

モデル構築を必要としないPID調整: E-FRITの開発と石油化学産業での活用事例

京都大学 加納 学

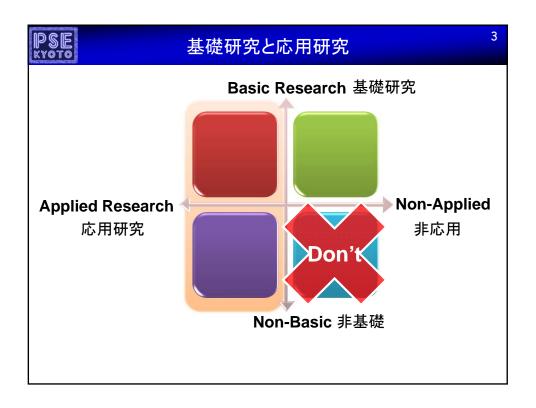
Division of Process Control & Process Systems Engineering Department of Chemical Engineering, Kyoto University

manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp
http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/

PSE

JSPS PSE143 WS27

- E-FRIT(イーフリット)の開発は、 日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会 Workshop No.27「プロセス制御技術」 の活動の一部として行われました。
- 設置期間: 2007-2009年 産側委員 31名 + 学側委員 13名
- 目指したもの(提案説明より)
 - 国内のプロセス制御技術者が集まり意見交換を行う重要な場として広く認知されるよう活発に運営する.
 - 産学連携により、産業界に貢献できるプロセス制御技術の開発を目指し、参加者がその成果を享受できるようにする。



PSE KYOTO

基礎研究と応用研究

4

- 基礎研究とはブレークスルーを生み出す研究である. ブレークスルーの対立概念はインクリメンタルである. これを「非基礎」といおう.
- 応用研究とは、人類の持つ知見を人類にとって有用な知見に変換する研究である。応用の対立概念はしたがって「非応用」である。当然のことながら、応用研究の中にも基礎研究は存在し、逆も真である。
- 我々は第Ⅳ象限の研究を行わないこととしよう。

「国立環境研究所のこれから」, 市川惇信, 1992



PSE kyoto

有用性へのこだわり

5

- 知識ある者は理解されるよう努力する責任がある.
- 素人は専門家を理解するために努力すべきである、あるいは専門家は専門家と通じれば十分であるなどとすることは、 野卑な傲慢である。
- 大学や研究所の内部においてさえ、残念ながら今日珍しくないそのような風潮は、彼ら専門家自身を無益な存在とし、彼らの知識を学識から卑しむべき衒学に貶めるものである。貢献に責任をもつためには、自らの産出物すなわち知識の有用性に強い関心をもたなければならない。



「経営者の条件」, P.F. Drucker

PSE kyoto

Outline

- 化学プロセス制御の現状, 研究の背景と目的
- 直接的PID調整法
- E-FRIT
- 産業応用: 出光興産&昭和電工
- まとめ

SE voto	化学プロセス制御の現状							
layer	classification	technique / tool	application	ratio				
2	Modern Advanced Control Conventional Advanced Control	DMCplus™ + Linear MPC Non-linear MPC LQI with Preview Action 2DOF IMC with Kalman Filter Feed-forward Control Ratio Control Valve Position Control Selective & Override Control Analyzer Feedback Control	58 + 6 2 2 1 >500	10				
1	PID Control	Time-delay Compensation Robust PID Tuning Flow Averaging Level Control Rule of Thumb Based Tuning	5,006	100				
· ·								

control methodology	level of application				-
control methodology	A	В	С	D	
conventional advanced control					A: standardized and always applied if necessar
feedforward control	3	9	6	2	B: applied, but not standardized.
override control	2	6	5	7	C: applied sometimes.
valve position control	4	5	6	5	D: not applied.
sampled-data control	1	5	9	5	
dead-time compensation	0	2	11	7	
gain-scheduled PID control	1	1	9	9	
model-based control					
internal model control	2	5	3	9	
linear model predictive control	4	6	6	3	
nonlinear model predictive control	0	1	2	16	
adaptive control					
self-tuning PID control	0	1	1	17	
model reference adaptive control	0	0	1	18	
modern-control-theory-based control					
state feedback control	0	0	4	15	
preview control	0	0	1	18	
H_{∞} control	0	0	0	19	
knowledge-based control					
fuzzy control	0	0	5	14	
artificial-intelligence-based control	0	0	2	17	
neural-network-based control	0	0	4	15	
statistical process control	0	1	3	15	
soft-sensor	3	7	4	5	Kano and Ogawa, J. Proc. Cont. (2010

