



セメントプラント原料調合制御への多段予測適応制御一手法の応用

尾崎, 賢二

(Citation)

化学工学論文集, 25(2):272-281

(Issue Date)

1999-03

(Resource Type)

journal article

(Version)

Accepted Manuscript

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90000973>



緒 言

セメント製造プラントにおける原料調整・混合プロセスの代表的なプロセスフローを **Fig.1** に示す。使用する原料は、プラントに隣接した山場で採取する石灰石と粘土質原料の二つの主要原料に、珪石と鉄滓等の酸化鉄原料を付加原料として使い合計四種類である。これら四原料を原料ミルプロセスにおいて混合粉碎し、ブレンディングサイロを経てキルン投入の原料粉としている。この様な原料調整・混合プロセスでは、これらの四種の原料の組成変動による、キルン投入原料の組成変動をいかに小さく抑えるかが、重要な品質管理の目的である。このための設備として、ホモジナイジングベッドやブレンディングサイロ等のプロセスと、これらの装置だけでは抑えることの出来ない長周期の変動を抑制するため、原料ミル前での四種の原料の配合比を適時制御する調合制御装置を備えるのが一般的である。調合制御装置は、**Fig.1** に示した様に原料粉碎プロセス出口の精粉をサンプリングし、X線分析計を利用して CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 の四成分含有量を求め、セメント製造上の品質管理指標である水硬率 HM 、珪酸率 SM 、鉄率 IM を制御している。その制御目標は要約すると、これら三指標の最小分散レギュレーションとトラッキングである。本報告では、調合制御の制御対象である原料粉碎ミルと山場から原料ミルに至るプロセスを経過した組成変動の外乱項に対し、これらの線形摂動近似モデルを提示し、その結果としてシステムの構造が受け入れ原料の組成変動を表現する正規性有色雑音を外乱として含み、原料ミル前での四原料の配合比（配合比の総計は”1”であることより操作量は三種である）を操作量とする三入力・三出力の多変数確率制御系であることを示す。

次に調合制御として我々が従来から利用している方法を説明するが、その方法を要約すると制御対象の原料ミルプロセスの動特性に対し、スミスのむだ時間補償付きの PI 制御により三指標独立に動的補

償を行い、三原料の配合比変更量と三つの品質指標の変動の間の静的な干渉、すなわち三入力・三出力間のゲイン特性を考慮した最適化計算を利用している。一方調合制御の制御対象は、受け入れ原料の組成変化によるゲイン特性だけでなく、原料ミルプロセスにおいては、そのむだ時間を含めた動特性が変化し易いことより、この様な在来制御のみではその制御性は必ずしも満足できるものとは言えない。この様な対象の特性変化に対して適応制御の応用が考えられ、実機に適用した例も報告されているが(Csaki et al.,1978; Narendra and Monopoli, 1980)、いずれもむだ時間に相当する離散時間後の出力の一段予測に基づく適応制御方式であり、プロセスの特性変化特にむだ時間の変化に対しロバストな制御系で無いこと、さらに外乱等による制御量の変化に対し操作量が過大になりすぎる点より在来制御方式に置き換え得るとは言い難い (Ozaki and Habata, 1997)。

この様な現状に対し、本報ではむだ時間を含めた対象の特性変化に対してロバスト性を有する確率的適応制御の一例として、多段予測に基づく Extended Horizon Adaptive Control (EHAC)を採用し、シミュレーションによりその制御性能とロバスト性が在来制御方法、および一段予測に基づく確率的適応制御法に比較し優れていることを確認し、実機への応用の有効性を検証した。

1. 制御対象の線形動特性モデル

構成プロセスの動特性モデルと受け入れ原料の組成変動を表す確率モデルを求めるに際し以下の仮定をおく。

AP1：ホモジナイジングベッド、原料粉砕プロセスの組成変動減衰特性は、いずれも定常動作点での線形摂動モデルで近似する。さらに原料配合計算や CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 の四成分による HM, SM, IM の計算についても、定常状態からの変動分を考え線形摂動近似する。

AP2：山場で採取し、一次破砕機へダンプトラックにより運搬・投入

される石灰石・粘土質原料の組成変動過程は、ダンプトラックの到着過程をポアソン到着とし、かつ運搬バッチ毎の原料は各々独立に静的な正規分布に従うものとして求めた確率過程に従うものとする。なお正規分布の標準偏差には、プラント計画時に行うボーリングサンプルの化学分析結果より求まる標本標準偏差を利用する。珪石・酸化鉄原料についても同様とする。

AP3：各原料の主成分（石灰石： CaO ，粘土質原料： SiO_2 ，珪石： SiO_2 ，酸化鉄原料： Fe_2O_3 ）以外の三成分の組成変動は、主成分の組成変動による一次回帰式で表現できるものとする。

既報告では（Ozaki et al.,1998a）これらの仮定につき、実プラントのデータをもとに検証を行うとともに、これらの仮定を用いて導出した線形動特性モデルにより予測したキルン入口の HM の変動計算結果が、実機の計測結果と概ね一致していることを示した。従って調合制御を対象とする場合、上記の仮定は妥当なものと言える。これらの仮定を用いて結論として **Fig.2** に示す調合制御系の総合ブロック線図を得ることができるが、以下にその導出方法と **Fig.2** 内に示した各部の伝達関数について説明する。

1.1 受け入れ原料の組成変動過程一行列 $Z(t)$ の表現一

四原料の組成変動過程の自己相関関数は仮定 AP2 を利用すると Eq.(1) で表現できる。ただし下添字 ij は j 番目原料の i 番目の組成を表し T_j は j 番目原料の平均到着時間間隔である。

$$R_{ij}(\tau) = \sigma_{ij}^2 \cdot e^{-|\tau|/T_j} \quad (1)$$

Eq.(1) より、変動のパワースペクトル密度関数は Eq.(2) となり、

$$\Phi_{ij}(\omega) = \frac{2 \cdot T_j \cdot \sigma_{ij}^2}{1 + (\omega \cdot T_j)^2} \quad (2)$$

正規白色過程が時定数 T_j を持つ一次の Shaping Filter を通過した確率過程と等価である。この変動過程を $z_{ij}(t)$ と記す。次に仮定 AP3 を利

用し、一次回帰係数 γ_{ij} を要素とする四行・四列の行列 Γ を用いると、 $z_{ij}(t)$ は最終的に Eq.(3) の行列演算で表すことが出来る。

$$[z_{ij}(t)] \equiv \mathbf{Z}(t) = \bar{\mathbf{Z}} + \Gamma \cdot \mathbf{Z}_p(t) \quad (3)$$

