

角速度オブザーバを用いた熱延仕上スタンド間ルーパー制御

Development of Interstand Looper Control with Angular Velocity Observer for Hot Strip Finishing Mill

住友金属工業(株) 鹿島製鉄所 中川 繁政*・八木沢 繁・原口 昭彦
システムエンジニアリング事業本部 木村 和喜

1. 緒言

熱延製品の板厚・板幅精度に対する要求は、極めて厳しいものがあり、これらの精度に大きく影響するものに仕上ミルのスタンド間張力変動がある。この張力は、スタンド間に設置されたルーパー駆動トルクを修正することにより制御されているが、ルーパー駆動トルク変更によりルーパー角度が変化し、これを修正しようとするミルモーター速度制御との間に相互作用があり、十分に応答性を上げられなかった。鹿島製鉄所熱延工場においては、仕上ミルのスタンド間張力変動を防止し、ルーパー角度を安定させるために、オブザーバにより推定したルーパー角速度を、従来のルーパー角速度制御ループに付加する新しいルーパー制御方法を開発した。

2. ルーパー制御系

ルーパー制御系は、Fig.1に示すように、ルーパー駆動トルクの修正によりスタンド間張力を制御する張力制御系と上流側スタンドのミルモーター速度の修正により圧延材のパスライン（ルーパー角度）を制御する角度制御系からなる。

上記の2つの制御系においては、張力制御によりルーパー角度が、また、ルーパー角度制御により張力が変動するといった相互干渉があるため、各々の制御系の応答性向上には限界があった。

そこで、ルーパー制御系の応答性を向上させるため、ルーパー角速度をルーパー角度制御系にフィードバックする制御方法を考案した。

3. ルーパー角速度フィードバック

3.1 角速度オブザーバの構成

Fig.1に示すルーパー制御系のブロック線図をFig.2に示すが、これは各状態量を定常状態近傍にて局所線形化したモデルである。

本モデルにおいて、スタンド間張力発生系の応答は、他の系の応答に比べ速いため無視し（張力発生系時定数 $T\sigma \approx 0$ ）、かつ、速度外乱 V_d を定常外乱とすると次の4次元の状態方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_L} & 0 & -\frac{D}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{J} & 0 & -\frac{K\sigma A L\sigma^2}{J} & -\frac{K\sigma A L\sigma}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ V_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K\sigma A L\sigma}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{ref} \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ V_d \end{bmatrix} \quad T = \frac{T_L}{K_v}, \quad D = \frac{A_c}{K_v} \quad (2)$$

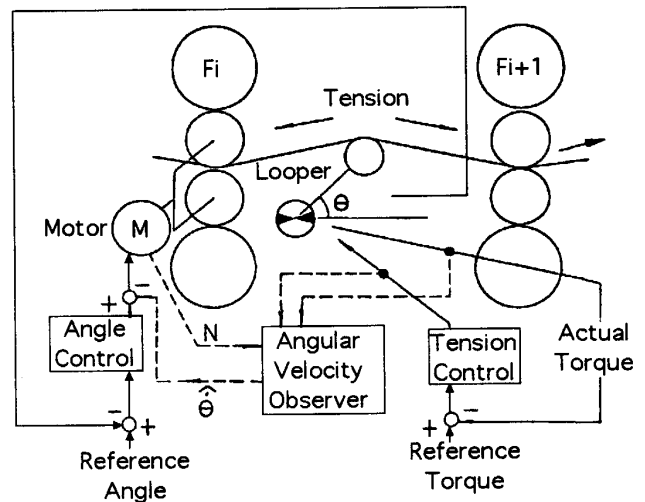
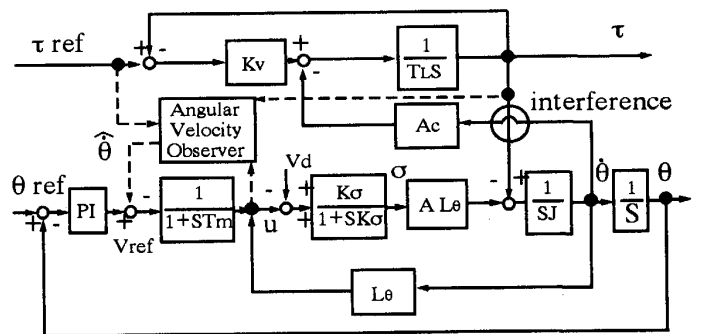


