

2001年12月7日

## 新規ワークショップ（No. 25）提案説明

**制御性能監視 —プロセス産業での実用化を目指して—****[概要]**

資源、環境、安全、品質、価格など、生産活動を行う上で考慮しなければならない項目の数は増加するばかりであり、グローバル化を背景に、突き付けられる要求も際限なく厳しくなってきている。このような時代の要請に応えるためには、化学プラントの能力を最大限に引き出すような運転を実現しなければならず、制御系の性能を高く維持することが最低限必要である。しかし、一般的な生産プロセスには非常に多数の制御ループが存在し、どの制御ループがプラント全体の運転効率向上へのボトルネックであるかを見極めることは大変困難である。また、気温の変化、銘柄やロードの変更、触媒の劣化、伝熱係数の変化など多種多様な要因によってプラントの状態は時々刻々と変化するため、一度調整したコントローラであってもその制御性能が劣化している場合も多く、時にはその悪影響がプラント全体にまで及ぶこともある。そればかりか、調整もされないままに使用されているコントローラも少なくないのが現状である。近年では、モデル予測制御に代表される大規模な多変数制御を導入し、高度な運転システムを構築する事例も増えているが、それが計画通りの性能を発揮しているかどうかを常時監視し、必要に応じて再調整を行わなければ、高価なシステムが無駄となりかねない。このため、再調整を必要とするコントローラを検出する目的で、各制御系の性能を評価できるシステムティックかつ実用的な手法が必要である。さらに多変数制御系では、プラントの状態変化に適応するために、プロセスマodelを再同定する必要があるかどうかを判定できる手法の開発も望まれている。

本ワークショップの目的は、実用的な制御性能評価・監視手法を提供することである。そのために、そもそも制御性能の善し悪しとは何なのかという原点から議論を始め、これまでに提案されている各種制御性能監視手法を整理し、シミュレーションデータおよび実プラント運転データを用いた各種手法の評価を行いながら、我々が取り組むべき問題を明確にする。例えば、最小分散制御を規範とする制御性能評価手法は、この分野の先駆的な研究として高く評価できるが、まだ時間の正確な同定が必要であると共に、実現不可能な制御性能をベンチマークにするという問題点がある。実用的な制御性能評価・監視手法を開発するためには、産業界におけるニーズを的確に把握し、厳しい目で既存技術を検証する必要がある。本ワークショップでは、産学からの参加者が共同し、かつ適切に役割を分担して課題に取り組み、様々な立場の参加者がその成果を享受できるような方向で作業を進める方針である。

**[内容]**

本ワークショップの内容や進め方は参加者の議論に基づいて決定するが、現時点では、下記のような内容を想定している。

1. 産業界におけるニーズ（制御性能監視の理想像）の調査
2. 既存手法のサーベイ（文献・企業での実施例を調査）と評価（解析を実施）
3. 実用的な制御性能評価・監視手法の開発

**[世話人]**

(代表) 加納 学	(京都大学)	山下 善之	(東北大学)
重政 隆	(東芝)	西澤 淳	(三菱化学)

**[連絡先]**

加納 学

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻

E-mail: kano@cheme.kyoto-u.ac.jp

Phone: (075) 753-5577 Fax: (075) 752 - 9639

# 制御性能監視

## —プロセス産業での実用化を目指して—

日本学術振興会PSE第143委員会  
ワークショップ No.25

2001年12月07日

### —世話人—

加納 学 (京都大学) [代表世話人]  
山下 善之 (東北大)  
重政 隆 (東芝)  
西澤 淳 (三菱化学)

