

研究メモ

運転データを用いる直接的PID制御パラメータ調整

- 拡張型FRIT法 (E-FRIT) の実用化 -

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻

プロセスシステム工学研究室

加納 学

<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/>

2009年03月初版作成

Copyright ©2009 Manabu Kano. All rights reserved.

本資料の全部または一部を無断で複写複製すること、および配布することを禁じます。

1 はじめに

PID 制御は、プロセス産業で実装されている制御方式の 90% 以上を占める制御の要であり、その適切な調整は収益向上に不可欠である [1, 2]。このため、その調整法についても長く研究が行われてきた。しかし、ひとたびプラントに目を向けると、多くの制御器が十分な制御性能を実現しないまま、再調整されることなく放置されている。平均的な化学工場（事業所）における制御ループ数は数千にもなり、経済的・人的コストのかかる調整作業を全てのループに対して実施することは難しいのがプロセス産業界の実情である。

プラント全体の制御性能を効率的に向上させるためには、ボトルネックとなっている少数の制御ループを見付け出し、それらの再調整を優先的に実施すべきである。そのためには、日常の運転データから制御性能を簡単に評価できる方法が必要であるとの認識から、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法を提案した Harris の研究 [3] を契機に、制御性能評価あるいは制御性能監視に関する研究が非常に活発に実施され [4, 5, 6, 7]、その理論的発展と産業応用事例は制御分野における代表的なサクセスストーリーとも評されている。さらに、化学プラントにおいては、制御性能が悪いと判断された場合に、その原因が制御パラメータの調整ではなく、アクチュエータである調節弁の固着である場合も多数存在したため、運転データから固着の有無を検知する方法に関する研究も大いに注目を集めてきた [8, 9, 10, 11]。これらの技術開発の結果、膨大な制御ループの中から、性能の悪い制御ループを検出し、その原因を特定することができるようになってきている。効率的に制御性能を向上させる仕組みを実現するためには、次の段階として、簡便な PID 制御パラメータ調整法の構築が鍵となる。日本の石油化学産業界においては、プロセス制御技術者が独自の手法を提案・実践し、成果をあげている [12]。ただし、この技術開発に際しては、調整作業の負担軽減、特に一般的な調整に際して必要とされるシステム同定の回避または効率化に対する現場からの要請が極めて根強いことを認識しておく必要がある。

このような要請に応える手法として、これまでに運転データから直接的に制御パラメータを調整する、Iterative Feedback Tuning (IFT)[13, 14]、Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT)[14, 15]、Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT)[16, 17] などが提案されている。これらの直接的調整法はいずれも、対象とする制御系の閉ループ伝達特性が予め定めた参照モデルの特性に近づくように制御器を調整するモデルマッチング法である。しかしながら、IFT ではオンラインの反復試験が必要とされ、VRFT では開ループ下でのデータ取得が望ましいとされるため、いずれもプロセス制御における実用的な手法とはなりえない。一方、そのような制約を受けない FRIT はより実用的な手法と言えるが、制御量の応答のみを評価して操作量の変動を考慮していない、プロセスに関する事前情報がない状態で適切な参照モデルを定めるのが難しい、などの問題が存在する。

そこで、これらの問題を克服するために、FRIT に対して、1) 操作量の変動に対するペナルティの評価関数への導入、2) 参照モデルの調整パラメータ（むだ時間など）を最適化変数とする参照モデルと制御パラメータの同時調整、3) 最適化計算への粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization;

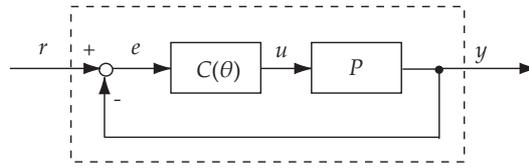


図 1 フィードバック制御系

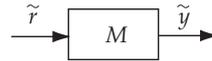


図 2 フィードバック制御系の参照モデル

PSO) の適用，からなる拡張を行った拡張型 FRIT (E-FRIT) が提案され，その PID 制御系への適用が報告されている [18] .

本報では，複数の化学プロセスの運転データを用いて，E-FRIT の実用化に向けた考察を行い，本手法がプロセス産業界での実用に足る手法であることを示す .

2 拡張型 FRIT (E-FRIT) の概要

本節では，FRIT および E-FRIT[18] の概要を述べる .