ここに $\mathbf{Z}_p(t)$ は四原料の主成分の組成変動過程を表す正規有色過程を $(1,1), (2,2), (2,3), (4,4)$ の各要素に持ち他の要素が全て "0" である四行四列の行列、 $\bar{\mathbf{Z}}$ は四原料の四成分の平均組成を要素に持つ行列である。以下全て $\bar{}$ は定常状態の値を表すこととし、さらにこの定常値からの線形摂動による変動量を考え、かつそれらを全て s 領域で表すこととする。すなわち Eq.(3) はその変動分のみを考えると下記に置き換えられる。

$$\Delta \mathbf{Z}(s) = \Gamma \cdot \Delta \mathbf{Z}_p(s) \quad (4)$$

1.2 ホモジナイジングベッドの伝達関数

シェブロン方式のホモジナイジングベッドを代表例として取り上げる。このプロセスでは一次破碎後のれき状の原料をスタッカーにより N 層に積み付け、これをリクレーマを用いて直角方向から切り出すことにより組成変動の均質化を行っている。このプロセスで出口原料の組成変動は、入口原料の組成変動に対し Eq.(5) の一次進み遅れの伝達関数を通過した過程として近似表現できる (Ozaki et al., 1998a)。

$$G_{HB}(s) = \frac{1 + \frac{\sqrt{N}}{2} T_L \cdot s}{1 + \frac{N}{2} T_L \cdot s} \quad (5)$$

ただし、 T_L はスタッカーの積み付け周期である。石灰石と粘土質原料の伝達関数を各々 $G_{HB}^L(s)$, $G_{HB}^C(s)$ とするが、付加原料である珪石と酸化鉄原料には Fig.1 に示した様にこの種のプロセスを装備しないのが一般的である。従い原料ミル前の四原料の一次貯蔵用ホッパー内の各原料の組成変動は Eq.(6) で表すことが出来る。

$$\Delta \mathbf{Z}_{Mi}(s) = \text{diag}[G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s), 1, 1] \cdot \Delta \mathbf{Z}(s) \quad (6)$$

1.3 原料ミル前の配合計算

Fig.1に示した四原料の原料ミル前ホッパーを出た加え合わせ点(添字 Mi でこの点を表す。)を考える。ミルに投入する四原料の流量比は緒言で説明した様に調合制御装置によって決められる。その流量比すなわち四原料の配合比ベクトルを $\mathbf{u}(t)=[u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)]^T$ とし、合流後の四成分組成ベクトル $\mathbf{E}(s)=[\xi_{CaO}, \xi_{SiO_2}, \xi_{Al_2O_3}, \xi_{Fe_2O_3}]^T$ の変動分を考えると、仮定 AP1 の線形摂動近似により Eq.(7)が成立する。

$$\Delta \mathbf{E}(s) \cong \Delta \mathbf{Z}_{Mi}(s) \cdot \bar{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{Z}}_{Mi} \cdot \Delta \mathbf{u}(s) \quad (7)$$

さらに四原料の配合比の総計が”1”であることより操作量は三つであるが、これを改めて $\Delta \mathbf{u}(s)=[\Delta u_1(s), \Delta u_2(s), \Delta u_3(s)]^T$ と表記する。また合流後の原料中の四成分の含有量の変動と三指標の変動量 $\Delta HM, \Delta SM, \Delta IM$ の間に成り立つ下記の線形摂動による近似変換式 Eq(8)を利用し、1.1, 1.2 節の結果を用いると最終的に Eq.(7)は Eq.(10)に変換することが出来る。

$$[\Delta HM(s), \Delta SM(s), \Delta IM(s)]^T \cong \mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{E}(s) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{\xi_{SiO_2} + \xi_{Al_2O_3} + \xi_{Fe_2O_3}} \\ m_{22} &= \frac{1}{\xi_{Al_2O_3} + \xi_{Fe_2O_3}} \\ m_{33} &= \frac{1}{\xi_{Fe_2O_3}} \end{aligned} \\ \text{ただし、} \quad m_{12} &= -\overline{HM} \cdot m_{11}, \quad m_{23} = -\overline{SM} \cdot m_{22}, \quad m_{34} = -\frac{1}{\xi_{Al_2O_3}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &[\Delta HM_{Mi}(s), \Delta SM_{Mi}(s), \Delta IM_{Mi}(s)]^T \\ &\cong \mathbf{M} \cdot \text{diag}[G_{HB}^L(s), G_{HB}^C(s), 1, 1] \cdot \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{Z}_p(s) \cdot \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}}_{Mi} \cdot \Delta \mathbf{u}(s) \end{aligned} \quad (10)$$

Eq.(10)の右辺第一項・第二項が各々、Fig.2の Mi 点での外乱項 $[\Delta HM_d(s), \Delta SM_d(s), \Delta IM_d(s)]^T$ と配合比変更操作によるミル前の三指標の変動特性の表現である。

1.4 原料ミルプロセスの伝達関数

Eq.(10)により表した原料ミルプロセスへ投入する原料の組成変動

がミルプロセスの出口でどの様に表されるかを考える。原料ミルの代表例として閉回路ボールミル粉碎系を取り上げ、以下の仮定 AP4 を追加する。

AP4：原料ミルおよびセパレータでの四原料の滞留時間等の動的挙動は同一である。また原料の違いによる粉碎性能や分級性能に違いは無いものとする。

上記の仮定と線形摂動近似の仮定により、入出力間の組成変動の関係は、セパレータからの戻り粉による正帰還を考慮した Eq.(11)の動特性モデルを用いて近似できる (Ozaki et al.,1998b)。

$$G_{GM}(s) = \frac{\exp\left\{-\left(l + \frac{1}{30 \cdot L_C}\right)\right\}}{(1+L_C)\left(1+\frac{T_B}{5}s\right)^5 - L_C} \quad (11)$$

ただし、 T_B はミル単体の平均滞留時間に相当し、 L_C はセパレータからの戻り粉流量の製品流量に対する循環比 (一般に $L_C > 1$)、 l はミル出口から X 線分析計までのサンプル輸送と分析遅れによるむだ時間である。この伝達関数を利用すると、仮定 AP4 より X 線分析計での四成分の組成の分析値による三指標の測定値 ΔHM_m , ΔSM_m , ΔIM_m は Eq.(12) で表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} \Delta HM_m(s) \\ \Delta SM_m(s) \\ \Delta IM_m(s) \end{bmatrix}^T = G_{GM}(s) \cdot I \cdot \begin{bmatrix} \Delta HM_{Mi}(s) \\ \Delta SM_{Mi}(s) \\ \Delta IM_{Mi}(s) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

