連続乾燥装置における含水率制御

宋 戸 郁 郎*, 藤 元 正**
松 本 繁**, 大 谷 茂 盛**

The Control of Moisture Content within a Product for Continuous Dryer

by

Ikuro SHISHIDO[†], Tadashi FUJIMOTO^{††}
Shigeru MATSUMOTO^{††} and Shigemori OHTANI^{††}

The control characteristics of the moisture content within a product(dried sardine powder called "fish meal") are investigated for an in-direct heating continuous dryer. The system is described by a state space model, and the controller is designed based on the discrete I-PD control scheme. State variable is estimated by applying the steady or extended Kalman filter because the moisture content measured by an infra-red hygrometer contains a large amount of random noise due to the rough surface of the powdery product. Satisfactory control performance is achieved for a pilot-scale continuous dryer.

Key Words : Continuous Dryer, Moisture Content Control, Steady Kalman Filter,
I-PD Controller

緒 言

乾燥装置は種々の工場で使われているが、その多くは蒸気を熱源とした間接加熱型で、通常の運転管理はその蒸気使用量ならびに蒸気圧力を経験値とするだけで積極的な制御はあまり行われてはいないのが現状である。乾燥装置で消費されるエネルギーならびに製品品質の点から考えれば乾燥装置の制御は重要ではあるが、これまで乾燥装置を積極的に制御しようとする動きはあまり見られなかった。これは製品含水率をいかに測定するか、すなわち、性能の良い含水率センサーが欠如していることに原因の一つがあると考えられる。

現在、使用されている含水率センサーとして赤外線吸収を利用した赤外水分計があるが、対象が粉粒体の場合にはその表面状態が極めて強く影響する。すなわち、表面の凹凸による雑音が大きく、あたかも含水率が変動しているかのように感知してしまい、この出力を利用して制御しようすると変動が大きく、安定な制御はできなくなってしまう。そこで本研究ではデジタルフィルターの一種であるカルマンフィルター¹⁾を利用して雑音を除去し、含水率の推定を行い、さらに簡単なI-PD制御則^{2,3)}を適用して連続乾燥装置の含水率制御を試みた。

1. 制御モデル

1.1 システムの伝達関数

システムは乾燥装置の熱源である蒸気の流量を入力とし、乾燥装置出口の含水率を出力とした1入力、1出力系とする。このような乾燥システムはよく知られているように、むだ時間+1次おくれ系で近似できる

昭和62年3月6日受付

* 宮城県工業技術センター(〒982 仙台市長町8-7-20)

TEL 022-248-4386

** 東北大学工学部化学工学科(〒980 仙台市荒巻字青葉)

TEL 022-222-1800

† Miyagi Prefectural Institute of Technology, Sendai 982

†† Dept. of Chem. Eng., Tohoku Univ., Sendai 980

ものが多く、時定数 T [min], むだ時間 L [min], 比例ゲイン K [-]を用いて、その伝達関数は

$$G_p(s) = \frac{K \exp(-Ls)}{1 + Ts} \quad (1)$$

と表現される。

1.2 システムの状態空間表示

赤外水分計の出力はかなりの雑音を含むと予想される。したがって、この出力のままフィードバックをかけると不安定になる。この場合には種々のフィルタリング(平滑化)処理が考えられる。本研究ではデジタルフィルターの1種であるカルマンフィルターを利用して状態推定をする。すなわち、観測部に大きな雑音加わるものと考えて、確率システムモデルを作る。この場合にはシステムのモデルを状態空間で表記する必要がある。しかし、Eq.(1)はむだ時間要素を持っているためにそのまま状態空間で表現しようとするとう無限次数となってしまう。そこで、ここではTaylor展開近似を行う。すなわち、

$$Y(s) = \frac{K \exp(-Ls)}{1 + Ts} U(s) \doteq \frac{K}{(1 + Ts)(1 + Ls)} U(s) \quad (2)$$

