脈動を有する重量式フィーダの制御*

和田 憲造^{*1}, 伊 東 宏^{*2}, 森 元 映 治^{*1}

Control of the Outflow Quantity Discharged Pulsatingly from a Loss in Weight Type Feeder

Kenzo WADA, Hiroshi ITO and Eiji MORIMOTO

In the present report, we discuss the control method to realize the constant feed of granules from a loss in weight type feeder. Usually, the outflow quantity integrated per unit time is used as the controlled variable from the viewpoint of the accuracy in the control of the outflow rate from a loss in weight type feeder. In this experiment, however, a instantaneous outflow rate per unit time is used in order to achieve better accuracy of feeding. Generally, the outflow quantity is pulsatingly discharged from the feeder owing to the shape of the screw. Thus, we consider two control methods: one where the outflow rate signal filtered by a lowpass filter is taken as the controlled variable, and another that considers the pulsating component. As the control algorithm, the LQI control algorithm is applied for the former, and the STR control algorithm is for the latter. As for the results, good response waves and good control performances are obtained by applying these algorithms to the feeder system.

Key Words: Loss in Weight, Feeder, Pulsation, LQI Control, STR Control, Granules

1. 序 論

粉粒体を一定量供給する装置の一つとしてロードセルを用いたロスインウェイト方式のフィーダがよく用いられている⁽¹⁾。このフィーダは計量ホッパ下部にフィーダを備えており、常に一定量を精度良く供給できるよう排出流量を調整している。

本研究は、二軸かみ合いスクリューを有するロスインウェイト方式のフィーダを用いて、粉粒体の定量供給を実現するための制御システムについて検討を行ったものである。

一般に、スクリューフィーダから排出される流出量はスクリューの形状に起因する脈動(流量の周期的変動)を生じる。脈動は流出量算出時において誤差の要因となることから、制御系を構成する場合、脈動をどう取扱うかが問題となってくる。

フィーダからの流出量を制御する方法として瞬間流量を制御する方法(流量値制御方式)と積算流量を制御する方法(積算値制御方式)の二通りがある⁽²⁾。流量値制御方式は一定時間の重量変化から流量を算出し、

設定流量値との差により排出量を調整する方法である。この方式は単位時間当たりの減量(瞬間流量)から流量を算出していることから、サンプリング周期を短く取ると誤差が増大し、精度の点で問題があるとされている。これに比べて積算値制御方式は各サンプリング時点で計量ホッパから排出されるべき重量(積算排出重量)と比較しながら排出量を調整する方式であり、サンプリング周期を短くすることにより、かなり高精度な制御が可能とされている。また、総重量を制御できる利点も持っている。しかし、供給精度は通常、瞬間流量をもとに算出されるものではなく、実際に排出されている流量をもとに算出されるものである。したがって、流量値制御においてノイズおよび脈動などの影響を受けることなく、排出量をうまく制御することができれば良好な供給精度を得ることができる。また、時々刻々変化する設定値に制御量を追従させるよりも、ある一定の定められた目標値に向かって制御を行うほうがより良好な制御性能が期待できる。

本研究では流量制御方式を適用して定量供給システムを構成することを試みた。その際、脈動の取扱い方法により二通りの制御システムについて検討を行った。一つはノイズおよび脈動を考慮した制御システム、他の一つはこのノイズおよび脈動をフィルタリング

* 原稿受付 平成3年6月12日。

^{*1} 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台)。

^{*2} 山口大学大学院。

し、フィルタリングされた流出量を制御量とした制御システムである。前者に対する制御方式としてSTR制御方式⁽³⁾、後者に対してはLQI制御方式⁽⁴⁾を適用し、その制御性能などについて検討を行った。

2. 装置概要

装置の概略を図1に示す。装置はスクリーフィーダ、ロードセル、フィードホッパ、V/Fコンバータおよびコントローラであるパーソナルコンピュータなどから構成されている。