2. 調合制御装置の伝達関数と多変数系としての特徴

調合制御は一般的に混合粉碎後の原料粉を間欠的にサンプリングし、そのサンプルを X 線分析計で分析し、一定時間間隔毎に原料ミル前の定量供給機の配合割合を変更するサンプル値制御系である。我々の在来の制御方法を Fig.2 に例示した。 $G_C^*(z)$ は Eq.(12) の伝達関数を一次遅れ + むだ時間 $\left[f_0 \cdot e^{-Ls} / (1+T_0s)\right]$ で近似し、Smith 法で補償した PI 制御のパルス伝達関数である。所望の目標指標 HM_r, SM_r, IM_r と実測値 HM_m, SM_m, IM_m との偏差量に対し、上記の $G_C^*(z)$ による演算を施し動的な

修正目標 $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ をまず算出する。この修正目標に対し、下記に示した最適化計算により、最終的に配合比の修正量を決めている。ただし K_1, K_2 は評価の重み係数である。

$$F = K_1(\Delta HM_T - \Delta HM)^2 + K_2(\Delta SM_T - \Delta SM)^2 + (\Delta IM_T - \Delta IM)^2$$

$$\text{with } \sum_{i=1}^4 \Delta u_i = 0 \text{ and } |\Delta u_i| \leq \Delta_{\max}(i), \text{ where } \Delta HM = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial HM}{\partial u_i} \right) \cdot \Delta u_i, \text{ etc.} \quad (13)$$

この最適化計算は $\Delta HM = \sum_{j=1}^4 \left(\frac{\partial HM}{\partial u_j} \right) \cdot \Delta u_j$ 等の三指標変更量が配合比の

関数であることより、あらかじめ設定した定常状態での四原料の四成分組成値（行列 $\bar{\mathbf{Z}}$ の各要素の値）を用いて静的に計算し、かつ各配合比の変更量の総和が”0”であることと、各変更量に上限を設ける拘束条件のもとに、評価関数 F を最小にする配合比の変更量 Δu_j を求めている。ただし定常状態からの変動量がわずかな摂動モデルを考える場合は、評価関数 F を”0”とする配合比が下記の代数演算で算出できる。

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} \equiv [\Delta u_1, \Delta u_2, -(\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3), \Delta u_3]^T = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{J})^{-1} [\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T]^T \quad (14)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{の様に珪石の配合比を従属変数としている。}$$

なお Eq.(14)が成立し、かつミル前ホッパ内の四原料の平均組成行列 $\bar{\mathbf{Z}}_{Mi}$ が、上記の $\bar{\mathbf{Z}}$ に一致する場合は Fig.2 から分かる様に $\Delta HM_T, \Delta SM_T, \Delta IM_T$ から見たプロセスのゲイン行列は

$\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}}_{Mi} \cdot \mathbf{J} \cdot (\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{J})^{-1} = \mathbf{I}$ より単位行列となり、スカラー系として三指標を独立に制御することと同等となる。また、 $\bar{\mathbf{Z}}_{Mi} \neq \bar{\mathbf{Z}}$ の一般的な場合の調合制御においても、仮定 (AP4) により原料ミル入口・出口間の三指標の間に成り立つ伝達関数が Eq.(12) の通り対角行列である限り、このプロセスの動特性に対する動的補償を各指標に独立に施し、多変数

系としての扱いは静的な前置補償器を用いて三個の制御量と三つの配合比変更量間の干渉を補償する方法が有効と考えられる。

以下の各種制御系の検討比較では、いずれも Eq.(14)が成り立つ範囲の変動を考え、まずスカラー系としての性能比較を行う。さらに多変数制御を構成する場合は、いずれの制御方式に対しても静的な

前置補償行列 $\mathbf{P} \equiv (\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{J})^{-1}$ を挿入し、プロセスのゲイン行列 $\mathbf{B}_0$ との間での $\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{P} \equiv \mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}}_{Mi} \cdot \mathbf{J} \cdot (\mathbf{M} \cdot \bar{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{J})^{-1}$ によって多変数系としての干渉を考え動的補償は三指標各々独立に行う方法、すなわち前置補償器を持つ多重ループ制御方法を共通して採用している。なお、7章に示した実機プラントの数値例、すなわち山場の石灰石鉱床が変わり平均組成に大きな変化を来した場合でも、 $\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{P}$ の対角項以外の要素は全て対角項の 15%以下であり、上記の前置補償行列を用いた制御系の構成で実用上十分であることが分かる。

3. 在来制御の効果と適応制御の必要性

我々は、前章で説明した在来制御の方式を多くのプラントに利用し、その制御効果を確認してきた (Sugimoto et al., 1984)。その結果を要約すると、調合制御を off した手動制御状態に対し、主要指標である HM の標準偏差を約 1/2 に低減することが出来ている。元来、PID 制御はその調整規範が明確かつ簡単であるとともに、対象プロセスの構造変化すなわち次数やむだ時間の変化や、プロセスゲインと時定数等のパラメータの変動に対して比較的ロバストな制御系である。しかし、調合制御の対象プロセスである閉回路粉碎系は、プロセス自身にセパレータからの正帰還を含む系であり不安定に陥り易いこと、また Eq.(11)に示した様に、その時定数やむだ時間が循環比により変動すること、および山場の採掘原料の平均組成の変化が制御対象プロセスのゲイン行列に直接影響を与え、これらの変動によって制御効果に変化をもたらすことが確認出来ている。

一方、調合制御の制御目標を要約すると、これらのプロセスの変動に対しても、*HM*, *SM*, *IM* の最小分散 *Regulation* を達成し、かつ *Tracking* 性能も併せ持つことが望ましい。後者の目標は、原料ミル後段のブレンディングサイロの混合特性を見込んだ上で調合指標の設定値を積極的に変更する運転が、製造セメントの品種変更やキルンでの焼成状況による運転状態の変更を目的として利用する場合があるためである。これらの目標に対して適応制御の応用が考えられるが上記の様にむだ時間の変化にもロバストな適応制御の構成が必要となり、第一世代 (Landau,1993) の適応制御では我々の在来制御方式に置き換わるには至っていない (Ozaki and Habata, 1997)。要約すると適応制御を調合制御系に応用する場合に以下の四点が所用の要件としてまとめられる。

