

# プロセス動特性同定ツール

魚谷一則\* 江木博志\*\* 重政隆\*\* 根岸靖典\*\*

## Identification Tool of Process Dynamics

K. Uotani, H. Egi, T. Shigemasa and Y. Negishi

**Abstract**— Model-Driven PID control system is useful for systems with long dead time. In order to apply Model-Driven PID controller, it is very important to identify process dynamics properly. We developed an Identification Tool of Process Dynamics for those applications. Applied process dynamics are first order lag plus dead time and first order lag plus dead time plus integral. The Identification Tool is applicable not only dynamics from manipulated variables to process variables but also dynamics from disturbance to process variables.

**Key Words:** Dynamics, Identification, Control

### 1 はじめに

プロセスの制御において、PID 制御を用いて制御を行うことがほとんどであり、そのパラメータチューニングの多くは未だ専門技術者の経験に頼っているのが現状である。この解決策として、チューニングが簡易かつ高精度な制御を可能とするコントローラとして制御器内にモデルを内蔵するモデル駆動 PID 制御があげられる。モデル駆動 PID 制御を用いることで、長いむだ時間を有するプロセスおよびむだ時間に加えて積分特性を有するプロセスであったとしても、有効な制御を行うことができる。しかし、モデル駆動 PID 制御を適用するためにはモデルに近似したプロセスの特性把握が必要不可欠であるのに対し、プロセスには長いむだ時間や外乱などの要素が大きく、正確な特性を得ることは困難である。そこで本論文では、プロセスのステップ応答から動特性を同定し、モデル駆動 PID 制御をプロセスに効率よく適用するためのツールの開発事例を紹介する。なお、本ツールは操作出力から制御量への動特性を同定するばかりでなく、外乱から制御量への動特性も同定することができ、積分特性と無駄時間が組み合わさったプロセスの動特性も同定することができる。

## 2 モデル駆動 PID 制御<sup>1),2)</sup>

### 2.1. モデル駆動 PID 制御の構成

モデル駆動 PID 制御のブロック図を Fig. 1 に示す。制御システムは、主制御器、PD 補償器、目標値フィルタにより構成されている。

### 2.1.1 主制御器

主制御器はゲイン要素、プロセス動特性モデル、Q フィルタから構成される。プロセス動特性モデルは一次遅れ+無駄時間要素であり、主な調整パラメータには下記のものがある。

Kc : 制御ゲイン

Tc : 時定数

Lc : 無駄時間

$\lambda$  : 進み遅れ調整パラメータ

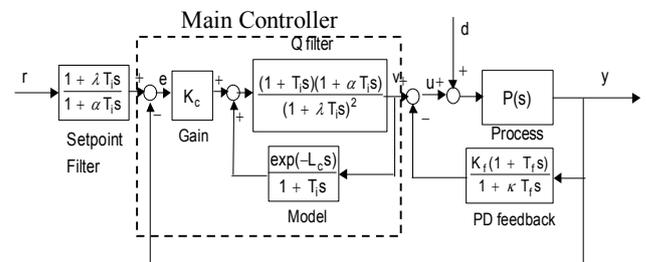


Fig.1 Block diagram of Model Driven PID Controller

### 2.1.2 PD フィードバック

PD フィードバックは、制御対象が積分系、振動系であった場合にも、モデル駆動 PID 制御で取り扱える、一次遅れ+無駄時間系へと主制御器から見た、見かけの制御対象特性を変換する役割を果たす。

### 2.2 モデル駆動 PID 制御の特徴

一次遅れ+無駄時間系にモデル駆動 PID 制御を適用し、モデルと制御対象が一致したときの、目標値変更に対する制御系の応答を Fig.2 に示す。

目標値をステップ変化させたとき、操作量もステップ変化しており、閉ループのまま、制御対象のステップ応答が得られている。Fig.2 は理想系応答であるが、パラメータにずれがあっても、ステップ応答に近い応答波形を得ることができ、閉ループでの同定に有効である。

\* 東芝 IT コントロールシステム(株)

Toshiba IT & Control Systems Corporation

\*\* 東芝三菱電機産業システム(株)

Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation

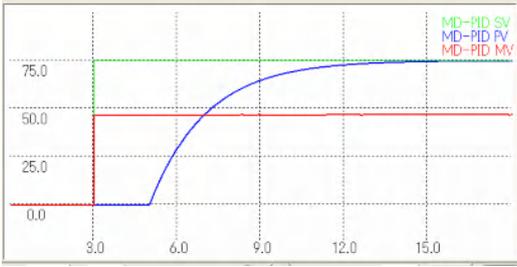


Fig.2 Response of Model Driven PID Controller

### 3 対象プロセス

基本的には, Fig.3 に示す, P(s), D(s)の同定である.