PSE kyoto

化学プロセス制御の現状認識

9

- プロセス制御技術は大きな経済的利益の創出を可能にする。
- 超安定プラントの実現に向けて、PID制御(I-PD制御なども 含む)に最大限の性能を発揮させることが重要である。 (一事業所内に約5000ループある)
- 古典的高度制御(バルブポジション制御など)が有効な対象は多い。それにもかかわらず適用数は伸びていない。
- モデル予測制御は、大規模プロセスの経済運転を実現する 多変数制御の標準的な技法として定着した。現在はその保 守が問題となっている。

Kano and Ogawa, J. Proc. Cont. (2010)

PSE kyoto

本研究の背景と目的

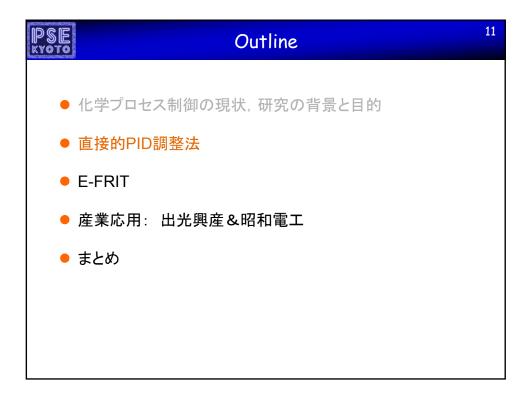
10

背景

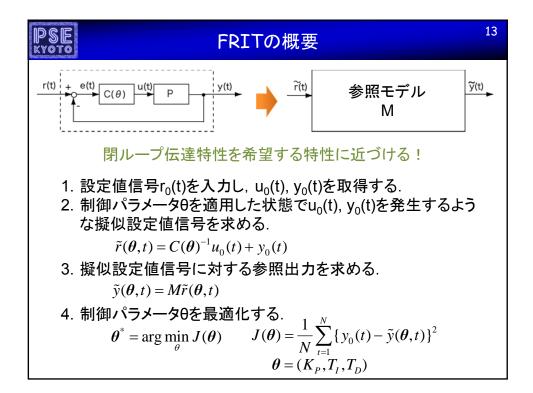
- PID制御パラメータの調整には、対象プロセスの動特性モデルと何らかの調整則を用いるのが一般的である。
- 化学プラントには数千もの制御ループが存在するため、それらの調整作業の負担軽減、特にシステム同定の回避または効率化に対する現場からの要請は極めて根強い。

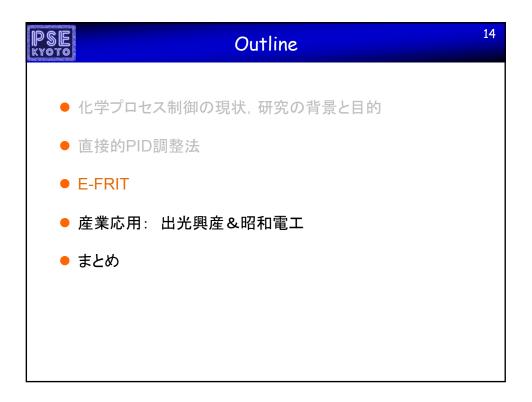
目的

- 運転データから直接的にPID制御パラメータを調整できる方法を開発する. ただし.
 - 実験の繰り返しは無理!(許されない)
 - 開ループ実験は無理!(不安定プロセスへ適用したい)
 - 激しい操作は厳禁!(安心が大切)



既存の直接的PID調整法 Iterative Feedback Tuning (IFT) オンラインの反復試験が必要 → 使えない... Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) 開ループ下でのデータ取得を推奨 → 使えない... Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) IFTとVRFTの問題点を克服している → 良さそう♪





PSE

拡張型FRITの提案

15

FRITの問題点?

- 事前に適切な参照モデルを定めるのが難しい.
- 制御変数の応答のみを評価している。



E-FRITの特徴

- 参照モデルの調整パラメータ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
- 操作変数の変動に対するペナルティの評価関数への導入

Extended Fictitious Reference Iterative Tuning

PSE

拡張1:参照モデルの最適化

16

プロセスに関する十分な情報がない状態で参照モデルを適切 に定めるのは容易でないため、参照モデルを予め固定するの ではなく、最適化する枠組みが有効である.

