 pp. 691 - 694
- (2) ジャック・リシャレ、江口 元（小崎恭寿男監修）：モデル予測制御－PFC（Predictive Functional Control）の原理と応用－ 日本工業出版 2007年2月 pp. 12 - 79