- (1) 制御則とパラメータ推定機構を含め、総合的に対象の変化にロバストな制御であること。
- (2) むだ時間が既知と言う第一世代の適応制御の欠点を補う必要がある。
- (3) 不安定な零点や極を持つ系にも対応出来る必要がある。
- (4) 以上を踏まえた上で、多変数系への拡張に見通しを持ち得る構成であること。

Ydstie は SISO 系に対する EHAC 法を提唱し (Ydstie,1984)、二酸化炭素吸収プラントの制御への応用結果が在来方式の制御に比較し、有効であることを報告している (Ydstie et al.,1985)。さらに、多変数系への拡張もなされており、上記の四条件を満足し得る可能性が示唆されている (Dugard et al.,1984 ;Ydstie et al.,1988)。

4. 調合制御系に対する *Extended Horizon* 適応制御の構成

1 章の線形摂動モデルに基づき調合制御系に対する EHAC の構成方法と、そのパラメータ適応則について説明する。

4.1 EHAC の構成

Fig.2 の構成で制御対象と外乱部を離散表現することにより、調合制御系は、下記 Eq.(15)の ARMAX モデルで表現できる。

$$A(z^{-1}) \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{y}(k) = z^{-d} \cdot \mathbf{B}(z^{-1}) \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{C}(z^{-1}) \cdot \mathbf{w}(k) \quad (15)$$

ここに、 $\mathbf{y}(k)=[\Delta HM_m, \Delta SM_m, \Delta IM_m]^T$ ：三指標の摂動量の測定値ベクトル、 $\mathbf{u}(k)=[\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3]^T$ ：三成分の配合比変更量を表す操作変数ベクトル、 $\mathbf{w}(k)=[w_1, w_2, w_3, w_4]^T$ ：四原料の主成分の変動過程を表す正規白色過程、 $A(z^{-1})=1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\dots+a_nz^{-n}$ ： z^{-1} に対するスカラー多項式、

$\mathbf{B}(z^{-1})=\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{B}'(z^{-1})=\mathbf{B}_0 \cdot (1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\dots+b_nz^{-n+1})$ ：ゲイン行列 $\mathbf{B}_0$ と z^{-1} に対するスカラー多項式 $\mathbf{B}'(z^{-1})$ からなる多項式行列で、この

$\mathbf{B}_0$ を用いて、プロセスゲインは $\mathbf{B}_0 \cdot \frac{\mathbf{B}'(1)}{A(1)}$ と表される。

$\mathbf{C}(z^{-1})=\mathbf{I}+\mathbf{C}_1z^{-1}+\mathbf{C}_2z^{-2}+\dots+\mathbf{C}_{n-1}z^{-n+1}$ ：三指標の外乱特性を表現する 3 行 4 列の多項式行列。

上記で $z^{-d} \cdot \frac{\mathbf{B}'(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ が Eq.(11)の原料ミルプロセスの伝達関数のパルス

伝達関数を表している。

Eq.(15)において、 $\mathbf{u}'(k)=\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{u}(k)$ なる変換を施し $\mathbf{u}'(k)$ から見た対象を拡大プラントと考えると、下記の Eq(16)の様に $\mathbf{y}$ と $\mathbf{u}'$ に関して伝達特性が全て対角行列となり、二章で述べた様にスカラー系と同様な取り扱いが出来る。

$$A(z^{-1}) \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{y}(k) = z^{-d} \cdot \mathbf{B}'(z^{-1}) \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{u}'(k) + \mathbf{C}(z^{-1}) \cdot \mathbf{w}(k) \quad (16)$$

EHAC はその構成上下記の仮定が必要となるが、一章の説明からこれらが成立することは容易に推察できる。

AC1： $w_i(k)$ は有限な分散 σ_i^2 を持つ正規白色過程である。

AC2：むだ時間 d は有限である。

EHAC 制御では、対象のむだ時間の最大値 d_{max} に対して、予測区間

T ($T \geq d_{max}$ なる整数)を導入し、 $E\{y(k+T)|Y_k\} = y_M(k+T)$ を満たす $u(k)$ を逐次求めていくことを基本としている。なお、 $E[\cdot|Y_k]$ は、 k 時点までに制御系から得られる情報集合 Y_k を基にした期待値を表し、 $y_M(k+T)$ は規範モデルより得られる T 時点先の目標値系列ベクトルである。まず Diophantine 方程式を Eq.(17)で導入する。

$$1 \equiv S(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-T}R(z^{-1}) \quad (17)$$

$S(z^{-1})$, $R(z^{-1})$ は各々、 $(T-1)$ 次、 $(n-1)$ 次のスカラー多項式である。Eq(17)を Eq(16)に代入し各出力 y_i 毎に整理すると最終的に Eq(18)を得る。

$$y_i(k+T) = \phi_i^T(k) \cdot \theta_i + F(z) \cdot w(k) + P(z^{-1}) \cdot w(k) \quad (18)$$

$$\text{ただし、} \phi_i^T(k) = [y_i(k), y_i(k-1), \dots, y_i(k-n+1); u_i'(k+T-d), \dots, u_i'(k+1), u_i'(k); u_i'(k-1), \dots, u_i'(k-n-d+2)] \quad (19)$$

$$\theta_i = [r_{i,0}, r_{i,1}, \dots, r_{i,n-1}; \beta_{i,0}, \beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,T-d}; \beta_{i,T-d+1}, \dots, \beta_{i,n+T-2}]' \quad (20)$$

$F(z)$, $P(z^{-1})$ は、 $w(k)$ の、各々将来と過去の系列に係わる前進、後進の要素を含む多項式行列であり、 $w_i(k)$ を正規白色過程と仮定したこと、および異なる原料間の組成に相関の無いことは自明であることより下記の諸式が成立し、最終的に Eq.(21)を得る。

$$E[y_i(k+T) - F(z) \cdot w(k) | Y_k] = E[y_i(k+T)], \quad E[P(z^{-1}) \cdot w(k) | Y_k] = 0, \\ E\left[\left\{P(z^{-1}) \cdot w(k)\right\}^2 | Y_k\right] = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^{n-2} p_{i,j} \sigma_i^2 < \infty$$

$$E[y_i(k+T)] = \phi_i^T(k) \cdot \hat{\theta}_i(k) \quad (21)$$

上記の Eq.(21)式の確率的な関係式を利用し、EHAC 制御では、 $u_i'(k), u_i'(k+1), \dots, u_i'(k+T-d)$ が次の Eq.(22)を満たす様に選ぶのである。

$$y_{i,M}(k+T) - \phi_i^T(k) \cdot \hat{\theta}_i(k) = y_{i,M}(k+T) - h_i(k+T) - \sum_{j=0}^{T-d} \beta_{i,j} \cdot u_i(k+T-d-j) = 0 \quad (22)$$