2.1 FRIT の概要

FRIT は制御系の閉ループ伝達特性が望ましい伝達特性 (参照モデル) と近くなるように制御パラメータを決定するモデルマッチング法であり，プロセスの動特性モデルを必要とせず，フィードバック制御下で得られる運転データから直接的に制御パラメータを調整することができる [16, 17] .

図 1 のフィードバック制御系を考える . $C(\theta)$ はパラメータ $\theta \in \mathfrak{R}^n$ をもつ構造の固定された制御器， $u(t), y(t) (t = 1, 2, \dots, N)$ はプロセス P の入出力， $r(t)$ は設定値信号である . 例えば，PID 制御の場合，

$$C(\theta) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (1)$$

$$\theta = (K_P, T_I, T_D) \quad (2)$$

となる . FRIT では，入出力データと参照モデルから擬似参照出力を制御パラメータの関数として立式し，実際の出力と擬似参照出力ができるだけ一致するように，制御パラメータを調整する .

具体的な調整手順を以下に示す . ただし，ある伝達関数 $G(s)$ に信号 $x(t)$ を入力して得られる出力信号の時間領域における表現 $\mathcal{L}^{-1} \{G(s)\mathcal{L}\{x(t)\}\}$ を $G(s)x(t)$ あるいは単に $Gx(t)$ と略記するものとし，特に明記しない限り，あるサンプリング間隔で取り出された離散時間の時系列データを表すとする . なお，入出力のサンプリング間隔は同じとする .

1. 初期制御パラメータ θ_0 によって制御系が安定化された状態で適当な設定値信号 $r_0(t)$ を入力し、プロセスの入出力データ $u_0(t), y_0(t)$ を取得する。
2. 図 1 において制御パラメータ $\theta \neq \theta_0$ を適用した状態で $u_0(t), y_0(t)$ を発生する擬似設定値信号 (Fictitious Reference) $\tilde{r}(\theta, t)$ を求める。

$$\tilde{r}(\theta, t) = C(\theta)^{-1}u_0(t) + y_0(t) \quad (3)$$

3. 図 2 に示すように、参照モデル M を用いて、 $\tilde{r}(\theta, t)$ に対する参照出力 $\tilde{y}(\theta, t)$ を求める。

$$\tilde{y}(\theta, t) = M\tilde{r}(\theta, t) \quad (4)$$

この擬似的な出力 $\tilde{y}(\theta, t)$ と実際の出力 $y_0(t)$ が近ければ、閉ループ系は参照モデルに近いと見なせる。

4. 次の最適化問題を解き、最適な制御パラメータ θ^* を算出する。

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} J(\theta) \quad (5)$$

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_0(t) - \tilde{y}(\theta, t))^2 \quad (6)$$

2.2 E-FRIT の概要

FRIT では制御パラメータの最適化に際して、制御量の応答のみが評価され、操作量については考慮されていない。そこで、E-FRIT では評価関数に操作量の変動 $\Delta\tilde{u}(t)$ に対するペナルティを加えることで、制御性能と同時に安定性の向上を図る。

$$J_{\text{ext}}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ (y_0(t) - \tilde{y}(\theta, t))^2 + \lambda \Delta\tilde{u}(\theta, t)^2 \right\} \quad (7)$$

$$\Delta\tilde{u}(\theta, t) = \tilde{u}(\theta, t) - \tilde{u}(\theta, t-1) \quad (8)$$

$$\tilde{u}(\theta, t) = C(\theta) (r_0(t) - M r_0(t)) \quad (9)$$

ただし、 λ は重み係数である。

また、むだ時間を含む伝達関数を参照モデルとする場合、E-FRIT では制御パラメータに加え、参照モデルのパラメータも最適化変数とすることで、制御器と参照モデルの同時最適化を行う。例えば、二項係数標準形伝達関数を用いて、参照モデル M を

$$M = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2} e^{-L_M s} \quad (10)$$

とする場合、最適化変数を θ の代わりに $\phi = (K_P, T_I, T_D, \omega_0, L_M)$ とする。これにより、プロセスに関する十分な事前情報がない状態でも適切な参照モデルを定めることが可能となる。

上述の最適化問題を解く際、FRIT では Gauss-Newton 法などの関数の勾配に基づく最適化手法が用いられるが、この場合、各最適化変数による評価関数の微分を計算する必要があるため上述