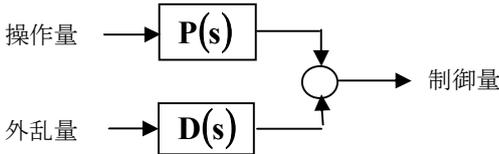


Fig.3 Block diagram of process identification

具体的には Fig.4(a),(b)に示す2種類のプロセスを同定の対象としている. プロセス制御では制御対象を一次遅れ+無駄時間で近似することが一般的であるのと, モデル駆動PID制御の内蔵モデルも一次遅れ+無駄時間であるので, この近似を採用した.

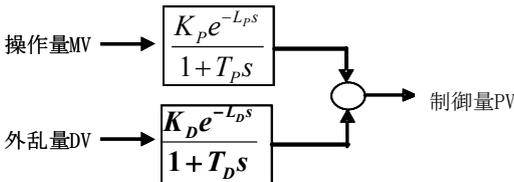


Fig 4(a) Process Model. First order lag + Dead time

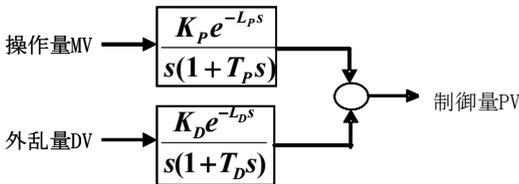


Fig 4(b) Process Model. Integral + First order lag + Dead time

## 4 プロセス同定ツール

### 4.1 プロセス同定ツールの機能概要

プロセス同定ツールは実プラントへの適用支援のためのツールであり, プロセス同定だけでなく, チューニングを支援する機能を兼ね備えている. そのためメニューとして, プロセス同定, モデル駆動PID制御のPDフィードバックシミュレーション, プロセス制御シミュレーション機能を持っており, それらの機能を連携して使用する.

### 4.2 プロセス同定機能

制御対象を Fig.4(a),(b)に示す対象プロセスモデルに近似して, 操作量, 外乱量に対する, ゲインK, 時定数T, 無駄時間Lを求める. 同定手法としては逐次比較法と拡張カルマンフィルタによる推定法の二通りについて実証した.

### 4.2.1 プロセスデータ読み込み, 表示

プロセスの操作量, 制御量, 外乱量のトレンドデータをCSV形式で読み込み表示する.

レンジや表示区間は任意に設定できるようになっており, 目視でプロセス同定に最適な区間を選択してその部分を拡大表示する. 読み込みデータトレンド表示例を Fig.5 に示す.

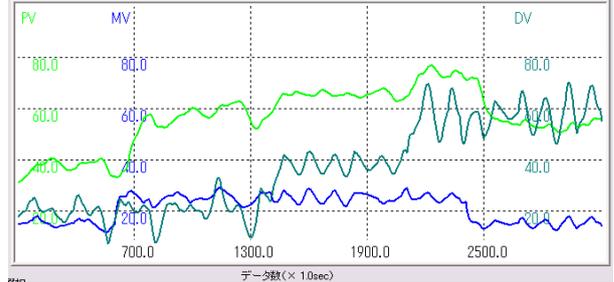


Fig 5 Trend Data sample

### 4.2.2 プロセス同定

操作量と制御量, 外乱量と制御量の関係から, P(s),D(s)を求める. 対象が定位系か無定位系かで同定アルゴリズムが異なるので, どちらの系かを指定する. プロセス同定の詳細は5項で述べる.

### 4.3 PD フィードバックシミュレーション

プロセス同定結果に基づき, 無定位系にモデル駆動PID制御を適用するには, PDフィードバックによって, 制御系を定位系に変換する必要がある. このときのPDフィードバック係数K<sub>F</sub>, T<sub>F</sub>を決めるためのシミュレーション画面である. プロセスパラメータK, T, Lを設定し, K<sub>F</sub>, T<sub>F</sub>の値を変化させて, 見掛けの制御系が安定な定位形になる様に選択し, そのときのモデルパラメータK, T, Lを波形を合わせることによって求める. PDフィードバック画面例を Fig.6 に示す.