ゆえに、

$$T L s^2 Y(s) + (L + T) s Y(s) + Y(s) = K U(s) \quad (3)$$

これより、状態変数として、含水率ならびにその時間変化をとり、

$$x_1 = Y, \quad x_2 = dY/dt, \quad y = Y \quad (4)$$

とすれば

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} u \quad (5)$$

$$y = \mathbf{c} \mathbf{x} + w \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/(TL) & -(T+L)/(TL) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2 \times 2 \text{ matrix}) \quad (2 \times 1 \text{ vector}) \quad (7)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ K/(TL) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2 \times 1 \text{ vector}) \quad (1 \times 2 \text{ vector})$$

ただし、 u は確定入力(乾燥装置の蒸気流量パーセント) $\bar{u}$ とモデル誤差ならびにその他の不確定な要素(外乱など) v との和

$$u = \bar{u} + v \quad (8)$$

であり、 w は観測ノイズである。ここで、 w , v の各ノイズは白色ランダムノイズであると仮定する。すなわち、

$$\begin{aligned} E\{u\} &= \bar{u}, & E\{v^2\} &= Q, \\ E\{w\} &= 0, & E\{w^2\} &= R \end{aligned} \quad (9)$$

が成り立つものと仮定する。さて、この状態空間モデルは連続時間系なので、これを離散時間系で表現すると、

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F} \mathbf{x}_k + \mathbf{g} u_k \quad (10)$$

$$y_k = \mathbf{c} \mathbf{x}_k + w_k \quad (11)$$

式中、 $\mathbf{F}$, $\mathbf{g}$ は

$$\mathbf{F} = \exp(\mathbf{A} \tau), \quad (2 \times 2 \text{ matrix}) \quad (12)$$

$$\mathbf{g} = \int_0^\tau \exp(\mathbf{A} t) dt \cdot \mathbf{b}, \quad (2 \times 1 \text{ vector}) \quad (13)$$

で求められる。ここで、 τ はサンプリング時間である。

1.3 カルマンフィルターの設計

1.3.1 定常カルマンフィルター

Eq.(9) から、Eqs.(10), (11)において u_k , $(u_k - \bar{u}_k)^2$, w_k ならびに w_k^2 の期待値を、

$$\begin{aligned} E\{u_k\} &= \bar{u}_k, & E\{(u_k - \bar{u}_k)^2\} &= Q, \\ E\{w_k\} &= 0, & E\{w_k^2\} &= R \end{aligned} \quad (9')$$

とすると離散型のカルマンフィルターによる状態推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ は次のようにして求められる。

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{P} \mathbf{c}^T R^{-1} (y_k - \mathbf{c} \bar{\mathbf{x}}_k), \quad (2 \times 1 \text{ vector}) \quad (14)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F} \bar{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{g} u_k, \quad (2 \times 1 \text{ vector}) \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ は、次式の収束値を用いれば良い。

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{M}_k^{-1} + \mathbf{c}^T R^{-1} \mathbf{c})^{-1}, \quad (2 \times 2 \text{ matrix}) \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{F} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{g} Q \mathbf{g}^T, \quad (2 \times 2 \text{ matrix}) \quad (17)$$

1.3.2 拡張カルマンフィルター

さて、前述の定常カルマンフィルターはシステムの伝達関数がEq.(1)のように既知の場合にはかなり有効と思われるが、処理量変動したり、原料が変化した場合には乾燥装置内での表面蒸発区間と内部蒸発区間の長さが変化してしまう。このためにシステムが変わってしまいEq.(1)中の K, L, T などは違った値になる。しかもこの変化が乾燥装置稼働中に起こればもはや定常カルマンフィルターで状態推定を行うことはできなくなると予想される。このような場合には K, L, T などをも未知として状態を推定する拡張カルマンフィルター⁴⁾を適用する。すなわち、システムを

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\theta) \mathbf{x}_k + \mathbf{g}(\theta) u_k \quad (18)$$

$$y_k = \mathbf{c} \mathbf{x}_k + w_k \quad (19)$$

で表現できるものと仮定する。

ただし、 θ はEqs.(12)および(13)の $\mathbf{F}$ および $\mathbf{g}$ の各要素の値が未知と考えたパラメーターである。

いま、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\theta) \mathbf{x}_k + \mathbf{g}(\theta) u_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$y_k = \mathbf{c} \mathbf{x}_k + w_k \quad (21)$$

