

P / D 制御システムの 閉ループテストに基づく P / D 調整 - E-FRIT MATLAB Program Quick Start -

E-FRIT (Extended Fictitious Reference Iterative Tuning)

version 2.0 対応

10/6, 2010

小河 守正

加納 学

重要事項

配布プログラムを使用する方は、下記項目に同意したものとします。同意できない場合は、プログラムを使用しないで下さい。

【編集】

プログラムは自由に編集していただいて結構です。

【再配布】

編集の有無にかかわらず、プログラムを再配布することは禁じます。

【成果】

本プログラム（編集したものも含む）を使用して得られた成果は、できるだけ学会等で発表して下さい。公表できない場合でも、できるだけプログラム作成者に連絡して下さい。今後の技術開発の励みにさせていただきます。

【責任】

本プログラム（編集したものも含む）を使用して生じる結果について、作成者は一切の責任を負いません。なお、お礼は拒みません。

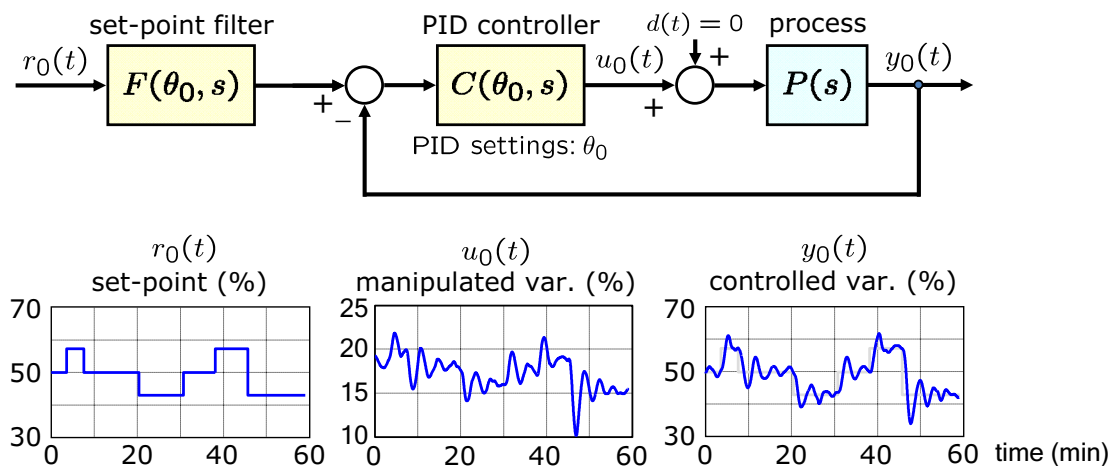
【連絡先】 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 准教授 加納学
<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/>

内 容

- E-FRIT
 - 原理
 - アルゴリズム
- 実用化設計
 - 時系列データ平滑化
 - 目標値応答規範モデル
 - PID パラメータ制約条件
- MATLAB Program Quick Start
 - 閉ループテストデータファイル
 - プログラム実行・調整パラメータ
 - プログラム実行結果
- ケーススタディ
 - 蒸留塔塔底液面制御
 - 組成制御
 - 重合温度制御
 - リボイラー蒸気流量制御

E-FRIT アルゴリズム

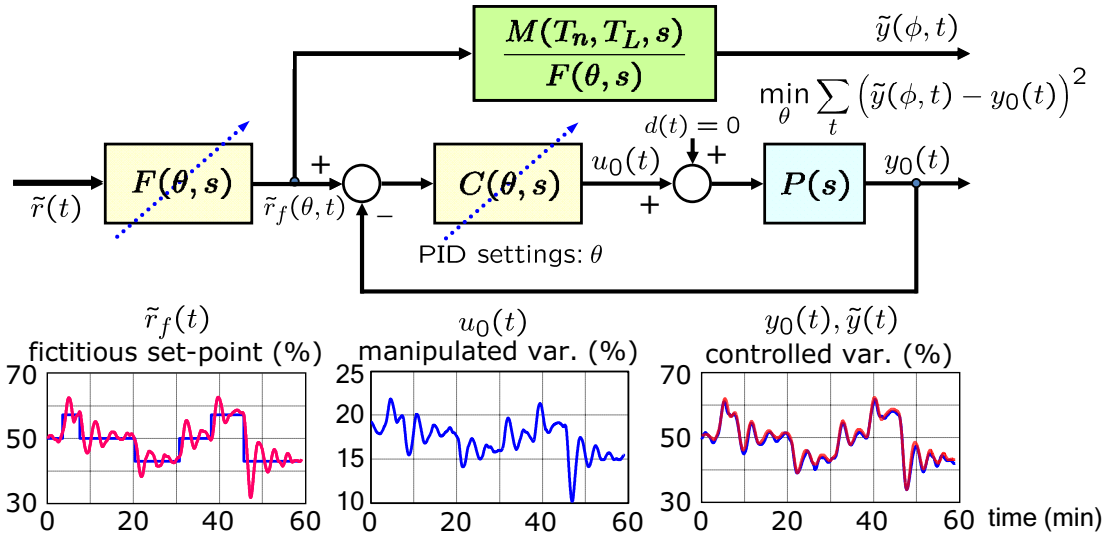
- step 1 : 閉ループ目標値変更テスト
 - ・ P/D 制御システム : 安定性は確保されているが, 制御性能に改善の余地がある.
 - ・ 閉ループテスト : 外乱の影響がない閉ループの状態において, 目標値を階段状に数回変更する. このときの目標値・操作量・制御量の時系列データ $\{r_0(t), u_0(t), y_0(t)\}$ を収集する.