Fig.1 Structure of Looper Control with Angular Velocity Observer



S:Laplace Operator Vd:Disturbance
 τ :Looper Torque TL:Looper Torque Time Constant
 θ :Looper Angle Tm:Motor Time Constant
 J:Moment of Looper Inertia T σ :Tension Time Constant
 A:Strip sectional area Kv:Torque Control Gain
 Ac,K σ ,L σ :Transformation Constant

Fig.2 Block Diagram of Looper Control

平成 4年 9月22日受付 (Received on Sep. 22, 1992)

* Shigemasa Nakagawa (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Oaza-Hikari Kashimamachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314)

上記システムは、トルク指令値 τ_{ref} および速度修正量 u を入力、ルーパートルク τ およびルーパー角度 θ を出力とする2入力2出力の系である。

前記の系は、可観測な系であり、これからルーパー角速度 $\dot{\theta}$ と速度外乱 V_d を推定する2次元の最小次元オブザーバが、次のように構成できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\frac{K\sigma AL_0}{J} \\ \frac{D}{T}K_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} - (\lambda_1 + \lambda_2 - \frac{1}{T})K_1 - \frac{K\sigma AL_0 K_2}{J} & 0 \\ \frac{1}{T}K_2(DK_1 + 1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_1}{T} & \frac{K\sigma AL_0}{J} \\ -\frac{K_2}{T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{ref} \\ u \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{V}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ K_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad K_1 = \left(\frac{T}{D} \right) \left\{ \frac{K\sigma AL_0^2}{J} - (\lambda_1 + \lambda_2) \right\} \quad K_2 = \left(\frac{T}{D} \right) \left\{ \frac{J}{K\sigma AL_0} \lambda_1 \lambda_2 \right\} \quad (4)$$

ここで、 $-\lambda_1$ 、 $-\lambda_2$ はオブザーバの極であり、推定速度および精度を支配するものである。

3. 2 ルーパー角速度フィードバック

ルーパー制御系の応答性を向上させるために付加したルーパー角速度フィードバックは、Fig.3に示すよう、角速度が変動することにより生じるロール周速度変更量 $L\dot{\theta}$ 相当量を V_{ref} に加算することにより張力変動を抑制することができる。

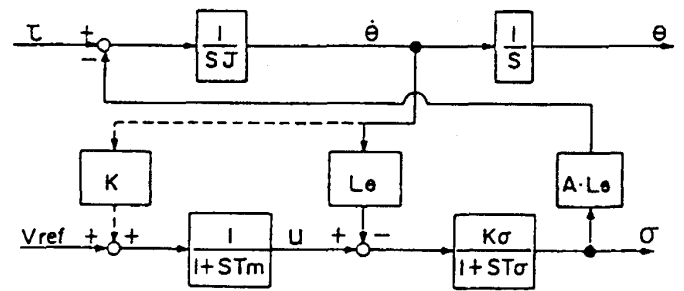


Fig.3 Block Diagram of Tension Control

ルーパー角速度 $\dot{\theta}$ を従来のルーパー制御系にマイナーループとしてフィードバックするときのブロック線図をFig.4に示す。ここで、ルーパートルク制御系は、ダイナミクスを無視するとルーパー運動系に対するダンパー効果となるため、これを $D=Ac/Kv$ にて表している。