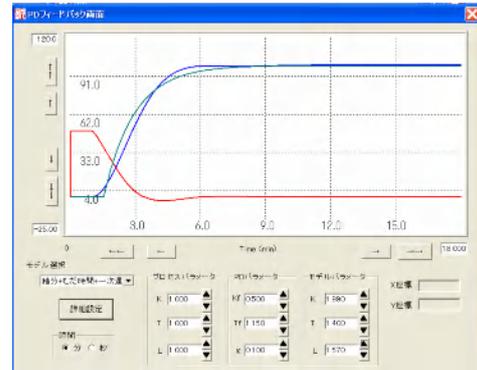


Fig 6 PD Feed Back Simulation

### 4.4 モデル駆動PID制御, PID制御比較シミュレーション

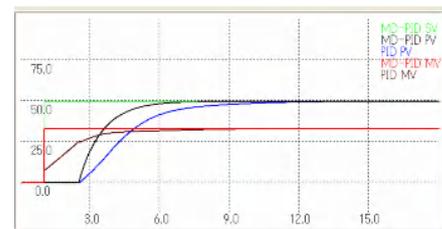


Fig 7 Comparison Example of Model Driven PID Control(MD-PID) and Standard PID Control

プロセス同定結果を用いてモデル駆動 PID 制御をプラントに適用するとき、予め従来の PID 制御と制御性能を比較するためのシミュレーション機能である。画面例を Fig.7 に示す。

## 5 プロセス同定機能

### 5.1 プロセス同定機能の検討

プロセス同定対象は、操作量に対する制御対象応答  $P(s)$  と外乱量に対する制御対象応答  $D(s)$  である。

プロセス同定方法としては逐次比較法と拡張カルマンフィルタ法を適用した。

同定が難しい項目としては、無駄時間要素、無定位置系、操作量変動と外乱量変動の混在がある。これらの項目の克服が研究課題である。

逐次比較法では制御対象モデルのプロセスパラメータ  $K, T, L$  の値を逐次変化させ、操作量に対する制御応答を計算し、観測制御量との絶対値積算誤差 (IAE) が最小となる  $K, T, L$  の値を求めるものである。この方法では一次遅れ+無駄時間系に対して操作量に対する制御対象応答  $P(s)$  は満足できる特性を得ることが出来たが、積分要素が加わった制御対象では満足できる結果を得ることが出来なかった。積分系では無駄時間、一次遅れ時定数の同定が困難であった。また一次遅れ系、積分系共に外乱に対する特性同定が困難であった。

これらの問題を解決するため、拡張カルマンフィルタ法を適用したところ、無定位置系に対しても、操作量に対する制御対象応答で無駄時間、時定数を同定することが出来た。また外乱量に対する制御対象応答も条件に制約はあるが同定することが出来た。

### 5.2. 拡張カルマンフィルタ<sup>3)</sup>

拡張カルマンフィルタでは時間発展モデル

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k)$$

と、観測モデル

$$y_k = h(x_k, v_k)$$

を考える。ここで、 $x_k, u_k, w_k, y_k, v_k$  はそれぞれ、状態量、制御対象への入力、システムノイズ、システムの観測ベクトル、観測ノイズである。状態量の要素は制御量および制御対象モデルパラメータ  $K, T, L$  である。

まず、偏微分行列 (ヤコビアン) を計算する。

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k|k}}$$

$$H_{k+1} = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k+1|k}}$$

状態の推定値と誤差行列の予測は下式で与えられる。

$$x_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0) \quad (1)$$

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + Q_k \quad (2)$$

ここで、 $\hat{x}_{k|k} : x_k$  の推定量

$\hat{x}_{k+1|k} : x_{k+1}$  に基づく  $x_{k+1}$  の推定量

(1) 式の  $f(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0)$  は伝達関数モデルを双一次変換することによって求められる。

$P_{k|k}$  は  $\hat{x}_{k|k}$  の推定誤差の共分散行列、 $Q_k$  はシステムノイズの共分散行列である。

ここで、観測量  $y_k$  と状態量との関係は、操作量から  $K_p, T_p, L_p$  を推定する例では、 $h = (1, 0, 0, 0)$  である。