E-FRIT アルゴリズム

• step 2 : 望ましい目標値応答を得るための制御量の目的関数

- 擬似目標値 : 任意の P / D 設定値 θ において, 閉ループテストの操作量と制御量応答を与える擬似目標値 $\tilde{r}_f(\theta, t)$ を求める.
- 規範モデル(望ましい目標値応答) : $M(T_n, T_L, s)$ Binomial Standard Form
- 制御量目的関数 : 擬似目標値に対する規範モデル応答 $\tilde{y}(\phi, t)$ が閉ループテストの制御量応答 $y_0(t)$ に一致すれば, P / D 制御系は規範モデルと同等である. 誤差 $\tilde{y}(\phi, t) - y_0(t)$ の 2 次形式を目的関数とする.



E-FRIT ver2.0 MATLAB

Confidential

5

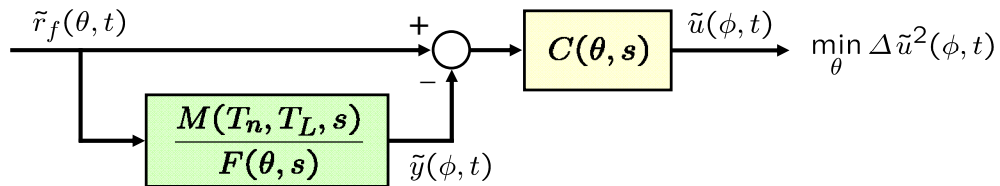
Copyright © 2010 M. Ogawa & M. Kano, All rights reserved

10/6, 2010

E-FRIT アルゴリズム

• step 3 : ロバスト性確保のため操作量変更量を抑制する目的関数

- 仮想操作量系列 : 擬似目標値に対して望ましい制御量応答を与える仮想的な操作量
- 操作量目的関数 : 仮想操作量の 1 次差分値の 2 次形式を目的関数に追加する.



• step 4 : 目的関数を合成した最適化問題を数値的に解き P / D 設定値を求値

- 最適化変数 : P / D 設定値・プロセスむだ時間 $\theta = \{K_c, T_i, T_d\}$, $\phi = \{\theta, T_L\}$
- 最適化法 : 非線形計画法 SQP (MATLAB Optimization Toolbox®, fmincon)

$$\phi^o = \arg \min_{\phi} \sum_t \left[\left(\tilde{y}(\phi, t) - y_0(t) \right)^2 + \left(\lambda f_s \Delta \tilde{u}(\phi, t) \right)^2 \right]$$

$$\text{subject to } \phi_l \leq \phi \leq \phi_u, \text{ initial guess } \phi_0 = \{\theta_0, T_L = 0\}$$

$$\tilde{r}_f(\theta, t) = C^{-1}(\theta, s) u_0(t) + y_0(t), \quad \tilde{y}(\phi, t) = \frac{M(T_n, T_L, s)}{F(\theta, s)} \tilde{r}_f(\theta, t)$$

$$\tilde{u}(\phi, t) = C(\theta, s) \left(\tilde{r}_f(\theta, t) - \tilde{y}(\phi, t) \right) = \left(1 - \frac{M(T_n, T_L, s)}{F(\theta, s)} \right) \left(u_0(t) + C(\theta, s) y_0(t) \right)$$

$$\lambda : \text{weighting parameter, } f_s : \text{scaling factor } f_s = \sqrt{V_e / V_u}$$

$$V_e = \sum_t \left(\tilde{y}(\phi_0, t) - y_0(t) \right)^2, \quad V_u = \sum_t \Delta \tilde{u}^2(\phi_0, t)$$

