談話室

制御屋からみた圧延プロセス制御の問題点

古 田 勝 久*

1. は じ め に

最近の制御理論に基づいた制御系が鉄鋼の多くのプロセスで使われるようになり，制御屋の出番が増えてきたと言われるが，まだまだ制御が使われていないところが多いようである．この一文は，現場を知らない制御屋のたわごとであるが，圧延屋さんが耳を傾けて下されば幸いである．

圧延に関する制御は図 1 で示されるように

1) 圧延仕様から，目標値（厚み，張力）が与えられる場合の圧下位置，ロール速度，クラウン力の計算値を求めるフィードフォワード入力

2) 厚み・張力等の制御量を制御するフィードバック制御

3) 実際の制御結果に基づき次の操業結果を改善するように目標値の適応（学習）制御

の三つの部分からなつていることがわかる．1)のフィードフォワード的操作条件は，取り扱う対象が完全にわかつている場合には決められるが，通常モデルの不完全さや，外乱の存在のため，2)のフィードバック制御が用いられる．しかし，フィードバック制御においては，“制御量は測定されなければ良好な制御結果が期待できない”という可読性（readability）という概念があるが，圧延においては，制御しようとする対象が移動しているためいろいろの問題が生じている．形状制御があまりうまく行われていない原因はこのへんにあるのではなかろうか．

3)の学習制御では，前回までの目標値で良い結果の出ないとき，よりよい目標値を次に与えるものである．これまで，この部分と 1) の部分が組み合わされていろいろな仕事が行われているようであるが，著者の聞く多くの仕事はモデルが静的なためこの部分を有効に働かせる限度にきているようである．この小文では，動特性を入れる場合の一方法について述べたい．

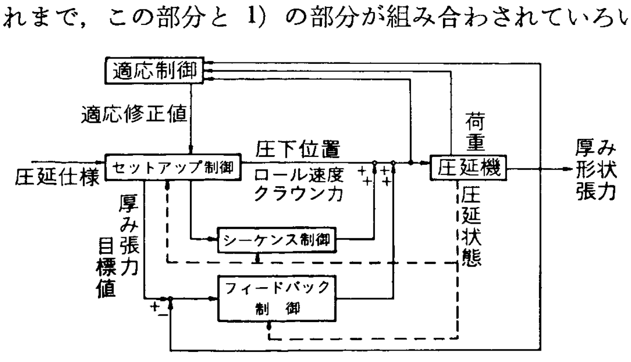

図 1 制御系の構成
(“圧延技術発展の歴史と最近の進歩” p. 225 より)

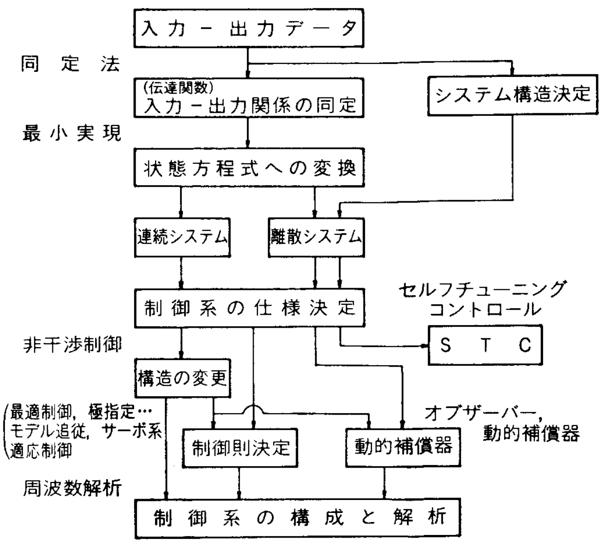

図 2 制御系設計の手順
(“圧延技術発展の歴史と最近の進歩” p. 203 より)