スクリーフィーダは二軸かみあいフィーダ（羽根径50 mm、ピッチ40 mm）である。本装置のように軸を二軸にすること、またスクリー羽根を間欠的に配置することにより脈動を軽減する効果があると思われる。

ロードセルの上には、スクリーフィーダ、フィードホッパ、モータが搭載されている。フィードホッパ内には粉粒体が充てんされており、これらの重量はロードセルによって検出され、その値は分解能を高めるためV/Fコンバータにより周波数に変換される。結果として本装置では100 kgの重量が400 kHzの周波数に変換されることから0.25 g/Hzの分解能を持つことになる。なお、粉粒体としてポリプロピレンを用いた。

制御に際しては周波数に変換された重量をもとに、操作量を計算し、スクリーフィーダからの流出量を制御している。

3. 制御対象

フィーダからの流出量を算出する上で脈動が問題となることから、まず流出量の変動について調べた。図2にインパクトライン流量計で測定した、各回転における流出量の変動の様子を示す。

回転数が低い場合に特異な波形が得られているが、これは二軸かみあいスクリーにおいて、スクリー

羽根の位置がお互いにずれており、このため2本のスクリー軸がおのおの脈動を発生し、それらが合成されて図のような波形が得られたものと思われる。回転が速くなると脈動は正弦波に近い形となる。なお、この脈動は回転数の2倍の周波数で発生している。なお、ノイズおよび脈動をフィルタリングするためにカットオフ周波数 $f_c=0.1$ Hzの二次のローパスフィルタを用いた。

LQI制御方式をプラントへ適用する場合、またSTR制御系を構成する場合にプラントモデルが必要となる。そこで最小二乗推定法を用いてプラントの同定を行った。プラントのモデルは次式で表される三次のARMAモデルとし、プラントを同定する際の出力としてローパスフィルタによりフィルタリングされた出力を、また同定のための入力信号 $u(k)$ としてM系列信号を用いた。

$$y(k) = \frac{z^{-1} \sum_{i=1}^3 b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^3 a_i z^{-i}} u(k) \quad \cdots (1)$$

このとき、同定されたプラントの極と零点は

極 $-0.230, \quad 0.804 \pm 0.273$

零点 $3.067, \quad -1.922$

となり、零点は z 平面の単位円外に存在し、本プラントは非最小位相系となる。

4. LQI制御システムの構成

4.1 LQI制御方式 流出量を出力としたときの制御対象の状態推移方程式は次式で表される。

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k) \quad \cdots (2)$$

$$y_f(k) = cx(k)$$

ここで、 $y_f(k)$ はフィルタリングされた出力である。

図1 実験装置の概略図

図2 流出量波形

LQI 制御方式は定常偏差を解消するために積分動作を主体とした、次式で示される二次形式評価関数を最小化する制御方式である。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\{r(k) - y(k)\}^2 + R\{\Delta u(k)\}^2] \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

評価関数 J を最小とする $\Delta u(k)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= -[R + b^T P b]^{-1} b^T P A x(k) \\ &= -f x(k) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、上式の P はリカッチ方程式の定常解である。これより最適操作量は次式のように与えられる。

$$u(k) = k_1 \sum_{j=0}^k [r - y(j)] - \sum_{j=1}^3 k_j x_j(k) \dots\dots\dots (5)$$

なお、LQI 制御方式を適用するに際し、オブザーバとして次式で示されるカレントオブザーバ⁽⁵⁾を用いた。

$$\begin{aligned} z(k+1) &= A x(k) + b u(k) \\ x(k+1) &= z(k+1) + k[y(k+1) - c z(k+1)] \\ &\dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

4・2 シミュレーションおよび実験結果 4・1 節で構成した LQI 制御システムについてシミュレーションを行った。結果を図 3 に示す。

脈動として周波数 7.44×10^{-1} Hz、振幅 1.96×10^{-2} N/s(2 g/s)の正弦波を加えた。またロードセルに負荷がかかった場合を想定して出力に 4.90×10^{-1} N/s(50 g/s)のインパルス外乱(これはロードセルの上に 50 g