の拡張を行うのが容易ではない．そこで，E-FRIT では，最適化変数の追加を容易に行うことのできる PSO[19] による最適化が提案されている．

PSO では，粒子群が多次元解空間内を移動しながら互いに情報交換を行うことで自身の位置と速度を調整し，最適値を探索する．E-FRIT では，各粒子の位置（座標）が最適化変数 ϕ に対応する．位置と速度は各粒子がこれまでに発見した自身の最適位置 $\hat{\phi}_i$ と群れ全体の最適位置 $\hat{\phi}_G$ に基づいて調整される．

$$\phi_i(k+1) = \phi_i(k) + v_i(k) \quad (11)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + c_1 r_1 (\hat{\phi}_i - \phi_i(k)) + c_2 r_2 (\hat{\phi}_G - \phi_i(k)) \quad (12)$$

ここで， $v_i(k), \phi_i(k)$ はそれぞれ粒子 i の k 回目の更新における速度と位置を表す．また， r_1, r_2 は 0 から 1 の一様乱数， c_1, c_2 は非負の重み係数である．PSO では，評価関数の値のみを考慮して最適化が行われるため，上述の拡張を容易に行うことができる．

3 E-FRIT の実用化に向けた考察

E-FRIT[18] は，プロセス産業における FRIT の実用化を目指して提案されたものであるが，参照モデルや重み係数 λ の設定について必ずしも十分な指針が与えられていない．本節では，様々な実プラントデータに E-FRIT を適用した経験をふまえて，E-FRIT の実用化に向けた指針を示す．

3.1 参照モデルの設定

直接的調整法を有効に機能させるためには参照モデルを適切に設定する必要がある．本節では化学プロセスを制御対象とする場合の参照モデルの設定方法について述べる．田坂ら [18] は参照モデルのパラメータ ω_0 を最適化変数として制御パラメータと共に自動調整する手法を提案しているが，この手法では目標応答として実現が容易な遅い応答が導出される傾向があり，制御性能の向上を目指す上で望ましくない．そこで本報では，運転データの立ち上がり速さに基づいた参照モデルの設定方法を提案する．また，これまで不明確であった標準形伝達関数の型および次数の選定指針を与える．

3.1.1 標準形伝達関数

参照モデルを伝達関数で与える場合，その選択肢は無限に存在するため，ここでは標準形の伝達関数を採用し，そのパラメータを調整して使用することとする．標準形伝達関数としては，二項係数標準形，バターワース標準形などが一般的であるが，振動を嫌うプロセス制御においては二項係数標準形を選択するのが妥当と考えられる [20]．次式に二項係数標準形の一般形を示す．ただし，

ω_0 は応答の速さを表すパラメータである．

$$M = \frac{\omega_0^n}{s^n + {}_n C_{n-1} \omega_0 s^{n-1} + \dots + {}_n C_1 \omega_0^{n-1} s + \omega_0^n} = \frac{1}{\sum_{k=0}^n {}_n C_k \omega_0^{-k} s^k} \quad (13)$$

なお，E-FRIT の適用に際しては，この二項係数標準形伝達関数にむだ時間を付加したものを参照モデルとして用いる．

3.1.2 参照モデルの次数

化学プロセス制御の場合，対象プロセスの多くは高々 2 次遅れまでの伝達関数で十分近似できるため，閉ループ応答も 4 次程度で十分表現可能である．経験的には初期設定では 4 次の参照モデルが適当であると考えられる．これは，遅れを持つ高次のプロセスを 1 次遅れなどの低次のモデルにマッチングさせようとするとき，応答を急がせるために不安定化の原因となるのに対し，その逆については比較的容易に実現されるためである．

3.1.3 パラメータ ω_0

参照モデルのパラメータ ω_0 は，制御目的に応じて事前に適切に設定しておくことが望ましい．しかし，プロセスの動特性を無視した設定を行うと，不安定化や制御性能悪化を引き起こす可能性がある．ここでは，取得した運転データから適切なパラメータを決定する方法を提案する．

いま，二項係数標準形を用いる場合，プロセス制御において重要となる低周波数領域の応答を主として規定しているのは，分母の定数項 1 および s の 1 次項の係数 ${}_n C_1 \omega_0^{-1} = n \omega_0^{-1} \equiv \tau$ である．ここで， τ は閉ループ応答の立ち上がり時間の目安となり，ステップ状設定値変更を行う場合，次数に関わらず 70% 立ち上がるのに経過時間約 1.2τ (誤差 $\pm 2\%$) を要する．いま，ステップ状設定値変更実施時の運転データが得られているとすると，設定値変更時に出力が 70% 立ち上がるのに要した時間を $t_{70\%}$ とし， $\tau = t_{70\%}/1.2$ のとき目標応答はデータ取得時と同等の立ち上がり速さになる．このとき，参照モデルのパラメータ ω_0 は

$$\omega_0 = \frac{n}{\tau} = \frac{1.2n}{t_{70\%}} \quad (14)$$

から求めることができる．実用上は，ステップ状設定値変更実施時の運転データおよび $t_{70\%}$ の値を参考にして， τ あるいは ω_0 を調整すればよい．