2. フィードバック制御系実現の問題点

制御系設計の目的は，

① 制御系の安定性の改善

② 外乱の存在の下で目標値に追従する制御系の構成：特に線形自由系の出力で表現される目標値，外乱の場合に定常状態で制御量が目標値に一致する「出力制御」

③ システム構造の変化：出力零化，外乱の局所化，非干渉制御系の構成等である．

これらの制御系設計の目的で与えられ，制御対象であるプラントのモデル構造が明確になつたとき，制御系設計は図 2 のような手順で制御系設計が行われる．

しかるに，これまでの鉄鋼プロセスにおいて多く使用されてきた制御系は，線形自由系で外乱，目標値が与えられる場合にも有効なサーボ系である．これは，プラントの入力 u，状態 x，出力 y，外乱 w，目標値 y_d が次のように表現される場合に有効な制御系設計法であるが使われ方に問題があると思われることが多い．ここではそのいくつかについて述べる．プラント目標値外乱は，次のように表されている．

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu + w,\quad y = Cx \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\frac{d}{dt}x_1 = A_1x_1,\quad y_d = C_1x_1 \quad \cdots\cdots (2)$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = A_2x_2,\quad w = C_2x_2 \quad \cdots\cdots (3)$$

* 東京工業大学工学部教授 工博

y_d, w が一定値なら A_1, A_2 は共に零行列である．これから簡単のため $A_1=0$, $A_2=0$ の場合を考える．

$$\dot{y}_d=0,\quad \dot{w}=0 \quad\cdots\cdots(4)$$

であるから

$$e \overset{d}{=} y-y_d \quad\cdots\cdots(5)$$

を定義すると

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\dot{x}\\ e\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & 0\\ C & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{x}\\ e\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\ 0\end{bmatrix}\dot{u} \quad\cdots\cdots(6)$$

が成り立つから(6)を安定にする

$$\dot{u}=F_1\dot{x}+F_2e \quad\cdots\cdots(7)$$

を用いるとき偏差 e はだんだん小さくなるから，制御量と目標値が一致する制御系が作られる．(7)より入力 u は

$$u=F_1x+F_2\int_0^t ed\tau\{-F_1x(0)+u(0)\} \quad\cdots\cdots(8)$$

のように，ある定数項を含んでいる．定常状態から入力が加えられる場合 $x(0)=0$ であり

$$u(0)=F_3y_d \quad\cdots\cdots(9)$$

のように選ぶことができる．この(9)は，フィードフォワード入力を制御対象に与えることを意味しており，加えると非常に良いのは，応答の遅い制御対象の場合である．このとき，フィードバック系の方で応答を速くしようとするといろいろの無理が出てくるようである．(8)の制御則は状態の推定を観測器で行い実行されるが，現実のプラントにおいてはアクチュエータのような飽和が存在する場合，図3のようになる．このように積分要素が補償器に含まれる場合，誤差が積分器にたまり Wind up という現象が生じ振動的になる．このような現象を起こさないためには，アクチュエーターでは

$$V+F_1\hat{x}=u \quad\cdots\cdots(10)$$

であるが，積分器を

$$V=\begin{cases}u_{max}-F_1\hat{x} & u\geq u_{max}\\ u_{min}-F_1\hat{x} & u\leq u_{min}\end{cases} \quad\cdots\cdots(11)$$

となるように $V+F_1\hat{x}$ が，アクチュエーターの限界を越えるときは，積分操作を停止しなければならない．

このサーボ系をデジタルコンピューターで実現する場合通常，プラント，目標値，外乱のモデル(1)，(2)，(3)を離散化して制御則が求められるが，この場合制御入力 u は，サンプル時点で不連続となり好ましくない

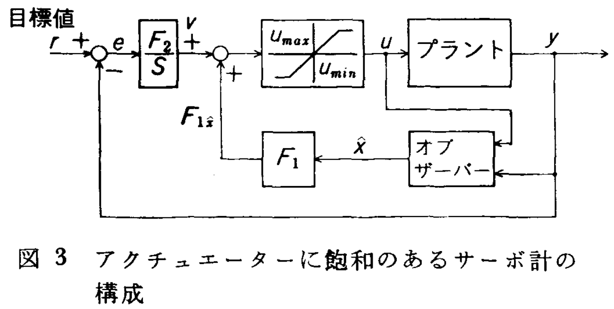

図 3　アクチュエーターに飽和のあるサーボ計の構成

場合がある．このようなときは，(6)式を離散化し

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ e\end{bmatrix}((k+1)T)=\Phi\begin{bmatrix}\dot{x}\\ e\end{bmatrix}(kT)+\Gamma\dot{u}(kT)\cdots(6)'$$