参照モデルの調整パラメータ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

コントローラ

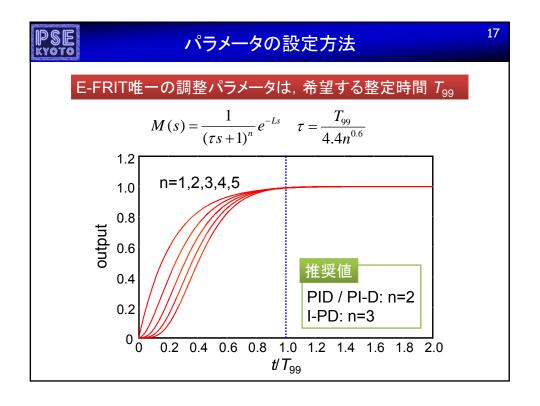
コントローフ 参照モナル
$$C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \qquad M(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n} e^{-Ls}$$

$$M(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n} e^{-Ls}$$

最適化変数 $\theta = (K_P, T_I, T_D)$ $\phi = (K_P, T_I, T_D, L)$



より無理のない参照モデルが選択される. なお. n は事前に 設定し, τ は希望する整定時間に基づいて決める.



PSE KYOTO

拡張2:操作変数のペナルティ

18

プロセスに関する十分な情報がない状態で適切な参照モデルを定めるのは容易でなく、強引にマッチングさせると、操作変数の動きが鋭敏になり、プロセスへの負担が大きくなる.

操作変数の変動に対するペナルティの評価関数への導入

$$J(\phi) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} \left\{ \left(y_0(t) - \tilde{y}(\phi, t) \right)^2 + \lambda f_s \Delta \tilde{u}(\phi, t)^2 \right\}$$

推奨値 λ=1

$$\begin{split} \Delta \tilde{u}(\phi,t) &= \tilde{u}(\phi,t) - \tilde{u}(\phi,t-\Delta t) \\ \tilde{u}(\phi,t) &= C(\theta) \left(\tilde{r}(\theta,t) - \tilde{y}(\phi,t) \right) \end{split} \qquad f_s = \sqrt{\frac{Var \left(\tilde{y}(\phi,t) - y_0(t) \right)}{Var \left(\Delta \tilde{u}(\phi,t) \right)}} \end{split}$$

制御性能と同時に安定性(操作の緩慢さ)を考慮し、参照モデルの設定に対するロバスト性を向上させられる.

PSE kyoto

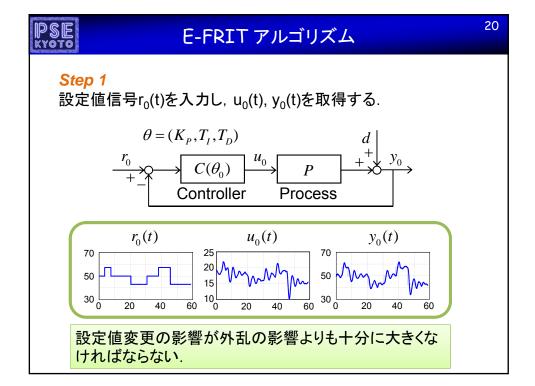
E-FRIT アルゴリズム

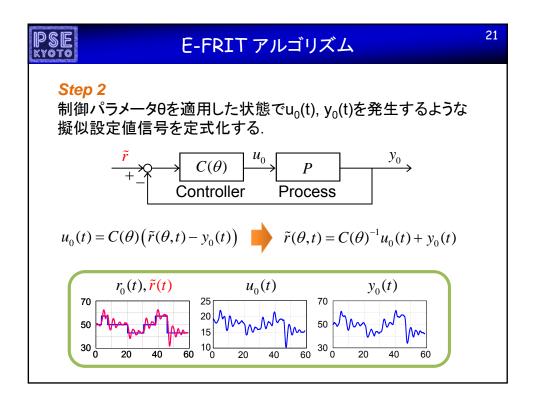
19

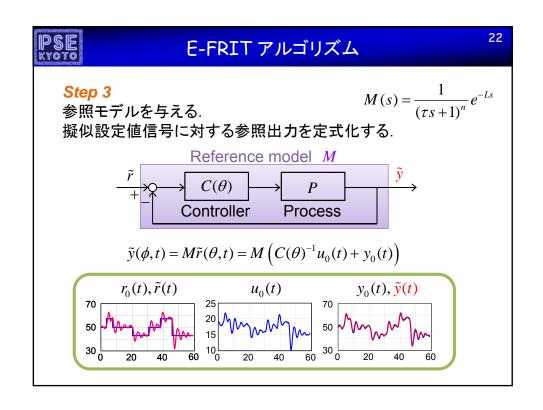
Step 0

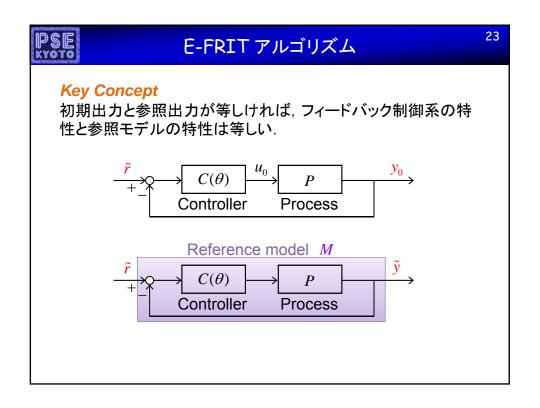
- 1. 制御性能監視により、制御性能の悪いループを抽出する.
- 2. 制御性能が悪い原因を究明する.
- 3. チューニングが原因で制御性能が悪いループを特定する.

