

## 予測応答を用いたデータベース駆動型制御系の一設計

### Design of a Database-Driven Controller using Estimated Data

岡田 龍二<sup>†</sup> 木下 拓矢<sup>†</sup> 山本 透<sup>†</sup>

Ryuji Okada<sup>†</sup> Takuya Kinoshita<sup>†</sup> Toru Yamamoto<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 広島大学大学院 工学研究科

#### 1 はじめに

近年、操業データと制御パラメータを格納したデータベースを用いたPID制御法[1]（データベース駆動型制御法[2]）が提案され、実機実験により非線形システムに対する有効性を検証している。このとき、データベース駆動型制御法は格納されているデータを参照してPIDゲインを調整するため、より多くの操業データを格納できれば更なる制御性能の向上が期待できる。しかしながら、そのデータ数を増やすためには、長時間の実験が必要となる。

一方、一組の閉ループデータのみを用いて、あらゆる制御パラメータに対する入出力データを事前に予測することが可能なEstimated Response Iterative Tuning (ERIT) [3] というデータベース駆動型制御が提案されている。しかしながら、ERITは非線形システムに対しての有効性は検証されておらず、また、2自由度制御系のみに限定した手法となっている。

そこで、本研究では一組の閉ループデータから疑似的にデータ数を増やすことが可能な、予測応答を用いたデータベース駆動型制御系を提案する。提案手法では、ERITを用いることにより、オフラインにおいてデータ数の増加、制御パラメータの更新が可能となる。また、本手法は線形システムを制御対象としたERITを非線形システムに拡張している。さらに、従来のERITでは2自由度制御系が必要となるが、本研究ではERITに基づいた1自由度制御系を構築する。

#### 2 提案手法の概要

図1に提案手法の概要図を示す。はじめに、初期閉ループデータ (Initial data) を取得し、この閉ループデータに対してERITを適用することにより、データを疑似的に増やす。図1の例では、初期閉ループデータが $N$ とした場合、ERITを用いることで $4N$ に増やすことができる。具体的には、様々な参照軌道に対応する入出力データをデータベースに格納することができる。制御性能の向上が期待できる。

#### 3 予測データを用いたデータベース駆動型制御系の設計

##### 3.1 システムの記述

制御対象として、次式で表される離散系時間非線形システムを考える。

$$y(t) = f(\phi(t-1)) \quad (1)$$

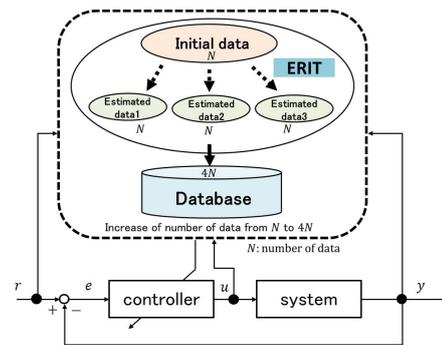


図1: 提案手法の概要図。

ここで、 $y(t)$  はシステム出力、 $f(\cdot)$  は非線形関数、 $\phi(t-1)$  はシステムの時刻  $t$  より前の状態を表しており、情報ベクトルと呼ぶ。また、情報ベクトル  $\phi(t-1)$  は次式で定義される。

$$\phi(t-1) := [y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)] \quad (2)$$

ここで、 $u(t)$  は制御入力、 $n_y$ 、 $n_u$  はそれぞれ出力と入力の次数である。現在のシステムの状態を示す情報ベクトル  $\phi(t)$  を要求点 (クエリ) と呼ぶ。本手法で用いるデータベース駆動型制御は、各ステップごとに事前に大量に蓄えられたデータベースから、要求点に類似した情報ベクトルを近傍として抽出し、PIDゲインを算出し、そのPID制御器を用いて制御を行う。

##### 3.2 データベース駆動型PIDコントローラの設計

本稿では、下記のような比例動作先行PID制御 (I-PD制御) 則を適用する。

$$\Delta u(t) = K_I(t)e(t) - K_P(t)\Delta y(t) - K_D\Delta^2 y(t) \quad (3)$$

ここで、 $e(t)$  は制御誤差信号であり以下のように定義する。

$$e(t) := r(t) - y(t) \quad (4)$$

また、 $K_P(t)$ 、 $K_I(t)$  はそれぞれ各ステップにおける比例ゲイン、積分ゲインを表している。さらに、 $\Delta$  ( $:= 1 - z^{-1}$ ) は差分演算子を表している。以下に、データベース駆動型PIDコントローラの具体的な設計手順を示す。



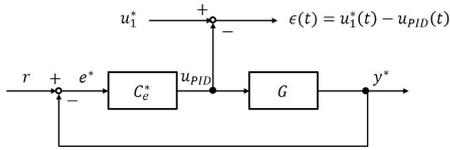


図 3: 1 自由度制御系のブロック線図.

上式から閉ループデータ  $y_0, u_0$  から所望の応答  $y^*, u^*$  を推定することが可能になる.