の物質が置かれた場合を想定している)を加えた。評価関数中の重み R は 5×10^3 および 5×10^4 の二通りとした。図 3(a)が $R = 5 \times 10^3$ の場合、図 3(b)が $R = 5 \times 10^4$ の場合を示している。図より、いずれの重みにおいても、設定値および外乱に対して定常偏差を生じることなく目標値に追従している。また、重みが小さいほど速応性は良いが、かなり振動的となっており、操作量の変動も大きくなっている。重みを大きくすると操作量の変動も抑えられ、外乱に対しても若干振動的であるが良好な応答が得られている。脈動に対しては、重みを大きくすることにより、脈動によって生じる操作量の変動はかなり小さく抑えることができる。

次に、LQI 制御を実プラントに適用した。設定値は 2.94×10^{-1} N/s(30 g/s)とし、重みは脈動による操作量の変動を抑えるため $R = 5 \times 10^4$ とした。制御開始 70 S 後に外乱として 4.90×10^{-1} N(50 g)のおもりをロードセルの上にのせた。このときの実験結果を図 4 に示す。図中の破線はフィルタリングされた出力を示している。図から、実出力 y は脈動により変動を生じているが、フィルタによって脈動が取り除かれていることがわかる。また、操作量の変動も小さくなっており、インパルス外乱を加えた後の出力の変動も小さくなっている。

以上のことより LQI 制御方式をプラントに適用した場合、フィルタリングされた出力を用い、重みを適切に選択することにより操作量の変動を抑え、また外乱に対しても良好な応答を示す制御系を構成できることがわかった。

5. STR 制御システムの構成

本プラントは非最小位相系となっており、現状のままでは STR 制御方式を適用することは不可能である。そこで、プラントの零点が z 平面の単位円内に存在するように零点補償を行い、零点補償されたプラントに対して STR 制御方式の適用を行った。

(b)

(a)

図 3 LQI 制御によるシミュレーション波形

図 4 LQI 制御による実験波形

5.1 STR 制御方式 ここでは脈動を既知の確定外乱、ノイズを確率過程の外乱として特徴づけ、セルフチューニングレギュレータのアルゴリズムを拡張し、脈動の影響を受けない制御方式について検討を行った。

次式で記述されるプラントを考える。

$$y(k) = \frac{z^{-1}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})}s(k) + \frac{E(z^{-1})}{A(z^{-1})}W(k) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots\dots\dots + a_nz^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots\dots\dots + b_mz^{-m} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1z^{-1} + \dots\dots\dots + c_pz^{-p} \\ D(z^{-1}) &= d_1z^{-1} + \dots\dots\dots + d_qz^{-q} \end{aligned}$$

である。右辺第3項はプラントにはいるノイズを表している。 $W(k)$ は平均値零の白色雑音である。また右辺第2項は既知の確定外乱であり、ここでは脈動発生モデルを表している。このモデルのダイナミクスは制御系の目標値（設定流出量）が決まれば既知となる。いま脈動を

$$M(k) = (D(z^{-1})/C(z^{-1}))s(k) \quad \dots\dots\dots (8)$$

とおく。ここでの設計目標は脈動を差し引いたプラントの出力と規範応答との誤差 $\epsilon(k+1)$ が $C_2(z^{-1})$ のダイナミクスで零に収束することである。すなわち次式が満足されることである。

$$\begin{aligned} C_2(z^{-1})\epsilon(k+1) &= C_2(z^{-1})\{y(k+1) \\ &\quad - M(k+1) - y_M(k+1)\} = 0 \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \epsilon(k+1) &= y(k+1) - M(k+1) - y_M(k+1) \\ C_2(z^{-1}) &= 1 + c_{21}z^{-1} + \dots\dots\dots + c_{2n}z^{-2n} \end{aligned}$$