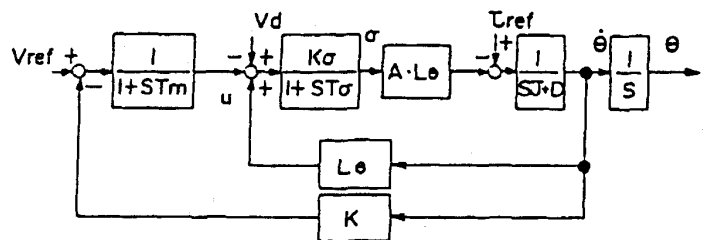


Fig.4 Block Diagram of Angular Velocity Feedback Control

Fig.4の制御系において、速度指令 V_{ref} からルーパー角速度 $\dot{\theta}$ に対する伝達関数は、次式で表される。

$$G(s) = \frac{K\sigma AL_0}{(1+sT_m)\{(sJ+D)(1+sT_\sigma) + K\sigma AL_0^2\} + K K\sigma AL_0^2} \quad (5)$$

この V_{ref} から $\dot{\theta}$ までの系に対し、ルーパー角速度フィードバックゲイン K を変化させたときの根軌跡をFig.5に示す。根軌跡は、1つの実数根と2つの複素数からなり、 $K=0$ （現状制御）の場合、実数根が虚数軸の近くにあり応答性を阻害している。そこで、 K を大きくすると、実数根がより左半平面内に移動し応答性は改善されるが、2つの複素数根が不安定側に移動する。ゆえに、2つの複素数根が、複素半平面において減衰係数がサーボ系にて望ましいとされる0.707になるように極配置法にてゲイン K を決定した。

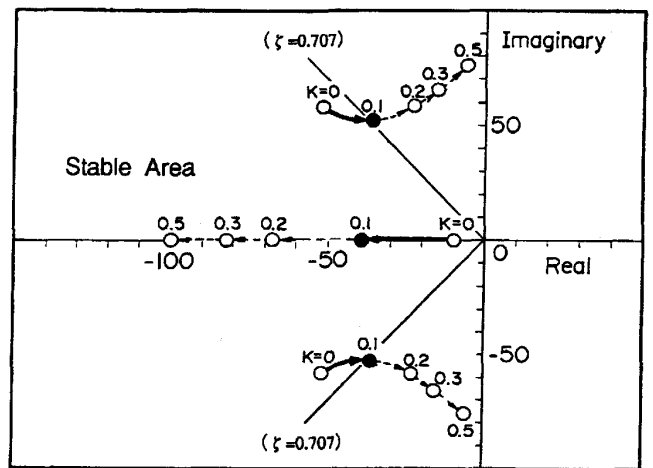


Fig.5 Diagram of Root Locus Corresponding to Feedback Gain Variation

3.3 シミュレーション結果

圧延材先端部における本制御のシミュレーション結果をFig.6に示す。

ルーパは隣接する2スタンドにおいて、鋼板が上流スタンドを通過し下流スタンドに噛み込んだ瞬間に立ち上がり、鋼板に接触したのち制御される。

従来制御の場合(a)、ルーパ角度は、ルーパ角度制御により目標角度に戻っていくが、A部に示すように過大張力が発生する。また、ルーパ角度の目標値への追従性も遅い。

これに対して、ルーパ角速度フィードバック制御の場合(b)、オブザーバにて推定したルーパ角速度(破線)はルーパ制御開始と同時に、速やかに真値(実線)に収束し、これをミルモータの速度指令にフィードバックすることによりルーパの応答性が向上され、B部に示すように張力変動が小さく抑えられる。また、ルーパ角度も速やかに目標値に収束する。

