

ホッパの流出量制御

和田憲造*・早野延男*・森岡 弘*・松崎 豊***

Control of Out-Flow Quantity from Hopper

Kenzo WADA, Nobuo HAYANO, Hiroshi MORIOKA and Yutaka MATUZAKI

Abstract

In this paper, we discuss the control of out-flow quantity of a known amount of granular material from a hopper.

Generally, there are many kinds of stochastic disturbance in the processes handling granules. For such processes, it is difficult to obtain a good performance by using conventional control schemes. Therefore, adaptive control algorithms which can operate in a deterministic or a stochastic environment are applied to the hopper system.

For the control algorithm, six kinds of adaptive algorithms were used and the behaviours of those algorithms in tracking and regulation were examined.

As for the results, it is shown that the self-tuning regulator, which can operate in a deterministic environment as a MRAC with desired performance and in a stochastic environment as a self-tuning regulator with desired performance, is more robust and very useful for the processes handling granules.

1. 緒 言

各種粉粒体プロセス（例えば配合、粉碎、造粒プロセス）の自動化において、原料の定量供給を行う上で供給機のもつ役割は非常に重要なものとなっている。供給機に必要な条件としては排出精度が高いこと、供給機の動特性が良好でかつ操作入力に対して供給量が直線的に変化することなどが挙げられる。通常、これらの条件を満足するために、ホッパ下部に、取り扱う粉粒体の物性に応じて適切に選定された供給機（フィーダ）が取り付けられている。このときの供給装置の性能はホッパからの排出精度と供給機の性能によって決定される。したがって、ホッパ自体からの流出量を直接制御することができれば、全体として精度の良い供

給装置を実現することができる。

筆者らは各種粉粒体の定量供給を実現するために、粉粒体として砂、ナイロンチップおよび流動性の悪いコークスを用い、また制御方式として、LQ制御¹⁾および各種適応制御方式^{2),3)}を適用してホッパの流出量制御を行い、外乱、流出量の変動、パラメータの変動などについて検討を行ってきた。

適応制御の方式としては、現在、体系も整い実用に供されているものとして、モデル規範形適応制御(MRAC)とセルフチューニングレギュレータ(STR)の二つがある。本報告ではこれらの中で確率的な、あるいは確定的な立場に基づいて構成された6種類の適応制御アルゴリズムを用いて、応答波形、演算時間、収束速度、外乱に対するロバスト性などの面から検討を行なった。

2. 制御対象¹⁾

Fig.1に本実験装置の概略図を示す¹⁾。ホッパから流

*生産機械工学科

**三菱電機株式会社

***松下電器産業株式会社

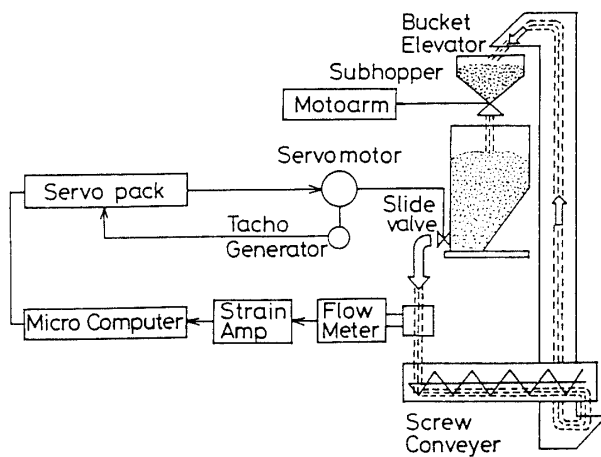


Fig. 1 Schematic diagram of the hopper system

出した砂は流量計により検出され、A/D コンバータを通してマイコンに取り込まれる。ここで、あらかじめ定められた制御式により操作量が決定され、D/A コンバータを通して操作部であるサーボモータに送られ、これによりホッパ側面に設けられたスライドバルブの開度を調節することで流出量の制御を行っている。

ホッパとして非対称垂直壁型ホッパを用いた。流出計にはインパクトライン流量計を使用している。この流量計はホッパから落下する粉粒体の衝撃力による水平分力を検出し、そのときの瞬間重量流量を検出するものである。粉粒体としては砂、ナイロンチップおよびコークスを用いた。