として、

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (8 \times 1 \text{ vector}) \quad (22)$$

と状態変数 $\mathbf{z}_k$ を拡張すると、状態変数の推定値 $\hat{\mathbf{z}}_{k+1}$ は以下で求められる。

$$\hat{\mathbf{z}}_{k+1} = \mathbf{f}_k + \mathbf{N}_k [y_k - \mathbf{c} \hat{\mathbf{x}}_k] \quad (23)$$

ただし、

$$\mathbf{f}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\theta) \mathbf{x}_k + \mathbf{g}(\theta) u_k \\ \theta_k \end{bmatrix}, \quad (8 \times 1 \text{ vector}) \quad (24)$$

$$S_k = (\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + R)^{-1}, \quad (\text{scalar}) \quad (25)$$

$$\mathbf{N}_k = \mathbf{J}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T S_k, \quad (8 \times 1 \text{ vector}) \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{J}_k \mathbf{P}_k \mathbf{J}_k^T + \mathbf{Q} - \mathbf{N}_k S_k^{-1} \mathbf{N}_k^T, \quad (8 \times 8 \text{ matrix}) \quad (27)$$

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\theta_k) & \mathbf{L}_k \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (8 \times 8 \text{ matrix}) \quad (28)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{c} \ 0], \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \mathbf{I}_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

(1×8 vector) (8×8 matrix)

また、 $\mathbf{L}_k$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{L}_k = \frac{\partial}{\partial \theta} [\mathbf{F}(\theta) \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{g}(\theta) u_k] \big|_{\theta=\theta_k} \quad (30)$$

(2×6 matrix)

1.4 I-PD制御則の設計

I-PD制御は、プロセスの部分的な動特性に関する知識のみで設計でき、しかも比較的大きなむだ時間を含む系でも容易に設計できるという特徴がある。北森^{2,3)}によると、制御対象の伝達関数を

$$G_p(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots} \quad (31)$$

フィードバック補償要素の伝達関数を

$$G_f(s) = f_0 + f_1 s + \dots \quad (32)$$

制御装置の伝達関数を

$$G_c(s) = \frac{k}{s} \quad (33)$$

としたとき、目標値から制御量までの閉ループ系の伝達関数の分母系列表現を

$$G(s)^{-1} = a_0' + a_1' s + a_2' s^2 + a_3' s^3 + \dots \quad (34)$$

とすれば次の参照モデル

$$G'(s)^{-1} = 1 + \alpha_1 \delta s + \alpha_2 \delta^2 s^2 + \alpha_3 \delta^3 s^3 \quad (35)$$

ただし、

$$\{\alpha_i\} = \{1, 0.5, 0.15\} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (36)$$

Fig. 1 Scheme of control system

にできるだけ高次の係数まで一致させるようにすれば k , f_0 , f_1 などが決まる。実際には離散時間系なので、PD 動作を動特性の補償に用いるときには立ち上がり時間 δ は次式

$$\begin{aligned} & (a_2' + \tau a_1' + \tau^2 a_0') \alpha_4 \delta^3 + \\ & (-a_3' + 7/12 \tau^2 a_1' + 1/4 \tau^3 a_0') \alpha_3 \delta^2 + \\ & (-a_3' - 7/12 \tau a_2' + 1/18 \tau^3 a_0') \tau \alpha_2 \delta + \\ & (-1/3 a_3' - 1/4 \tau a_2' - 1/18 \tau^2 a_1') \tau^2 = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