3.2 重み係数 λ

前節の枠組みで参照モデルを定めた場合，参照応答を無理なく実現できる可能性は高くなるため，通常は重み係数 λ は 0 として良い．しかし，速い応答を目標とする場合は，応答が発散する可能性も生じる．そのため， $\lambda = 0.01$ 程度の小さな値で設定しておくとき，参照モデルが適切な場合はマッチングへの影響は限定的となり，かつ，参照応答が不適切な場合に応答が発散する可能性を低

減することができる．経験上，操作量と制御量に 0~100% のレンジに換算された数値が使用されている場合には λ は 0.01 で良い．

このように重み係数 λ を事前に設定できると，応答の速さを規定するパラメータ ω_0 のみを与えれば，E-FRIT によって PID 制御パラメータを自動調整できる．これは，内部モデル制御 (IMC) の枠組みにおいて，PID 制御パラメータの調整がフィルタ時定数という 1 パラメータの調整に落とし込まれるため，調整の見通しが極めて良くなるのと同様の効果がある．

4 ケーススタディ

本節では上記の設定の下，E-FRIT の実データへの適用を行い，本手法が実用に足る手法であることを示す．

4.1 共通設定

フィードバック制御がオートモードにある制御ループを対象として，設定値変更を実施した期間の入出力データを取得した．このときの制御パラメータを，初期制御パラメータとする．なお，サンプリング間隔 T は 1 min である．次に，取得したデータに前処理を行う．まず，設定値変更時以外のデータを削除し，その後，ウェーブレットフィルタを用いてノイズ除去を行う．このとき，マザーウェーブレットには Daubechies4 を用いる．以上の前処理を施したデータに対して，E-FRIT を適用する．なお，今回検討対象とした制御器はすべて I-PD 制御器である．

E-FRIT の設定パラメータは次の通りである．PSO の粒子数 $I = 100$ ，最大反復回数 $K = 10$ ，閾値 $\delta = 10^{-4}$ とする．最適化変数には上下限を設け， $0 \leq K_P [\%/ \%] \leq 10$ (逆動作の場合は $-10 \leq K_P [\%/ \%] \leq 0$)， $0 \leq T_I [\text{min}] \leq 50$ ， $0 \leq T_D [\text{min}] \leq 20$ ， $0 \leq L_M [\text{min}] \leq 5$ とする．参照モデルには 4 次の二項係数標準形を用いるものとし，立ち上がりの速さ τ はデータ取得時と同等の速さの参照軌道を定める値とその 80% 値および 200% 値の三通りで設定を行った．また，重み係数は $\lambda = 0.01$ で固定した．

4.2 液面制御 1

対象とするデータ LC-1 は蒸留塔の塔底液面制御の入出力データで，入力はりボイラースチーム流量，出力は塔底液レベルである．入出力データを図 3 に示す．

別途実施された検討によって，対象プロセスの伝達関数は次式で近似されることがわかっている．

$$P = \frac{y(s)}{u(s)} \simeq -\frac{1}{T_S s(1 + T_P s)} e^{-L_P s} \quad (15)$$

$$T_S = 13 \text{ min}, T_P = 2.1 \text{ min}, L_P = 1.0 \text{ min}$$

ただし，この伝達関数モデルは制御パラメータの調整には使用せず，調整結果の検証にのみ用いる．

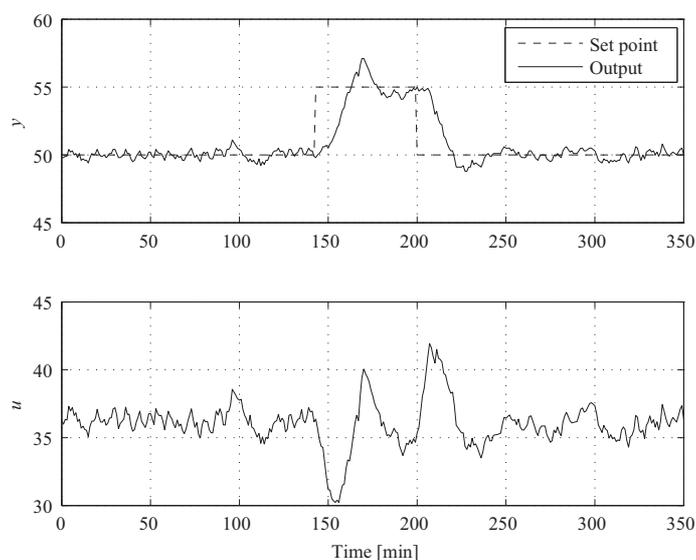


図3 入出力データ (LC-1)