本プロセスのブロック線図を Fig.2 に示す。スライドバルブの伝達関数は一次遅れ要素で表されるが、ここではその時定数が小さいため K_v で近似している。またむだ時間は粉粒体が流量計に落下するまでの時間を表している。

プロセスは基本的には次の ARMA モデルで近似されるが、アルゴリズムによっては AR モデルを使用している。モデルのパラメータは最小二乗推定法を用いて推定される。ここで、ARMA モデルの次数 n は Fig.2 のブロック線図をもとに、また、むだ時間がサンプリング周期に比べて小さいことから $n=4$ とした。なお ΔQ は流量計に入る外乱を表している。

$$y(k) = \frac{\sum_{i=1}^n b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} u(k) = \frac{\sum_{i=1}^n r_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} \Delta Q(k) \quad (1)$$

3. 制御方式

制御方式として以下に示す 6 種類のアルゴリズム (AL1~AL6) を用いた。AL1~AL4 は確定的な立場で設計されたものであり、AL5, AL6 は確率的な立場で設計されたものである。また AL1~AL3 はリアプノフの直接法を用いてアルゴリズムが導出されているのに対し AL4, AL6 はポポフの超安定論に基づいて設計されている。AL5 は同定論と CE 原理に基づいた設計法であり、セルフチューニングレギュレータ (STR) の原型である。以下に各アルゴリズムについて簡単に述べる。

①アルゴリズム 1 (AL1) ²⁾

本アルゴリズムはリアプノフの安定理論に基づく大川らのアルゴリズム⁴⁾を零点補償することにより非最小位相推移系に拡張したアルゴリズムである。プロセスモデルとして (1) 式で示される ARMA モデルが用いられる。

制御則

$$y(k) = \{y_m(k+1) - \sum_{i=1}^n \alpha_i(k) z^{-i} y(k+1) - \sum_{i=2}^n \beta_i(k) z^{-i} u(k+1)\} / \beta_1(k) \quad (2)$$

適応アルゴリズム

$$\Phi(k+1) = \Phi(k) - \lambda \frac{\xi(k+1)}{\omega(k)^T \omega(k)} \omega(k) \quad (3)$$

$(0 < \lambda < 2)$

ただし

- $\alpha_i(k), \beta_i(k)$; 適応ゲイン
- $e(k) = y_m(k) - y(k)$ (出力誤差)
- $\xi(k) = y_m(k) - \hat{y}(k)$ (拡張誤差)
- $\Phi(k)$; パラメータベクトル
- $\omega(k)$; 入出力ベクトル

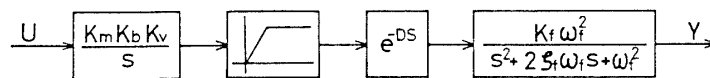


Fig. 2 Block diagram of the hopper system

②アルゴリズム 2 (AL2)⁵⁾

本アルゴリズムはプロセスをむだ時間+AR モデルで記述することにより、プラントの伝達関数の形、分母、分子の次数などを正確に知ることなく追従性能のよい設計が可能であり、非最小位相系のプロセスにも適応できるアルゴリズムである。

プロセスモデル

$$y(k) = \frac{z^{-a} b_i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} u(k) \quad (4)$$

制御則

$$u(k) = u_f(k) - \alpha u(k-1) - \beta u(k-2) \quad (5)$$

ただし

$$u_f(k) = \frac{1}{\pi_1(k)} [y_m(k+1) - \sum_{i=1}^n \{\theta_i - \phi_i(k)\} \times y_f(k+1-i) - \sum_{i=2}^n \pi_i(k) u_f(k+1-i)] \quad (6)$$

y_m : 規範モデルの出力

α, β : PID 調節動作を実現するためのフィルタのゲイン

サフィクス f はフィルタされた出力を表わしている。

適応アルゴリズム

$$\gamma(k) = \gamma(k-1) - \varepsilon(k) e_f(k) \delta(k-1) \quad (7)$$

$$\varepsilon(k) = \rho(k) / \{\delta^T(k-1) \delta(k-1) + \eta(k)\} \quad (8)$$

$$0 < \rho(k) < 2, \quad 0 \leq \eta(k)$$

③アルゴリズム 3 (AL3)²⁾

未知の確定外乱が加わるプロセスに対して、この外乱を時間の多項式で記述できる外乱と、あるダイナミックスを持つ外乱の2つに分けてモデル化を行ない、AR モデルで記述されたプロセスをもとに、リアプノフの安定定理に基づき導出されたアルゴリズムである。