ここに、 $y_{i,M}(k+T)$ は、後述の Eq.(28)で決める規範モデルの出力であ

り、 $h_i(k+T) = \sum_{j=0}^{n-1} r_{i,j} y_i(k-j) + \sum_{j=1}^{n+d-2} \beta_{j+T-d} u_i'(k-j)$ は過去の y_i と u_i' で計算でき

$$\lambda_i(k) = \frac{\text{trace}\{\mathbf{F}_i(k-1)\}}{\text{trace}\{\mathbf{F}_i(k-1)\} + g_i \cdot e_i(k)^2 / \{1 + \boldsymbol{\phi}_i^T(k-T) \cdot \mathbf{F}_i(k-1) \cdot \boldsymbol{\phi}_i(k-T)\}} \quad (27)$$

なお、適応ゲイン行列 $\mathbf{F}_i(k)$ の逐次更新には、U-D 分解法を適用した (Wellstead & Zarrop, 1991)。この適応則の調整パラメータとしては、適応ゲイン行列の初期値 $\mathbf{F}_i(0)$ と g_i の二つであり、これに予測区間 T を加えることにより、対象の設定値変更に対する Tracking 性能と確率外乱に対する Regulation 性能に対して、後述のシミュレーション結果で示す様に適切な調整が可能と考えられる。以上を総合して EHAC 制御を採用した調合制御系の構成図を **Fig.3** に示した。

なお、以下共通してサンプリング周期は 0.5 [h] とし、Tracking 目標 $y_{iM}(t+k)$ を決定する規範モデルには、ステップ応答の行き過ぎ量 10%、50% までの立ち上がり時間 2 [h]、帯域幅 3 [rad/h] と決め求めた s 領域伝達関数 (Ichikawa, 1984) を離散化した下記モデルを共通して採用している。

$$y_{i,M}(k+T) = \frac{0.221 - 0.0079z^{-1} - 0.076z^{-2}}{1 - 1.54z^{-1} + 0.787z^{-2} + 0.11z^{-3}} u_{i,M}(k) \quad (28)$$

ただし、 $u_{iM}(k)$ は i 番目の品質指標に対する設定値変更系列を表す。

5. 一段予測に基づく確率的 MRACS の構成と特徴

EHAC 制御の制御性能比較の対象とした第一世代の確率的適応制御として Dugard & Landau の確率的 MRACS (Dugard and Landau 1980 ; Dugard et al., 1982) を取り上げたが、その構成を HM のみを制御対象とした SISO 系に対し **Fig.4** に示す。制御対象は、Eq.(16) と同様な ARMAX モデルを対象に構成できるが、この方法ではさらに次の二つの仮定を必要とする。

AC3 : むだ時間 d は既知である。

AC4 : $B(z^{-1})/A(z^{-1})$ は最小位相推移系である。

この MRACS の特徴は、設定値回路にも可変の補償要素 $\hat{Q}(z^{-1}; k)$ を導

入することにより、確率的外乱存在下で最小分散 Regulation を達成しつつ、外乱が存在しない場合の Tracking 性能の劣化を補償出来ることにある。要約すると、

(a). $w(k) \equiv 0$ の確定系の場合： Fig.4 に破線で示した Feedback 系の伝達関数の分母が適応則によって $D(z^{-1})$ に収束し、かつ $Q(z^{-1})$ は "0" に収束する。従い、

$$y(k+d) \Rightarrow y_M(k+d) = \frac{B_M(z^{-1})}{A_M(z^{-1})} u_M(k) \quad (29)$$

となり、 $D(z^{-1})$ で指定した Regulation 性能と規範モデルに従った Tracking 性能を合わせ持っている。

(b). 確率外乱が存在し設定値変化のない場合：Feedback 系の伝達関数の分母は $C(z^{-1})$ に収束し、かつ $Q(z^{-1}) \rightarrow D(z^{-1}) - C(z^{-1})$ となる。この場合、最終的に Eq.(30) が成立する。

$$y(k+d) = y_M(k+d) + S'(z^{-1})w(k+d) \quad (30)$$

ただし、 $S'(z^{-1})$ は Diophantine 方程式 $C(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot S'(z^{-1}) + z^{-d} R'(z^{-1})$ を満たす $d-1$ 次のモニック多項式である。

従って、STR と同一構成となり最小分散制御を達成出来る。

の二点であり、三章で説明した調合制御の目標と合致しているためこれを探り上げた (Ozaki and Habata, 1997)。なお採用したパラメータ適応則については、逐次最小二乗法を利用し ($F(0) = 100I$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$)、Fig.4 内に示した各種多項式は以下のものを使用した。

$$D(z^{-1}) = L(z^{-1}) = H_2(z^{-1}) = 1 - 0.4z^{-1}, \quad H_1(z^{-1}) = 1$$

6. シミュレーションによる検討結果

二章で説明した様にまずスカラー系として HM を単独に制御した場合を想定し、EHAC の基本的な制御性能をシミュレーション結果により比較した。なお、計算には MATRIX-X Ver. 5 を使用し、Fig.2,3,4 に示した制御対象側の原料ミルプロセスと外乱部は、連続系として s 領域

で時間応答を求め、制御部は X-Math 言語により 0.5 [h]のサンプル時間毎に制御計算を出力する形でシミュレーションを行った。プロセスの特性変化としてプロセスゲイン、むだ時間、対象の時定数を下記のように個別に変化させ、外乱応答時の HM の標準偏差および Tracking 時の規範出力との誤差信号の標準偏差で制御性能を比較した。

- a). プロセスゲイン : 50%上昇、
- b). むだ時間 : 1[h]から 1.5 [h]に増加、
- c). 遅れ時定数: 閉回路原料ミル系の循環比を 3.0 から 1.0 に変更し、
等価時定数を 0.7[h]から 0.35[h]に変化。

なお EHAC では方策 1 のステップ入力策を採用している。

6.1 確定系としての性能比較

Fig.5 に HM の設定値変更途中にプロセスゲインを変化させた場合の、出力 $y(k)$ (即ち $\Delta HM_m(k)$) と操作用出力 $u(k)$ (石灰石配合比率の変更量) を比較した。適応制御の計算ではいずれの方法でもパラメータの初期値を必要とするが、これはあらかじめ変化前のゲインでステップ応答を取り、その整定値をパラメータの初期値として使用している。いずれの適応制御系でも当然のことながら、二回目以降の変化に対し、規範モデルで指定した性能に近づいている。