ここで, ERIT を非線形システムに適用することにより, 非線形性が強いところを  $y^*$  によって可視化することができ, システムの異常検知が可能となる.

ここで, 本稿では ERIT により算出した  $u^*$  に着目する. まず, ERIT で算出した予測応答  $u^*$  を  $u_1^*$  とする. 次に, 所望の応答  $y_r$  を  $G_m$  より以下の式を導くことができる.

$$u_2^*(t) = \frac{1}{\hat{G}(t)} y_r(t) \quad (17)$$

$$\hat{G}(t) = \frac{G_m}{C_e + C_r^*(t) - G_m C_e} \quad (18)$$

ここで,  $\hat{G}(t)$  は 2 自由度制御系の閉ループ伝達関数と目標応答伝達関数  $G_m$  により算出できるものである.  $u_1^*$  と  $u_2^*$  の差分を最小化する  $C_r^*$  を求めることにより, 非線形システムに対応可能で最適な解を得ることができる.

$$J_1 = \|u_1^* - u_2^*\| \quad (19)$$

なお, ERIT は 2 自由度制御系のみに限定した手法となっている. この理由として, 式 (12) から式 (13) に変形するためには, 初期実験のときとチューニング後の  $C_e$  が一致する必要があるためである.

したがって, 次節では ERIT を用いて 2 自由度制御系で得た応答から 1 自由度制御系の制御パラメータを取得する手法を記述する.

## 5 予測応答を用いたデータベース駆動型制御

前節で説明したように ERIT は 2 自由度制御系で設計する必要があるが, 本手法では入出力応答  $u_1^*(t), y^*(t)$  を用いて図 3 に示す 1 自由度制御系を構築する. まず, 目標値  $r(t)$  が既知のため, 出力  $y^*(t)$  を用いて推定偏差  $e^*(t)$  を得る.

$$e^*(t) = r(t) - y^*(t) \quad (20)$$

ここで, 図 3 の  $C_e^*$  は  $u_{PID}(t), y^*(t)$  を実現するフィードバック制御器である. このとき, 式 (3) より  $y^*(t), u_{PID}(t), e^*(t)$  を用いた速度型 I-PD 制御則は次式になる.

$$\Delta u_{PID}(t) = K_I^*(t) e^*(t) - K_P^*(t) \Delta y^*(t) - K_D^* \Delta^2 y^*(t) \quad (21)$$

表 1: 各種パラメータ.

Orders of information vector	$n_y = 2, n_u = 2$
Learning rates	$\eta_P = 0.375$
	$\eta_I = 0.375$
	$\eta_D = 0.125$
Number of neighbors	$k = 3$
Initial number of data	$N(0) = 200$
Rise-time	$\sigma = 1.0$
Damping coefficient	$\delta = 0.0$

ここで,  $K_P^*(t), K_I^*(t), K_D^*(t)$  は  $C_e^*$  に含まれる比例ゲイン, 積分ゲイン, 微分ゲインを表している.

次に, 式 (21) より  $C_e^*$  を最適化するための評価関数  $J_2$  を得る.

$$J_2 = \|u_1^*(t) - u_{PID}(t)\| \quad (22)$$

式 (22) より, 評価関数  $J_2$  が最小となる  $C_e^*$  を設計することで入出力応答に対応する PID ゲインを得ることができる. 本稿では, 次式の最急降下法により  $C_e^*$  は更新される.

$$C_e^{new*}(t) = C_e^{old*}(t) - \eta \frac{\partial J_2(t+1)}{\partial C_e^{old*}(t)} \quad (23)$$

$$\eta := [\eta_P, \eta_I, \eta_D] \quad (24)$$

ここで,  $\eta$  は学習係数を表しており, 式 (23) により  $C_e^*$  は更新される. 次に, 更新を行った制御パラメータと予測データを情報ベクトルとしてデータベースに格納する.

$$\phi(t) := [r(t+1), r(t), y_r(t), \dots, y_r(t-n_y+1), u_1^*(t-1), \dots, u_1^*(t-n_u+1), C_e^*(t)] \quad (25)$$

以上より, 推定した入出力応答を用いて 1 自由度制御系の構築が可能になる.

本手法は, 一組の閉ループデータから式 (15), (16) を用いて, 様々な応答を事前に取得できる. また, 式 (22) を用いて 1 自由度制御系の PID ゲインを得ることが可能である. 以上より, ERIT で得られた入出力応答と制御パラメータをデータベースに格納することで, 制御性能の向上が期待できる.

