ホ ッ パ の 流 出 量 制 御*
(第2報, 適応制御方式の適用)和田 憲造^{*1}, 早野 延男^{*1}, 森岡 弘^{*2}Control of Flow-out Quantity from a Hopper
(2nd Report, Application of Adaptive Control)

Kenzou WADA, Nobuo HAYANO, and Hiroshi MORIOKA

In this paper, we discuss the control of the flow out quantity of a known amount of granule from a hopper. First, for the control algorithm, the model reference adaptive control algorithm extended to a non-minimum phase system by compensating zeros of the system was used. Next, adaptive algorithm for a process with unknown deterministic disturbances was investigated. As for the results, it is shown that the proposed algorithm is very useful for the process with a deterministic disturbances and with time variant parameters.

Key Words: Granular Materials, Non-Minimum Phase System, Adaptive Control, Zero-Point Compensation, Deterministic Disturbance

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では流出量制御系において, 検出端である流量計の特性について検討を行い, ホッパからの流出量の変動は白色雑音で近似でき, また検出板上における粉粒体の滞留は一次遅れ要素で近似できることを示した。このとき粉粒体としては流動性の良好な砂およびナイロンチップを使用し, また制御式として LQ 制御方式を適用し, モデリング誤差およびパラメータ変動がある場合でも, 重みを変えることで良好な応答波形を得ることができた。

粉粒体の流動性が良好であるということは, バルブ開度に対するホッパからの流出量の割合(バルブのゲイン)がほぼ一定であり, かつ流出量の変動が小さいということを意味している。しかし一般の粉粒体プロセスにおいては, ホッパ内の粉粒体の粒度は必ずしも均一でなく, むしろ幅広い粒度分布を有する場合が少なくない。このような粉粒体プロセスを対象とした場合, 流出量の変動および粉粒体の持つ粒度分布によりプロセスのパラメータは時々刻々変化し, このためプ

ロセスの動特性を正確に把握することは困難となる。このような場合, これまでの制御方式では良好な制御を望むことは難しくなる。そこで本論文では, プロセスの動特性が未知であり, またパラメータが時変のプロセスに対して有効とされているモデル規範形適応制御系(MRACS)の適用について検討を行った。

適応制御の方式として, 現在, 体形も整い実用に供されているのは, 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)の二つである。

MRACSはその立脚する安定理論により Lyapunov の安定理論に基づくものと, Popov の超安定理論に基づくものとに大別される。ここでは本プロセスがサンプリング周期が小さいときに非最小位相推移系になることから, Lyapunov の安定理論に基づく MRACS 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⁽²⁾を適用する。さらにプロセスが非最小位相推移系になるのはプロセスを ARMA モデルで表現するからだとし, 次にプロセスを AR モデルで表し, このモデルに対して種々の外乱に対して定常偏差の生じないシステムの構成を行い, 本プロセスに適用し実験検討を行った。

* 昭和63年3月12日 中国四国支部第26期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年8月28日。

*¹ 正員, 山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台)。

*² 三菱電機(株)(〒652 神戸市兵庫区和田崎町)。

2. 対象プロセス

実験装置の概略図を図1に示す。本実験装置は前報で用いたのと同様である。

まずプロセスの零点がサンプリング周期でどのように変化するかを調べるために、プロセスを次式で示すARMAモデルで記述し、パラメータを最小二乗推定法により推定を行った。

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

このときの各サンプリング周期 τ における零点の値を表1に示す。

これより本プロセスはサンプリング周期 τ が小さいときに零点は単位円外に存在し、非最小位相推移系のシステムとなることがわかる。また τ が大きくなるにつれてこの零点は単位円の中心に近付いていく。これらのことから制御アルゴリズムとしては、零点補償を行うことで非最小位相推移系に拡張された適応アルゴリズム⁽²⁾(このアルゴリズムをMRAC-1とする)を用いる。

表1 零点の値

	Value of Zeros
$\tau = 0.5\text{sec}$	-1.095
	$0.43547 \pm 0.13418j$
$\tau = 1\text{sec}$	-0.61750
	$0.16324 \pm 0.11701j$
$\tau = 2\text{sec}$	-0.43691
	$-0.01112 \pm 0.01291j$
$\tau = 3\text{sec}$	0.08630
	-0.23396
	-0.29245

