定量フィーダのセルフチューニング制御

佐藤 孝雄*・亀岡 絃一*

Self-Tuning Control of a Weigh Feeder

Takao SATO* and Koichi KAMEOKA*

In this paper, a weigh feeder is controlled by using a self-tuning controller. To make a plant output follow a ramp-type reference input without a steady-state error, we propose a new design method for generalized minimum variance control with a pre-compensator. In order to confirm the effectiveness of the proposed method, experimental results are shown.

Key Words: weigh feeder, self-tuning control, generalized minimum variance control, pre-compensator, type 2 control system

1. はじめに

本研究では、化学・医薬・食品などの分野で主に原料の連続混合ライン、押出ラインなどのプロセスにおいて使用される定流量供給装置である定量フィーダ^{1)~3)}の制御について報告を行なう。定量フィーダは主に比例、積分補償などを用いて制御されており、これらの制御パラメータを調整することにより所望の制御性能を実現している。しかし、最適なパラメータは粉体の種類や個々の機器により異なる。そのため、供給するおのこの粉体に対する事前実験を行ない最適なパラメータを求めたのち、それらのパラメータを基に熟練の技術者が各機器毎に微調整する必要がある。また、供給する粉体の種類、状態、そして計量ホッパーに補充された粉体の量によって定量フィーダの動特性が変動するため、固定されたパラメータのみでは十分な制御特性を維持できない場合が考えられる。そのため、定量フィーダの制御パラメータを自動調整する制御手法の開発が望まれている。

一般化最小分散制御 (Generalized Minimum Variance Control; GMVC)^{4),5)}は、むだ時間分未来の予測出力を含む分散の最小化を目的として設計される。GMVCはパラメータ同定機構を併用して設計することにより、制御対象のパラメータが未知の場合でも適用可能な制御手法であるため、GMVCを用いた定量フィーダは、最適パラメータ選定のための事前実験や粉体変更時のパラメータ再設定が不要とすることができ、本研究では、GMVCを用いた定量フィーダの排出量制御について報告を行なう。

定量フィーダは粉体を希望した量だけ一定流量で供給することが目的であるが、定量フィーダの構造から流量は直接観測できず、台秤で計測した排出積算量を用いて制御を行なう。そのため、ランプ状の設定値に定常偏差を生じさせないよう

に制御系を設計しなければならない³⁾。排出量を定常偏差なくランプ状の設定値へ追従させるためには、2型の制御系を構成すればよい。積分器を二つ有する制御系を設計することにより2型の制御系を構成できるが、積分器は応答速度を劣化させる要因になる。そこで、本研究では、前置補償器を用いた2自由度GMVC⁶⁾を用いて、定量フィーダの制御を行なう。文献6)では、1型の制御特性を改善するように前置補償器を設計しているが、本研究では、2型の制御系を構成するよう前置補償器を設計する方法を提案する。最後に、定量フィーダの実機実験を行ない、その制御結果について報告を行なう。

2. 定量フィーダ

本研究の制御対象である定量フィーダはディスクフィーダである。粉体重量を計測する台秤(ロードセル)の上にディスクや攪拌羽を回転させるモータ、粉体を貯留するホッパーを配置する構造となっており、ロスインウェイト方式(減算積算値方式)によって原料の排出量計測を行なう。本研究の制御目的はインバータへの入力電圧を操作してディスク回転速度を制御し、排出積算量を設定値に追従させることである。

制御系の設計を行なうために、フィーダ伝達関数を定める。Fig.1のように粉体排出部の伝達関数を $G(s)$ とし、台秤部の伝達関数を $H(s)$ とする。以下では、 $G(s)$ 、 $H(s)$ それぞれの伝達特性を定める。

$G(s)$ を構成する K_i 、 K_g はそれぞれインバータと減速機のゲインであり、 K_d はディスクの回転数1[rpm]当りの排出流量[kg/s]である。文献3)ではモータを単にゲインとして近似しているが、本研究では、制御対象の動特性をより正確に表現するモデルを得るために、モータの伝達関数を1次遅

Fig. 1 Block diagram of a weigh feeder

* 兵庫県立大学大学院工学研究科 姫路市書写 2167

* Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji

(Received August 31, 2006)

(Revised January 23, 2007)

れ系として $K_m/(1+sT)$ とする。以上より、排出部の伝達関数 $G(s)$ は以下のように表わせる。

$$G(s) = \frac{K_d K_g K_m K_i}{s(1+sT)} \quad (1)$$

台秤の伝達関数 $H(s)$ は次式のように2次遅れ系とする³⁾。

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

ここで、 ω , ζ はそれぞれ固有角周波数, 減衰比である。

本研究の目的は、伝達関数 $G(s)$, $H(s)$ のパラメータが未知な場合でも、指定した量の粉体を排出する制御系を構成することである。実験時の出力信号にはノイズが混在するため、外乱除去のためにローパスフィルタを導入する。また、高次の係数の同定は低次のものに比べて困難である。以上から、台秤の動特性 $H(s)$ は陽には考慮せず、制御対象を排出部の伝達関数 $G(s)$ として制御系の設計を行なうこととする。本研究ではデジタル計算機を用いて定量フィードを制御するため、制御対象として次式の線形離散時間モデルを考える。

