綿スライバむらサンプリング制御(閉ループ型)*

(第 3 報)

(昭和39年4月8日受理) 会 員 松 本 庄 平**

" 石 川 茂 彬

福 丸 正 雄

会 員 岩 田 信 孝

竹 内 将 二

→ 摘 要 ←

目 的

閉ループ比例連続制御は開ループ型に比べて、その制御能力において劣ることが指摘されている。

この研究では、閉ループ比例連続、サンプリング制御を理論的、実験的に解明し、スライバむら閉ループ制御の改良発展に寄与せんとする。

成 果

- (1) 閉ループ比例連続およびサンプリング制御のスライバに対する理論修正能力は、(10)、(12) 式でもとめられる。またその能力は開ループに比較して非常に劣っている。
- (2) 定常状態における修正能力は長周期むらに対して同一である。
- (3) むだ時間は0であることが望ましい。
- (4) フリクタに起因する外乱が、スライバに加えられ、短周期むらがより以上に修正後増大する。したがって検出ローラ幅にも関係するフリクタの形状とくに配慮が必要である。

1. ま え が き

一般に綿スライバむらを修正する制御装置としては、開ループ比例連続制御系が推奨されている。これは自動制御分野において、特異な存在といえよう。自動制御とは「物体、プロセス、機械などの量を外から与えられる目標値と一致させるために、その量を検出して目標値と比較し、それに応じて訂正動作を自動的に行なわせること」と定義されている。このことは、結果から原因へ信号を復原する閉ループ系が、自動制御そのものであることを意味する。にもかかわらずむら修正に開ループサーボ機構を採用するゆえんは制御対象がスライバであり、原因となる操作と、結果として生じる制御量の変化との

間の因果関係がはっきりと規定され、予期されざる外乱が加わることはなく、したがってこの影響を打消す必要がないからである。

この理由をもってむら修正に対して、閉ループ系を捨てざるという結論を出すことはすこし拙速のきらいがある。スライバむら修正の開ループ比例連続制御について、理論的考察をした報文があるが、その他はあまり見かけない。それによるとむら修正能力は、かなり劣ることが指摘されている。

そこで閉ループ比例サンプリング制御について、理論的、実験的に解明し、あわせて2次おくれ要素の開ループ比例連続制御について考察し、スライバむら閉ループ制御の改良、発展に寄与せんとする。

* Controlling Cotton Card Sliver Unevenness with Sampled-Date Control having Proportional Action. Part 3: Feed Back Control. (第1報 15巻 1号, 第2報 16巻 9号所載)

** S. Matsumoto, S. Ishikawa, and N. Iwata, M. Fukumaru, Capembers and S. Takeuchi. 京都工芸繊維大学工学部

2. 実験装置

第1図は実験装置を示す。ミドルローラ R_2 はコンプリー C_1 より伝動され、フロントローラ R_3 とともに定速回転する。検出ローラは矢の方向に走るスライバにむらがあると微小変動する。これは $L_1 \sim L_4$, 油圧サーボ

(第1図) 実験装置の概略図

機構 O , $L_5 \sim L_7$, サンプラ S およびベルトシフタ L_8 により倍力増幅され、バックローラ R_1 を変速する。サンプラおよびホールド要素 S は、2個の円筒状のものにV型の突起と溝があり、これがカム H の回転により L_9 が上下動し、作動およびホールドする。またホールドされている間に、サーボ機構からの信号は連続して伝わるが、突起は常に溝の範囲内にあり、ホールドがはずれた瞬間にそのときの溝の位置に噛合うのである。

連続制御は S を常に噛合わせ、 H の回転を中止すれば可能であるが、念のため L_9 , H をとりのぞき、 S を一体のものと交換して実験を行なった。

3. 実験装置の特性

3.1 連続制御の場合

検出ローラと変速ローラ間の伝達関数 $G'(S)$ を求める。この実験方法は、第1図 R_3 のかわりに偏心ローラをとりつけ、光電管、ひずみ計、電磁オシロなどによりローラ R_1 の変速を測定する。