図1 実験装置概略図

3. 非最小位相系に対するMRACS

図2に示すように、プロセスの零点が z 平面の単位円内に存在するように補償要素 $P(z^{-1})$ を設ける。これにより零点補償されたプロセスの出力 $\tilde{y}(k)$ は次式のように表される。

$$\tilde{y}(k) = y(k) - P(z^{-1})u(k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $P(z^{-1})$ は次式で示される z^{-1} の多項式である。

$$P(z^{-1}) = \sum_{i=1}^m p_i z^{-i} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また p_i ($i=1 \dots m$) は次式で示される方程式の根が z 平面の単位円内に存在するように決定される。

$$\sum_{i=1}^n b_i z^{-i} - P(z^{-1}) \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

これよりプロセスは以下の条件を満足しているものとする。

- (1) $b_1 - p_1 \neq 0$
- (2) 補償されたプロセスの零点はすべて z 平面の単位円内に存在する。
- (3) n は既知である。また $m \leq n$ とする。

いま式(1)のプロセスに対する規範モデルとして次式で表される系を考える。

$$y_M(k) = \sum_{i=1}^n \{ a_i'(k) z^{-i} y_M(k) + b_i'(k) z^{-i} r(k) \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $r(k)$ は規範モデルに対する基準入力である。これより入力 $u(k)$ を次式のように合成する。

$$u(k) = \left\{ y_M(k+1) - \sum_{i=1}^n a_i(k) z^{-i} y(k+1) - \sum_{i=2}^n \beta_i(k) z^{-i} u(k+1) \right\} / \beta_1(k) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\alpha_i(k)$, $\beta_i(k)$ は適応ゲインである。また出力誤差 $e(k)$ および拡張誤差 $\xi(k)$ を

$$e(k) = y_M(k) - y(k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi(k) = y_M(k) - \tilde{y}(k) \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように定義すると、次の適応アルゴリズムを実行することにより $k \rightarrow \infty$ で $e(k) \rightarrow 0$ が保証される⁽²⁾。

$$\Phi(k+1) = \Phi(k) - \lambda \frac{\xi(k+1)}{\omega(k)^T \omega(k)} \omega(k) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$(0 < \lambda < 2)$

図2 プロセスの零点補償

ただし

$$\begin{aligned}\Phi(k)^T &= [\{\alpha_1(k) - a_1\}, \dots, \{\alpha_n(k) - a_n\}, \\ &\quad \{\beta_1(k) - g_1\}, \dots, \{\beta_n(k) - g_n\}] \\ \omega(k)^T &= [\{y(k), y(k-1), \dots, y(k+1-n), \\ &\quad u(k), \dots, u(k+1-n)\}] \\ g_i(k) &= \beta_i(k) - (b_i - p_i) \quad (j \leq m) \\ g_i(k) &= \beta_i(k) - b_i \quad (j > m)\end{aligned}$$

である。ところで T はベクトルの転置を表している。

3.1 実験結果 規範応答として次式に示す二次系のモデルにステップ入力を与え、これを規範応答 $y_M(k)$ として与えた。

$$Y_M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} R(s) \dots \dots \dots (10)$$

[$R(s)$: ステップ入力]

ここで $\zeta=0.5$, $\omega=0.2$ とした。本アルゴリズムはシミュレーション実験により良好に動作することはすでに確認されている⁽²⁾。図3にサンプリング周期 $\tau=0.5$, $P(z^{-1})=-200z^{-1}$ としたときの実験による応答波形を示す。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。

このときプロセスは非最小位相推移系となっているが、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。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(見掛け比重 $=0.72 \text{ g/cm}^3$)の粒子と砂(見掛け比重 $=1.37 \text{ g/cm}^3$)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20 cm ずつ積み重ねて実験を行ったときの応答波形を図4に示す。また $\tau=0.5 \text{ s}$, $P=-200z^{-1}$ である。

応答初期において規範応答に対して少し行過ぎを生じているが、その後は規範応答によく追従しているのがわかる。以上のことより本アルゴリズムは流出量の制御に対して有効に動作しているといえる。