6.2 確率的 Regulation 特性の比較

調合制御では、原料ミル入口での原料組成変動としての確率外乱に対する制御性能が最も重要であるが、これをミル出口の HM の標準偏差で性能比較した。**Fig.6** に 10 日単位で Open loop、在来制御方法、EHAC 各々に切り替えた場合の HM の変動を $y(k)$ として示した。また、**Table 1** にプロセス変化を生じた場合を含め、5 日単位、即ち制御回数 240 回の HM の標準偏差を求め、三法による制御結果を比較した。一般的に在来法に比較し EHAC では、対象の変化に対しての制御性能の劣化を少なくし得る調整が十分に可能と判断出来る。

6.3 確率的 Tracking 特性の比較

Fig.7 に確率外乱存在下での設定値変更に対する Tracking 応答を示し、Table 2 に規範出力との偏差量の標準偏差で三法の制御性能の比較を示した。プロセスの特性変動が無い場合は、確率的 MRACS の標準偏差が最小となっているが、むだ時間が増加した場合には仮定 AC.3 が成り立たず、特にむだ時間が想定より大きくなる場合は発散してしまう結果となっている。一方在来制御との比較で EHAC は通常状態及びむだ時間が増加した場合いずれにおいても Tracking 性能で優れている。Fig.8 には設定値変更およびその後継続する外乱応答に対し、EHAC 制御におけるパラメータ適応則中の忘却係数 $\lambda(k)$ と適応ゲイン行列のトレースの変化の一例を示した。外部よりの設定値変化に対し、忘却変数が減少し、適応則への誤差信号の効果を大きくして、パラメータの修正を早める効果が出ているが、調整係数 g をあまり大きく取りすぎると、Tracking 後の外乱応答時に適応則が発散する可能性もあり、予測区間 T 、適応ゲイン行列の初期値と合わせて、プロセスの特性との関連し。適応則の発散を防止しつつ、制御性能を保つ適切な調整値があると想定されるが、その調整規範については今後の課題である。

7. 三指標の多重ループ構成による制御性能

Fig.3 で示した静的前置補償器 P を伴う多重ループ EHAC 制御による三指標の制御性能を在来方式と比較した。下記にシミュレーションに使用した実機プラントのボーリングデータより得た各種の行列等の値を示す。

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{Z}} &= \begin{bmatrix} 0.526 & 0.016 & 0.007 & 0.076 \\ 0.025 & 0.562 & 0.902 & 0.123 \\ 0.006 & 0.200 & 0.031 & 0.009 \\ 0.007 & 0.078 & 0.037 & 0.665 \end{bmatrix} & \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} 1.0 & -0.81 & 0.0 & 0.0 \\ -0.90 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \\ -0.13 & -0.70 & 0.0 & 0.0 \\ -0.05 & -0.30 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \bar{\mathbf{u}} &= \begin{bmatrix} 0.803 \\ 0.141 \\ 0.0515 \\ 0.0047 \end{bmatrix} \\
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 4.938 & -10.37 & -10.37 & -10.37 \\ 0 & 17.78 & -46.21 & -46.21 \\ 0 & 0 & 46.22 & -73.96 \end{bmatrix} & \bar{\mathbf{B}}_0 &= \begin{bmatrix} 12.23 & 1.393 & 2.135 \\ -13.05 & -15.75 & -41.85 \\ 1.063 & 4.779 & -47.46 \end{bmatrix} & & (31) \\
\mathbf{P} &= \begin{bmatrix} 0.0897 & 0.00722 & -0.00233 \\ -0.0628 & -0.0552 & 0.0458 \\ -0.00431 & -0.00539 & -0.0165 \end{bmatrix} & \overline{HM} &= 2.10 \\
& & \overline{SM} &= 2.60 \\
& & \overline{IM} &= 1.60
\end{aligned}$$

プロセスの伝達関数については、Fig.2 内に例示している。なおプロセスの変化として下記二点を考慮した。

- a). 山場の石灰石の鉱床が変化した場合の例として、組成行列 $\bar{\mathbf{Z}}$ の一行目に $[+0.081, -0.043, -0.018, 0.049]^T$ を加える場合、
- b). むだ時間を 1[h] から 1.5[h] に変化させる場合。

Fig.9 は確率外乱存在下で上記 a) の場合における三指標の設定値変更に対する Tracking 性能の比較を示す。明らかに EHAC 制御が優れていると言える。**Table.3** には各指標の標準偏差による Regulation 性能の比較を示した。SISO 系の場合と同様 EHAC は特性変化に対して在来法に比較し、ロバスト性に優れていることが分かる。

以上の結果より総合して多段予測による EHAC は在来制御以上の性能を確保し、かつプロセス変動にもロバスト性を示しており、実機への適用が十分可能と判断できる。

結 言

セメントプラントの品質管理上重要な調合制御系に対し、原料の組成変動を含めた対象の構造を明示し、多段予測に基づく EHAC を取り上げ、確率外乱存在下での Regulation 性能と Tracking 性能を、PI 制御に基づく在来制御法および一段予測に基づく確率的 MRACS と比較し、シミュレーションによりその有効性を示した。

今後の検討課題として、EHAC 内の三つの調整パラメータの調整規範を確立する必要があること、さらに前置補償器を用いた多重ループ制御構成における前置補償器の適応化が考えられる。また動的干渉を含めたより一般的な多変数確率制御系への EHAC の適用も考えられるが、これらの検討にも本報告の結果が有効であると考ええる。