E-FRIT ver2.0 MATLAB QS

Confidential

6

Copyright © 2010 M. Ogawa & M. Kano, All rights reserved

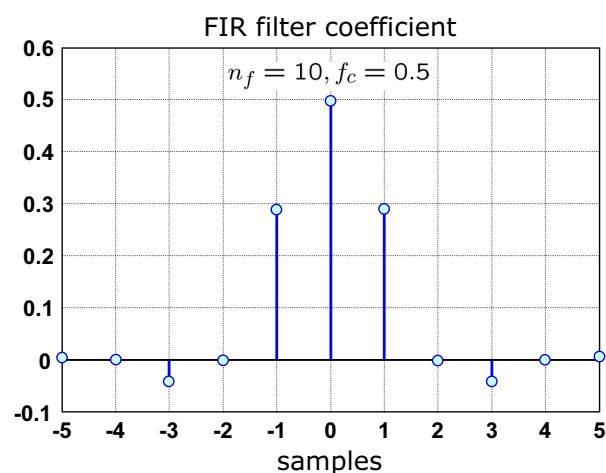
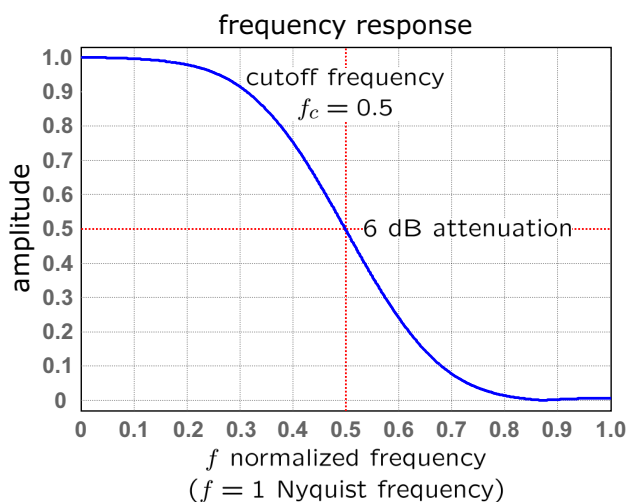
10/6, 2010

- E-FRIT
 - 原理
 - アルゴリズム
- 実用化設計
 - 時系列データ平滑化
 - 目標値応答規範モデル
 - PID パラメータ制約条件
- MATLAB Program Quick Start
 - 閉ループテストデータファイル
 - プログラム実行・調整パラメータ
 - プログラム実行結果
- ケーススタディ
 - 蒸留塔塔底液面制御
 - 組成制御
 - 重合温度制御

時系列データ平滑化

- 時系列データ平滑化：高周波ノイズ除去
 - ・ 操作量・制御量時系列：位相遅れを生じない平滑化により高周波ノイズを除去する。
 - ・ Hamming-window filter: $u(k), y(k) \xrightarrow{\text{smoothing}} u_f(k), y_f(k)$
 order: $n_f = 10$
 cutoff frequency: $f_c = 0.5 \in (0, 1)$ normalized by Nyquist frequency: F_n
 $F_n = F_s/2$; F_s : sampling frequency
- MATLAB Program Example

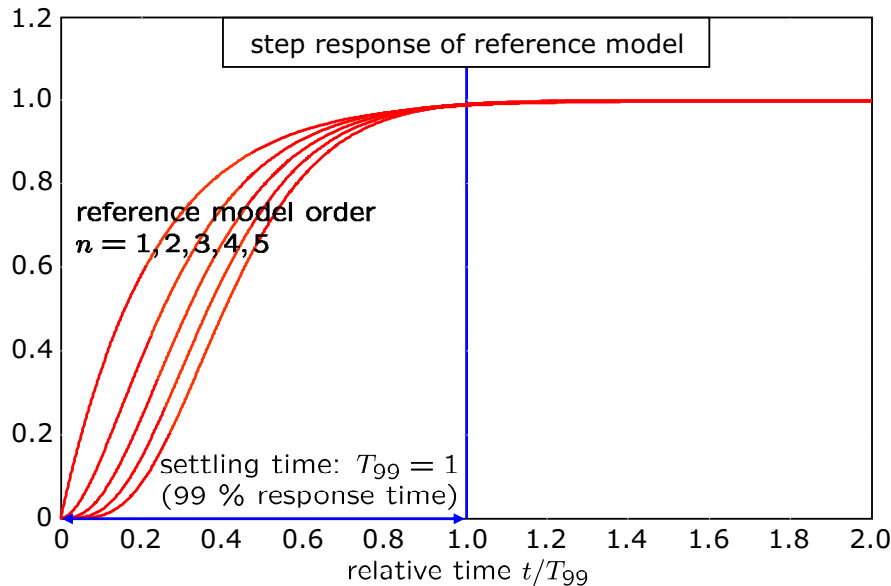

```
nf=10; fc=0.5; b=fir1(nf,fc); kw=ceil(nf/2);
for k=1:kmax; yf(k)=b*[y(k-kw) ... y(k-1) y(k) y(k+1) ... y(k+kw)]'; end;
```