図3 規範応答および外乱に対する応答

4. 未知確定外乱を伴うプロセスに対するMRACSの構成

3章ではARMAモデルを用いて零点補償することにより非最小位相推移系に対するMRACSを構成した。プロセスが非最小位相系となるのはモデルをARMAモデルで表すからだとし、ここではプロセスをむだ時間+ARモデルで記述し、藤井らの方法⁽³⁾をもとにして、安定なMRACSの構成について検討を行った。結果として、シミュレーション実験ではかなり良好な応答が得られたが、実システムに適用した場合良好な応答波形は得られなかった。この原因として、粉粒体プロセスは熱系のような時定数の大きいプロセスと異なり、変動の激しい、時定数の短いプロセスとなっているため、藤井らのアルゴリズムを適用するうえで、かなりの事前情報を必要とし、実際の適用において困難さがあったためではないかと考えられる。そこでこれらの変動に対処するために、あらかじめプラントに未知の確定外乱が加わることを想定し、このようなプロセスに対してMRACSを構成することで、粉粒体の変動に対してもロバストな制御系の構成について考える。

4.1 プロセスの記述 未知の確定外乱が加わるプロセスに対して適応制御系を構成する場合、この外乱をなんらかの方法でモデル化する必要がある。そこで、この外乱を時間の多項式で記述できる外乱と、あるダイナミクスを持つ外乱の二つの成分に分けて考え、そのモデル化を行う⁽⁴⁾。ここではプロセスはARモデルで記述され、リアプノフの安定定理に基づき適応アルゴリズムが導出される。ここで提案されるアルゴリズムは、藤井らのアルゴリズムに比べて、その実

図4 時変パラメータを有するプロセスの応答

行において非常に簡単である。

プロセスを次の AR モデルで記述する。

$$y_p(k+1) = \sum_{i=1}^{n_p} a_{pi} y_p(k+1-i) + b_p u(k) \cdots \cdots (11)$$

プロセスに未知確定外乱として、ダイナミックスを持つ外乱 $w_1(k)$ と時間の多項式で表せる外乱 $w_2(k)$ が加わるものとする。式(11)は次式のように表せる。

$$A(z^{-1})y_p(k) = b_p u(k) + w_1(k) + w_2(k) \cdots \cdots (12)$$

ただし

$$A(z^{-1}) = 1 - \sum_{i=1}^{n_p} a_{pi} z^{-i} \cdots \cdots (13)$$

ここで

$y_p(k)$: プロセスの出力

$u(k)$: プロセスの入力

a_{pi}, b_p : プロセスの未知パラメータ

$w_1(k)$: ダイナミックスを持つ外乱

$w_2(k)$: 時間の多項式で表される外乱

外乱 $w_1(k), w_2(k)$ はそれぞれ以下の特性を持つものとする。

$$D_1(z^{-1})w_1(k) = 0 \cdots \cdots (14)$$

$$D_2(z^{-1})w_2(k) = 0 \cdots \cdots (15)$$

ただし

$$D_1(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_{D1}} c_i z^{-i} \cdots \cdots (16)$$

$$D_2(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^{n_{D2}} \cdots \cdots (17)$$

また多項式 $D_1(z^{-1})$ は安定かつ、その次数の上限 n_{D1} は既知、 c_i は未知とする。式(12)、(14)より次式が成り立つ。

$$D_1(z^{-1})A(z^{-1})y_p(k) = D_1(z^{-1})b_p \times u(k-1) + D_1(z^{-1})w_2(k) \cdots \cdots (18)$$

また上式を差分方程式で表現すると

$$y_p(k) = \sum_{i=1}^{n'} a_i y_p(k-i) + \sum_{i=0}^{n_{D1}} b_i u(k-1-i) + w_2'(k) \cdots \cdots (19)$$