周波数特性 $G'(j\omega)$ を

$$G'(j\omega) = \frac{K}{\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right) + 1} e^{-j\omega L} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= 14 \text{ rad/sec: 折点周波数} \\ \xi &= 0.8 \quad : \text{減衰係数} \\ L &= 0.04 \text{ sec} : \text{むだ時間} \\ K &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

とすると、実験とよく一致する。

3.2 サンプリング制御の場合

検出ローラとサンプリング要素とのあいだの伝達関数を実験より求めると

$$G_1(S) = \frac{K_1}{1 + S T_1} \dots\dots\dots (3)$$

$$K_1 = 1, T_1 = 0.03 \text{ sec}$$

また、ベルトシフタとバックローラ間の伝達関数は、実験と重ね合わせの定理により

$$G_2(S) = \frac{K_2}{1 + S T_2} e^{-S L_1} \dots\dots\dots (4)$$

$$K_2 = 1, T_2 = 0.04 \text{ sec}, L_1 = 0.05 \text{ sec}$$

検出ローラと変速ローラ間の開いた回路のブロックダイアグラムを第2図に示す。図において

(第2図) 回路を開いたときのブロックダイアグラム

$R(S)$: 入力信号, $E(S)$: それぞれの出力信号
 $H(S)$ は実験結果より近似的に零次ホールドとみなされるから

$$H(S) = \frac{1 - e^{-S T_s}}{S} \dots\dots\dots (5)$$

入力信号 $R(S)$ が、正弦波であるとき $\omega \leq 3 \text{ rad/sec}$ (むら波長約 50~60 cm 以上) の範囲において、出力信号 $E_2(S)$ (ベルトシフタの変位) が、近似的に入力信号と一致するサンプリング周期の最大値を実験的にもとめると

$$T_s = 0.31 \text{ sec} \dots\dots\dots (6)$$

出力信号 $E_3(S)$ の周波数特性は、その主成分のみを考えると

$$E_3(j\omega) = \frac{1}{T_s} G_1(j\omega) H(j\omega) G_2(j\omega) R(j\omega) \dots\dots\dots (7)$$

入力信号 $r(t) = K_0 \sin \omega t$ に対する出力信号 $E_3(t)$ は

$$E_3(t) = \frac{K_0 K_1 K_2}{\sqrt{1 + (\omega T_1)^2} \sqrt{1 + (\omega T_2)^2}} \frac{\sin \frac{\omega T_s}{2}}{\frac{\omega T_s}{2}} \sin \left\{ \omega \left(t - L_1 - \frac{T_s}{2} \right) - \alpha - \beta \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$\alpha = \tan^{-1} \omega T_1 \quad \beta = \tan^{-1} \omega T_2$

(8) 式に (3), (4), (6) の諸数値, および $K_0 = 1$ を代入したものは実験値とよく一致する。

4. スライバむらに対する理論制御能力

(第3図) 装置のブロックダイアグラム (連続制御)

4.1 連続制御の場合

第3図は装置全体のブロックダイアグラムである。

$\frac{\Delta y}{y_0}$: 入力スライバむら信号

$\frac{\Delta x}{x_0}$: 出力スライバむら信号

A: 変速点, B: 検出点, L_2 : A B間をスライバが移動する時間 (sec)

スライバの供給, 紡出むらの関係を示す伝達関数を G_e

(S) とすれば

$$\frac{L}{L} \frac{\Delta x}{\Delta y} = G_e(S) = \frac{e^{-sL_2}}{1 + G'(S) e^{-sL_2}} \dots\dots\dots (9)$$

(9) 式において, $S = j\omega$ とし (1) を代入し, そのゲインをもとめると

$$|G_e(j\omega)| = \left\{ \frac{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + K^2 + 2K\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\} \cos \omega(L_1 + L_2) - 2K\left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right) \sin \omega(L_1 + L_2)} \right\}^{1/2} \dots\dots (10)$$