規範モデル

- 規範モデル：望ましい目標値応答 $M(s) = \frac{y_r(s)}{r(s)} = \frac{1}{(1 + T_n s)^n} e^{-T_L s}$
- 調整パラメータ： $T_n \approx T_{99}/(4.4 n^{0.6}) \leftarrow T_{99} : 99\% \text{ 応答時間 (整定時間)}$

$$n = \begin{cases} p & (\text{PID, PI-D}) \\ p + 1 & (\text{I-PD}) \end{cases} \quad p: \text{プロセス相対次数}$$



E-FRIT ver2.0 MATLAB QS

Confidential

9

Copyright © 2010 M. Ogawa & M. Kano, All rights reserved

10/6, 2010

目標値応答特性：PI-D Algorithm

- 目標値応答特性 $W_c(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{F(s)C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$ プロセスの二つの主要な極とコントローラの零点が相殺するように微分時間を設定する

$$\text{PID コントローラ: } C(s) = \frac{K_c}{T_i s} (1 + T_i s + T_i T_d s^2) \approx \frac{K_c}{T_i s} D_p(s)$$

$$\text{PI-D 目標値フィルター: } F(s) = \frac{1 + T_i s}{1 + T_i s + T_i T_d s^2}$$

$$\text{プロセス: } P(s) = K_p \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s}$$

$$\begin{aligned} W_c(s) &= \frac{\frac{K_p K_c}{T_i s} (1 + T_i s) \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s}}{1 + \frac{K_p K_c}{T_i s} N_p(s) e^{-T_L s}} \\ &= \frac{1 + T_i s}{N_p(s) e^{-T_L s} + (T_i/\lambda) s} \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s} \end{aligned}$$

$\lambda \equiv K_p K_c > 1$ ($K_c = \lambda/K_p$) である。第 1 項分母のむだ時間を 1 次 Pade' 近似する。

$$\rightarrow e^{-T_L s} \approx (1 - T_L s/2)/(1 + T_L s/2)$$

プロセス零点の次数 2 以下なら、目標値応答特性の次数はプロセス相対次数に等しい。

$$\rightarrow \text{プロセス相対次数} = (\text{分母多項式 } D_p(s) \text{ 次数}) - (\text{分子多項式 } N_p(s) \text{ 次数})$$

E-FRIT ver2.0 MATLAB QS

Confidential

10

Copyright © 2010 M. Ogawa & M. Kano, All rights reserved

10/6, 2010

目標値応答特性：I-PD Algorithm

- 目標値応答特性 $W_c(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{F(s)C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$ プロセスの二つの主要な極とコントローラの零点が相殺するように微分時間を設定する

$$\text{PID コントローラ: } C(s) = \frac{K_c}{T_i s} (1 + T_i s + T_i T_d s^2) \approx \frac{K_c}{T_i s} D_p(s)$$

$$\text{I-PD 目標値フィルター: } F(s) = \frac{1}{1 + T_i s + T_i T_d s^2}$$

$$\text{プロセス: } P(s) = K_p \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s}$$

$$\begin{aligned} W_c(s) &= \frac{\frac{K_p K_c}{T_i s}}{1 + \frac{K_p K_c}{T_i s} N_p(s) e^{-T_L s}} \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s} \\ &= \frac{1}{N_p(s) e^{-T_L s} + (T_i/\lambda) s} \frac{N_p(s)}{D_p(s)} e^{-T_L s} \end{aligned}$$

$\lambda \equiv K_p K_c > 1$ ($K_c = \lambda/K_p$) である。第 1 項分母のむだ時間を 1 次 Pade' 近似する。

$$\rightarrow e^{-T_L s} \approx (1 - T_L s/2)/(1 + T_L s/2)$$

プロセス零点の次数 2 以下なら、目標値応答特性の次数はプロセス相対次数+1 になる。

$$\rightarrow \text{プロセス相対次数} = (\text{分母多項式 } D_p(s) \text{ 次数}) - (\text{分子多項式 } N_p(s) \text{ 次数})$$

P / Dパラメータ制約条件

• 上下限值制約

・最適化変数：P / D設定値・プロセスむだ時間の上下限值を下表のように定める。

最適化変数		unit	lower	upper
P / D設定値：比例ゲイン	K_c	%/%	0.1	50
積分時間	T_i	min	0.1	150
微分時間	T_d	min	0	30
プロセスむだ時間	T_L	min	0	10

• 不等式制約

・P / D調整の経験則に倣い、微分時間は積分時間の α (e.g. $\alpha=1/5$) 以下にする。

$$\frac{T_d}{T_i} \leq \alpha \Rightarrow -\alpha T_i + T_d \leq 0$$

内 容

- E-FRIT
 - 原理
 - アルゴリズム
- 実用化設計
 - 時系列データ平滑化
 - 目標値応答規範モデル
 - PID パラメータ制約条件
- MATLAB Program Quick Start
 - 閉ループテストデータファイル
 - プログラム実行・調整パラメータ
 - プログラム実行結果
- ケーススタディ
 - 蒸留塔塔底液面制御
 - 組成制御
 - 重合温度制御
 - リボイラー蒸気流量制御