Literature cited

- Åstrom, K., J. and B. Wittenmark ; Adaptive Control - Second Edition-, p.168, Addison-Wesley, Massachusetts, USA (1995)
- Csaki,F., L. K. Keviczky, J. Hetthessy, M. Hilger and J. Kolostori ; “Simultaneous Adaptive Control of Chemical Composition, Finess and Maximum Quantity of Ground Materials at a Closed Circuit Ball Mill,” Proc. IFAC Congress, p.453-460, Helsinki, Finland (1978)
- Dugard,L. and I.D.Landau ; “Stochastic Model Reference Adaptive Controllers,” Proc. 19th IEEE. CDC, p.1132-1137, Albuquerque, USA (1980)
- Dugard, L., B. Egardt and I. D. Landau ; “Design and Convergence Analysis of Stochastic Model Reference Adaptive Controllers,” Int. J. Control, **35**, 755-773 (1982)
- Dugard,L., G.C.Goodwin and X.Xianya ; “The Role of Interactor Matrix in Multivariable Stochastic Adaptive Control,” Automatica, **30**, 701-709 (1984)
- Ichikawa,K. ; “Control System Design[1]” Keisoku to Seigyo **23** 550-555 (1984)
- Landau, I.D. ; “Evolution of Adaptive Control,” Trans. ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, **115** 381-391 (1993)
- Narendra, K. and R. V. Monopoli eds. ; Application of Adaptive Control, p.517 - 526, Academic Press. New York, USA (1980)
- Ozaki,K., O.Habata, and M.Fukuoka ; ”Stochastic Process Representation and Analysis of the Homogenizing Process in a Cement Plant,” System Seigyo Zyouhou Gakkai Ronbunshu,**11**, 241-250 (1998a)
- Ozaki,K.,O.Nakagawa and S.Ihara ; “Dynamic Analysis and Control of Closed-Circuit Ball Mill Grinding System,” Kagaku Kogaku Ronbunshu, **24**, 5-11 (1998b)
- Ozaki,K.,O.Habata; “An Application Study of Stochastic Adaptive Control for the Raw Material Mixing Control in a Cement Plant,” Proc. 17th SICE Symposium on Adaptive Control, p.105-110, Okayama, Japan (1997)

Sugimoto. H., K.Okamoto, K.Asakura, S.Ihara, M.Ueda,E.Mutuyoshi, J. Hiraishi and K.Miura ;

“Computer Control Applied to Cement Plant Operation (Part 1),” Kawasaki Gihou, **84** 1-8
(1984)

Wellstead,P.E. and M.B.Zarrop ; Self-Tuning Systems, p.167-179, John Wiley & Sons Ltd.,
Chichester, England (1991)

Ydstie,B.E. ; “Extended Horizon Adaptive Control,” Proc. IFAC World Congress, p.911-915,
Budapest, Hungary (1984)

Ydstie,B.E. L.S.Kershenbaum and R.W.H.Sargent ; “ Theory and Application of an Extended
Horizon Self-Tuning Controller,” AIChEJ., **31**, 1771-1780 (1985)

Ydstie,B.E. A.H.Kemna and L.K.Liu ;“Multivariable Extended-Horizon Adaptive Control,”
Comput. Chem. Engng., **12**, 733-743 (1988)

Table 1 Regulation performance comparison with standard deviations of HM

Control method	Adjustable parameter	Nominal	$f_0=3.69$	$d=3$ (1.5 h)	$L_c=1$
EHAC with Step-Input Strategy	$T=4, g=100, F(0)=10 \times I$	0.0260	0.0266	0.0301	0.0364
	$T=5, g=100, F(0)=10 \times I$	0.0289	0.0300	0.0317	0.0358
	$T=5, g=1,000, F(0)=10 \times I$	0.0303	0.0296	0.0332	0.0358
Classical Control (PI+Smith Method)	$K_p=0.2, T_i=0.8$	0.0374	0.0386	0.0414	0.0391
Stochastic MRACS	$F(0)=100 \times I, \lambda_1=\lambda_2=1.0$	0.0250	0.0293	0.0308	0.0371

(note) : -Nominal operating condition : $f_0=2.42$, $d=2$ (i.e. 1.0 h), $L_c=3$

Table 2 Tracking performance comparison with standard deviations of tracking error of HM

Control method	Adjustable parameter	Nominal	$d=3$ (1.5 h)
EHAC with Step-Input Strategy	$T=4, F(0)=10 \times I, g=100$	0.0319	0.0440
	$T=5, F(0)=10 \times I, g=1,000$	0.0317	0.0438
Classical control (PI+Smith Method)	$K_p=0.2, T_i=0.8$	0.0479	0.0580
Stochastic MRACS	$F(0)=100 \times I, \lambda_1=\lambda_2=1.0$	0.0296	∞

(note) : -“ ∞ ” means “Calculation be diverged”

Table 3 Multi-loop regulation performance comparison for standard deviations of HM , SM , and IM .

Control Method	Adjustable Parameter		Standard Deviation		
			Nominal	“B” Change	$d=3$ (1.5 h)
Multi-loop EHAC (step-input strategy with fixed pre-compensator)	$T=5, g=100, F(0)=100 \times I$	HM	0.0256	0.0258	0.0292
		SM	0.0377	0.0376	0.0400
		IM	0.0302	0.0215	0.0221
Classical Control (PI+Smith method with pre-compensator)	$K_p=0.484, T_i=0.8$ (h)	HM	0.0291	0.0287	0.0325
		SM	0.0612	0.0586	0.0700
		IM	0.0302	0.0362	0.0345

(note) : K_p has been decided with a try and error method to get same performance as the reference model defined by Eq. (28) and same figure for three loops

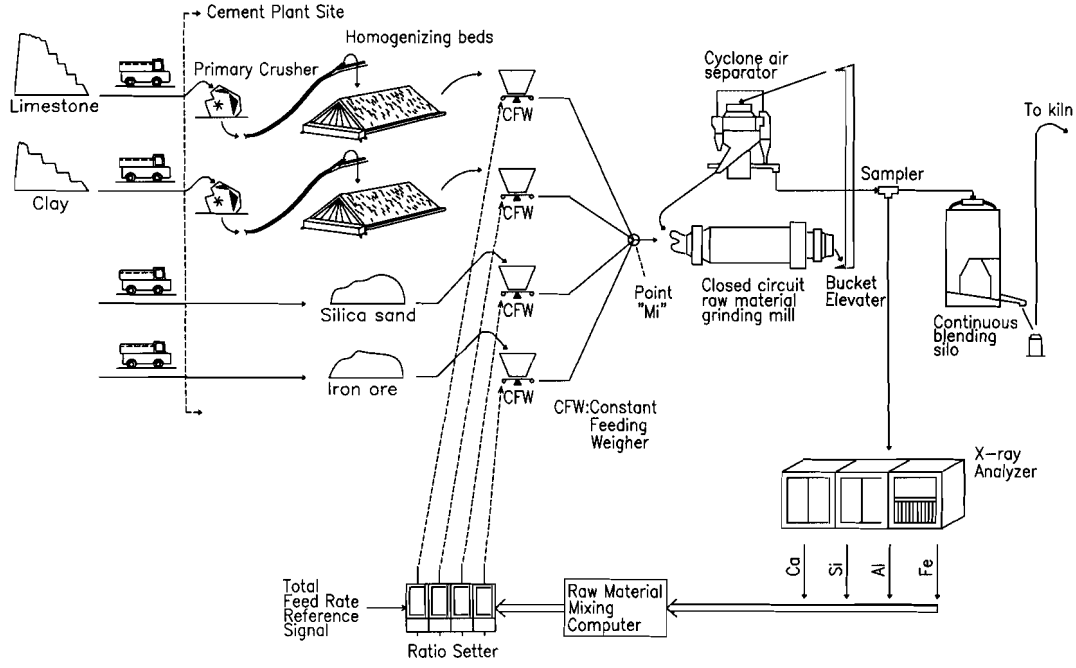
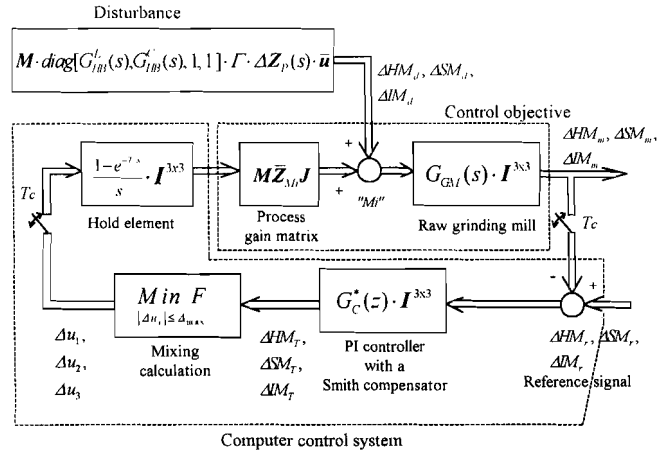


