抄紙機の水分制御の一方式

山武ハネウエル株式会社 森 亮 一

New Moisture Control Method for Paper Machine

Ryoichi Mori

Yamatate-Honeywell Co., Ltd.

Presented in this paper is a novel method to improve machine-direction moisture profile in paper machine.

Kalman Filter is employed to compensate the time-varying dead time in moisture control loop. Effect of moisture-basis weight interaction is deliberately utilized in building the control scheme. Stability analysis is tried out in Laplace plane in classical manner.

1. ま え が き

製紙工程の中でも、抄紙機は鉄鋼の圧延プロセスに似て高速で、しかも、制御量の種類が多く、制御の対象としては難しいものの一つである。1970 年前後から、セルフ・チューニング・レギュレータなど新しい制御手法が適用され、制御性の改善例は増加している。問題は短い周期での多変数制御を実現する高パフォーマンス処理であり、未だ部分的なオフライン処理が必要なものが多い。ここでは、未だ課題の多い抄紙機の水分プロファイル制御向けの簡易化したアルゴリズムの一つを紹介する。

2. プロセスの特徴

一般的な抄紙プロセスを要約すれば、まず、ストックと呼ばれる濃度 0.1% 程度のパルプの懸濁液をヘッドボックスで加圧して、スライスと称する数 mm の間隔のスリットから高速で射出する。射出されたストックは射出速度と一定の関係をもつライン速度で走行するワイアで運ばれている間に、水分の大部分を除かれ、

シート状の繊維分が残る。そのシートを何段かのローラで加圧、脱水して様々な表面処理をして巻き取る。この間、プロセス変数として単位面積当りの重量 (Basis Weight)、水分、灰分、厚さ、白色度などは図 1 に示すように各工程間で、スキャン型センサで測定し、そのうちのいくつかは制御のために使われる。流れに直角の方向 (幅方向) の主要な制御量はスライスの開度の分布によって支配され、しかも一つのスライス操作端の動作は隣接するいくつかの操作端の制御ループと相互干渉をもたらす。また、スキャン型センサの走行速度は、シート線速度に対し、十分速いとは言えず、測定機構にむだ時間を含んだ形となる。また、走行中のシート上のある点のある時間の Basis Weight (BW) や水分の変動は位置と時間の関数としての成立のほかに、いずれにも無関係なランダム成分が加わっていることが知られている。

3. 水分制御系

抄紙機の水分制御は操作端がプロセスの終端に近いところにあるにもかかわらず、除湿の時定数が大きく、

図 1 抄紙機プロセス

図 2 水分制御系

かつむだ時間が長いため、十分な制御性が得られない。これに対し、BW の制御系は操作部が最も上流のヘッドボックス回りにあるが、プロセスの時定数が小さく、ストックがワイヤ上に射出された瞬間にそのプロファイルが決定される。

水分のプロファイルはスキャニング・センサの中の赤外線吸収センサで検出され、各スキャニングの終わりに各プロファイルの平均値を求め、それを入力してドライヤの蒸気圧を制御する。プロセスは一般に

$$P(S) = \frac{e^{-L.S}}{TS+1} \quad \dots\dots(1)$$

の形の一次おくれとむだ時間で表現されるので、制御の安定性を維持するため、フィードフォワード系を付加したり、図3のようなO. J. Smithのむだ時間補償ループを加えたりしている。

ただ、他のプロセスでも言えることであるが、むだ時間Lは常に一定とは限らず、様々な要因によって変動するので、ローカル・フィードバック・ループ中のLも適応的に変化させなければならない。

ドライヤによる除湿のプロセスは、まずファイバを

図 3 むだ時間補償ループ

含むシート全体が加熱され、内部がある温度以上になった時点で水分の気化が始まり除湿が進むと考えられる。この気化が始まるまでの加熱時間がむだ時間Lであり、二つの長さは熱容量に依存するが、ファイバの重量含有率にシート容積を掛けたファイバ重量流量が熱容量を代表するとしても決定的な違いはないと考えられるので、

$$L = L_o + K W_F(t) \quad \dots\dots(2)$$

$W_F(t)$: ファイバ重量流量

K : 定数 > 0

L_o : ドライヤ以外のむだ時間

という形の補償ができれば、安定領域が拡大する。ただ、 $W_F(t)$ は直接計測できず $W(t)$ の実測値から推定するが、水分 $M(t)$ と同じ時点で得られた $W(t)$ を使

ったのでは補償の意味がない。そこで、BWの制御系から、 $W_F(t)$ の未来の最適推定値を $W_F^*(t+1)$ を求めて、補償値とする。今、単位面積当りのファイバ重量流量をファイバ濃度 $K(t)$ とストック流量 $g(t)$ により

$$W_F(t) = k(t)g(t) \quad \dots\dots(3)$$

と表し、動的に

$$W_F(t+1) = aW_F(t) + W(t) \quad \dots\dots(4)$$

と表されるものとする。実際には $W(t)$ は $K(t)$ 、スライス開度 $U(t)$ 、ヘッドボックスのトータル・ヘッド $h(t)$ の関数であるが、正規化して平均値0、分散 σ_F^2 のガウス分布とし、非ガウス成分は次の観測式で吸収するものとする。観測可能なプロセス変数はBWであるが、これは水分の項を含んだ形で、

$$W(t) = k(t)g(t) + \beta(t)g(t)\{1 - k(t)\} \quad \dots\dots(5)$$

$\beta(t)$ ：除水率 $0 < \beta(t) < 1$

で表されるので観測方程式は、

$$W(t) = (1 - \beta)W_F(t) + \beta(t)g(t) + v(t) \quad \dots\dots(6)$$

右辺第2項と非ガウス・ノイズ成分 $V(t)$ を併せて $v^1(t)$ とし

$$v^1(t) = \{1 - \lambda(t)\}x(t) + \lambda(t)y(t) \quad \dots\dots(7)$$

ただし、 $\lambda(t)$ は、

$$\text{Prob}\{\lambda(t)=1\} = \epsilon, \text{Prob}\{\lambda(t)=0\} = 1 - \epsilon \quad \dots\dots(8)$$