となる。ここで

$$D_1(z^{-1})A(z^{-1}) = 1 - \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}$$

$$D_1(z^{-1})b_p = \sum_{i=0}^{n_{D1}} b_i z^{-i} \cdots \cdots (20)$$

$$D_1(z^{-1})w_2(k) = w_2'(k)$$

図 5 積分器を含む制御系のブロック線図

また、 $n' = n_p + n_{D1}$ である。式(18)あるいは式(19)で表されるシステムは式(11)と比較してその次数が n_{D1} だけ高い拡大系となっている⁽⁴⁾。以下では式(19)で表されるシステムをプロセスの構造式とみなしこのシステムに対して制御系を構成することを考える。式(20)より

$$D_2(z^{-1})w_2'(k) = D_2(z^{-1})D_1(z^{-1})w_2(k) = 0 \cdots \cdots (21)$$

であることから式(19)を時間の多項式状の外乱を受けるシステムと考える。まず式(19)で示されるプロセスに対して n_{D2} 次の離散時間積分特性を含む図 5 の制御系を考える。

このとき図 5 より信号 v から出力 y_p に至る伝達関数 $G_{vu}(z^{-1})$ は

$$G_{vu}(z^{-1}) = \frac{1}{(1-z^{-1})^{n_{D2}}} \frac{\sum_{i=0}^{n_{D1}} b_i z^{-i-1}}{1 - \sum_{i=1}^{n'} a_i z^{-i}} \cdots \cdots (22)$$

となり v から y_p に至る特性は次の差分方程式で記述できる。ただし、式(22)の零点は z 平面の単位円内に存在するものとする。

$$y_p(k+1) = (1-z^{-1})^{n_{D2}} \sum_{i=1}^{n'} a_i y_p(k+1-i) + \{1 - (1-z^{-1})^{n_{D2}}\} y_p(k+1) + \sum_{i=0}^{n_{D1}} b_i v(k-i) \cdots \cdots (23)$$

ここで式誤差とパラメータ誤差を次のように定義する。

$$e(k) = y_m(k) - y_p(k) \quad (y_m(k): \text{規範応答}) \cdots \cdots (24)$$

$$d_i = \theta_i - a'_i \quad (i=1, \dots, n') \cdots \cdots (25)$$

また操作量 $v(k)$ を次のように合成する。

$$v(k) = \left\{ y_m(k+1) - (1-z^{-1})^{n_{D2}} \sum_{i=1}^{n'} \{\theta_i - \phi_i(k)\} \times y_p(k+1-i) - \{1 - (1-z^{-1})^{n_{D2}}\} y_p(k+1) - \sum_{i=1}^{n_{D1}} \pi_i(k) v(k-i) \right\} / \pi_0(k) \cdots \cdots (26)$$

図 5 および式(17)より

$$D_2(z^{-1})u(k) = v(k) \cdots \cdots (27)$$

上式を用いて式(26)を書き換えると

$$y_m(k+1) = (1-z^{-1})^{n_{D2}} \sum_{i=1}^{n'} \{\theta_i - \phi_i(k)\} \times y_p(k+1-i) + \{1 - (1-z^{-1})^{n_{D2}}\} y_p(k+1) - \sum_{i=0}^{n_{D1}} \pi_i(k) v(k-i) \cdots \cdots (28)$$

したがって、式(23)、(27)、(28)より式誤差 $e(k)$ は次のように表せる。

$$e(k+1) = y_m(k+1) - y_p(k+1)$$

$$\begin{aligned}
&= D_2(z^{-1}) \left[\sum_{i=1}^{n'} \{d_i - \phi_i(k)\} y_p(k+1-i) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{i=0}^{n_{D1}} \{\pi_i(k) - b_i\} u(k-i) \right] \\
&= D_2(z^{-1}) r^T(k) \delta(k) \dots \dots \dots (29)
\end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned}
\gamma^T(k) &= \{d_1 - \phi_1(k), \dots, d_n - \phi_n(k), \\
&\quad \pi_0(k) - b_0, \dots, \pi_{n_{D1}}(k) - b_{n_{D1}}\} \\
\delta^T(k) &= \{y_p(k), \dots, y_p(k+1-n'), \\
&\quad u(k), \dots, u(k-n_{D1})\}
\end{aligned}$$