計測された、操作量  $u_0, u_1, u_2 \dots$ 、制御量  $y_0, y_1, y_2 \dots$  から、順次上記式を繰り返し計算することにより、 $K_p, T_p, L_p$  を求める。外乱の動特性同定の場合は、操作量の代わりに外乱量の時系列データを用いる。

拡張カルマンフィルタ法適用の利点は、逐次比較法と比較して、同定に要する時間が短いだけでなく、逐次比較法では同定が困難な無定位置系の同定も可能、周期的外乱の影響を受けにくいことがあげられる。調整パラメータとしてはノイズ量に対応した  $Q$  値の設定である。 $Q$  値はノイズが大きい計測データの場合は大きく、ノイズが小さい計測データの時は小さくすると良い同定結果が得られた。

## 6 プロセス同定の実証

シミュレーションモデルと実プラントデータによるプロセス同定の実証を実施した。

### 6.1 シミュレーションモデルによる実証

#### 6.1.1 一次遅れ+無駄時間モデル

一次遅れ+無駄時間モデルに高周波周期変動が重畳した負荷変動外乱を加えて、制御系の同定を実施した。

モデルを Fig.8(a) に示す。操作量は手動でステップ変化させる。まずは逐次比較法と拡張カルマンフィルタ法の操作量に対する特性同定の比較を実施し、その結果を Fig.8(b)(c) に示す。拡張カルマンフィルタ法の方が一次遅れ、無駄時間の正確な同定が出来る。

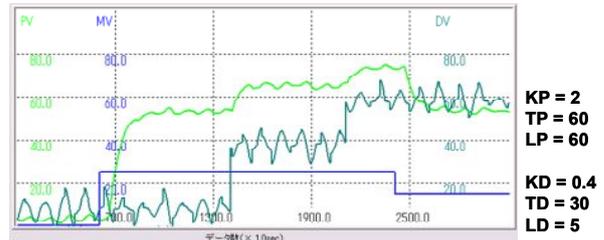


Fig 8(a) Simulation model for first order lag and dead time process

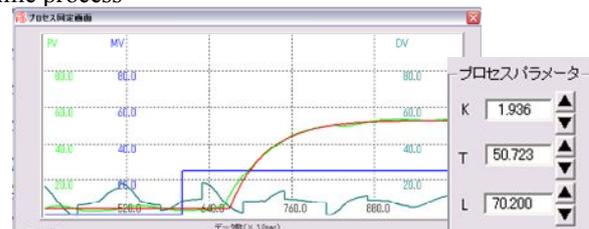


Fig 8(b) P(s) Identification Result for first order lag and dead time process by successive approximation

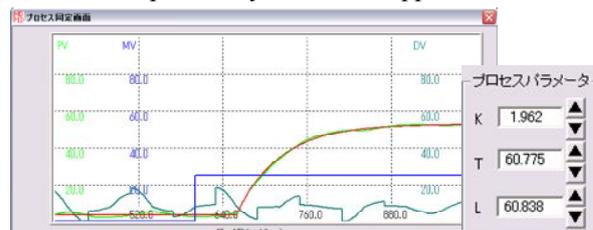


Fig 8(c) P(s) Identification Result for first order lag and dead time process by extended Kalman filter

次に、外乱のステップ変動に対する制御量応答の動特性を拡張カルマンフィルタ法で求めた結果を Fig.8(d)に示す。外乱そのものに大きなシステムノイズが乗っているため、操作量変化と比較して同定精度は低下する。同定結果に対して手動でパラメータを変化させて微調整も可能である。なお、逐次比較法ではこのようなシステムノイズが大きい外乱の動特性同定はできなかった。



Fig 8(d) D(s) Identification Result for first order lag and dead time process

### 6.1.2 一次遅れ+無駄時間+積分系モデル

一次遅れ+無駄時間+積分系モデルに負荷変動外乱と高周波周期変動を加えて、拡張カルマンフィルタ法で制御系の同定を実施した。このモデルでは第1段階で操作量特性を求め、第2段階で制御量と外乱量から外乱特性を同定した。操作量に対する特性ではゲインは正確に求められ、動特性も同定誤差3%以内という好結果が得られた。外乱量に対しては制御量平衡状態からの同定は同定誤差5%以内で操作量に対する同定と同様に求められた。

