論文

逐次推定法による圧延のロール偏心制御*

北村 章**・高橋哲也**・能勢和夫**
小西正躬**・菊地弘介***

Roll Eccentricity Control Based on Recursive Estimation Technique*

Akira KITAMURA**, Tetsuya TAKAHASHI**, Kazuo NOSE**,
Masami KONISHI** and Kousuke KIKUCHI***

This paper discusses a new roll eccentricity control method which has the following features ; the roll eccentricity is modeled by a sine wave equation for each roll and the eccentricity parameters, such as amplitude and initial phase angle are estimated using the recursive estimation technique. In this method, a square root filter is used to prevent the parameters from diverging. In addition, Kalman filter and exponentially weighted least square estimation are applied to decrease the estimation error due to the variance of observation noise and the gradual variation in force offset respectively. Furthermore, the convergence of parameters is automatically checked observing the trace of error covariance matrix. This control method is applied to the first stand of tandem cold mill as a roll eccentricity control system. The convergence of recursive computation is confirmed and both the force and thickness deviation due to roll eccentricity have been reduced to less than half.

1. はじめに

帯鋼の圧延を始めとする圧延機では、圧延ロールの軸受中心と胴部中心に幾何学的な偏心がある。また、圧延時の噛み止めによりロール冷却が不均一になることからロール表面の温度分布に熱的偏りが生じ、付加的な偏心となる。これらの偏心は、バックアップロールで、数 μ から数十 μ に達し、板厚変動の一因となっている。

ロール偏心はロール1回転ごとの周期的変動であるために高周波の板厚外乱をひき起こしており、圧延機出側に設置されたX線板厚計によるフィードバック制御では無駄時間のために追従できないばかりでなく、ゲージメータAGC^{1,2}に対しては誤制御の原因となっている。そこで、偏心の影響を除去するには専用の制御システム

が必要である。

ロール偏心の推定方法としては、バックアップロールの偏心を制御対象として、圧延中の荷重データに対してフーリエ変換を用いる方法^{3,4}、偏心による荷重変動を直接メモリし、ロール径差による上下ロールの位相差の変化を利用して各ロールの偏心波形を抽出する方法⁵、ロール回転周波数相当のバンドパスフィルタを用いる方法⁶など、各種の方法が提案されている。参考文献3)では、幾何学的偏心には十分対応できない、参考文献4)では、圧延中に発生する付加的な偏心に対応する機能がない。参考文献5)では、各ロールの偏心パラメータ(偏心量と初期位相角)を推定する方法ではないために、偏心以外の外乱を反映する可能性がある。参考文献6)では、フィルタ処理のために位相遅れが生じ、その補償が困難である、という問題がある。

そこで、筆者らは、ロール固有の幾何学的偏心に対しては多段ミルの全ロール偏心を同一モデルで表現し、同時に推定する機能として、ロール回転中の荷重データに逐次推定方法を適用し、偏心パラメータを時間領域で時々刻々推定するオフライン推定法を開発した。

また、圧延中に発生する付加的な偏心に対しては、偏心の最も大きいロールに着目して圧延中の荷重データに

* 原稿受付 1988. 9. 30

** ㈱神戸製鋼所 電子技術研究所 Electronics Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd. ; 5-5, Takatsukadai 1-chome, Nishiku, Kobe 673-02, JAPAN

*** ㈱神戸製鋼所 加古川製鉄所 Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd. ; 1, Kanazawacho, Kakogawa 675-01, JAPAN

Key Words : roll eccentricity control, recursive estimation, square root filter, Kalman filter, exponentially weighted least square estimation.

逐次推定法を適用して、偏心波形を時間領域で推定し、制御するオンライン推定法を開発した。また、これら二つの方法からなるロール偏心制御システムを構築した。

本稿では、開発したロール偏心の推定方法の詳細と、ロール偏心制御システムの実機適用結果について述べる。

2. ロール偏心制御の必要性

2.1 ロール偏心とは

ロール偏心として、ロール軸受け中心と胴部中心の間に偏心を考える。上下一対のロールで構成される圧延機の場合、偏心による板厚変動は、Fig. 1 に示すように、

$$\Delta h_{ee} = \frac{M_0}{M_0 + Q(1-\rho)} A(t) \cdot \sin(\omega_0 t + B(t)) \quad (1)$$