4.2 サンプルング制御の場合

第4図はブロックダイアグラムである。周波数領域で, スライバの供給, 紡出むらの関係を考えて, (9) 式に相当する伝達関数 $G_s(S)$ は, (7) 式を参考にして

$$G_s(S) = \frac{e^{-sL_2}}{1 + \frac{1}{T_s} \cdot \frac{K_1}{1 + T_1 S} \cdot \frac{K_2}{1 + T_2 S} \cdot \frac{1 - e^{-ST_s}}{S} e^{-s(L_1 + L_2)}} \dots\dots\dots (11)$$

(11) 式において $S = j\omega$ とし, そのゲインをもとめると

$$|G_s(j\omega)| = \left\{ \frac{T_s^2(1 - T_1 T_2 \omega^2)^2 \omega^2 + T_s^2(T_1 + T_2)^2 \omega^4}{T_s^2(1 - T_1 T_2 \omega^2)^2 \omega^2 + T_s^2(T_1 + T_2)^2 \omega^4 + 4K_1 K_2 \sin \frac{\omega T_s}{2} \{K_1 K_2 \sin \frac{\omega T_s}{2} + T_s(1 - T_1 T_2 \omega^2) \cos \omega(L_1 + L_2 + \frac{T_s}{2}) - T_s(T_1 + T_2) \omega^2 \sin \omega(L_1 + L_2 + \frac{T_s}{2})\}} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

そこで (10) 式に紡出スライバ速度 $V = 11.5 \text{ m/min}$, $L_2 = 0.47 \text{ sec}$, $K = 1$ および (2) の諸数値を (12) 式には $V = 10.6 \text{ m/min}$, $L_2 = 0.48 \text{ sec}$, $K_1 = K_2 = 1$ および (3), (4), (6) の数値を代入し, かつ

$$\lambda = \frac{2\pi V}{\omega} \dots\dots\dots (13)$$

の関係より, ゲインをたて軸, むら波長をインチの対数目盛にしてよこ軸にとり, むら修正能力を示したものが第5図である。この修正能力曲線は K あるいは V , L_2 を変えると, 上下あるいは左右に移動する。また定常状態において, 回路が連続でも非連続 (サンプルング) でも修正能力は類似の形である。またあるむら波長で常に共振することがわかる。

(第4図) 装置のブロックダイアグラム (サンプルング制御)

— 閉ループ比例連続制御 $L_1 + L_2 = 0.51 \text{ sec}$
..... 閉ループ比例サンプルング制御 $L_1 + L_2 = 0.53 \text{ sec}$

(第5図) むら修正能力

前記諸数値を用いてナイキスト線図を画くと、その曲線はいずれも (-1.0) 点近傍を通り臨界状態に近い。したがって比例ゲインを1より大きくすると不安定になる。 L_2 を小さくすると系は安定となり、共振波長はより短くなる。ゆえに紡出速度 V の増大以外の方法で、できるかぎり L_2 を小さくすることが望ましい。

むら波長 λ 、紡出速度 V 、むだ時間 L_1+L_2 が同調すると共振状態となり、細いむら部分はますます細くなり太いむら部分はむらが増加される。そのとき連続制御では回路ははなはだしい振動状態になる。サンプリング制御においては、このような振動はみとめられない。

4.3 過渡応答

連続制御において、単位階段入力に対する過渡応答はJohnsonの方法でもとめられる(第6図)。またサンプリングの手法でも解決される。

(第6図) 過渡応答(連続制御)

サンプリング制御において第4図の出力 $C(S)$ を、 Z 変換により導出するとき図のダイアグラムそのままでは解決できない。すなわち $G_1(S)$ の手前にサンプラが存在するか、あるいはそれが零次比例要素であれば出力 $C(S)$ はもとめられる。