このとき制御則として未知パラメータを推定値に置き換えた次式で表される制御則を用いる。

$$u(k) = \frac{1}{\hat{b}_0(k)} [C_2(z^{-1})y_M(k+1) - \hat{P}_0^T(k)\phi_0(k)] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} y(k+1) &= y(k+1) - M(k+1) \quad \dots\dots\dots (11) \\ \hat{P}_0^T(k) &= [\hat{b}_1(k) \dots \hat{b}_m(k), \hat{c}_{21}(k) - \hat{a}_1(k) \dots \\ &\quad \hat{c}_{2n}(k) - \hat{a}_n(k)] \\ \phi_0^T(k) &= [u(k-1) \dots u(k-m), y(k) \dots y(k-n+1)] \end{aligned}$$

である。パラメータは次式により更新される。

$$\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + F(k-1)\phi(k-1)e^*(k) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

$$\hat{P}^T(k) = [\hat{b}_0(k), \hat{P}_0^T(k)]$$

また、 $F(k)$ は次式で与えられる適応ゲインマトリックスであり、適応アルゴリズムとして固定トレース一定のアルゴリズムを用いた。ただし、 $\alpha = \lambda(k)_1/\lambda_2(k)$ 、また $e^*(k)$ は適応誤差信号である。

$$\begin{aligned} F(k) &= \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[F(k-1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{F(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)F(k-1)}{\alpha + \phi^T(k-1)F(k-1)\phi(k-1)} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

5.2 シミュレーション結果 設定流出量を 9.81×10^{-2} N/s (10 g/s)、適応アルゴリズムのパラメータは $\alpha = 1$ [$\lambda_1(k) = \lambda_2(k)$] とし、また零点補償要素のパラメータは $P_1 = -200$ 、プラントのダイナミクスを規定する多項式は $C_2(z^{-1}) = 1 - 0.1z^{-1}$ としシミュレーションを行った。なお、サンプリング周期は 1 S とした。また、二次系のモデルにステップ入力を与えこの出力を規範応答として用いた。

シミュレーションにおいてパラメータの初期値は $\hat{b}_0(0)$ 以外はすべて零とした。 $\hat{b}_0(0)$ にはプラントを同定した際の同定結果を用いた。プラント出力に重畳する脈動および外乱は先の LQI 制御のときと同様である。このときのシミュレーション結果を図5に示す。制御量が脈動しているにもかかわらず操作量に変動は生じていない。これにより、STR 制御において脈動を考慮することにより操作量の小刻みな変動が抑えられることが確認できた。また、インパルス外乱に対して

図5 STR制御によるシミュレーション波形

図6 脈動の位相がずれている場合の応答波形

は LQI 制御に比べて若干設定値への復帰が遅くなった。

次に、実プラントの出力に現れる脈動と、モデルにより発生させる脈動 $M(k)$ の位相がずれている場合についてシミュレーションを行った。その結果を図 6 に示す。発生させた脈動の周波数は 1.21×10^{-1} Hz である。位相ずれは $M(k)$ の符号を変えることにより最大 90° 以内に抑えることができる。そこで 90° の位相ずれを与えてシミュレーションを行った。図から明らかなように入力 $u(k)$ に若干の変動を生じているのがわかる。すなわち、本方式では実システムの脈動とモデルにより発生する脈動との間の位相がずれた場合は操作量に変動を生じ、またこの変動により流出量の変動が増幅される。しかし、最悪の場合（位相が 90° の場合）でも脈動を全く考慮しない場合に比べてその影響は半減されることから本方式を用いることにより良好な応答が期待できる。

5.3 実験結果 ここでは STR 制御方式の実プラントへの適用を行った。実験条件は、設定値を 2.94×10^{-1} N/s (30 g/s) とし、後はシミュレーションと同様である。なおインパルス外乱として制御開始後 70 s の時点で実プラントのロードセル上に 4.91×10^{-1} N (50 g) のおもりを乗せた。そのときの実験結果を図 7 に示す。応答はシミュレーションと同様の傾向を示し、インパルス外乱に対してはシミュレーションに比べて良好な応答を示した。しかし、脈動により操作量に若干の変動を生じている。