となる。

ただし、 $A(t) = F_1(e_T, e_B, \Delta\omega, t)$

$B(t) = F_2(e_T, e_B, \Delta\omega, t)$

$$\omega_0 = \frac{\omega_T + \omega_B}{2}, \quad \Delta\omega = \frac{\omega_T - \omega_B}{2}$$

$$v = R_T \omega_T = R_B \omega_B$$

ここで、

M_0 : ミル定数, Q : 圧延材の塑性係数

R_T : 上ロールの半径, R_B : 下ロールの半径

e_T : 上ロールの偏心量, e_B : 下ロールの偏心量

v : 圧延速度 ω_T : 上ロールの角速度

ρ : チューニング率 ω_B : 下ロールの角速度
($0 < \rho < 1$)

t : 時間

(1) 式は、ロール偏心による板厚 (荷重) 変動が上下ロールの径差のために振幅、位相ともに時々刻々変化してゆくことを示しており、偏心を制御するには、これらを考慮した方法が必要となる。

Fig. 1 Thickness deviation due to roll eccentricity

2.2 ロール偏心制御と AGC

Fig. 2.1 にゲージメータ AGC の概念図を示し Fig. 2.2 にその制御ブロックを示す。Fig. 2.2 より、ロール偏心 (Δe) と入側板厚偏差 (ΔH) のステップ外乱が加わった場合、最終値の定理を用いて定常偏差を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta h &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_e(s) \frac{\Delta e}{s} + \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_H(s) \frac{\Delta H}{s} \\ &= \frac{M_0}{M_0 + Q(1-\rho)} \Delta e + \frac{\partial P / \partial H}{M_0 / (1-\rho) + Q} \Delta H \end{aligned} \quad (2)$$

となる^{1,2}。

ここで、 $G_e(s)$ は、ロール偏心に関する伝達関数、 $G_H(s)$ は、入側板厚外乱に関する伝達関数を表す。

また、Fig. 2.3 では、 Δh とチューニング率 ρ の関係を示す。本図より、 ρ を大きくすると ΔH による出側

Fig. 2.1 Schematic diagram of gagemeter AGC

Fig. 2.2 Block diagram of gagemeter AGC

Fig. 2.3 Relationship between gagemeter AGC and roll eccentricity

Fig. 3 Schematic diagram of roll eccentricity control system

板厚偏差 Δh_H ((2) 式の右辺第 2 項) は小さくなるが, Δe による偏差 Δh_e ((2) 式の右辺第 1 項) が大きくなる。これは, 偏心がゲージメータ AGC に対して誤制御の原因となり, ロール偏心専用の制御システムが必要であることを示している。

3. 制御システム

ロール偏心制御システムの概略図を Fig. 3 に示す。圧延荷重 (P) とパルスジェネレータ (PLG) によって測定されたロール回転角 (θ) を用いて偏心波形を推定し, それに基づいて圧延中に偏心の影響を打ち消すようにロール間隙を補償する。波形の推定法としては, 以下に述べるオフライン推定法とオンライン推定法を組み合わせている。

3.1 オフライン推定法

本方法は, ロール固有の幾何学的な偏心に対応するもので, ロール替え時などにキスロール状態でロールを回転させ, その荷重変動から各ロールの偏心量と位相量を推定する。圧延時には, 推定量に基づいて予測制御にて, 圧下を補償する。

ここでは 4 段圧延機を想定し, オフライン推定法で用いるロール偏心推定用モデルについて述べる。モデルの概念を Fig. 4 に示す。いま, k 番目のサンプリングパルスに同期して得られた荷重 (P) から, ロックオン荷重 (噛み込み直後の荷重値) を差し引いた偏心による荷重変動 $\Delta P_{ef}(k)$ を各ロールの n_i 次高調波までの正弦波の噛み合わせと考えると次式となる。

$$\Delta P_{ef}(k) = M \cdot \sum_{i=1}^4 \sum_{m=1}^{n_i} e_{im} \cdot \sin(m\theta_i(k) + \phi_{im}) + P_0(k) + \Delta P_e(k) \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

Fig. 4 Roll eccentricity parameters for the "Off-line estimation method"