Fig. 1 Typical process flow diagram of a raw material preparation process



$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}, SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}, IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

$$G_C^*(z) = \frac{K_p \left(1 + \frac{T_c}{T_i} \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \right) (1-hz^{-1})(1-z^{-1})}{(1-hz^{-1})(1-z^{-1}) + f_p K_p (1-z^{-1}) z^{-1} \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) (1-h)(1-z^{-1}) + \frac{T_c}{T_i} (1-hz^{-1}) \right]}$$

Example of transfer functions:

$$G_{GM}(s) = \frac{\exp(-s)}{4(1+0.038s)^3 - 3}, G_{HB}^L(s) = \frac{1+0.72s}{1+14.79s}, G_{HB}^S(s) = \frac{1+0.41s}{1+5.74s}$$

Fig. 2 Overall block diagram of the mixing control system

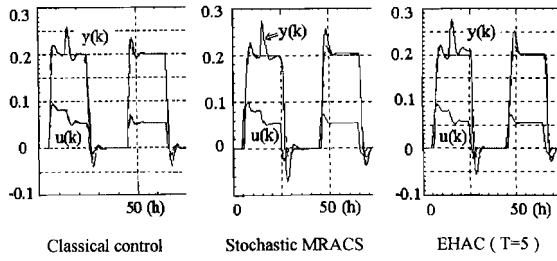


Fig. 5 Comparison of deterministic tracking performances

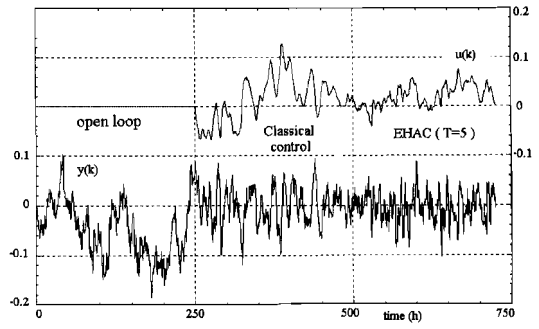


Fig. 6 HM fluctuation results at the mill outlet without any control, with a classical control and with an EHAC

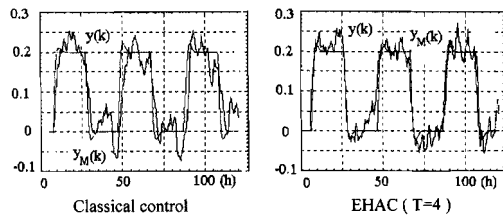


Fig. 7 Comparison of tracking performances under stochastic disturbance

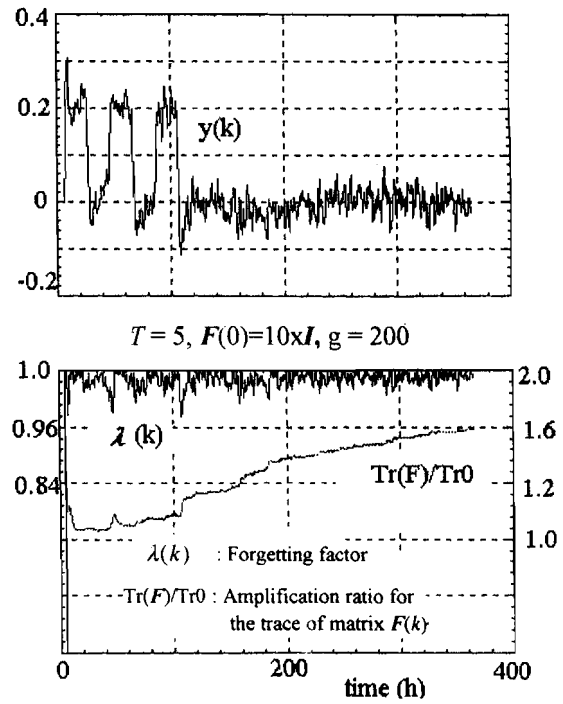


Fig. 8 Adaptation algorithm behaviors of EHAC system during tracking and following regulation

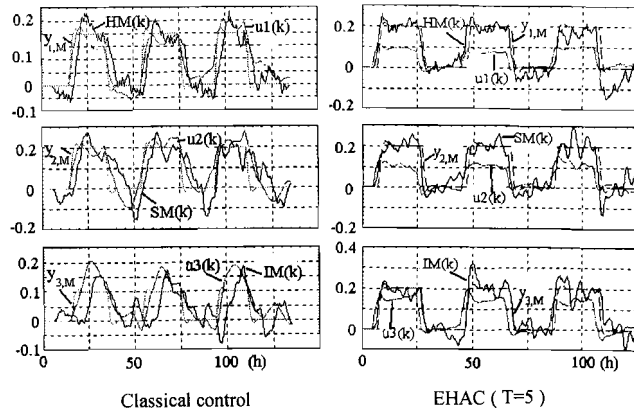


Fig. 9 Multi-loop control results for tracking performances under stochastic disturbance