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + \xi(t) \quad (3)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \quad (4)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 \quad (5)$$

ここで、制御対象の出力 $y(t)$ はフィードが排出する粉体の積算量であり、入力 $u(t)$ はインバータへの入力電圧である。 $\xi(t)$ は平均0, 分散 σ^2 の観測雑音であり、 z^{-1} は1ステップ過去に推移する作用素である。一般に、 $B(z^{-1})$ は1次の多項式となるが、本研究では0次として扱うこととする。

本研究の制御対象には、フィードを構成する機器の仕様から、制御入力に制約が存在する。インバータへの入力電圧とモータの回転周波数の実験結果を **Fig. 2** に示す。Fig. 2 に示される点は、0[V] から 0.5[V] 刻みで 10[V] までの入力電圧に対する出力周波数を示す。入力電圧 10[V] の結果を除く実験結果から最小二乗法を用いて、 $K_i = 6.11$ を得た。インバータの仕様 (入力電圧: 0 ~ 10[V], 出力周波数: 0 ~ 60[Hz]) より、入力電圧 [V] には以下の制約が存在する。

$$0 \leq u(t) \leq 9.82 \quad (6)$$

実際に、制約を越える入力に対する周波数として入力電圧 10[V]

Fig. 2 Relationship between input voltage and output frequency of an inverter

に対する周波数は 60[Hz] を示している (Fig. 2)。

3. GMVC⁴⁾

GMVC は評価規範 (7) を最小化する制御則を用いて制御を行なう。

$$J = E[\phi^2(t+k)] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi(t+k) &= P(z^{-1})y(t+k) + Q(z^{-1})u(t) \\ &\quad - R(z^{-1})w(t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $w(t)$ は目標値であり、 $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$, $R(z^{-1})$ は設計多項式である。まず、Diophantine 方程式 (9) を解き、多項式 $E(z^{-1})$, $F(z^{-1})$ を求める。

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-k}F(z^{-1}) \quad (9)$$

ただし、 $E(z^{-1})$, $F(z^{-1})$ はそれぞれ、 $k-1$, n_f 次の多項式であり、 $n_f = \max\{1, n_p - k\}$ である。以上より、(7) 式を最小化する制御則として次式を得る。

$$G(z^{-1})u(t) = R(z^{-1})w(t) - F(z^{-1})y(t) \quad (10)$$

$$G(z^{-1}) = B(z^{-1})E(z^{-1}) + Q(z^{-1}) \quad (11)$$

この GMVC 則を用いて、以下の閉ループ系を得る。

$$y(t) = \frac{z^{-k}B(z^{-1})R(z^{-1})}{T(z^{-1})}w(t) + \frac{G(z^{-1})}{T(z^{-1})}\xi(t) \quad (12)$$

ただし、 $T(z^{-1})$ は次数を n_t とする以下の多項式である。

$$T(z^{-1}) = P(z^{-1})B(z^{-1}) + Q(z^{-1})A(z^{-1}) \quad (13)$$

ここで、 $T(z^{-1})$ が安定多項式となるよう $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$ を設計し、さらに、 $R(1) = T(1)/B(1)$ を満たすよう $R(z^{-1})$ を設計することにより、ステップ状の設定値に対して定常偏差なく追従させることができる。

4. GMVC の拡張

定量フィードの排出流量は直接観測できないため、排出積算量をランプ状の参照設定値に定常偏差なく追従させなければならない³⁾。しかし、通常の GMVC では、主にステップ状の設定値に追従することを想定して設計されている。本研究では、GMVC に前置補償器を付加した2自由度制御系⁶⁾を用いて、ランプ状の設定値に対して定常偏差をなくすことのできるよう設計する手法を提案する。

(12) 式の $w(t)$ から $y(t)$ への閉ループ伝達関数と最終値の定理より、ランプ入力に対する定常偏差は以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - w(t)) \\ = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^{-k}B(z^{-1})R(z^{-1}) - T(z^{-1})}{(1-z^{-1})T(z^{-1})} r \end{aligned} \quad (14)$$

r は定数である。(14) 式を 0 にするためには、(14) 式の分子多項式に $(1-z^{-1})^2$ 含ませれば良い。しかし、 $P(z^{-1})$,

$Q(z^{-1})$ は $T(z^{-1})$ を安定化するように設計しなければならない。そのため、 $R(z^{-1})$ のみで前述の目的を達成することは困難である。本研究では GMVC に前置補償器を付加する制御法⁶⁾を用いてこの問題を解決する。このとき、前置補償器 $1/X(z^{-1})$ を GMVC に付加したとき、ランプ入力に対する定常偏差は以下となる。

$$\lim_{z \rightarrow 1} \frac{S(z^{-1})}{(1 - z^{-1})X(z^{-1})T(z^{-1})} r \quad (15)$$

$$S(z^{-1}) = z^{-k}B(z^{-1})R(z^{-1}) - X(z^{-1})T(z^{-1}) \quad (16)$$

本研究では、定常偏差を除去するために、 $S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 \bar{S}(z^{-1})$ として、 $R(z^{-1})$ と $X(z^{-1})$ を設計することとする。ただし、 $\bar{S}(z^{-1})$ は設計多項式である。また、 $R(z^{-1})$ 、 $X(z^{-1})$ はそれぞれ、 $n_t - 1$ 、 $k - 1$ 次の多項式であり、 $n_t \geq 3 - k$ である。 $X(z^{-1})$ は閉ループ系の安定性に直接かわかるため安定である必要がある。