ここで, i : 各ロールの番号

e_{im} : 第 i ロールの m 次偏心振幅

ϕ_{im} : 第 i ロールの m 次偏心初期位相角

$\theta_i(k)$: 第 i ロールの回転角

n_i : 第 i ロールの高調波成分の次数

$P_0(k)$: 荷重オフセット量

$\Delta P_e(k)$: 観測雑音

M : 等価ミル定数 $\left(= \frac{M_0}{(1-\rho)} \right)$

k : サンプリングパルスのナンバー

つぎに, 観測値 $\theta_i(k)$ で構成されるベクトル $\mathbf{a}(k)$ と未知パラメータ $e, \phi, P_0(k)$ で構成されるベクトル $\mathbf{x}(k)$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(k) &= (\sin \theta_1(k), \cos \theta_1(k), \sin 2\theta_1(k), \cos 2\theta_1(k), \\ &\quad \dots, \sin(n1\theta_1(k)), \cos(n1\theta_1(k)), \sin \theta_2(k), \\ &\quad \cos \theta_2(k), \dots, \sin(n4\theta_4(k)), \cos(n4\theta_4(k)), 1) \\ \mathbf{x} &= (X_1, \dots, |X_4|X_0)^T \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i, 2ni})^T$$

$$\text{ただし, } X_{i, 2j-1} = M \cdot e_{ij} \cos \phi_{ij} \quad (4-2)$$

$$X_{i, 2j} = M \cdot e_{ij} \sin \phi_{ij}$$

$$X_0 = P_0(k) \quad (j = 1, 2, \dots, ni)$$

これらの関係より, (3) 式を展開し, ベクトル表現すると次式となる.

$$\Delta P_{ef}(k) = \mathbf{a}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \Delta P_e(k) \quad (5)$$

ここで, 未知ベクトル $\mathbf{x}$ が推定できると, 偏心パラメータ e, ϕ は (4-2) 式の関係から, 下式で求めることができる.

$$\begin{aligned} e_{ij} &= \sqrt{X_{i, 2j-1}^2 + X_{i, 2j}^2} / M \\ \phi_{ij} &= \tan^{-1} \frac{X_{i, 2j}}{X_{i, 2j-1}} \end{aligned} \quad (6)$$

また, 荷重オフセット量 P_0 は, X_0 として求まる.

これらの関係から, 逐次推定法を用いて偏心パラメータを推定することができる. このように, 本方法では, 各ロールの偏心パラメータを推定することによって, ロール径差によって生じる偏心波形の振幅と位相の変化に追従することができる.

3.2 オンライン推定法

本方法は, 圧延時の噛み止めによって発生する熱膨張に起因したロール偏心を推定する. 圧延中はロール回転数が高くなることから, 計算負荷の軽減を考慮して各ロールごとの偏心パラメータの推定は行わず, 偏心の影響が大きいロール, たとえば, 4段圧延機のバックアップロール (以下 BUR) の一回転分の圧延荷重変動データより偏心成分を上 BUR を基準にして推定し, それに基づいて次回転にて圧下を補償する. 以下に偏心成分推定用のモデルを示す.

k 番目のサンプリングパルスに同期して得られた偏心による荷重変動は, 次式で表わされる.

$$\begin{aligned} \Delta P_{en}(k) &= \frac{MQ}{M+Q} \sum_{m=1}^n e_{Bm} \cdot \sin(m\theta_B(k) + \phi_{Bm}) \\ &\quad + P_0(k) + \Delta P_e(k) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, e_{Bm} : BUR の m 次偏心振幅

ϕ_{Bm} : BUR の m 次偏心初期位相角

n : BUR の高周波成分の次数

オフライン推定法と同様に, (7) 式は次式に変形される.

$$\begin{aligned} \Delta P_{en}(k) &= \sum_{m=1}^n (X_{m1} \sin m\theta_B(k) + X_{m2} \cos m\theta_B(k)) \\ &\quad + P_0(k) + \Delta P_e(k) \\ &= \mathbf{a}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \Delta P_e(k) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(k) &= (\sin \theta_B(k), \cos \theta_B(k), \dots, \\ &\quad \sin(n\theta_B(k)), \cos(n\theta_B(k)), 1) \\ \mathbf{x} &= (X_1, \dots, |X_m|, \dots, |X_n|X_0)^T \\ X_m &= (X_{m1}, X_{m2})^T \\ X_{m1} &= \frac{MQ}{M+Q} e_{Bm} \cos \phi_{Bm} \\ X_{m2} &= \frac{MQ}{M+Q} e_{Bm} \sin \phi_{Bm} \\ X_0 &= P_0(k) \end{aligned} \quad (9)$$

よって, (8) 式に基づき, 逐次推定法によって偏心分 X_{m1}, X_{m2} および荷重オフセット量 X_0 を時々刻々推定できる. このように, 本方法では, ロール一回転ごとに偏心成分を推定することによって, ロール径差によって生じる偏心波形の振幅と位相の変化に対応している.