取得したデータを用いて、E-FRIT による制御パラメータの算出を行った。立ち上がりの速さ τ はデータ取得時と同等の速さの参照軌道を定める 10 min とその 80% 値 (8 min) および 200% 値 (20 min) の三通りで設定した。調整した制御パラメータを表 1 に示す。 τ を大きくするに従って、比例ゲイン K_P は小さく、積分時間 T_I は大きくなっており、振動を抑えた弱い制御になっていることがわかる。

制御性能を検証するため、調整後の制御パラメータを用いた I-PD 制御系に、データ取得時と同じ設定値変更試験を実施した。ただし、Eq. (15) をプロセスと見立てている。検証結果を図 4 に示す。この結果から、E-FRIT による調整を行うことで、制御性能が改善されることが確認できる。また、 τ をより短く設定することで速い応答を、長く設定することで制御量および操作量の変動を抑えた運転が実現できることも確認できる。

さらに、均流液面制御では微分動作を用いることなく PI 制御を行うのが一般的であり、本対象でも均流液面制御が求められているため、上記の条件下で PI 制御器の調整を行った。調整した制御パラメータを表 2 に示す。検証結果は省略するが、PI 制御の場合でも PID 制御の場合と同様、良好な制御性能が実現できることが確認された。

4.3 液面制御 2, 3

同様の検証を別のデータに対しても行った。適用する LC-2 と LC-3 のデータはともに液レベル制御の入出力データである。また、別途実施された検討によって、対象プロセスの伝達関数は次式

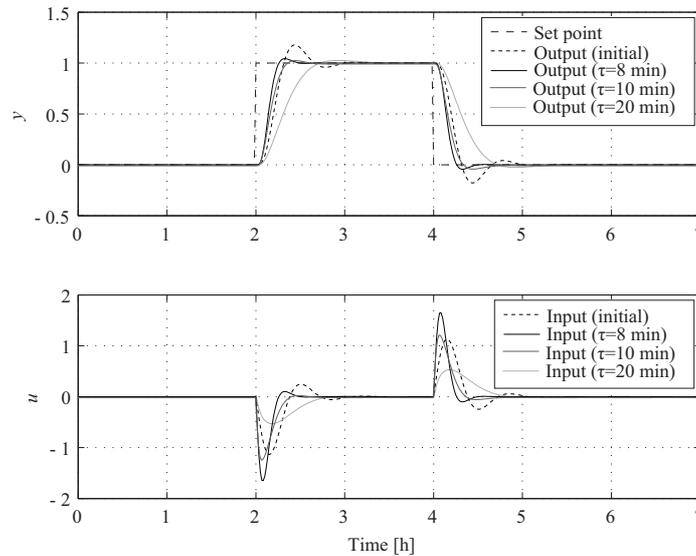


図4 E-FRIT で調整した I-PD コントローラによる制御結果 (LC-1)