モデルを Fig.9(a)に、対操作量応答の同定結果を Fig.9(b)に、対外乱量応答の同定結果を Fig.9(c)に示す。



Fig 9(a) Simulation model for first order lag plus dead time plus integral process

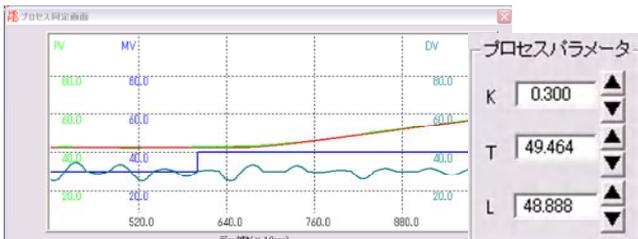


Fig 9(b) Identification result of P(s) for first order lag plus dead time plus integral process

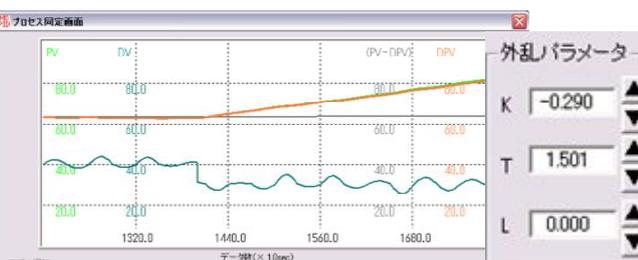


Fig 9(c) Identification result of D(s) for first order lag plus dead time plus integral process

## 6.2 プラント操作データを用いての同定

操作データを用いて無定位系プロセスの同定に適用した事例を以下に示す。Fig.10はプロセスの応答実測波形である。

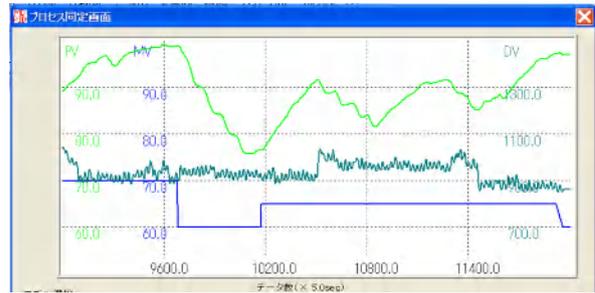


Fig 10 Process Trend Data of Manipulated, Disturbance and Process variables

外乱は短周期振動が重畳している、同定が難しいプロセスである。

同定区間として、P(s)同定はサンプリング区間を9500~10000と選んだ。

P(s)同定結果を Fig.11に示す。制御量変動に対して、同定結果の変動グラフは良く一致している。

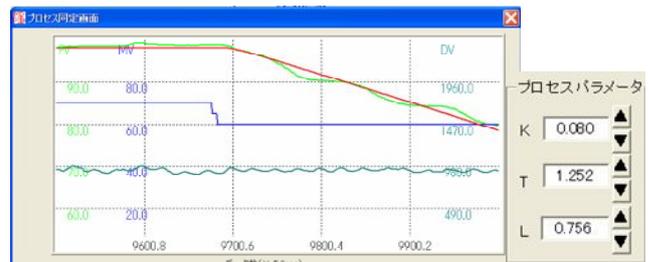


Fig 11 Identification result of P(s) for actual trend data of first order lag plus dead time plus integral process

## 7 結論

プロセスの動特性同定に拡張カルマンフィルタを適用した。シミュレーションモデル、実プラント操作データに適用し、許容できる誤差範囲でプラントの動特性を得ることが出来た。モデル駆動PID制御は無駄時間が支配的なプロセスや積分系と無駄時間が組み合わさったプロセスに適用し、従来のPID制御と比較して制御性の改善に寄与してきた。モデル駆動PID制御を有効活用するには、制御対象の動特性を同定することが基本である。従来は専門技術者に依存していたが、ツール化することにより、モデル駆動PID制御の適用拡大が可能となる。

## 文 献

- 1) 馬場泰, 重政隆, 小島文夫, モデル駆動 PID 制御, 東芝レビュー 10月号, 58, 10, 38/41, (2003)
- 2) 重政隆, 行友雅徳, 馬場泰, 小島文夫, モデル駆動 PID コントローラとその調整方法, 計測自動制御学会制御部門大会, 仙台市民会館, (2005)
- 3) M. Isabel Ribeiro, Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties, 31/41, (2004)