プロセスモデル

$$A(z^{-1})y(k) = bu(k) + w_1(k) + w_2(k) \quad (9)$$

ここで

$$A(z^{-1}) = 1 - \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}$$

$w_1(k)$: ダイナミックスをもつ外乱

$w_2(k)$: 時間の多項式で表わされる外乱

外乱 $w_1(k), w_2(k)$ の特性

$$D_1(z^{-1})w_1(k) = 0 \quad (D_1(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_{D1}} c_i z^{-i})$$

$$D_2(z^{-1})w_2(k) = 0 \quad (D_2(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^{n_{D2}})$$

操作量 $v(k), u(k)$

$$v(k) = \{y_m(k+1) - (1 - z^{-1})^{n_{D2}} \sum_{i=1}^{n'} \{\theta_i - \phi_i(k)\} * y(k+1-i) - \{1 - (1 - z^{-1})^{n_{D2}}\} y(k+1) - \sum_{i=1}^{n_{D1}} \pi_i(k) v(k-i) / \pi_0(k)\} \quad (10)$$

$$D_2(z^{-1})u(k) = v(k) \quad (11)$$

ただし $v(k)$ は n_{D2} 次の離散時間積分特性を含むプロセスに対する入力である。

適応アルゴリズム

$$\gamma(k) = \gamma(k-1) - \varepsilon(k) e(k) \delta(k-1) \quad (12)$$

$$\varepsilon(k) = \rho(k) / \{\delta^T(k-1) \delta(k-1) + \eta(k)\}$$

$$0 < \rho(k) < 2, \quad 0 \leq \eta(k)$$

ただし $\gamma(k)$; パラメータベクトル

$\delta(k)$; 入出力ベクトル

$e(k)$; 式誤差 (= $y_m(k) - y(k)$)

d_i ; パラメータ誤差

$$(\theta_i - a_i (i = 1, \dots, n'))$$

④アルゴリズム 4 (AL4)⁶⁾

本アルゴリズムは鈴木らによって提案されたもので、拡張誤差信号の概念とポポフの超安定定理に基づいて構成されたアルゴリズムである。

プロセスモデル

$$y(k+1) = \sum_{i=1}^n a_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^n b_i u(k) \quad (13)$$

制御則

$$u(k) = \sum_{i=1}^n g_i(k) v_i(k) \quad (14)$$

適応則

$$\delta(k) = \delta(k-1) - \gamma v(k-1) \eta(k) \quad (15)$$

調整パラメータ $g_i(k)$ に対する適応則

$$g_0(k) = g_0(k-1) - \gamma_0 v_0(k-1) \eta(k)$$

$$g_i(k) = g_i(k-1) - \gamma_i v_i(k-1) \eta(k) \quad (16)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 2n)$$

ただし

$\eta(k)$; 拡張誤差信号 (= $e(k) + w(k)$)

$w(k)$; 拡張信号

$v_0(k)$; 補助信号

$e(k)$; 出力誤差

γ ; 任意の正定マトリックス

v_i ; プロセスの入出力データに基づく変数

⑤アルゴリズム 5 (AL5)⁷⁾

確率環境下において制御量の分散を最小にする、いわゆる最小分散制御のアルゴリズムであり、未知パラメータをもつプラントに対して CE 原理に基づいて構成されるアルゴリズムである。

プロセスモデル

$$y(k+1) = \sum_{i=1}^n a_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^n b_i u(k-d-i) + \lambda \sum_{i=1}^n c_i e(k-1) \quad (17)$$

次式で表わされる恒等式を用いて上記のプロセスを書き直すと式(19)のようになる

$$z^d C(z) = A(z) F(z) + G(z) \quad (18)$$

プロセスモデル

$$\begin{aligned} y(k+i+1) + \alpha_1 y(k) + \dots + \alpha_m y(k-m+1) \\ = \beta_0 (u(k) + \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_l u(k-l)) \\ + \varepsilon(k+i+1) \end{aligned} \quad (19)$$

制御則

$$\begin{aligned} u(k) = ((\alpha_1 y(k) + \dots + \alpha_m y(k-m+1)) / \beta_0 \\ - \beta_1 u(k-1) - \dots - \beta_l u(k-l)) \end{aligned} \quad (20)$$