閉ループテストデータファイル

- 下表の閉ループテストデータを MAT ファイル型式保存

- file name: CL_Test_Data.mat
- MATLAB Command Prompt

>> save CL_Test_Data PID_algorithm dir_rev Kc0 Ti0 Td0 gamma tau rs us ys

データ	変数名	単 位	型 式	内 容
P / D アルゴリズム	PID_algorithm	-	scalar	1=PID, 2=PI-D, 3=I-PD
正逆動作 (脚注参照)	dir_rev	-	scalar	1=direct, -1=reverse
比例ゲイン	Kc0	%/%	scalar	P / D 設定値
積分時間	Ti0	min	scalar	↓
微分時間	Td0	min	scalar	↓
微分ゲイン	gamma	-	scalar	一般に gamma=10
時系列データ収集周期	tau	min	scalar	
目標値時系列	rs	%	vector	計測レンジで正規化: 0-100 %
操作量時系列	us	%	vector	常に 0 - 100 %
制御量時系列	ys	%	vector	計測レンジで正規化: 0-100 %

理論コントローラにおける正逆動作を表す (実用コントローラはこの逆の呼称が通則である)

- direct: 制御偏差 (+) → 操作量 (+)
- reverse: 制御偏差 (+) → 操作量 (-)

プログラム実行・調整パラメータ

- EFRIT プログラム実行

- MATLAB Command Prompt

- >> **efrit**

- EFRIT 調整パラメータ : MATLAB Command Window で会話型式で入力

調整パラメータ	変数名	単 位	内 容
99 % response time	T99	min	目標値変更量に対して 99 % 応答するまでの時間
weight coefficient on squared delta-MV	lambda	-	評価関数の操作量差分値 2 乗項にかかる重み係数 lambda=1 が標準である.
upper limit of Td / Ti	alpha	-	P / D 設定値の微分時間と積分時間の比の上限値 alpha ≤ 1/5 (= 0.2) が標準である.

- EFRIT 内部パラメータ : MATLAB Program 内部で固定値としているものを下表に示す.

内部パラメータ	変数名	単 位	内 容
FIR filter order & cut-off frequency	nf fc	-	nf=10, fc=0.5 としている.
desired response order	n	-	望ましい目標値応答 : 臨界制動応答の次数 PID: n=2, PI-D: n=2, I-PD: n=3 とした.

プログラム実行結果

>> **efrit** ← 赤字 : 入力するコマンドおよびパラメータ

case of closed loop test (0 = Actual Problem, 1 = LC, 2 = AC, 3 = TC, 4 = FC) = **3**

lambda (suggested 1.0) = **1**

suggested T99 = 10 min

99 % response time T99 (min) = **10**

upper bound of Td/Ti (<= 0.2 to utilize derivative action / 0 no derivative action) = **0.2**

Local minimum possible. Constraints satisfied.

fmincon stopped because the predicted change in the objective function is less than the default value of the function tolerance and constraints were satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Active inequalities (to within options.TolCon = 1e-006):

lower upper ineqlin ineqnonlin

3

convergence time (sec) ← 最適化計算収束時間

c_time = 6.453

PID settings: Kc (%/%), Ti (min), Td (min) ← PID 設定値計算結果

Kc = 4.0114

Ti = 1.3625

Td = 0

process dead time: TL (min) ← プロセスむだ時間

TL = 0.17248

内 容

- E-FRIT
 - 原理
 - アルゴリズム
- 実用化設計
 - 時系列データ平滑化
 - 目標値応答規範モデル
 - PID パラメータ制約条件
- MATLAB Program Quick Start
 - 閉ループテストデータファイル
 - プログラム実行・調整パラメータ
 - プログラム実行結果
- ケーススタディ
 - 蒸留塔塔底液面制御
 - 組成制御
 - 重合温度制御
 - リボイラー蒸気流量制御

ケーススタディ：E-FRIT

閉ループ目標値変更テスト条件

データ	変数名	単 位	Case 1: LC	Case 2: AC	Case 3: TC	Case 4: FC
			蒸留塔液面	pH	重合温度	リボイラー蒸気
PID algorithm	PID_algorithm	-	3 (I-PD)	3 (I-PD)	2 (PI-D)	2 (PI-D)
正逆動作	dir_rev	-	-1 (Reverse)	1 (Direct)	1 (Direct)	1 (Direct)
比例ゲイン	Kc0	%/%	2.0	0.67	2.5	0.50
積分時間	Ti0	min	10	1.0	2.8	11.7
微分時間	Td0	min	0	0	0.10	0
微分ゲイン	gamma	-	10	10	10	10
データ収集周期	tau	min	1	1/60 (1 sec)	1/60 (1 sec)	1