3.3 制御量の演算

オフライン推定法によって推定された偏心パラメータを $\hat{e}, \hat{\phi}$ とすると, その制御量は,

$$\Delta u_{of}(k) = \sum_{i=1}^4 \sum_{m=1}^{n_i} \hat{e}_{im} \cdot \sin(m\theta_i(k) + \hat{\phi}_{im} + \tau_{im}) \quad (10)$$

となる. ただし, τ_{im} は各ロールの回転速度で決定される圧下系の位相遅れ補償量である.

また, オンライン推定法によって推定された偏心成分を $\hat{X}_{m1}, \hat{X}_{m2}$ とすると, ロール一回転ごとの制御であることから, 積分型の制御となり, 制御量は,

$$\begin{aligned} \Delta u_{on}(k) &= \frac{M+Q}{MQ} \sum_r \{ \sum_{m=1}^n \hat{X}_{m1} \sin(m\theta_B(k) + \tau_{im}) \\ &\quad + \sum_{m=1}^n \hat{X}_{m2} \cos(m\theta_B(k) + \tau_{im}) \} \end{aligned} \quad (11)$$

となる. ただし, $\sum_r$ はロール一回転ごとに加算される積分を表わす³.

したがって, 圧延中のロール偏心制御量は,

$$\Delta u(k) = \alpha \cdot \Delta u_{of}(k) + \beta \cdot \Delta u_{on}(k) \quad (12)$$

となる. ここで, α, β は制御ゲインである.

4. 偏心パラメータの推定

本ロール偏心制御システムでは, 逐次推定法を用いて偏心パラメータを推定している. 以下では, 基本となる逐次型最小自乗推定, 平方根フィルタによる推定計算の安定化, 指数荷重型最小自乗法による推定精度の向上および, パラメータの収束判定方法などについて述べる.

4.1 基本アルゴリズム

(5) 式, あるいは (9) 式に基づいて逐次形パラメータ推定の基本アルゴリズムを設定すると, (13) 式となる⁷.

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= \hat{x}(k) + g(k+1) (\Delta P_e(k+1) \\ &\quad - a(k+1) \cdot \hat{x}(k)) \\ g(k+1) &= \frac{B(k) \cdot a^T(k+1)}{\lambda_1 + a(k+1)B(k)a^T(k+1)} \quad (13) \\ B(k+1) &= \{I - g(k+1) \cdot a(k+1)\} \cdot B(k)\end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned}\Delta P_e(k) &= \Delta P_{ef}: \text{オフライン推定法} \\ &\quad \Delta P_{en}: \text{オンライン推定法} \\ \hat{x}(k) &: x(k) \text{ の推定ベクトル} \\ B(k) &: \text{誤差共分散行列} \\ g(k) &: \text{推定誤差を修正するゲインベクトル}\end{aligned}$$

4 段圧延機の場合 $\hat{x}(k)$ は, オフライン推定法では, $2 \sum_{i=1}^4 ni+1$ 次元ベクトル, オンライン推定法では $2n+1$ 次元ベクトルとなる. また, λ_1 は, 最小自乗推定とカルマンフィルタとの互換性を保つ設定パラメータであり, $\lambda_1=1$ と設定すると最小自乗推定となり, λ_1 = 観測ノイズの分散と設定すると, カルマンフィルタのアルゴリズムと等価となる⁷.

4.2 平方根フィルタの応用

上記の基本アルゴリズムを用いて偏心パラメータの推定シミュレーションを行なったところ, 推定値が発散した. これは, 推定計算を単精度で行なっていたために桁落ちがおき, 収束の十分条件である誤差共分散行列 $B(k)$ の非負正定値性が満足されていないためであった. この問題を解決するには倍精度演算を用いる方法があるが, 計算負荷が過大となりオンライン制御に適さない. そこで, Potter⁸ の平方根フィルタを応用して誤差共分散行列の非負正定値性を保証した.

平方根フィルタの考え方は, 誤差共分散行列をその積が負定にならないことが保証されている平方根行列に分解し, 数値的に安定なアルゴリズムに置き換えることにある. 具体的な展開を以下に示す.