の正の最小の根として得られ (サンプリング時間を τ とした), $k^* (=k)$, $f_0^* (=f_0)$, $f_1^* (=f_1 + 0.5 \tau f_0)$ は各々

$$k^* = \frac{(a_2' + \tau a_1' + 1/3 \tau^2 a_0')}{\delta (\alpha_3 \delta^2 + \tau \alpha_2 \delta + 1/3 \tau^2)} \quad (38)$$

$$f_0^* = k^* \alpha_1 \delta - a_0' \quad (39)$$

$$f_1^* = k^* \alpha_2 \delta^2 - a_1' + 1/2 \tau f_0^* \quad (40)$$

で与えられるとされている。全系のブロック線図を Fig. 1 に示す。

2. シミュレーションの結果

2.1 観測雑音の影響

Fig. 2 はカルマンフィルターを用いないで、サンプリング時間を 1 分とした場合の制御性に対する雑音の大きさの影響を見たものである。(a) は雑音がない理想的な場合、(b) は雑音の標準偏差 σ_n が 0.1, (c) は 0.5 とした場合である。図によれば明らかに雑音が大きくなると制御入力の変動が大きくなり、このシステムでは 0.1 以下であれば一応の制御が可能であるが、これ以上雑音が大きい場合には蒸気流量がかなり変動してしまい、ボイラーなどの上流側に与える影響は大きくなることがこのシミュレーション結果から予想できる。

2.2 定常カルマン・フィルターの効果

Fig. 3 は雑音の除去にカルマンフィルターを利用した場合である。(a) は雑音の標準偏差 0.5, サンプリング周期 1 分, (b) は雑音の標準偏差 1.0, サンプリング周期を 10 分とした場合であり、ともに良好に制御

Fig. 2 Simulation result (influence of noise)

Fig. 3 Simulation result using Kalman filter

できており、しかも、サンプリング時間を 0.5 分から 60 分の間で変化させてもカルマンフィルターによる状態推定を行うことにより、雑音はかなり大きくとも制御は良好であった。

2.3 カルマン・フィルターにおける R と Q について
カルマンフィルターの設計にあたってはシステムならびに観測雑音に関する情報が必要であるが、ここでは R と Q の値は次に述べるように試行錯誤で決めた。すなわち、 R と Q を適当に仮定してシミュレーションによって制御変数である蒸気流量の変化を調べた。Fig. 4 はその例である。図から R と Q はその比が 0.01 以上であればおおむね良好に制御可能なことがわかり、後述の実験では $R = 0.1$ 、 $Q = 1$ としたがこれらの値が

Fig. 4 Simulation result using Kalman filter

Fig. 5 Simulation result with system parameter change

かならずしも最適な値かどうかについての検討は行っていない。

2.4 拡張カルマン・フィルターの効果

処理量の変動などによるシステムの変化には定常カルマンフィルターで状態変数を推定できるか否か検討する必要がある。Fig. 5 は制御開始 30 分後になんらかの原因でシステムが変化し始め、1 時間後には、はじめとは異なったシステム (Eq. (1) 中の K が $0.355 \rightarrow 0.2$ 、 T が $40.7 \rightarrow 60.0$ と変化した) となるものと考えた場合のシミュレーション結果である。(a) によれば定常カルマンフィルターでは状態推定は良好には行えないことが明らかである。そこで同じ条件で拡張カル

マンフィルターを適用してみた例が(b)で、良好に状態推定ができていることがわかる。ここで、良好に推定を行うためにサンプリング周期を短くしてシステムに関する情報量を多くし、また、制御入力 of 急激な変動を抑えるために制御周期は適当な時間間隔で行った。図はサンプリング周期1分、制御周期5分の例である。

3. 実験

3.1 実験装置ならびに方法

Fig. 6 に実験に用いた連続乾燥装置の概略を示す。装置は対流式で熱源は蒸気の潜・顕熱による間接加熱方式を採用している。乾燥機内部には蒸気による加熱のできる5本の鋼管とこれに製品の送り羽根を取り付けたローターならびにやはり蒸気による加熱の可能なジャケットからなっている。乾燥機の全長は2 m、ジャケットの内径は20 cmである。試料はスクリーコンベアーにより装置内に供給される。乾燥機をでた製品は最終コンベアーで系外に出され、ここで最終含水率が赤外線吸収の比色形水分計（千野製作所製モデルIR-M型）で測定される。さて、この場合の試料はイワシおよび残滓を原料としたフィッシュミール（主に家畜の飼料に用いられる）製造工程における中間製品であるが、これには水分のほかに油分も若干含んでいるために、汎用の赤外線吸収含水率計のような単なる1波長帯での吸収波長の強度を見ただけでは油分による吸収もあるために水分を正確には測定できない。そこで今回は2波長帯の吸収度合を検出し、この水分と油分に関する二つの電圧出力 E_1 、 E_2 を得た。これらの出力と含水率との関係は予備実験の結果から次式