である。式(29)の系に対して Lyapunov 関数を次のように選択する。

$$V(k) = \gamma^T(k-1) \gamma(k-1) \dots \dots \dots (30)$$

また適応アルゴリズムを

$$\begin{aligned}
\gamma(k) &= \gamma(k-1) - \varepsilon(k) e(k) \delta(k-1) \dots \dots \dots (31) \\
\varepsilon(k) &= \rho(k) / \{\delta^T(k-1) \delta(k-1) + \eta(k)\} \\
(0 < \rho(k) < 2, 0 \leq \eta(k))
\end{aligned}$$

とすると

$$\begin{aligned}
\Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) \\
&= \frac{e^2(k)}{\delta^T(k-1) \delta(k-1)} \left[\rho^2(k) - 2\rho(k) \right. \\
&\quad \left. - 2\rho(k) \frac{\{1 - D_2(z^{-1})\}}{D_2(z^{-1})} \right] \dots \dots \dots (32)
\end{aligned}$$

となり、 $0 < \rho(k) < 2$ より、 $\rho^2(k) - 2\rho(k) < 0$ となる。また $\rho(k) > 0$ であるので、

$$-2\rho(k) \{1 - D_2(z^{-1})\} / D_2(z^{-1}) < 0$$

したがって、リアプノフの安定定理より $\delta(k)$ が有界であれば $\Delta V(k) < 0$ となることから $k \rightarrow \infty$ で $e(k) \rightarrow 0$ が保証される。

4・2・シミュレーションおよび実験結果 本手法の外乱に対する安定性を確認するためにプロセスに以下に示す4種類の的外乱を与え、シミュレーション実験を行い、これに対する応答について調べた。実験では、 $n_p=5, n_{D1}=2, n_{D2}=1$ として一次の積分特性を含む形にした。また設定値は 2.94 N/s (300 g/s) とし、サンプリング周期 $\tau=1 \text{ s}$ の場合について行った。各パラメータの初期値は $\pi_0(0)=30$ とし、ほかはすべて零とした。

外乱の種類

- (1) 大きさ 0.98 N/s (100 g/s) のステップ状外乱 $w_2(k)$ (100 ステップ以降に流量計前段に加えた場合)
- (2) ランプ状外乱 $w_2(k)$ として

$$w_2(k) = \begin{cases} 2k & (0 \leq k < 50) \\ 2(k-50) & (50 \leq k < 100) \\ 2(k-100) & (100 \leq k < 150) \\ 2(k-150) & (150 \leq k < 200) \end{cases}$$

図 6 ステップ状外乱に対する応答

図 7 ランプ状外乱に対する応答

図 8 正弦波状外乱に対する応答

図 9 時変パラメータを有するプロセスの応答

(3) 正弦波状外乱 $w_1(k)$ として

$$w_1(k) = \begin{cases} 30 \sin(2\pi k/100) & (0 \leq k < 100) \\ 50 \sin(2\pi k/100) & (150 \leq k < 200) \end{cases}$$

(4) 時変パラメータとしてパルプゲイン K_v を次のように変化

$$K_v = K_v + (K_v/2) \sin(2\pi kT/N) \quad (N: \text{周期})$$

上記外乱に対する応答波形を図6~9に示す。これらのシミュレーションの結果、いずれの場合もプロセスの出力 $y_p(k)$ は、規範応答 $y_m(k)$ に応答の初期からよく一致している。また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よく追従しているのがわか

る。

時間の多項式状の外乱 $w_2(k)$ が(1)では外乱が加わる100ステップ、また(2)では零となった時点で操作量 $u(k)$ が振動し、プロセスの応答が若干変動しているが、約20s程度で規範応答に一致している。ダイナミクスを持つ外乱 $w_1(k)$ が加わる(3)の場合では、外乱に伴って、それを打ち消すように操作量は正弦波状に変動して、プロセスの出力は規範モデルに追従している。(4)の場合は操作量が若干変動しているのみで、出力 $y_p(k)$ は規範応答 $y_m(k)$ に一致している。また比較のために3章のMRAC-1のアルゴリズムによるシミュレーション結果を図10に示す。両者を比べてみると外乱を考慮したアルゴリズムのほうが規範応答に対する制御量の追従性が良いことがわかる。