$G_1(S)$ の時定数は非常に小であるから

$$G_1(S) = K_1 = 1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

第4図の a 点における信号 $K_1 C^*(S) = C^*(S)$ 、これを Z 変換すると $C^*(Z)$ である。

出力信号 $C(S)$ は

$$C(S) = R(S) G_3(S) - C^*(Z) H(S) G_2(S) G_3(S) \quad \dots\dots\dots (15)$$

(15)を Z 変換すると

$$C^*(Z) = R G_3^*(Z) - C^*(Z) H G_2 G_3(Z)$$

$$C^*(Z) = \frac{R G_3^*(Z)}{1 + H G_2 G_3(Z)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

(16)を(15)に代入すると

$$C(S) = R(S) G_3(S)$$

$$= \frac{R G_3^*(Z)}{1 + H G_2 G_3(Z)} H(S) G_2(S) G_3(S)$$

この式を拡張 Z 変換すれば

$$C^*(Z m) = R G_3^*(Z m)$$

$$= \frac{R G_3^*(Z)}{1 + H G_2 G_3(Z)} H G_2 G_3(Z m) \quad \dots (17)$$

(16)は出力の Z 変換であり、(17)は任意の入力に対する出力をもとめる式である入力を正弦波とすると、(12)式に应ずる出力が得られる。

一般に Z の関数を逆変換して、すべての時刻での出力は拡張 Z 変換によりもとまる。もし系にむだ時間 L を含むとき

$$m_\delta = 1 - \frac{L}{T_s}$$

とすれば、すべての時刻 $t = (n - m_\delta + m) T_s$ での出力 $C(n, m, m_\delta)$ が得られる。ただし n =整数 $0 \leq m \leq 1$ 。

入力 $R(S)$ を単位階段入力とすると

$$R(S) = \frac{1}{S}$$

$$R(S) G_3(S) = \frac{1}{S} e^{-s L_2} = \frac{1}{S} e^{-s T_s} \cdot e^{-s \delta_2}$$

$$\text{ただし } \delta_2' = \frac{L_2}{T_s} = \frac{0.48}{0.31} = 1.55$$

$$\delta_2 = 1.55 - 1 = 0.55$$

$$R G_3^*(Z m) = R G_3^*(Z) = \frac{1}{Z(Z-1)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$H(S) G_2(S) G_3(S) = \frac{1 - e^{-s T_s}}{S} \cdot \frac{1}{1 + T_2 S} e^{-s(L_1 + L_2)} = a(1 - e^{-s T_s}) e^{-s T_s (\delta_1 + \delta_2) / T_s} / S$$

ただし $a = 1/T_2$

$$H G_2 G_3^*(Z) = H G_2 G_3^*(Z m') = \frac{1}{Z} \cdot$$

$$\frac{Z-1}{Z} \left\{ \frac{Z - e^{-a T_s} - (Z-1) e^{-a m' T_s}}{(Z-1)(Z - e^{-a T_s})} \right\} m' = 1 - \delta_1 - \delta_2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$H G_2 G_3^*(Z m) = \frac{1}{Z} \cdot$$

$$\frac{Z-1}{Z} \left\{ \frac{Z - e^{-a T_s} - (Z-1) e^{-a m T_s}}{(Z-1)(Z - e^{-a T_s})} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし $t = (n - m_{\delta_2} + m) T_s$ $0 \leq m \leq 1$

$$m_{\delta_2} = 1 - \delta_2$$

(17)に(18)、(19)、(20) $a = \frac{1}{T_2} = 25$, $m' = 1 - \delta_1 - \delta_2 = 0.32$, $T_s = 0.31$ を代入すれば

$$C^*(Z\,m) = \frac{Z^3 - 0.000553\,Z^2 + Z(e^{-7.5m} - 0.090718) + 0.090718 - e^{-7.5m}}{Z^5 - 1.000553\,Z^4 + 0.909835\,Z^3 - 0.819117\,Z^2 - 0.090165\,Z} \dots\dots\dots (21)$$