パラメータ α_i, β_i は最小二乗推定法などを用いて推定される。

⑥アルゴリズム 6 (AL6)³⁾

本アルゴリズムは確定環境下においてプロセスの出力が規範モデルに追従するトラッキング問題、またプロセスとの誤差が、あるダイナミクスをもって零に収束するレギュレータ問題の二つの設計目的を満足するアルゴリズムであり、確率環境下において次の評価関数を最小化するアルゴリズムである。

$$I = E\{[C_2(z^{-1})(y(k+d) - y_m(k+d))]\}^2 \quad (21)$$

プロセスモデル

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + w(k) \quad (22)$$

$$N(z^{-1})w(k) = \lambda M(z^{-1})e(k) \quad (23)$$

ここで $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-nA}$

$$B(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-nB}$$

λ は粉粒体及びバルブ開度により定まる定数で、変動の大きさを表わしている。

また、 $w(k)$; 外乱

$e(k)$; (0, 1)の白色雑音

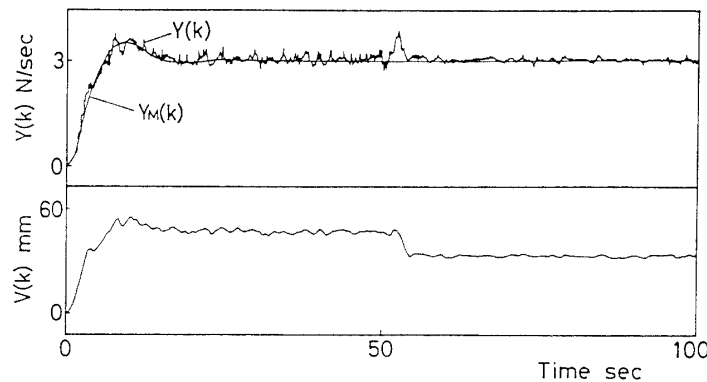


Fig. 3 Experimental result by an algorithm AL1 for a reference response and a deterministic disturbance input (granule ; sand)

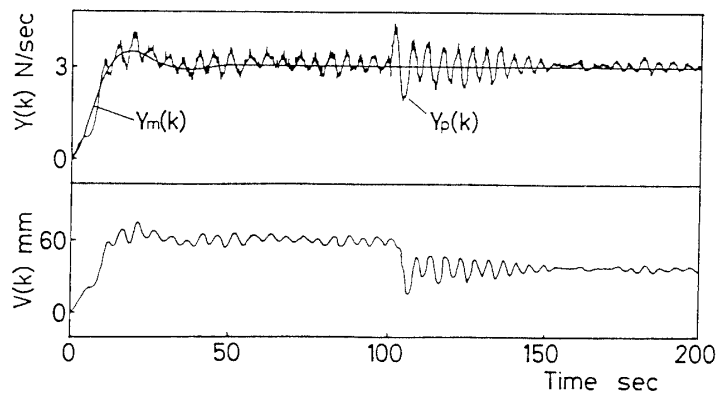


Fig. 4 Experimental result by an algorithm AL3 for a reference response and a deterministic disturbance input (granule ; sand)

制御則

$$u(k) = \frac{C_2(z^{-1})y_m(k+d) - \hat{P}_0^T(k)\Phi_0(k)}{b_0(k)} \quad (22)$$

適応アルゴリズム

$$\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + F(k)\Phi(k-d)\nu^*(k) \quad (23)$$

$$F(k+1) = \frac{1}{\lambda_1(k)} F(k) - \frac{F(k)\Phi(k-d)\Phi^T(k-d)F(k)}{\lambda_1(k) / \lambda_2(k) + \Phi^T(k-d)F(k)\Phi(k-d)} \quad (24)$$

ここで $\nu^*(k)$ は次式で表わされる適応誤差である。

$$\nu^*(k) = H(z^{-1})\varepsilon^*(k) (P - \hat{P}(k))^T \Phi(k-d)$$

4. 実験結果

実験はアルゴリズム AL1, AL3 及び AL6 の場合について行なった。次式に示す 2 次系のモデルにステップ入力を与え、これを規範応答 $y_m(k)$ として用いた。

$$Y_M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} R(s) \quad (25)$$

(R(s) : ステップ入力)