E-FRIT 設計結果

整定時間	T99	min	40	4.0	10	15
重み係数	lambda	-	1.0	1.0	1.0	1.0
比例ゲイン	Kc	%/%	2.12 (5.7)	0.310(0.32)	4.01 (5.3)	0.815 (2.2)
積分時間	Ti	min	13.0 (12)	0.782 (1.3)	1.36 (2.3)	5.49 (9.7)
微分時間	Td	min	0 (2.3)	0 (0.35)	0 (0.25)	0 (0)
プロセスむだ時間	TL	min	0	0	0.172	0

(・)：閉ループシステム同定とモデルベース PID 設定則（小河法）による。

ケーススタディ：閉ループシステム同定

閉ループ目標値変更テスト条件

データ	変数名	単位	Case 1: LC	Case 2: AC	Case 3: TC	Case 4: FC
			蒸留塔液面	pH	重合温度	リボイラー蒸気
PID algorithm	PID_algorithm	-	3 (I-PD)	3 (I-PD)	2 (PI-D)	2 (PI-D)
正逆動作	dir_rev	-	-1 (Reverse)	1 (Direct)	1 (Direct)	1 (Direct)
比例ゲイン	Kc0	%/%	2.0	0.67	2.5	0.50
積分時間	Ti0	min	10	1.0	2.8	11.7
微分時間	Td0	min	0	0	0.10	0
微分ゲイン	gamma	-	10	10	10	10
データ収集周期	tau	min	1	1/60 (1 sec)	1/60 (1 sec)	1

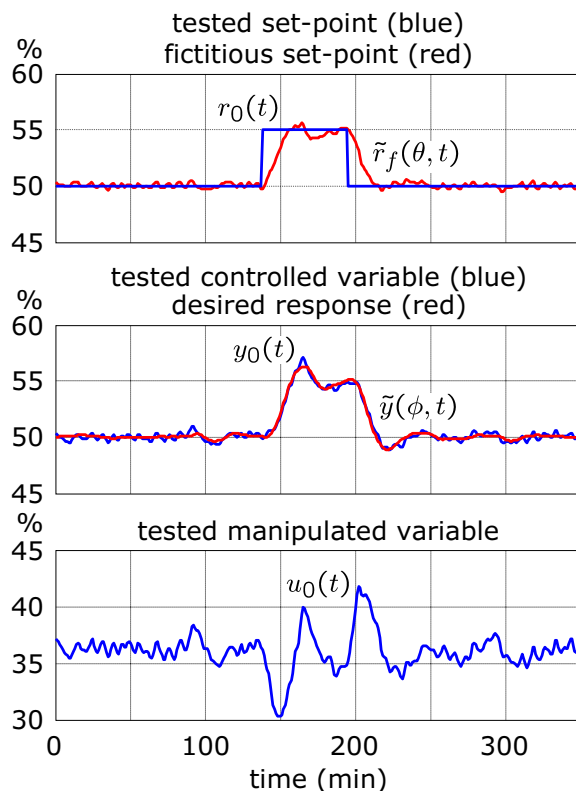
閉ループシステム同定結果

プロセス動特性モデル			積分+1次遅れ	2 次遅れ	2 次遅れ	2 次遅れ
ゲイン	K_p	%/%	-	3.69	0.0724	1.48
時定数 1	T_{p1}	min	-13.6	0.837	1.86	9.65
時定数 2	T_{p2}	min	3.83	0.837	1.86	0
むだ時間	T_L	min	0.250	0.220	0	0

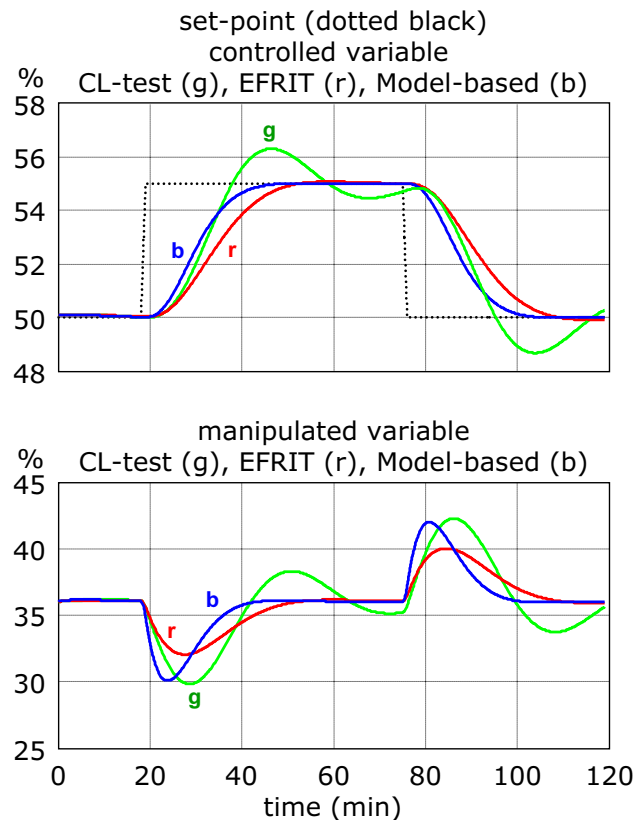
$$\text{process dynamics model: } P(s) \equiv \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_{p1}s(T_{p2}s + 1)} e^{-T_L s}, \quad P(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s + 1)(T_{p2}s + 1)} e^{-T_L s}$$