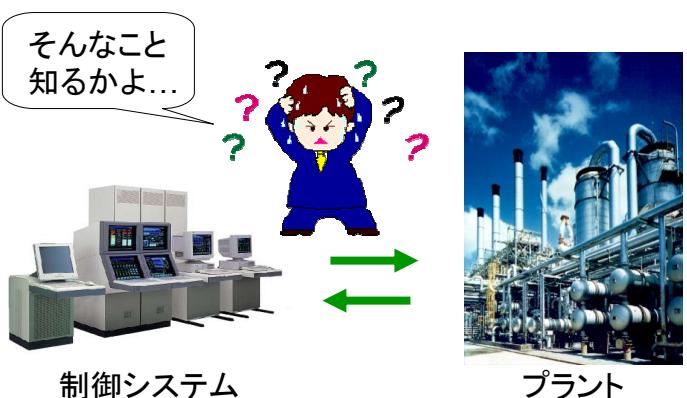
### » 制御性能監視とは？－健康管理の必要性－

コントローラはまともに動いているのか？

再調整は必要ないのか？

どの制御ループがダメなのか？

いや、プラントの改造が必要ではないのか？



## » 制御性能監視とは？－健康診断－

コントローラA: 良好  
コントローラB: 再調整必要  
コントローラC: 再調整必要  
コントローラD: 良好  
コントローラE: 抜本的な改善が必要

:

Dr. モニタリング



制御システム



プラント

俺の立場ないじゃん…



## » 制御性能監視とは？

### <背景>

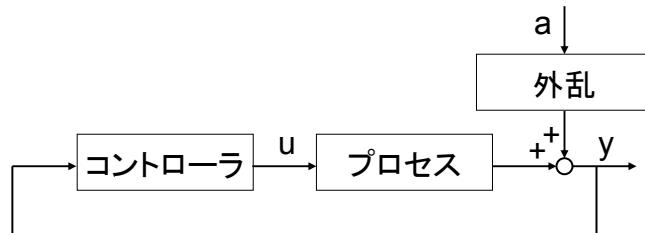
- ・DCSの導入等により、膨大な運転データが蓄積・利用できるようになった。
- ・経済性が厳しく追及されるようになり、最適点での運転が強く求められるようになった。

### <目的>

- ・コントローラが十分な性能を発揮しているか評価したい。
- ・オンラインで、運転状態を乱すことなく、できればモデル同定をせずに、制御性能を監視したい。

## » 代表的な制御性能監視手法 一概念一

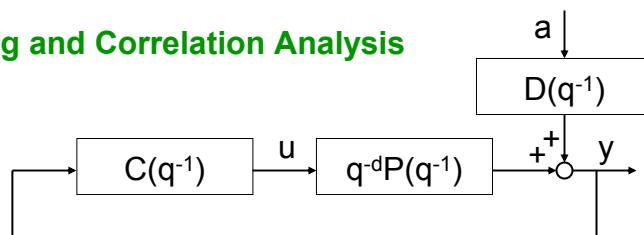
T. Harris, "Assessment of Closed Loop Performance,"  
Can. J. Chem. Eng., 67, 856-861 (1989)



$$\text{評価指標} = \frac{\text{出力 } y \text{ の分散(理論的最小値)}}{\text{出力 } y \text{ の分散(実現値)}} \quad (0 \leq \eta \leq 1)$$

## » FCOR法(1) 一最小分散制御一

Filtering and Correlation Analysis



$$\begin{aligned} y_t &= \frac{D}{1 + q^{-d} CP} a_t = \sum_{i=0}^{d-1} f_i q^{-i} a_t + q^{-d} \sum_{i=d}^{\infty} f_i q^{d-i} a_t \\ &= Fa_t + La_{t-d} \quad \text{むだ時間の間は制御不可能} \end{aligned}$$

$$\text{最小分散制御} \quad \sigma_{MV}^2 = Var(Fa_t) = \sum_{i=0}^{d-1} f_i^2 \sigma_a^2$$

## » FCOR法(2) –Closed-Loop Potential–

**最小分散制御**  $\sigma_{MV}^2 = Var(Fa_t) = \sum_{i=0}^{d-1} f_i^2 \sigma_a^2$

出力  $y$  と白色雑音  $a$  の相関係数

$$\rho_{ya}(i) = \frac{E[y_t a_{t-i}]}{\sigma_y \sigma_a} = \frac{f_i \sigma_a}{\sigma_y}$$

**CLP**  $\eta(d) = \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2} = \sum_{i=0}^{d-1} f_i^2 \sigma_a^2 / \sigma_y^2 = \sum_{i=0}^{d-1} \rho_{ya}^2(i)$

## » FCOR法(3) –CLPの利用–

**CLP**  $\eta(d) = \frac{\sigma_{MV}^2}{\sigma_y^2} = \sum_{i=0}^{d-1} f_i^2 \sigma_a^2 / \sigma_y^2 = \sum_{i=0}^{d-1} \rho_{ya}^2(i)$