ここで $\zeta=0.5$, $\omega=0.2$ とした。

Fig. 3, 4 にアルゴリズム AL1, AL3 を用いたときの規範応答及び外乱に対する応答を示す。サンプリング周期 $\tau=0.5\text{sec}$, また零点補償要素は $P(z^{-1})=-200z^{-1}$ である。サンプリング周期が 0.5 の時プロセスは非最小位相系となっているが、零点補償することにより規範応答および外乱に対して良好な応答を示している。アルゴリズム AL3 を用いたときは応答は若干振動的となっている。

次にプロセスが時変パラメータを有している(粉粒体が粒度分布を有している)場合の一例として、ナイロンチップ(見かけ比重 $=0.72\text{g/cm}^3$)の粒子と砂(見かけ比重 $=1.37\text{g/cm}^3$)の 2 種類の粒径、密度の異なる粒子を用い、これらをホッパ内に交互に 20cm づつ積み重ねて実験を行なったときのアルゴリズム AL1, AL3 による応答波形を Fig. 5, 6 に示す。サンプリング周期は $\tau=0.5$, また零点補償要素 $P(z^{-1})=-200z^{-1}$ である。上段はプラントの出力、下段はそのときのバルブ開度の変化を示している。アルゴリズム AL3 については種々の外乱が加わっても規範応答に偏差を生じることなく良く追従するのがシミュレーションにより確かめられているが、実験波形においても若干振動的であるが規範応答によく一致している。またアルゴリズム AL1 による応答波形は応答の初期において多少の行き過ぎがみられる。他のシミュレーション結果も含めて、AL1 と

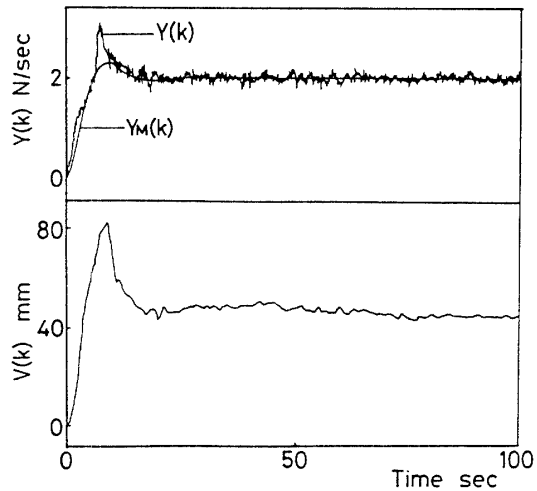


Fig. 5 Experimental result by an algorithm AL1 for the process with time variant parameters (granules ; sand and nylon chip)

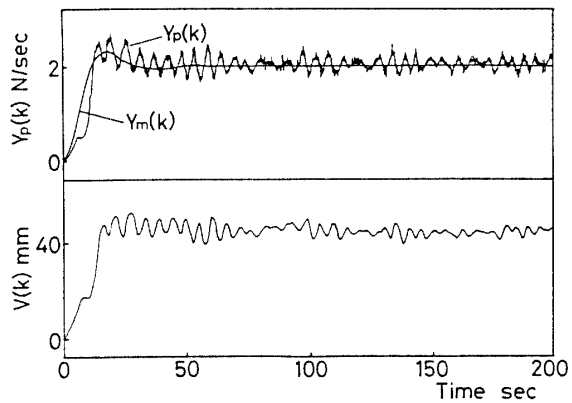


Fig. 6 Experimental result by an algorithm AL3 for the process with time variant parameters (granules ; sand and nylon chip)

AL3 のアルゴリズムを比較した場合、外乱およびプロセスのパラメータが変動するような場合には、外乱を考慮したアルゴリズム AL3 の方が規範応答に対する制御量の追従性がよい。外乱が入らない場合には AL1 はかなり良好な応答を示す。

次にアルゴリズム AL6 においては実験に際しては、モデルの次数および多項式 $C_2(z^{-1})$ は $n_A=4, n_B=3, C_2(z^{-1})=(1-az^{-1})^3$ とした。また、適応アルゴリズム中 $H(z^{-1})$ は $H(z^{-1})=1$ とし適応ゲイン行列のトレースが一定となるようにした。