以上では、制御対象のパラメータ a_1 、 a_2 、 b_0 を既知として話を進めてきたが、一般にこれらは未知であるので、漸減ゲイン型逐次最小 2 乗法⁴⁾を用いて a_1 、 a_2 、 b_0 を逐次推定する。そして、真値のパラメータ a_1 、 a_2 、 b_0 に代えて、推定パラメータ $\hat{a}_1(t)$ 、 $\hat{a}_2(t)$ 、 $\hat{b}_0(t)$ により構成される制御則を用いて制御を行なう。

5. 実験結果

通常の GMVC と拡張した GMVC を用いて排出量制御の実験を行ない、両手法の比較を行なった。設定排出流量は $0.012[\text{kg/s}]$ 、サンプリング周期を 0.01 秒、むだ時間 k は 1 と設定した。本実験では、カットオフ周波数 $10[\text{Hz}]$ の 5 次の butterworth フィルタ⁷⁾を用いて制御量のノイズの影響を軽減する。また、制御対象のパラメータを未知として、逐次推定したパラメータを用いて制御則を構成し、制御を行なった。推定パラメータの初期値として $\hat{a}_1(0) = -1.9967$ 、 $\hat{a}_2(0) = 0.9967$ 、 $\hat{b}_0(0) = 7.2213 \times 10^{-8}$ を与え、パラメータ同定則の設計パラメータは、忘却係数を 0.5 、誤差共分散行列の初期値を $100I$ とした。設計多項式は制御量の追従性と入力の振動抑制を考慮して、 $P(z^{-1}) = 1$ 、 $Q(z^{-1}) = 0.0025$ と設定した。通常の GMVC では、 $R(z^{-1}) = T(1)/B(1)$ とした。提案法では、 $S(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2$ と設計する。そのため、 $R(z^{-1})$ 、 $X(z^{-1})$ の次数はそれぞれ 1 、 0 であるため、 $X(z^{-1})$ の安定性は問題とならない。また、2 章で述べたように、 $0 \leq u(t) \leq 9.82$ の制約が存在する。

以上の設定の元に行なった実験結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 において上図が通常の GMVC による制御結果、下図が提案法による制御結果である。両図ともに制御結果として排出積算量を示す。通常の GMVC を用いて制御した場合、定流量制御は実現できており、GMVC は定量フィードの排出量制御に一定の有効性を確認できる。しかし、定常偏差が生じてしまっている。それに対して、提案法を用いた場合は定常偏差なく追従しており、提案法の有効性が確認できる。

Fig. 3 Experimental results

6. おわりに

本研究では制御器のパラメータを自己調整するセルフチューニングコントローラを用いて定量フィードの制御を行なった。定量フィードの排出流量は直接観測できないため排出積算量を制御量として制御系の設計を行なった。また、制御誤差の分散を最小化することを目的として、通常の GMVC と前置補償器を用いて拡張した GMVC を用いて制御系の設計を行なった。さらに、制御量をランプ状の設定値に定常偏差なく追従させるために、前置補償器の設計方法を新たに提案した。最後に、実機実験を行ない、提案法の有効性を確認した。本論文で提案した前置補償器の設計法では、設計パラメータ $X(z^{-1})$ は同定された制御対象の係数値に依存する。そのため、 $X(z^{-1})$ の安定性については、さらなる議論を必要とする。

謝辞 本研究において、実験機を提供するとともに貴重なお助言を頂きました大和製衡(株)に厚くお礼申し上げます。兵庫県立大学大学院修士課程在籍中に実験などで協力頂いた安達祥文君に、また、本論文に対して有益な御意見を頂きました査読者の方に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本計量調査部：粉流体の計量と制御，日本計量新報社 (1975)
- 2) H. Colijn: Weighing and Proportioning of Bulk Solids, Trans Tech Publications (1975)
- 3) K. Usui: Continuous Flow Rate Control System with Fuzzy Controller, International Symposium on Measurement of Force and Mass, 79/84 (1992)
- 4) 大松，山本編著：セルフチューニングコントロール，計測自動制御学会学術図書，計測自動制御学会 (1996)
- 5) D.W. Clarke and P.J. Gawthrop: Self-Tuning Control, Proc. IEE, **126D**-6, 633/640 (1979)
- 6) 山本，石原，大松：前置補償器をもつ一般化最小分散制御に対する適応系の構成，計測自動制御学会論文集，**26**-6, 656/661 (1990)
- 7) 足立修一：Matlab によるデジタル信号とシステム，東京電機大学出版局 (2002)