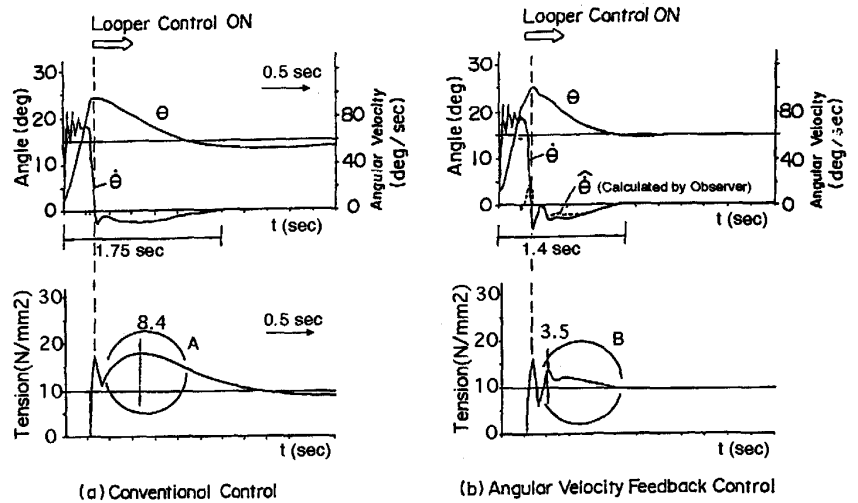


Fig.6 Simulation Results

4. 実機テスト結果

オブザーバを用いたルーパ角速度フィードバックを付加した制御方法の効果を確かめ、鹿島熱延仕上ミルNo.3ルーパ(F3、F4スタンド間)にて、実機テストを行った。

テスト方法としては、圧延材がスタンド間に通板され、ルーパが立ち上がった後、通板が安定した状態にて、上流側スタンド(F3)ロール周速度をステップ状に、約2%減速した場合のスタンド間張力およびルーパ角度変動を、従来制御方法の場合と新制御方法の場合について比較テストした(Fig.7)。

上流側スタンドロール周速度の減速により、スタンド間への流入するマスフローが減少し、圧延材に過大張力が作用し、ルーパは下降する。この外乱に対し、従来制御の場合、張力の目標値からの変動量は129 KNである。

これに対し新制御の場合、ルーパ角速度をオブザーバにて推定し、これに基づき速度修正量を演算し、これを従来の角度制御による速度修正量に加算することにより、応答性が改善され、張力の目標値からの変動が76 KNと約40%低減できている。また、張力およびルーパ角度の追従性も従来制御より速くなっている。