CLP が0に近い場合  $\sigma_y^2 >> \sigma_{MV}^2$

コントローラを修正する必要がある。

CLP が1に近い場合  $\sigma_y^2 \approx \sigma_{MV}^2$

$\sigma_y^2$  が十分に小さいなら、完璧！

そうでないなら、フィードフォワード制御等の利用を検討する必要がある。

## » FCOR法(4) - 多変数系への拡張 -

88 8 Feedback Controller Performance Assessment: General Interactor

adjustment or testing is necessary. For loops which indicate poor performance measures, a second-level study, which may require process identification and/or redesign or retuning of control loops, may be necessary. Thus, the second-level performance assessment need only be conducted on a limited number of loops and the remaining loops, which do not have significant phase and controller constraints, can then be studied at this second-level performance (local minimum) level.

最小分散制御をベンチマークにする手法はそのまま多変数系にも拡張できます。

8.3 The FCOR algorithm for general interactor matrices

## 8.3.1 Multivariable performance measures

As proved in the previous sections, performance assessment processes can be reduced to finding the minimum variance term,  $\epsilon_t$ , from a multivariate moving average process, which has the general form shown in Equation 8.5. From Equation 8.5, the covariance between the output and the white noise sequence at lag  $t$  (for  $t < d$ ) is given by

$$\Sigma_a \triangleq E[\eta(t)^T]. \quad (8.15)$$

where  $\Sigma_a = D^{-1}(q)$ . From

$$q^{-d}D|_{mv} \triangleq \hat{Y}_t|_{mv} = e_t = F_0a_t + \cdots + F_{d-1}a_{t-d+1}$$

one can solve for  $\hat{Y}_t|_{mv}$  as

$$Y_t|_{mv} = q^d D^{-1} (F_0a_t + F_1a_{t-1} + \cdots + F_{d-1}a_{t-d+1})$$

where  $\hat{Y}_t|_{mv}$  is the interactor-filtered output under minimum variance control, and  $Y_t|_{mv}$  is the original output under the same control law. Note that from Remark 8.2.3 the minimum variance control laws of  $\hat{Y}_t$  and  $Y_t$  are identical. For the unitary interactor matrix, we have  $(D^{-1}(q)) = D^T(q^{-1})$ , i.e.,

$$D^{-1} = (D_0^Tq^d + \cdots + D_{d-1}^Tq^{d-1})^{-1} = D_0^Tq^{-d} + \cdots + D_{d-1}^Tq^{-1} \quad (8.16)$$

Therefore

$$Y_t|_{mv} = (D_0^T + \cdots + D_{d-1}^Tq^{d-1})(F_0 + \cdots + F_{d-1}q^{-d+1})a_t \\ \triangleq (E_0 + E_1q^{-1} + \cdots + E_{d-1}q^{-d+1})a_t \quad (8.17)$$

89 8.3 The FCOR algorithm for general interactor matrices

(Note that for a weighted unitary interactor matrix,  $D_w^{-1}(q) \neq D_w^T(q^{-1})$ , but  $D_w = D_w W^{1/2}$  and  $D_w$  is a unitary interactor. Thus,  $D_w^{-1} = W^{-1/2} D_w^T(q^{-1})$  and Equation 8.16 has to be modified accordingly.)

Owing to causality, any term with a positive power of  $q$  in Equation 8.17

be zeroed out in the corresponding matrix form:

$$\begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 & \cdots & F_{d-1} \\ F_1 & F_2 & \cdots & & \\ \vdots & \vdots & & & \\ F_{d-1} & & & & \end{bmatrix} \quad (8.18)$$

From Equation 8.17, variance of  $Y_t$  under minimum variance control can be

$$\triangleq X X^T \quad (8.19)$$

$$\text{where } X \triangleq [E_0 \Sigma_a^{1/2}, E_1 \Sigma_a^{1/2}, \dots, E_{d-1} \Sigma_a^{1/2}] \quad (8.20)$$