で近似されることがわかっている。

$$P = \frac{y(s)}{u(s)} \simeq \frac{K}{s} \quad (16)$$

$$\text{LC-2} : K = -0.42 \text{ h}^{-1}$$

$$\text{LC-3} : K = 0.75 \text{ h}^{-1}$$

ただし，LC-1 と同様，この伝達関数モデルは制御パラメータの調整には使用せず，調整結果の検証にのみ用いる。

取得したデータを用いて，E-FRIT による制御パラメータの算出を行った．立ち上がりの速さ τ は LC-2, LC-3 とともにデータ取得時と同等の速さの参照軌道を定める 25 min とその 80% 値 (20 min) および 200% 値 (50 min) の三通りで設定した．LC-2 と LC-3 の入出力データおよび検証結果を Figs. 5, 6 および Figs. 7, 8 に示す．ここで，Eq. (16) をプロセスと見立てている．また，制御パラメータの調整結果を表 1 に示す．これらの結果から，LC-2, LC-3 とともに振動が低減され良好な制御が実現されていることがわかる．LC-1 のデータとは異なり， τ を短くしても応答速度の上昇はあまり見られなかったが，これは初期状態で既に強めの制御が行われていたためであると考えられる．逆に，LC-2 の $\tau = 20 \text{ min}$ では， K_P が $\tau = 25 \text{ min}$ の場合よりも小さくなるという直感に反した結果が得られた．これは， $\tau = 20 \text{ min}$ では性急な参照軌道が設定されていることから操作量の変動が大きくなり，ペナルティ項が制御を弱めるよう働いた結果， K_P が小さくなったものと考えられる．実際，LC-2 で $\tau = 20 \text{ min}$ のときに $\lambda = 0$ として調整した制御器では入出力が発散することが確認されており，ペナルティ項の効果が確認できる．なお，本ケーススタディにおいては，むだ時間 L_M の最適値がすべて 0 となった．これは，対象プロセスのむだ時間が比較的短かったためであると考えられる．

表 1 E-FRIT 適用結果 (I-PD 制御)

		K_P [%/%]	T_I [min]	T_D [min]	L_M [min]
LC-1	initial	2.00	10.00	0.00	–
	$\tau = 8$ min	5.01	8.32	1.40	0.00
	$\tau = 10$ min	4.89	9.97	2.09	0.00
	$\tau = 20$ min	2.43	18.77	3.04	0.00
LC-2	initial	3.33	8.33	0.00	–
	$\tau = 20$ min	8.05	18.72	3.47	0.00
	$\tau = 25$ min	8.24	21.75	5.61	0.00
	$\tau = 50$ min	6.25	35.21	16.0	0.00
LC-3	initial	1.43	13.33	5.00	–
	$\tau = 20$ min	9.11	20.01	3.77	0.00
	$\tau = 25$ min	8.79	25.19	4.00	0.00
	$\tau = 50$ min	8.71	45.35	13.49	0.00

さらに，上記の条件下で PI 制御器の調整を行った結果を表 2 に示す．初期制御パラメータと E-FRIT で調整した制御パラメータとを比較すると，初期制御パラメータでは，比例ゲイン K_P と積分時間 T_I が共に非常に小さいことがわかる．これは，現場において，積分時間が短すぎるために発生した制御応答の振動を，比例ゲインを小さくすることによって抑制しようとした結果だと推測される．制御応答の振動を低減するために比例ゲインを小さく調整することは，PID 調整の実務では常套手段であるが，対象プロセスが積分要素を含む液レベル制御系においては，この調整指針は必ずしも有効ではない．実際，制御性能が悪く，制御応答が振動的になっている制御ループの多くが液レベル制御ループであり，その主たる原因は過度に短い積分時間を設定していることだと指摘がなされている [21]．本報の検討結果は，この指摘を裏付けるものであり，また，そのような制御ループの再調整における E-FRIT の有効性を示すものでもある．

本節のケーススタディにより，運転データから妥当な参照モデルを設定し，前節で示した指針に従って E-FRIT を適用することによって，良好な制御器調整が行えることが示された．

5 結言

本報では，複数の化学プロセスの運転データを用いて，拡張型 FRIT 法の実用化に向けた考察を行った．その結果，実用上は，参照モデルとして 4 次の二項係数標準形伝達関数を採用し，ステップ状設定値変更時の運転データからパラメータ ω_0 を設定すると共に，むだ時間 L_M を制御パラメータと共に最適化すればよいこと，および，重み係数 λ は 0.01 で固定すればよいことが確認

表 2 E-FRIT 適用結果 (PI 制御)

		K_P	T_I	L_M
		[%/ %]	[min]	[min]
LC-1	initial	2.00	10.00	–
	$\tau = 8$ min	2.60	12.76	0.00
	$\tau = 10$ min	2.43	13.72	0.00
	$\tau = 20$ min	1.71	20.00	0.00
LC-2	initial	3.33	8.33	–
	$\tau = 20$ min	5.86	19.27	0.00
	$\tau = 25$ min	5.32	23.58	0.00
	$\tau = 50$ min	3.00	38.91	0.00
LC-3	initial	1.43	13.33	–
	$\tau = 20$ min	7.02	21.25	0.00
	$\tau = 25$ min	6.60	26.00	0.00
	$\tau = 50$ min	3.83	49.50	0.00

された。これらの指針に従って複数の化学プロセスの運転データに拡張型 FRIT 法を適用した結果、良好な制御結果が実現された。つまり、拡張型 FRIT 法および提案する指針の有用性が確認された。