## 6 数値例

### 6.1 対象システム

本論文では次式で与えられる Hammerstein モデルを用いる.

$$y(t) = 0.6y(t-1) - 0.1y(t-2) + 1.2x(t-1) - 0.1x(t-2) \quad (26)$$

$$x(t) = 1.5u(t) - 1.5u^2(t) + 0.5u^3(t) \quad (27)$$

ここで、所望の応答を実現するモデル  $G_m$  は以下のよう  
にあらわされる． [4]

$$G_m(z^{-1}) = \frac{z^{-1}T(1)}{T(z^{-1})} \quad (28)$$

なお、 $T(z^{-1})$  は参照モデルの多項式であり、次式で表  
される．

$$T(z^{-1}) := 1 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} \quad (29)$$

$$\begin{cases} t_1 = -2\exp(-\frac{\rho}{2\mu})\cos(\frac{\sqrt{4\mu-1}}{2\mu}\rho) \\ t_2 = \exp(-\frac{\rho}{\mu}) \\ \rho := T_s/\sigma \\ \mu := 0.25(1-\delta) + 0.51\delta \end{cases} \quad (30)$$

ここで、 $T_s$  はサンプリング時間、 $\sigma, \delta$  はそれぞれ制御  
系の立ち上がり特性、減衰特性に関するパラメータを  
示しており、設計者が任意に設定する．なお、各時刻  
における目標値を以下のように設定した．

$$r(t) = \begin{cases} 0.5 & (0 < t \leq 50) \\ 1.0 & (50 < t \leq 100) \\ 2.0 & (100 < t \leq 150) \\ 1.1 & (150 < t \leq 200) \end{cases} \quad (31)$$

その他、各種パラメータの値を表1にまとめる．

また、こちらの数値例において、提案手法では、式  
(28) で表される参照軌道に対する入出力データを一組  
増やしてデータベースに事前に格納している．

## 6.2 制御結果

オフライン学習に必要な入出力データを得るために  
以下の初期パラメータを用いて制御をおこなう．

$$K_P = 0.243, K_I = 0.113, K_D = 0.061 \quad (32)$$

固定 PID 制御器による制御結果と提案手法による制  
御結果、さらに比較対象として FRIT を用いたデー  
タベース駆動型制御法の制御結果を図4に示す．また、  
提案手法の PID パラメータの推移を図5に示す．

図4より、固定パラメータの場合、 $t = 100[\text{step}] -$   
 $130[\text{step}]$ において、即応性がほかの目標値応答に比  
べ十分でないことが確認できる．また、従来法では、目  
標値  $r = 2$  のところでオーバーシュートし、その後振  
動している．これは、近傍データより制御パラメータ  
を算出の際に、適切な情報ベクトルが選択されていな  
いためであると考えられる．一方、提案法では、オフ  
ラインにおいて予測データを事前に格納したデータベー  
ス作成することにより、近傍データの選択が適切に行わ  
れ、制御性能の向上がみられることがわかる．また、  
図5より、システムに応じて適用的に制御パラメータ  
が変化していることがわかる．

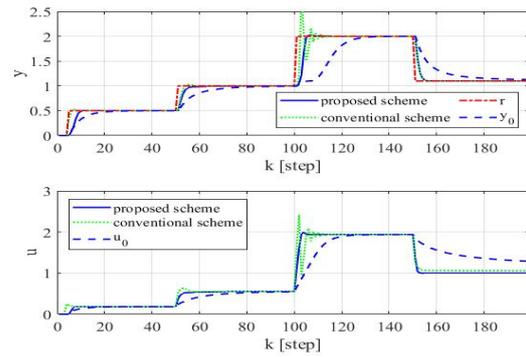


図4: 制御結果.

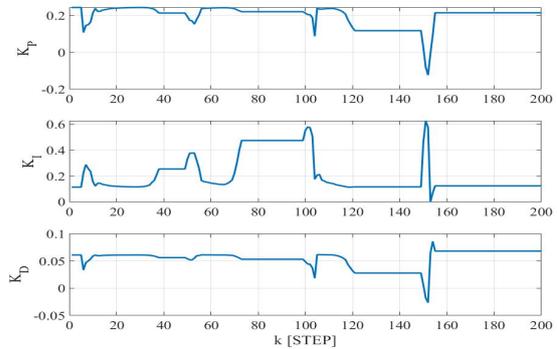


図5: PID パラメータの推移.

## 7 おわりに

本稿では、非線形システムに対して予測応答を用い  
たデータベース駆動型制御法を適用した．数値シミュ  
レーションにより、非線形システムに対しての有効性  
を検証した．なお、本研究は、JSPS 科研費 16H04384  
の助成を受けたものである．

## 参考文献

- [1] 須田信英：PID 制御，朝倉書店（1992）
- [2] 高尾健司，山本透，雛元孝夫：Memory-Based 型  
PID コントローラの設計，計測自動制御学会論  
文集，Vol.40, No.9, 898/905（2004）
- [3] 中村岳男，金子修：1 自由度制御系データを用いた  
2 自由度制御系に対するフィードフォワード部の  
Estimated Response Iterative Tuning，第 60 回自  
動制御連合講演会（2017）
- [4] T.Yamamoto and S.L.Shah: Design and ex-  
perimental evaluation of a multivariable self-tuning  
PID controller, IEE Proceedings-Control The-  
ory and Applications, Vo. 151, No. 5, pp. 645-  
652(2004)