From Equation 8.15, we have

$$X = [D_0^T, D_1^T, \dots, D_{d-1}^T] \times \quad (8.21)$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{F_0}(0)\Sigma_a^{-1/2} & \Sigma_{F_0}(1)\Sigma_a^{-1/2} & \cdots & \Sigma_{F_0}(d-1)\Sigma_a^{-1/2} \\ \Sigma_{F_1}(0)\Sigma_a^{-1/2} & \Sigma_{F_1}(2)\Sigma_a^{-1/2} & \cdots & \\ \vdots & \vdots & & \\ \Sigma_{F_{d-1}}(d-1)\Sigma_a^{-1/2} & & & \end{bmatrix}$$

Since variance of  $Y_t$  under minimum variance control can be calculated from Equation 8.19, the objective function based performance measure (denoted as MIMO performance measure) can be calculated as

$$\begin{aligned} \eta(d) &= \frac{\text{minimum variance}}{\text{actual variance}} = \frac{E[Y_t^T Y_t]_{\min}}{E[Y_t^T Y_t]} \\ &= \frac{\text{tr} \Sigma_{mv}}{\text{tr} (E[Y_t^T Y_t])} \\ &= \frac{\text{tr} (X X^T)}{\text{tr} \Sigma_Y} \end{aligned}$$

## » 制御性能監視手法は確立されたのか？

### < 疑問 >

1. むだ時間を正確に同定できるのか？
2. 最小分散制御が理想なのか？  
操作量の激しい変動を許容するのか？
3. PID制御などの特定のコントローラで実現できる  
制御性能の限界はどこか？
4. 高度制御はどのように評価したら良いのか？



どうやら、検討すべき課題は数多く残されているようだ。。。

## » 本ワークショップの目的と内容

実用的な制御性能評価・監視手法を提供する。

1. 産業界におけるニーズ(制御性能監視の理想像)の調査
2. 既存手法のサーベイ(文献・企業での実施例を調査)と評価(解析を実施)
3. 実用的な制御性能評価・監視手法の開発

### 具体的な目的の例

1. シングルループ制御の性能監視(主にPID制御)  
コントローラのクラスごとに、各種制約条件も考慮して、実現可能な最高の制御性能を導出する。
2. 多変数制御の性能監視(モデル予測制御も含む)  
制御性能の評価指標を導入するとともに、制御パラメータの再調整やモデルの再構築の必要性を判断できるシステムを開発する。

## » おわりに

### ご提案

時系列データ解析、システム同定、制御系設計など、本ワークショップを進めるために必要な基礎事項の解説も、必要に応じて行います。

自社あるいは個人のプロセス制御関連技術をレベルアップしたいと望まれるプラント・ユーザ企業の方々、制御システム・ベンダー企業の方々の積極的な参加をお待ちしています。あくまでも、実用化重視のワークショップにしたいと考えています。

もちろん、この分野に興味をお持ちの研究者の皆様には、本ワークショップに参加し、存分にその実力を発揮していくだけることを期待しています。

## » おまけ

### 制御性能監視のテキスト

Biao Huang & Sirish L. Shah;  
Performance Assessment of Control Loops:  
theory and applications,  
Springer-Verlag London (1999)  
ISBN: 1-85233-639-0

### 日本語解説

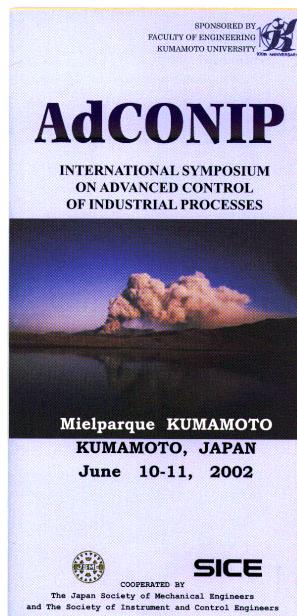
化学工学, Vol.65, No.12 (2001)

### ワークショップ成果物のイメージ

多変量解析 & 統計的プロセス管理ツールボックス  
<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/>

本ワークショップのホームページもあります。

## » おまけ



### 工業プロセスの高度制御に 関する国際会議@熊本

アブストラクト締切：2月15日  
最終原稿締切：4月30日  
会議：6月10, 11日

<http://www.adconip.org/>