今後は、実プラントでの検証を実施すると共に、液レベル制御に限らず、流量、温度、圧力など特性の異なる様々な制御ループを対象として、拡張型 FRIT 法の有効性を検証してゆく予定である。

参考文献

- [1] M. Kano and M. Ogawa: Practice and Challenges in Chemical Process Control Applications in Japan, *IFAC World Congress*, Seoul, Korea, July 6–11, 10608/10613 (2008)
- [2] 小河, 加納: 化学プロセス制御技術者の実践と挑戦 - 何をしてきたのか, 何をすべきか, システム/制御/情報, **52**, 262/269 (2008)
- [3] T. Harris: Assessment of Closed Loop Performance, *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, 856/861 (1989)
- [4] S. J. Qin: Control Performance Monitoring — A Review and Assessment, *Comput. Chem. Eng.*, **23**, 173/186 (1998)
- [5] T. J. Harris, C. T. Seppala and L. D. Desborough: A Review of Performance Monitoring and Assessment Techniques for Univariate and Multivariate Control Systems, *J. Proc. Cont.*, **9**, 1/17 (1999)

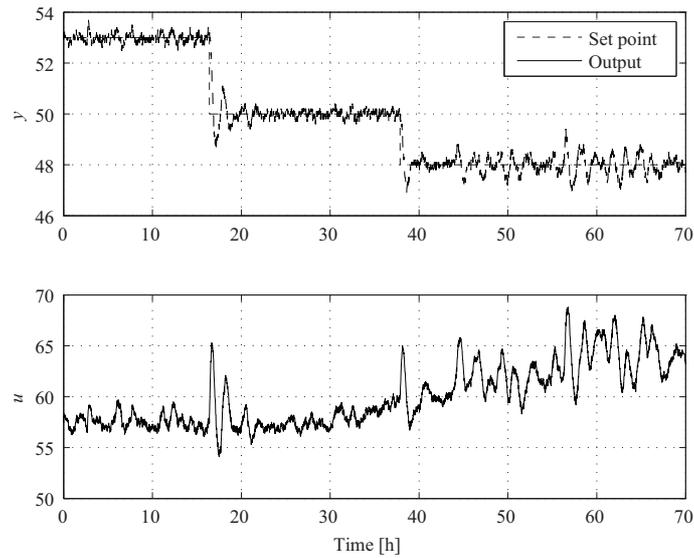


図 5 入出力データ (LC-2)

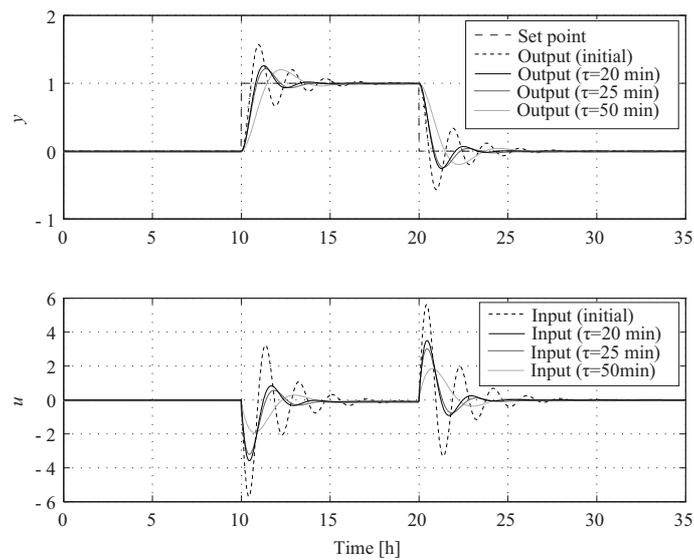


図 6 E-FRIT で調整した I-PD コントローラによる制御結果 (LC-2)

- [6] B. Huang and S. L. Shah: *Performance Assessment of Control Loops: Theory and Applications*, Springer-Verlag London (1999)
- [7] 加納, 山下: プロセス制御系の制御性能評価と監視, 計測と制御, 44, 125/129 (2005)
- [8] 総田, 大塚, 長坂, 香川: 空気圧式調節弁の動作特性診断に関する実験的研究, 計測自動制御学会論文集, 35, 594/599 (1999)
- [9] A. Horch: Condition Monitoring of Control Loops, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2000).