とし(6)′を安定にする制御則

$$\dot{u}(kT)=\hat{F}_1\dot{x}(kT)+\hat{F}_2e(kT)\cdots\cdots(7)'$$

を求める．(6)′は，$kT\leq t<(k+1)T$ のサンプル区間で $\dot{u}(t)$ が一定である制御入力である場合を示しており，サンプル区間では

$$u(kT+\tau)=u(kT)+\dot{u}(kT)\tau \quad\cdots\cdots(12)$$

をとる．ここで(7)′の $\dot{x}(kT)$ は e を出力とする(6)′のシステムの観測器より求められる．このようにサーボ系一つとつてみてもその実現には，いろいろ気を使わなければならないことがわかる．

3．学習制御の形状制御への応用

これまで，圧延理論部会制御小委員会に出席させていただき圧延の最大の問題は，図1のフィードフォワード部，すなわち形状制御等におけるプリセットのような目標値の設定であるとの感じをもつた．この問題は，出力が望ましい形をとるような目標値を求めるわけであるが，目標値を入力とする場合，出力が望ましい値をとるような入力を求める問題とも言い直せる．この問題は，ロボットにおいて目標軌道 r が与えられても，実際の軌道 y は，これから離れているため，ロボットの実軌道が r になるような目標軌道 u_r を何回かの試行で求めるものと類似であると考えられる．この問題は東北大の内山氏や，阪大の有本氏，千葉大の美多氏らによつて研究されているがこれまでに考えられているものは，次で述べるように制御システムがある特性をもつものでなければならなかつた．ここでは，それを拡張したものを紹介しよう．

これまでの方法は，システムの目標値(プリセット値)を u_i としたときの出力（形状）を y_i とするとき，$i+1$ 番目の目標値（プリセット値）u_{i+1} を目標形状を r とするとき

$$u_{i+1}=u_i+a(r-y_i)\quad 0<a<1 \quad\cdots\cdots(13)$$

によつて与えるものである．もしシステムが線形で

$$y_i(jw)=H(jw)u_i(jw) \quad\cdots\cdots(14)$$

のように記述できるなら(13)より

$$e_{i+1}(jw)=(I-aH(jw))e_i(jw)\cdots\cdots(15)$$

となる．ただし

$$e_i(jw)=r(jw)-y_i(jw)$$

(15)より，1入出力系のとき $|1-aH(j\omega)|<1$ のとき偏差 e は，減少するから $H(j\omega)$ は

$$\left|H(jw)-\frac{1}{a}\right|<\frac{1}{a} \quad\cdots\cdots(16)$$

を満たさなければならない．このように限られたシステムでない場合，(13)のような試行では，いくらくり返しても目標形状 r を与える目標値が得られない．しかるに

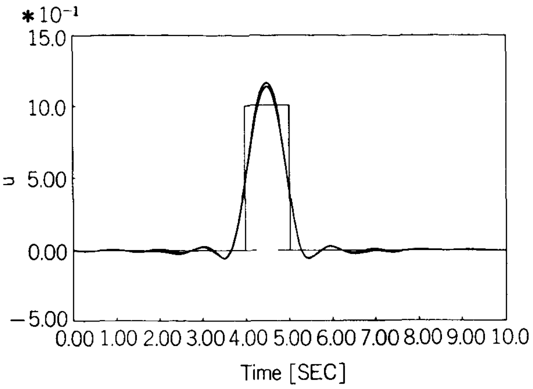

図 4(a)　目標入力の試行による決定法

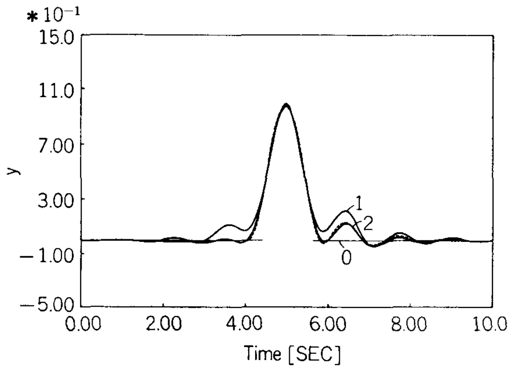

図 4(b)　出力の試行結果 (……は目標出力)