ただし $t = (n - m_{\delta_2} + m)\,T_s, \quad 0 \leq m \leq 1,$

$m_{\delta_2} = 1 - 0.55, \quad n$ は整数

(21) において $m = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ を代入し、
逆変換すると第 7 図になる。

(第 7 図) 過渡応答 (サンプリング制御)

5. スライバむら修正制御実験結果

実験条件を第 1 表に示す。

第 8 図は連続制御、第 9 図はサンプリング制御のときの
測定結果の一例である。

小むらの増大の形状はいずれも類似である。理論的に
考察すると共振波長 (8 ~ 10 in 1 次共振波長, 4 ~ 5 in
2 次共振波長) の存在, 臨界状態などが小むら増大の第
1 の原因と考えられる。

共振状態は機械あるいはその要素に生ずる音, または

(第 8 図) スライバむら修正実験結果
(連続制御)

—— 制御前 制御後
(第 9 図) スライバむら修正実験結果
(サンプリング)

変動を感覚によりある程度感知できる。
連続制御実験ではベルト シフタの動作は, 振幅の大き
いなめらかな修正運動と, 振幅の小さい激しい振動とが
かかっていることがみとめられる。したがって, 測定
前にスライバの小むら増大が推察できる。

サンプリング制御実験では, ベルト シフタの激しい振
動がみとめられない。この制御では, 1) 高周波をしゃ
断するように T_s を選定した。2) 波長 10 in に相当す
る ω では (8) 式の出力 $E_s(t)$ は非常に小さい。3) ま
た 1 サンプリング周期のうち作動時間 0.1 sec, ホール
ド時間 0.2 sec である。以上のことから, 实际的に
共振は避けられている。にもかかわらず第 9 図の小むら
の増大は, 後述の第 2 の原因によるものと考えられる。
またこれが, 長周期むらの修正に悪影響をおよぼしてい
る。

階段入力を加えたときも同様にスライバの $U\%$ は増大
し, 測定記録も良好でない。

6. 修正されたスライバの小むら増加の原因
究明

むら発生の第 2 の原因は, 明らかに機械要素の不完全
性である。装置においてむらが発生すると考えられる個
所は, (1) 検出ローラ, (2) ドラフト領域, (3) フリ
クタである。

(1) 検出ローラについて

(第 1 表)

閉ループ型	紡出スライ バ速度 $V(\text{m/min})$	変速点検出 ローラ間の 距離 (cm)	むだ時間 $L_1 + L_2(\text{sec})$	比例ゲイン K	スライバ (gr/6 yd)	ダフリング 数	ドラフト比	安定判別
比例連続	16.7	9.05	0.37	1	280	2	1.23	安定
比例サンプリング	10.6	8.4	0.53	1	280	2	1.38	臨界

検出ローラおよびそのボトムローラの偏心を荷重のある状態で、ダイヤルゲージで測定した結果 0.01 mm 程度である。ゆえにここではむらが発生しないと結論できる。

(2) ドラフト領域について

スライバを第1図における R_1 , R_2 のみを一定ドラフト比 1.25, 制御なしで通す。第2表はその測定結果である。

(第2表)

ドラフト領域におけるむら発生時の測定結果

スライバ	U%	
	ドラフト前	ドラフト後
2本ダブリング	1.6	1.3
1本	2.3	2.1

つぎに制御動作においてはバックローラ R_1 が変速するからこれに起因するむら発生を調べる。そのため作爲的にスライバにむらを加えしるしをつける。そうして人爲的にそれに応じてバックローラを変速する。その測定結果は実験前の U%: 2.55, 実験後の U%: 2.35 である。

以上によりドラフト領域において、むらは発生しないことが明らかである。

(3) フリクタについて

(第3表)

フリクタのむら発生有無の実験条件およびその結果 (スライバ1本)

速度比	記号	U%		速度比	記号	U%	
		サンプリング制御				無制御	
		実験前	実験後			実験前	実験後
1.25	a	1.8	3.7	1.25	c	1.8	2.5
1.11	b	2.2	2.5	1.11	d	2.1	2.6
1.05		スライバ切断		1.05	e	2.0	3.1
1		スライバ切断		1			