まず、粉粒体として砂を用いた場合の実験による応答波形を Fig. 7 に示す。サンプリング周期 $\tau=1\text{sec}$, また $P_1(0)=150, a=0.4$ とし、100 ステップ少し手前

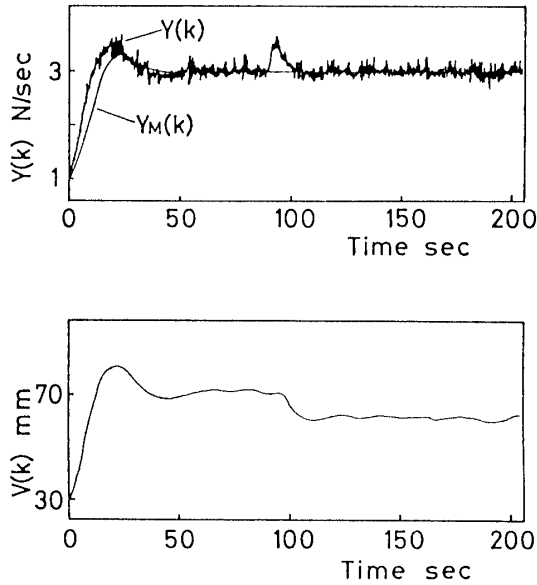


Fig. 7 Experimental result by an algorithm AL6 for the reference response (granule ; sand)

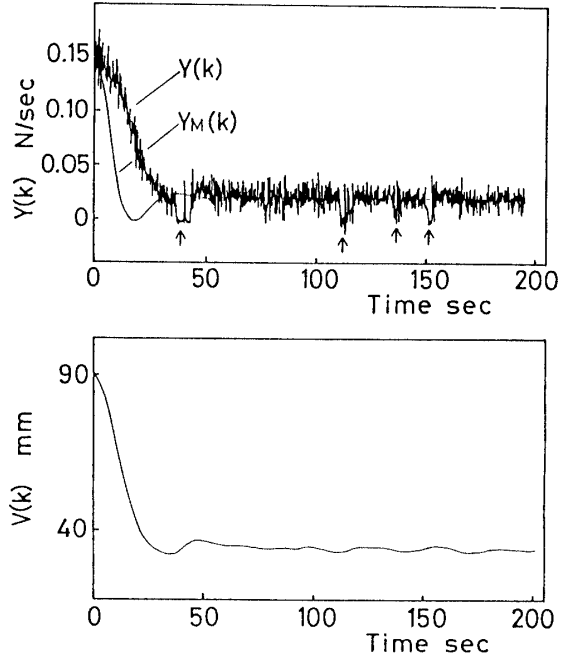


Fig. 9 Experimental result by an algorithm AL6 for the choking (granule ; sand)

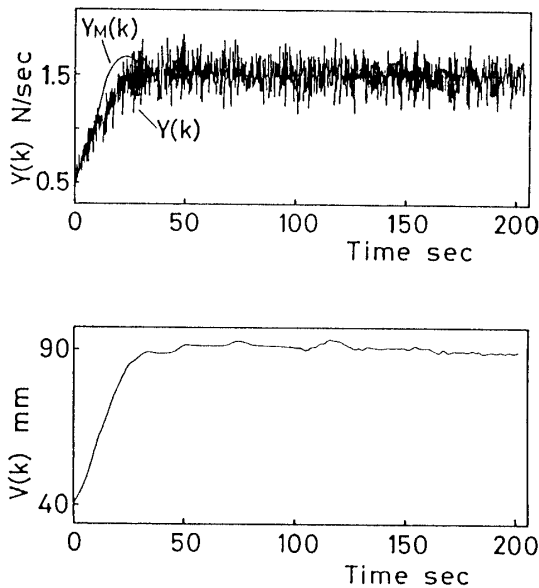


Fig. 8 Experimental result by an algorithm AL6 for the reference response (granule ; coke)

で0.98N/secのステップ状外乱を加えた。図より、プロセスの出力は規範応答によく追従しており、先のアルゴリズムAL1, AL3を用いたときよりもバルブ開度の変動が少ないことがわかる。すなわち操作量の変動が非常に少なく、ステップ状外乱に対しても約20ステップ後に安定し、バルブ開度も外乱に相当する開度で安定し、変動も少なく、外乱に対して安定であることが