蒸留塔塔底液面制御 - 操作量がリボイラー蒸気量

Case 1: LC EFRIT Design Results

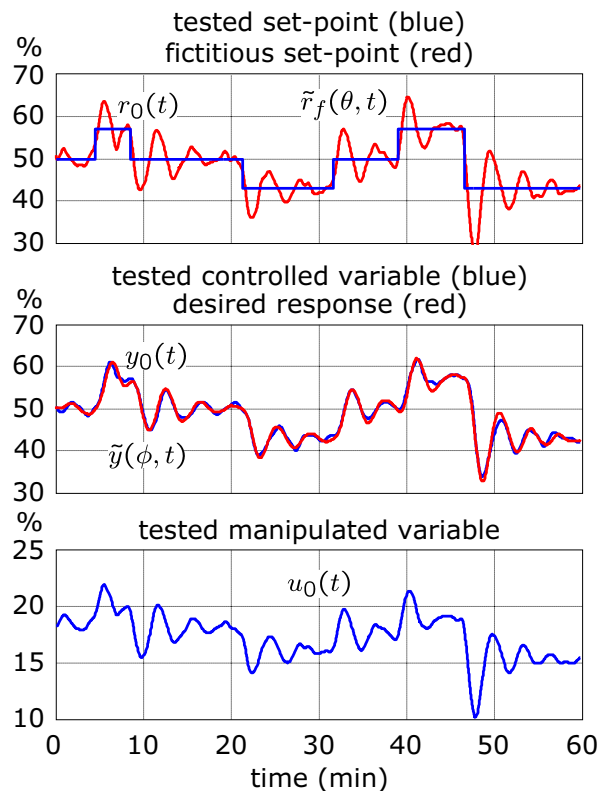


I-PD Control Simulation

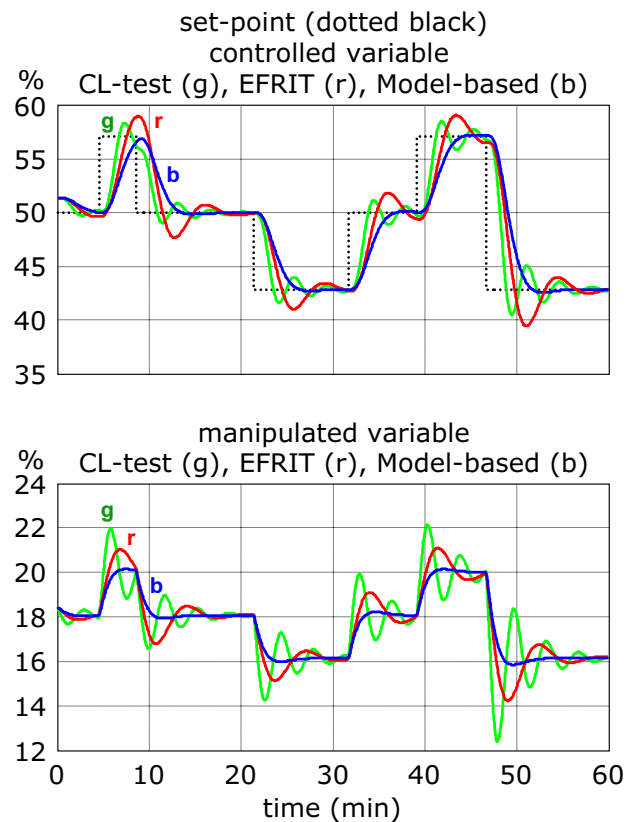


組成制御 - 応答の速い pH プロセス

Case 2: AC EFRIT Design Results

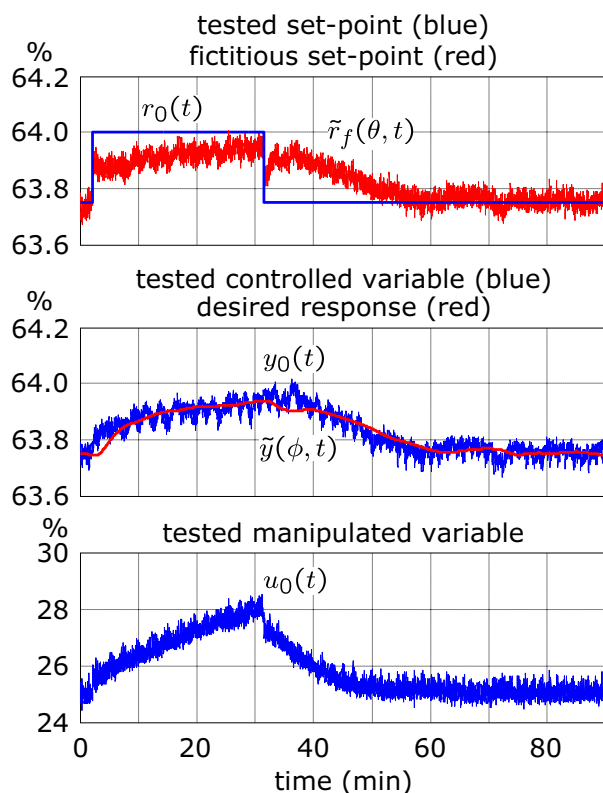