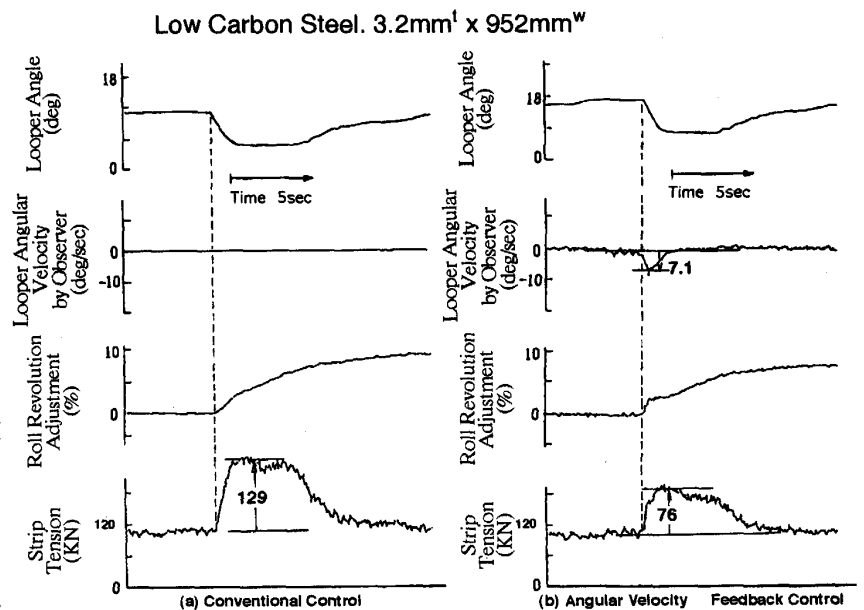


Fig.7 Experimental Results by Changing F3 Roll Speed

また、No.5ルーパー（F5、F6スタンド間）にて実機オンライン適用した例をFig.8に示す。

圧延中にオブザーバによる角速度フィードバック制御の入切を行い、スタンド間張力およびルーパー角度変動について、新制御方法と従来制御方法の比較を行った。

オブザーバによる角速度フィードバック制御を行わない場合（従来制御方式）は、角度で7deg、張力で29.4KNの変動がみられる。これに対して、角速度フィードバック補償を行った場合（新制御方式）は、上流側ミルモータの速度（F5スタンド）は、急速に修正され（従来制御は、緩やかな速度修正である）、これにより、角度変動3.5deg、張力変動14.7KNと、角度変動、張力変動とも約50%低減できている。

5. 結言

熱延鋼板の板厚・板幅精度に大きく影響を及ぼすスタンド間張力と圧延操業安定化のためのルーパー角度（スタンド間の圧延材のループ量）の変動を抑制するために、ルーパー制御系の応答改善を目的として、ルーパー角速度を推定するオブザーバを構成し、この角速度推定値を従来 of 角度制御にフィードバックする新しい制御方式を検討した。そして、本制御方式を実機にてテストすることにより、スタンド間張力変動を抑制し、目標値への追従性が共に、改善されることを確認した。

参考文献

- 1) 木村ほか：材料とプロセス、Vol.5 (1992) - 288

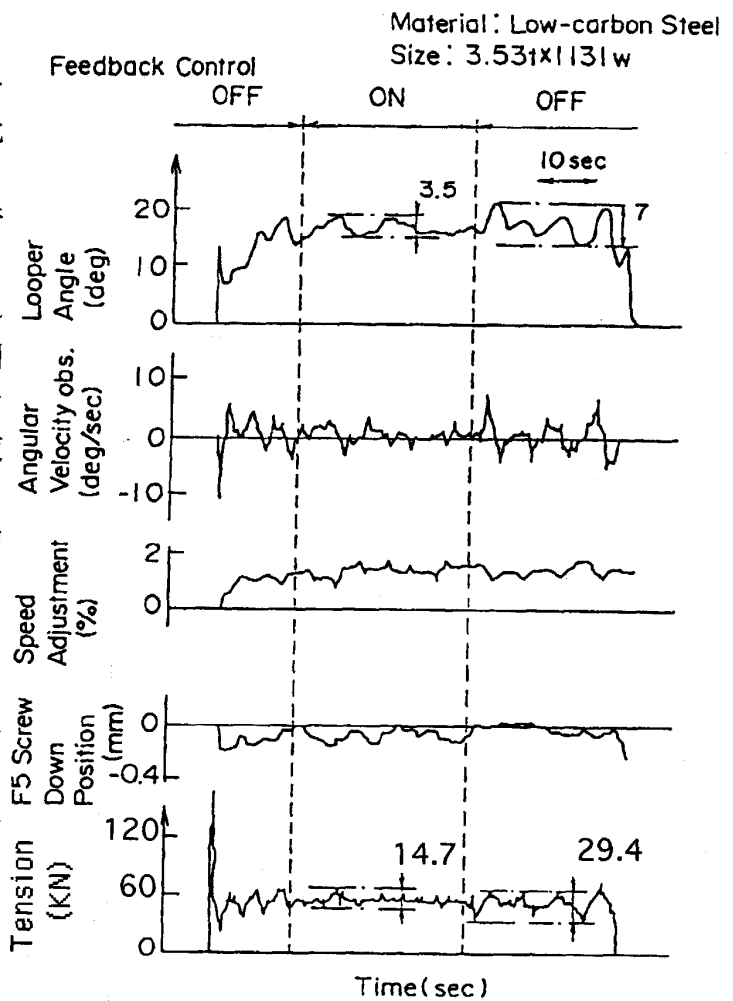


Fig.8 Application Results of Angular Velocity Feedback Control