$$y = 0.2328 + 2.653 \ln(1250 E_1) - 2.4539 \ln(1250 E_2) \quad (41)$$

で表現できるものとした。

3.2 実験結果

予備実験ではデジタルフィルターを使用しない場合には雑音の影響が大きく制御入力の変動してしまい、制御できなかった。また、定常カルマンフィルターを用いた場合でも処理量の変動あるいは実験装置の伝熱面の汚れ等によるシステムパラメーターの変化に追

(a) Constant target moisture content

(b) Step change target moisture content

Fig. 7 Experimental result of controlled system

Fig. 6 Schematic drawing of experimental continuous drying equipment

従でできず制御はできなかった。そこで本実験では始めから拡張カルマンフィルターを使用した。Fig.7に制御実験結果の例を示す。(a)は原料の初期含水率は湿量基準で66%, サンプル周期0.1分, 制御周期5分, 目標含水率7%の場合である。なお, 乾燥装置出口含水率は1分毎の値のみを示した。図によれば実験開始約1時間で目標値に到達しており, 観測値の大きな雑音にもかかわらず, 良好に制御できていることがわかる。(b)は目標含水率5%とし, 実験開始後1.8時間に目標含水率を7%と変更した場合である。図より出口含水率は若干オーバーシュートしてはいるが目標値の設定変更1.4時間後にはほぼ整定している。

結 論

本論文では連続乾燥装置における製品の含水率を制

御する目的でまずシステムを状態空間モデルで表現した。ついで, I-PD制御則に基づき制御系を構成した。この際に, 定常カルマンフィルターあるいは拡張カルマンフィルターによってオブザーバーを構成し, 赤外吸収水分計で観測される製品含水率の変動の影響をできるだけ除去した。その結果拡張カルマンフィルターを適用すれば原料の処理量がある程度変動しても良好に制御が可能であることが示された。

〔謝 辞〕 本実験に当たっては石巻魚糧工業(株)の連続乾燥装置を使用させていただいた。同社ならびに実験に協力いただいた同社の高橋順一郎, 稲井幹男両氏に感謝の意を表します。

Nomenclature

A : system matrix at continuous-time system	[-]	s : the complex variable in Laplace domain	[-]
b : control distribution vector at continuous-time system	[-]	T : time constant	[min]
c : measurement vector	[-]	u : input variable	[-]
E : output voltage from infra-red hygrometer	[V]	$\bar{u}$: steady value of input variable	[-]
f : feedback gain factor of I-PD controller	[-]	V : system disturbance	[-]
F : system matrix at discrete-time system	[-]	W : measurement disturbance	[-]
g : control distribution vector at discrete-time system	[-]	x : state variable vector	[-]
G : transfer function	[-]	$\dot{x}$: time differential vector of x	[-]
k : gain factor of I-PD controller	[-]	$\hat{x}$: estimated state vector	[-]
K : proportional gain factor	[-]	$\tilde{x}$: state vector in Kalman filter theorem	[-]
L : dead time	[min]	y : output variable	[-]
Q : covariance of system disturbance	[-]	Z : extended state variable vector in extended Kalman filter theorem	[-]
R : covariance of measurement disturbance	[-]	σ_n : standard variation of noise	[-]
		τ : sampling time	[min]

References

- 1) Arimoto, T. : "Kalman Filter", Sangyotosyo (1977)
- 2) Kitamori, T. : *Trans. Soc. Instrum. & Control Engrs. Japan*, **15**, [4], 549 (1979)
- 3) Kitamori, T. : *ibid*, **15**, [5], 695 (1979)
- 4) Lennaratljung : *IEEE Trans. on Automatic Cntl.*, **AC-24**, [1], 36 (1979)