定常状態で運転されているプラントでは粉粒体の排出に伴いホッパ内に粉粒体を補充する必要がある。積算値制御方式の場合、粉粒体を補充している間は実際の重量が測定できないため制御の断点が生じる。この間は排出量を固定するなどして、流出量に補充の影響が及ばぬよう、さまざまな方法が試みられている⁽⁶⁾。

STR 制御方式では制御を中断すると、アルゴリズムの中でパラメータの推定を行っていることから、そ

図 7 STR 制御による実験波形

の後継続して制御を行うことが難しくなる。そこで制御を連続的に行うため、通常のノイズ以上の変動を検出したときは、この変動は粉粒体の補充により生じたものであると認識し、これ以後、ある一定時間（粉粒体の補充が終わるまでの時間）は、プラントの出力として実測値を用いず、代わりに規範応答の値を用いることにする。一定時間経過後に本来の制御に戻る。このようにすれば制御に断点を生じることなく継続して制御を行うことが可能となる。このときの応答波形を図 8 (a) に示す。またそのときの重量の変化を図 8 (b) に示す。図 8 (a) より、粉粒体の供給がプラントに及ぼす影響は、見かけ上非常に大きいインパルス状の外乱が入ったのと同じになっており、図 8 (b) からは前述した方法で対処することによりうまく制御されている様子がわかる。

本研究では、流出量の制御において流量値制御方式を適用し、LQI 制御方式および STR 制御方式の適用について検討を行った。ここでは、各制御方式を用いてプラントを運転したときの、供給精度について比較検討を行った。

設定値を 2.94×10^{-1} N/s (30 g/s) として運転を行った。また、供給機自体の性能を評価するために一定回転数での供給精度の測定も併せて行った。精度の測定は次のように行った。定常運転を行っている状態で 1

表 1 供給精度

	平均値からの精度 (%)	設定値からの精度 (%)
L Q I 制御	0.182	0.273
S T R 制御	0.672	0.761
一定回転	0.390	—

図 8 粉粒体を補充しているときの応答

min間の排出流量を測定する。これを6回繰返して測定を行い、この6回の流量の値をもとに次式により精度を算出した。

$$\text{精度} = \frac{2 \times \sigma}{\text{平均値}} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 σ は平均値からの偏差の標準偏差である。制御を行った場合は設定値からの供給精度も算出した。このときの測定結果を表1に示す。

表から明らかなようにどの制御方式においても精度は1%以内に収まっており、良好な結果が得られていると思われる。

以上より、制御性能に関しては両者の間にほとんど差がないことがわかる。しかし、粉体の交換などによりプラントのパラメータが変化する場合には、オンラインで同定を行いながら制御を行うSTR制御方式では制御可能であるが、プラントのモデルを固定したLQI制御方式ではオフラインで新たにプラントモデルを同定する必要がでてくることから本プラントに適用する制御方式としてはSTR制御が適していると思われる。

7. 結 論

本研究では、脈動を有する重量式フィーダの制御シ

ステムの構成を目的として、まず、フィーダ出力に現れる脈動について調べた。次に、フィルタリングされた出力を制御量とする制御システム、また脈動成分を考慮した制御システムをおのおの構成し、シミュレーション実験を行った後、実プラントへの適用を行った。その結果、LQI制御方式では、重みをある程度大きく与えることにより、設定値および外乱に対して良好な応答を得ることができた。また、STR制御方式では、脈動を考慮してアルゴリズムを構成することにより良好な応答を得ることができた。さらに、ホッパ内に粉粒体を補充するときの制御方法について検討を行い、制御の断点を生じることなく連続的に制御が行える方法を示した。

文 献

- (1) 佐藤, 粉体と工業, 19-6(1987), 49.
- (2) 澤井, 粉体と工業, 19-6(1987), 29.
- (3) Lozano, R. and Landau, I. D., *Int. J. Control*, 33-2 (1981), 247.
- (4) 高橋, システムと制御(下), (1978), 376, 岩波書店.
- (5) Takahashi, ほか2名, *ASME*, 97-4 (1975), 354.
- (6) 林, 化学装置, 3(1988), 87.