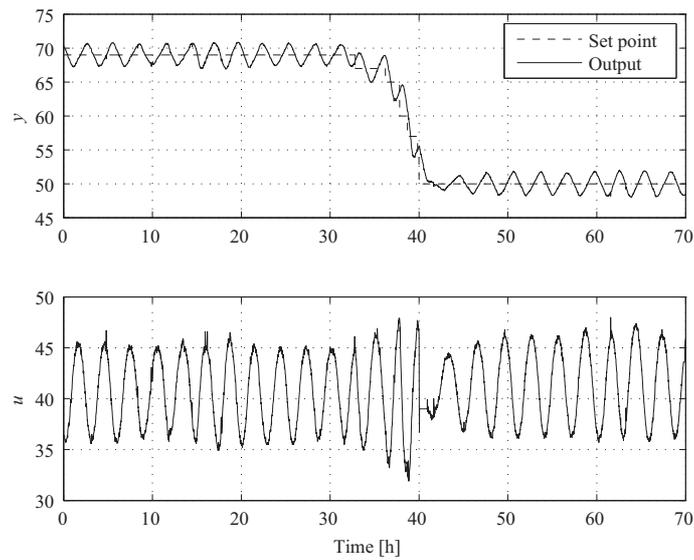


図7 入出力データ (LC-3)

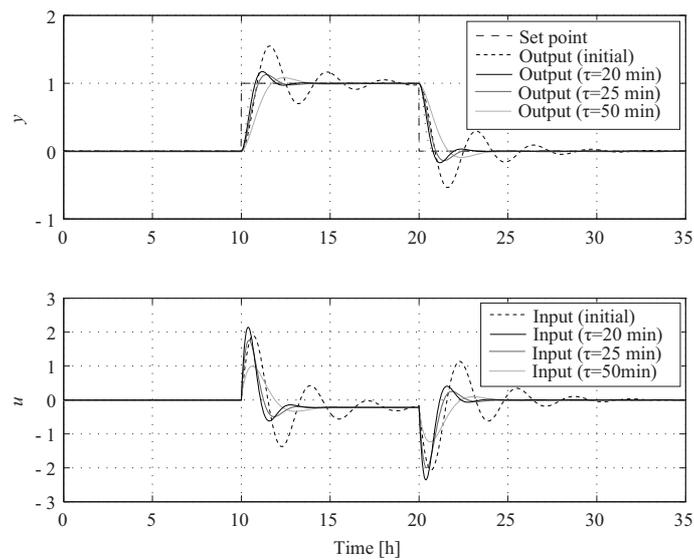


図8 E-FRIT で調整した I-PD コントローラによる制御結果 (LC-3)

- [10] 丸田, 加納, 久下本, 清水: 空気圧式調節弁固着現象のモデル化と固着検出法の開発, 計測自動制御学会論文集, **40**, 825/833 (2004)
- [11] Y. Yamashita: An Automatic Method for Detection of Valve Stiction in Process Control Loops, Control Engineering Practice, **14**, 503/510 (2006)
- [12] 藤井, 大寶, 山本: 石油・化学プロセスにおける PID 制御の新しい展開 — 「評価」と「設計」を統合するアプローチ, システム/制御/情報, **52**, 270/277 (2008)
- [13] H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin: Iterative Feedback Tuning:

- Theory and Applications, *IEEE Control Systems Magazine*, **18**, 26/41 (1998)
- [14] 中本: 実験データに基づく PID パラメータの直接計算, システム/制御/情報, **50**, 447/452 (2006)
- [15] M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi: Virtual Reference Feedback Tuning: a Direct Method for the Design of Feedback Controllers, *Automatica*, **38**, 1337/1346 (2002)
- [16] 相馬, 金子, 藤井: 一回の実験データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ—fictitious reference iterative tuning の提案, システム制御情報学会論文誌, **17**, 528/536 (2004)
- [17] O. Kaneko, S. Soma, and T. Fujii: Fictitious Reference Iterative Tuning in the Two-Degree of Freedom Control Scheme and its Application to a Facile Closed Loop System Identification, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, **42**, 17/25 (2006)
- [18] 田坂, 加納, 小河, 増田, 山本: 閉ループデータに基づく直接的 PID 調整とその不安定プロセスへの適用, システム制御情報学会論文誌, accepted.
- [19] J. Kennedy and R. Eberhart: Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE the International Conference on Neural Networks*, 1942/1948 (1995)
- [20] 小河, 片山: 操作量制約を考慮した I-PD コントローラのロバスト調整方法, 計測自動制御学会論文集, **34**, 674/681 (1998)
- [21] 小河, 加納, 橋本: ギャップ付き IP コントローラを用いた均流液面制御の設計法, 化学工学論文集, **24**, 259/265 (1998)