(13) の代わりに

$$u_{i+1}=u_i+\varepsilon_i z_i \quad \cdots\cdots (17)$$

ただし

$$z_i(t)=\int_t^{\infty} g^T(\tau-t)\{r-y_i(\tau)\}d\tau \quad \cdots\cdots (18)$$

$g(\tau)$ は，そのフーリエ積分を $G(j\omega)$ とするとき，制御対象の周波数伝達関数 $H(j\omega)$ に対し，次の $H(j\omega)$ $G^*(j\omega)$ の実部

$$\mathrm{Re}\{H(j\omega)G^*(j\omega)\}>0$$

が正定となるシステムの荷重関数である．また ε_i は，

$$\varepsilon_i=\frac{\|z_i\|^2}{\|Hz_i\|^2} \quad \cdots\cdots (19)$$

と選ぶのが一番良い．ただし，ここでのノルムは，

$$\|z_i\|^2=<z_i,z_i>=\int_{-\infty}^{\infty} z_i^T(t)\,z_i(t)\,dt$$

のように定義されたものであり，u_i, y_i ともそのノルムが有界であるものを考えている．このくわしい証明は文献にあるが，簡単には評価関数

$$J(u)=<r-y_i,\ r-y_i>$$
$$=<r-Hu_i,\ r-Hu_i>$$

とするとき

$$J(u_i+\varepsilon_i z_i)=J(u_i)-2\varepsilon_i<r-Hu_i, Hz_i>$$
$$+\varepsilon^2<Hz_i, Hz_i>$$

であるから，その勾配

$$\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_i}(u_i+\varepsilon z_i)=-2<e_i, Hz_i>$$

が負の条件から前の事柄がわかる．

例として

$$H_1(s)=52/\{(s+2)(s^2+2s+26)\}$$

なる伝達関数をもつシステムに対し $4\leq t\leq 5$ だけ 1 他は零の入力のとき得られる出力を目標出力とし，この入力をくり返しで求めた経過を図 4 に示す．ただし，このとき，プラントの特性Hは既知としてGをこれに等しく選んでいる．このように目標出力を与える入力がくり返し試行によつて求められ，この結果与えられる出力は目標出力と一致している．厚板等の形状制御においても，同じものの場合，数回の試行後には有効なものが得られる可能性があることがわかる．しかも始めの目標値もこれまでのプリセット決定法で求めれば，試行中のものも，これまで以上の製品が得られるため完全なオシャカを試行途中で作つてゆくのではないことがわかる．以上述べてきた方法は，ロール変形等による周期的外乱除去に有効な，くり返し制御における中野氏らの方法と併用して用いることもできる．

4. おわりに

以上，最近の制御の話題から圧延における問題と使つた面白そうな方法について述べた．フィードバック制御使用の一番の問題はモデルがはつきりしないことで，そのためサーボ剛性の高い制御系や圧延システムが好まれているようであるが，サーボ剛性を高めるシステムとしては，Variable Structural System が最近注目を集めており，この利用が考えられる．また，プリセット関係も，ここで述べた学習制御を含めもう少し研究されても良いように感じられる．

終わりに，これまで著者に圧延をつめ込んで下さつた圧延理論部会制御小委員会の中川部会長を始めとする委員諸氏に御礼申し上げます．

文　献

1) 古田勝久，江連　久，浜野芳治，諸岡泰男: 圧延理論部会 30 周年記念シンポジウム (1985), p. 201 [日本鉄鋼協会]
2) 古田勝久: システムと制御, 28 (1984) 12, p. 714
3) 内山　勝: 計測自動制御前会論文集, 14 (1978) 6, p. 706
4) S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki: J. Robotic Systems, 1 (1984) 2, p. 123
5) 美多　勉，大明準治，千田有一，ロボット学会第 2 回学術講演会 (1984), p. 89
6) 古田勝久，山北昌毅: 第28回自動制御連合講演会
7) 小俣　透，中野道雄，井上　悳: 計測自動制御学会論文集, 20 (1984) 9, p. 795
8) A. V. Balakrishnan: SIAM Control, 1 (1963) 2, p. 109