本アルゴリズムでは、外乱の成分をダイナミクスを持つものが n_{D1} 次以下、時間の多項式で記述できるものが n_{D2} 以下として制御系の構成を行っている。ここでは $n_{D1}=2$, $n_{D2}=1$ としているのでダイナミクスを持つ外乱 $w_1(k)$ が二次のものまでは除去可能である。また一次の積分器を含む形となっているが、本プロセスはそれ自身一次の積分要素を有しているの、全体としては二次の積分特性を持つことになる。

図10 時変パラメータを有するプロセスの応答 (MRAC-1による)

図11 ステップ状外乱に対する応答

図12 時変パラメータを含むプロセスの応答 (実験波形)

(a) $\phi_i(k)$ の変化

(b) $\pi_i(k)$ の変化

図13 パラメータの変化

したがって時間の多項式で記述できる外乱 $w_2(k)$ は二次のものまで、つまりランプ状の外乱までは理論上除去可能となる。しかし実際は $w_1(k)$, $w_2(k)$ の合計の次数が $n_{D1} + n_{D2} + 1$ (プロセスの積分器) を超えない限り外乱除去は可能である⁽⁴⁾。またシミュレーション(1), (2)のような、積分器で除去できる時間の多項式状の外乱 $w_2(k)$ のみ加わる場合、適応パラメータが、外乱に対して変動していることから、外乱の除去は適応動作と積分器が個々に動作するのではなく、両者が複合して動作していると考えられる。また拡大されたプロセスが式(19)のような ARMA モデルで表されていることより、適応制御系を構成するうえで、本質的にプロセスを ARMA モデルで表したほうが AR モデルで記述するよりも外乱に対して安定である。しかし拡大されたプロセスの非最小位相系問題は今後の課題である。次にシミュレーション(1)および(4)について実験を行った。

(1)でのステップ状外乱が加わる場合では、流量計に 0.98 N/s (100 g/s) の外乱を別に設けた外乱用ホッパから流出させた。このときの実験波形を図 11 に示す。また(4)の時変パラメータを含む一例として 3 章で行ったと同様に、ナイロンチップと砂を交互にホッパに入れて実験を行った。このときの応答波形を図 12 に示す。またこのときのパラメータの変動を図 13 に示す。

両者ともシミュレーションに比べ応答は振動的になっ

ているものの、プロセスの出力 y_p は規範応答によく追従している。また図 12 は図 4 のように応答初期における行過ぎもなく、規範応答に対して追従性がよいといえる。図 13 に示されているパラメータの変化より外乱の除去は、適応動作と積分器の両者で行われていることがわかる。以上より未知確定外乱を考慮したアルゴリズムは粉粒体プロセスに対して非常に有効であることがわかる。

5. 結 論

本プロセスに 2 種類の適応アルゴリズムを適用した結果、粉粒体プロセスに対するこれらのアルゴリズムの有用性がシミュレーションおよび実験を通して確認された。また未知の確定外乱を伴うプロセスに対しては、この外乱をあらかじめ考慮にいったアルゴリズムを用いたほうが良好な応答を示した。ただし流出量の細かな変動(ノイズ)に対しては検討の余地があると思われる。

文 献

- (1) 和田・早野・森岡, 機論, 54-497, C (昭 63), 189.
- (2) 和田・早野・相良, 計測自動制御学会論文集, 22-3 (昭 61), 329.
- (3) Fujii, S. and Mizuno, N., *Preprints 8th IFAC Congr.*, VII (1981), 120.
- (4) 藤井・水野, 計測自動制御学会論文集, 21-9 (昭 60), 914.