わかる。Fig. 8に流出量変動の大きい粉粒体としてコークスを使用した場合の応答波形を示す。流出量の変動はかなり大きいですが、操作量はその影響をほとんど受けず非常に良好な応答を示した。次に閉塞が生じた場合の応答であるが、コークスはその粒径が大きいためバルブ開度が小さいところで閉塞を生じる。そこで、閉塞に対する応答を調べるため目標値を1.47→0.196N/secに変更して実験を行なった。このときの応答波形をFig. 9に示す。矢印は閉塞を生じた箇所を示している。バルブは自動的に調整され、閉塞にうまく対応しているのがわかる。アルゴリズムAL6は流出量の変動の大きい粉粒体に対しても適用可能であり、確率的な外乱に対してロバスト性の高いアルゴリズムであるといえる。

5. 各種アルゴリズムの比較

5.1 演算時間による検討

演算時間ではアルゴリズムの構造が簡単なAL1, AL2がほぼ同じで、サンプリング周期1~3秒では計算の遅れ時間を考慮する必要はない。次いでAL3, AL4の順で演算時間は長くなっており、AL4では各ステップごとに3次の代数方程式の求解が必要となるため少し時間を要するが、サンプリング周期が2~3秒程度であれば、演算時間遅れを特に考慮する必要はない。またAL5, AL6は、通常のBASIC言語を使用した場合、

約4～5秒(本プロセスに適用した場合)を要し、演算時間遅れをむだ時間として考慮する必要がある。

5.2 収束速度による検討

パラメータの収束速度は各アルゴリズムともほとんど変わらない。AL6は設計者があらかじめ指定できるパラメータが多く、その選定方法により、各種の応答パターンを得ることができる。特に $C_2(z^{-1})$ の選択はプロセスの特性に影響されず統一的な取扱ができる。

5.3 プロセスのパラメータ変動に対する検討

一般に適応制御系はこの種の問題に対して非常に優れた性能をもつ。しかしAL1では、プロセスのパラメータが変動する場合、操作量 $u(k)$ が変化するため、補償要素 $P(z^{-1})$ の選択に注意を要する。またAL6ではトレース一定アルゴリズムとした場合に非常に高いロバスト性を有する。

5.4 確定的外乱に対する検討

AL3は確定的外乱に対して制御系を構成しているので、理論的に安定性は補償されている。しかし、他のアルゴリズムも粉粒体プロセスで存在し得る確定外乱に対しては充分安定である。またAL3の方法はダイナミックスをもつ外乱の消去に関してはプロセスを高次化して記述することにより簡単に他のアルゴリズムに適用できる。

5.5 確率的外乱に対する検討

AL1～AL4はもともと確定的立場で設計されたもので、確率的外乱に対してはかなり弱い。その中でもAL2は非常に弱い。これはプロセスをARモデルで記述す

ると構造的に各種外乱に対して不安定になる可能性が高いためである。また仮に不安定にならない程度のノイズであっても、適応パラメータはかなり変動し、操作量 $u(k)$ はその影響を直接受けることになる。これは例えばAL1の調整則の形は

$$\Phi(k+1) = \Phi(k) + \Psi(k)w(k)$$

であり、出力の変動がパラメータに敏感に影響するためである。しかし、AL6、AL5では適応パラメータに与える影響は小さくなり、確率的外乱に対して高いロバスト性を有する。

以上より各種アルゴリズムとも利点、欠点があるが、粉粒体プロセスを扱う上では応答その他の面からAL6が最良であった。しかしノイズがあまり影響しない場合はコスト面を考えると、簡単な構造であるAL1～AL4が適当である。またAL1は非最小位相系に適用可能であり、ノイズに対しても比較的ロバストである。

6. 参考文献

- 1) 和田, 早野, 森岡; 機論, 54-49C, 189(1988).
- 2) 和田, 早野, 森岡; 機論, 54-504C, 1828(1988).
- 3) 和田, 早野, 森岡; 機論, 54-505C, 2140(1988).
- 4) 米沢, 大川; 計測自動制御学会論文集, 16-6, 49(1980).
- 5) 藤井, 水野; 計測自動制御学会論文集, 21-9(1985), 914.
- 6) T. Suzuki and S. Takashima; Int. J. Control, 28-2, 245(1978).
- 7) K.J. Astrom and B. Wittenmark; Automatica, 19, 185(1973).

(昭和63年10月15日受理)