ただし第3表における無制御とは、第1図のミドルローラ R_2 , フリクタ T , 検出ローラ R_3 にスライバを通すことである。速度比とは R_3 の回転数と R_2 の回転数との比である。スライバ切断とは制御動作において R_2 とフリクタ T の間にスライバが停たいし、運転不能となり T と R_3 間でスライバが切断する。

一方フリクタのブラケットにひずみ計のビックアップ

プをはりつけ、その応力変動を記録する。装置にスライバを供給しない無負荷のときは、もちろんその電磁オシロの記録は直線である。

第10図は第3表記号 b の記録、第11図は記号 d の記録である。

フリクタの応力変動

供給スライバ

紡出スライバ

(第10図) 第3表記号 b の実験記録

280 gr/6 yd スライバ2本をダブリングした場合の実験記録もこれと大同小異である。

以上の実験よりつぎの事項が結論される。

- (1) フリクタにおいてむらが発生する。
- (2) R_3 と R_2 の速度比、すなわちスライバ張力の過大、過小は避けるべきである。適当な速度比が存在する。
- (3) フリクタの応力変動は、スライバむらに応じて変動しない。スライバを検出ローラに案内するフリクタの最狭部において、ときにはスライバがつまりつぎの瞬間引き抜かれることが周期的に繰り返される。

フリクタの応力変動

供給スライバ

紡出スライバ

(第11図) 第3表dの実験記録

7. 考 察

7.1 修正能力について

定常状態において閉ループ比例連続制御, サンプリグ制御の修正能力は同一であるということが理論的, 実験的に実証されたと考えられる。

しかしながら連続制御では, 回路を開いた場合 ω rad/sec=10~12 (むら波長 $\div$ 4~5 in) まで感度があるから, 実験結果のように4 inあるいは10 in 近傍で共振するかもしれない。現実には回路およびベルト シフタの振動がみとめられた。しかし, これはフリクタに起因する

むらによる振動ともいえる。

一方サンプリグ制御では, ω rad/sec=5~6 以上において急激に感度は落ちる。また10 in 近傍で共振が起こらないようにサンプリグ周期を選んだ。実験において装置の振動はみとめられない。それにもかかわらず, 小むらの著しい増大はフリクタに起因すると結論される。

結局, 長周期むらに対して修正能力は同一であるが, 短周期むらについて結論は明確にすることができない。

7.2 フリクタについて

小むらの増大はフリクタに起因すると考えるならば, それぞれのスライバについて検出ローラ幅, およびそれに関係するフリクタの形状などが重大な問題となる。流体がしぼり部分 (たとえばベンチュリ管) を整流を通るとき, 圧力エネルギーは速度エネルギーに変換され, 通過後はふたたび圧力エネルギーにもどり, 系全体として変動はない。スライバにおいては, このような断熱的可逆変化は不可能である。フリクタのしぼり部分では圧縮による繊維相互間の摩擦の存在のため非可逆過程となる。つまりむら発生はさけられない。このことは今後に残された課題といえよう。

7.3 装置の改良

閉ループ比例制御においてそれが連続でも, 非連続でもスライバむら修正能力は良好でない。これをいくらかでも改良する手段として, 望ましい伝達関数を持つ要素を回路に組み込めばよい。しかしこれを実現するとき機械的にはすこぶる困難で, とくにサンプリグ制御においては不可能である。必然的に検出部と油圧サーボ機構間を電氣的にせざるを得ない。

参考文献

- 1) 村上文男; スライバむら連続制御, 本誌, 12, 4 (1959)
- 2) 松本庄平; 綿スライバむらサンプリグ制御 (第1報), 本誌, 15, 11 (1962)
- 3) 松本庄平; 綿スライバむらサンプリグ制御 (第2報), 本誌, 16, 9 (1963)
- 4) E. I. Jury; サンプル値制御, 丸善 (1962)