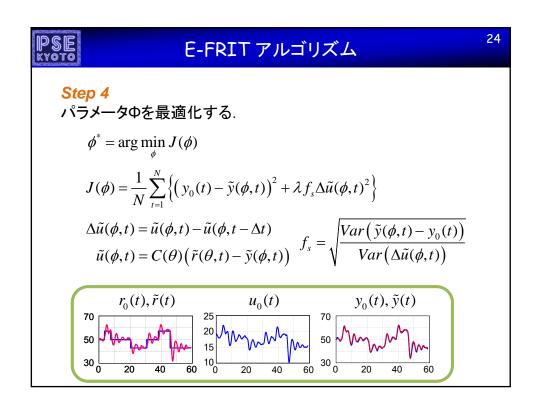
制御性能診断ツール LoopDiag を使おう! http://ws25.pse143.org/











PSE KYOTO

最適化における制約条件

25

• 上下限値制約

最適化変数	unit	lower	upper	
PID設定値: 比例ゲイン	K_{P}	%/%	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	L	min	0	10

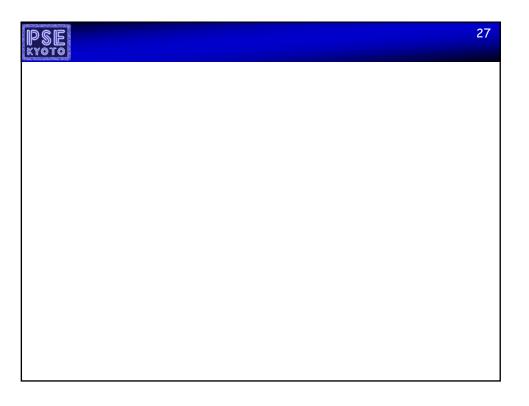
不等式制約 経験則に倣い、積分時間は微分時間の5倍以上とする。

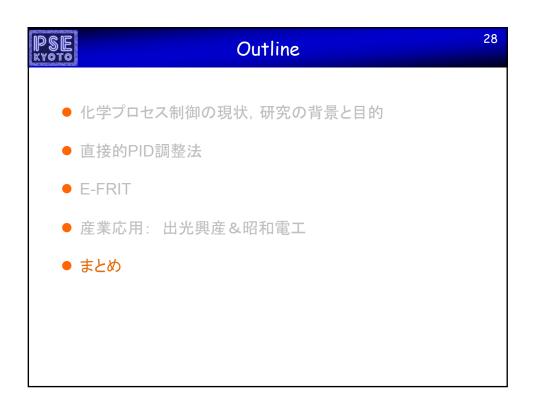
$$T_I \ge 5T_D$$

PSE KYOTO

Outline

- 化学プロセス制御の現状,研究の背景と目的
- 直接的PID調整法
- E-FRIT
- 産業応用: 出光興産&昭和電工
- まとめ





PSE まとめ

29

- 設定値変更時の閉ループ運転データから直接的にPID/ PI-D/I-PD制御パラメータを調整できるE-FRITを開発した.
- 数々の実機適用を通して実用性を高め、希望する整定時間 のみを調整パラメータとするアルゴリズムに到達した.
- 複数の日本学術振興会第143委員会Workshop No.27 メンバー企業において、E-FRITを実機に適用し、顕著な 経済的利益を実現している。
- 開発したソフトウェア (MATLAB)を公開中.

直接的PID調整法 E-FRIT 公式サイト http://e-frit.chase-dream.com/

PSE

謝辞

- 実用化に向けた検討
 - 小河氏(山武)
- 初期アルゴリズム開発&シミュレーション
 - 田坂君(京都大学, 現在はゴールドマン・サックス)
- 理論面でのサポート
 - 増田先生(首都大学東京)
- 適用事例の提供
 - 小河氏(山武), 大寶氏(三井化学)滝波氏, 高橋氏(昭和電工), 樋口氏, 吉井氏(出光興産)
- 本技術開発の母体(課題抽出, コメント, 議論)
 - 日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会 ワークショップ No.27「プロセス制御技術」 出光興産, ジャパンエナジー, 昭和電工, 新日本石油精製, 住友化学, ソニー, 東芝, 東芝三菱電機産業システム, 東洋エンジニアリング, 日揮, 日立製作所, 三井化学, 三菱化学, 山武, 横河電機