$x(t)$ 、 $y(t)$ は互いに独立な白色ノイズ・プロセスとする。すなわち、ヘッドボックス回りの制御系に固有の変動特性が確率を出現すると想定したものである。

$$E\{v^2(t)\} = (1 - \epsilon)\sigma_x^2 + \epsilon y^2 \quad \dots\dots(9)$$

状態方程式(4)と観測方程式(6)で表されるカラーシステムに対し、Kalmanフィルタは

$$W_F^*(t+1) = aW_F^*(t) + K(t)\{W(t) - (1 - \beta)aW_F^*(t)\} \quad \dots\dots(10)$$

$$K(t) = \frac{a(1 - \beta)P(t)}{(1 - \epsilon)\sigma_x^2 + \epsilon\sigma_y^2 + P(t)(1 - \beta)^2} \quad \dots\dots(11)$$

$$P(t+1) = a^2P(t) + \sigma_F^2 - K(t)a(1 - \beta)P(t) \quad \dots\dots(12)$$

ただし、 $P(t)$ は、予測誤差 $W(t) - (1 - \beta)aW_F^*(t)$ の共分散である。(10)で得られた $W_F^*(t+1)$ を(2)式に代入して補償要素を更新する。

4. むだ時間補償の近似方式の安定性

図3のむだ時間補償系はローカル・ループに e^{-Ls} の項目があり、これを簡易なコントローラで実際するのは難しいため、

$$\frac{1}{1 + TS} \left(1 - e^{-Ls}\right) \doteq \frac{1}{1 + TS} \left(1 - \frac{1}{1 + T_1 S}\right) \quad \dots\dots(13)$$

で、近似した場合、安定領域がどれだけ狭くなるかが気になるので、それを吟味する。近似系の一巡伝達関数は、

図 4

$$G_o(S) = \frac{C \frac{1}{1+TS} e^{-LS}}{1 + \frac{CT_1S}{(1+TS)(1+T_1S)}}$$

$$= \frac{C(1+TS)(1+T_1S)e^{-LS}}{\{(1+TS)(1+T_1S) + CT_1S\}(1+TS)} \quad \dots\dots(14)$$

閉回路の特性方程式 $1+G_o(S)=0$ は、

$$C(1+T_1S)e^{-LS} + (1+TS)(1+T_1S) + CT_1S = 0 \quad \dots\dots(15)$$

$S \neq \frac{1}{T_1}$ として

$$e^{-LS} + 1 + \frac{1}{C} + \frac{T}{CS} - \frac{1}{1+T_1S} = 0 \quad \dots\dots(16)$$

コーシーの定理をそのまま応用すれば、 S が図 5 のような軌跡を画くとき、(16)式の左辺（これを $G(S)$ とする）が画く時間方向の回転の数は複素平面の右半分にあるゼロと極の数の差であるが、 $G(S)$ は右半面に極を持たないから、回転の数はゼロの数を与え、完全に $G(S)$ の軌跡が一回転しなければ、系は安定である。 $G(S)$ を二つの部分に分け、

図 5

図 6

$$G(S) = g_1(s) - g_2(s)$$

$$g_1(s) = e^{-LS}$$

$$g_2(s) = -1 - \frac{1}{C} - \frac{T}{CS} + \frac{1}{1+T_1S} = 0 \quad \dots\dots(17)$$

とすれば、 $G(S)$ は始点を $g_1(s)$ 上に終点を $g_2(s)$ 上に有する軌跡を画く。 $g_1(s)$ は単位円上を時間方向に動き、 $g_2(s)$ は大略、図 6 の左のような軌跡を画く。いかなる L に対しても、 $G(s)$ が一回転しないためには $g_2(s)$ は $g_1(s)$ の外側にあればよいから、

$$-\frac{1}{C} < -\frac{1}{2} \quad \therefore C < 2 \quad \dots\dots(18)$$

すなわち調節器のゲインが 2 以下であれば無条件に系は安定である。 C を大きくする場合は系は条件的に安定となる。図 7 において $g_1(s)$ 上で $g_2(s)$ より右側すなわち円弧 PQ の範囲で系は安定である。PQ はむだ時間 L に比例するのである程度以上 L が大きくなると不安定となる。更に $C > 1$ では S の小さい範囲すなわち低周波域で $g_2(s)$ は図 8 のように虚軸を接する円に近くなるので、Q 点の横座標は $S = j\omega$ として (17) 式を連立させ、虚部と実部を対照して、

$$\cos \omega L = -T_1^2 \omega^2, \quad \sin \omega L = T_1 \omega \quad \dots\dots(19)$$

より ω を求めて決まるので、安定条件は、

図 7

図 8

$$\cos \frac{L}{T_1} \frac{\sqrt{5}-1}{2} > \frac{1-\sqrt{5}}{2} \quad \dots\dots(20)$$

であり、むだ時間に関する安定条件は、

$$L^* > L$$

ただし、

$$L^* = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{5}-1} T_1 \left(\pi - \cos^{-1} \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right) \quad \dots\dots(21)$$

すなわち、制御対象のむだ時間 L は T_1 を大きくとれば安定を損なわず補償される。