I-PD Control Simulation

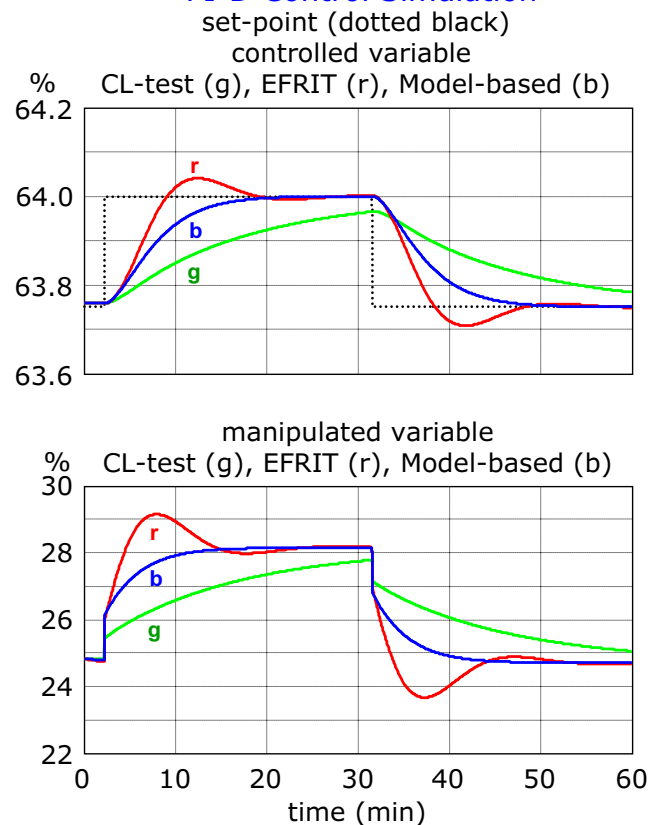


重合温度制御 - 目標値応答特性を改善したい

Case 3: TC EFRIT Design Results

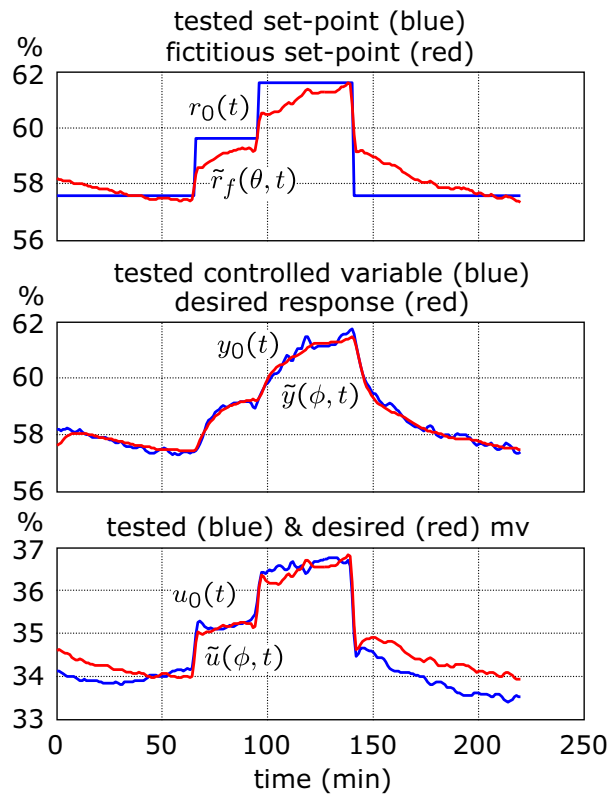


PI-D Control Simulation



リボイラー蒸気流量制御 - 凝縮水ラインに調節弁設置

Case 4: FC EFRIT Design Results



PI-D Control Simulation