討 論

〔質問〕 市川 邦彦〔上智大学理工学部〕

(1) 必要な $P(z^{-1})$ は、プラントが不安定なときには必ずしもその存在が保証されないと思う^(付1)

(2) $r \rightarrow \bar{y}$ の伝達関数は規範モデルに収束するが、 $r \rightarrow y$ の伝達関数は規範モデルには収束しないから、このような並列補償では、適応制御の目的を達したとはいえない。ただし、 r がステップのときのみ、 $y(k)$ は $y_m(k)$ に収束しうるが^(付1)。

(3) 本来非最小位相系であるプラントを AR モデルで近似すれば不安定になることはないという議論であるが、安定にはなっても、近似による誤差を伴うはずである。これをどう説明するか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、プラントが不安定な場合には $P(z^{-1})$ はその存在が保証されないが、今回は安定な非最小位相系プラントを対象として検討を行ったため、その点については言及しなかった。

(2) 本論文の中では直接述べていないが、補償要素の定常状態におけるゲインが零となるよう p_i を決定すれば〔例えば $p(z^{-1}) = p'(z^{-1})(1 - z^{-1})$ として〕 $k \rightarrow \infty$ で $e(k) \rightarrow 0$ が保証される。また特に本プロセスのように定常状態において $u(k) \rightarrow 0$ となるようなプロセスであれば、 p_i が本文中の条件を満足する限り $k \rightarrow \infty$ で $e(k) \rightarrow 0$ が保証される。〔このむね、本文中にあげた文献(2)に記載してある〕

(3) ご指摘のとおり AR モデルで近似すれば、近似による誤差を伴い、またその度合はモデルの次数により変わってくると思われる。今回はシミュレーションを行うことによりモデルの次数の決定を行っている。

〔付1〕 市川, 計測自動制御学会論文集, 19-7 (昭 58), 526.

〔質問〕 藤井省三〔名古屋大学工学部〕

(1) 2章と4章とで、プロセスの数式モデルがことなるのはなぜか。論理に首尾一貫性が欠けると思うが。

(2) 4・1節で提案されているアルゴリズムは文献(4)のそれに比べて非常に簡単であるとのべているが、その意味がよくわからない。文献(4)には、むだ時間が1のARモデルの場合も含まれる一般の場合を示してあるがなぜか。

(3) 4章の定式化では、外乱がないときにパラメータが真値に近づくとき零点が不安定になることがおこり、非最小位相系の対策がされていないと思うがいかがか。

(4) 貴研究では、適応制御のスタート時から過渡特性を良くされようとしているが、現在の適応制御の理論ではまだスタート時の過渡特性を最適化できないと思う。したがって、現状では最初の過渡変化に対して良い応答をうるにはそれ以前に同定区間を設けるなどの工夫がいると思うがいかがか。

(5) 4章で文献(3)の方法を用いるとき、かなりの事前情報を必要としたとあるが、むだ時間、分母の次数をどのように決められ、その値をいくつに選定されたかをお示しいただきたい。

〔回答〕 (1) 本研究はホッパの流出量の制御に対して適応制御方式の適用について検討を行ったものであり、本プロセスは離散化した場合にサンプリング周期が小さいときに非最小位相系になることから、適応制御系の構成を行ううえで2とおりの方法(プロセ

スをARMAモデルで表した場合とARモデルで表した場合について)について検討を行った。そのため結果的に両者の数式モデルが異なることになる。

(2) 今回用いたアルゴリズムが藤井らのアルゴリズムに比べて簡単であると述べているのは、その実行に際してである(プログラムおよび計算時間など)。アルゴリズムを実際のプラントに適用する場合、サンプリング周期の制約の面から、なるべく簡単で計算時間の短いアルゴリズムが望ましいと考える。この点に関して、今回用いたアルゴリズムは推定したパラメータをもとに直接操作量を合成しており、この意味で簡単であると思われる。

(3) ご指摘のとおり、外乱がないときは零点が不安定となることが起こり得ると考えられるが、今回は外乱の存在を仮定し、かつ拡大されたプロセスの零点は単位円内に存在するものとして検討を行っている。ご指摘の点については本文中でも若干ふれたが、今後の検討課題として考えていきたいと思っている。

(4) ご指摘のとおり、スタート時の過渡特性については現状では最適化できないと思われる。また特にノイズなどの混入するプロセスではなおさら難しいと思われる。したがって実験を行う際にあらかじめシミュレーションなどにより試行を行った後パラメータの初期値を与えるといったことも行っている。

(5) むだ時間は $l=1$ ($l=2$ ではシミュレーション段階で不安定となった)、分母の次数は $n=7$ とした。これらはシミュレーションにより試行錯誤的に決定した。