誤差共分散行列 $B(k)$ を, 平方根行列 $S(k)$ を用いて次式のように分解する.

$$B(k) = S(k) \cdot S^T(k) \quad (14)$$

(13) 式の関係より,

$$\begin{aligned}B(k+1) &= B(k) - g(k+1) \cdot a(k+1) \cdot B(k) \\ &= B(k) - \frac{B(k)a^T(k+1)a(k+1) \cdot B(k)}{\lambda_1 + a(k+1)B(k)a^T(k+1)} \\ &= S(k) \{I - Z(k+1) \cdot f(k+1)f^T(k+1)\} S^T(k) \quad (15)\end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}f(k+1) &= S^T(k) \cdot a^T(k+1) \\ Z(k+1) &= \frac{1}{\lambda_1 + a(k+1) \cdot B(k) \cdot a^T(k+1)} \quad (16) \\ &= \frac{1}{\lambda_1 + f^T(k+1) \cdot f(k+1)}\end{aligned}$$

ここで, $B(k+1)$ を平方根行列に分解し, その逐次解を求めることを考える. まず, (15) 式の $\{ \}$ の部分に正の未定定数 $\gamma(k+1)$ を導入し, 下式のように分解する.

$$\begin{aligned}I - Z(k+1)f(k+1)f^T(k+1) \\ = \{I - \gamma(k+1)Z(k+1)f(k+1)f^T(k+1)\} \\ \times \{I - \gamma(k+1)Z(k+1)f(k+1)f^T(k+1)\} \quad (17)\end{aligned}$$

本式が成立するように $\gamma(k+1)$ を定めると次式となる.

$$\gamma(k+1) = \frac{1}{1 + \sqrt{\lambda_1 Z(k+1)}} \quad (18)$$

この導出の詳細を, 付録 1 に示す.

したがって, (14), (15), (17), (18) 式より, $B(k+1)$ の平方根行列 $S(k+1)$ は下式により, 逐次的に計算できる.

$$\begin{aligned}S(k+1) \\ = S(k) - Z(k+1)\gamma(k+1)S(k)f(k+1)f^T(k+1) \quad (19)\end{aligned}$$

また, このとき, (16) 式より, ゲインベクトル $g(k+1)$ は,

$$g(k+1) = Z(k+1) \cdot S(k) \cdot f(k+1) \quad (20)$$

で表わされる.

よって, 基本アルゴリズム (13) 式のうち, 誤差共分散行列 B とゲインベクトル g を (16), (18), (19) および, (20) 式に置き換えて逐次的に解くことにより, 偏心パラメータを安定して計算できる.

4.3 指数荷重型最小自乗法の適用

Fig. 5 にロール偏心による荷重変動データ (実測) を示す. 本図からわかるように, 荷重オフセット量は一定ではなく, ゆるやかな変動を持つ場合がある. このデータ列に対して上記のアルゴリズムを用いると, 荷重オフセット量の推定精度が悪化する. これは, 荷重オフセット量が変動するにもかかわらず, 誤差共分散行列が収束してしまうためである. その結果, 推定パラメータが収束してしまうために荷重オフセット量の変動に追従できないばかりでなく, 偏心パラメータの推定精度の悪化を招いている. そこで, 指数荷重形最小自乗法^{9,10}を適用することによって, 推定精度を向上させた.

Fig. 5 Actual force deviation due to roll eccentricity with gradual offset

すなわち、指数荷重形最小自乗法では、評価指標として、

$$J = \sum_{m=1}^k \delta^{k-m} \cdot \{\Delta P_e(m) - a(m) \cdot \hat{x}(m)\}^2 \quad (21)$$

(ただし、 $\delta (< 1.0)$ は、重み係数)

を導入することにより、誤差共分散行列の急峻な減少を防止する。指数荷重形最小自乗法を逐次型に展開すると、基本アルゴリズムにおいて、ゲインベクトル g 、および共分散行列 B が次式となる¹⁰。

$$g(k+1) = \frac{B(k) \cdot a^T(k+1)}{\delta + a(k+1)B(k)a^T(k+1)} \quad (22)$$

$$B(k+1) = \frac{1}{\delta} \{I - g(k+1) \cdot a(k+1)\} \cdot B(k)$$

4.4 パラメータ推定アルゴリズムの汎用化

以上の検討結果から、本システムでは、最小自乗推定、カルマンフィルタ、および指数荷重形最小自乗法をそれぞれの特徴に応じて適用できるシステムとした。また、三つの方法を合理的に使い分けることを考慮し、推定アルゴリズムを汎用化した。すなわち、同一の推定式で偏心パラメータの推定ができるように、 λ_1 に加えて新たに λ_2, λ_3 を導入した¹¹。汎用化したアルゴリズムを以下に示し、 λ パラメータの設定方法を Table 1 に示す。また、本アルゴリズムの導出の詳細を付録 2 に示す。

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \hat{x}(k) \\ &\quad + g(k+1) \cdot \{\Delta P_e(k+1) - a(k) \cdot \hat{x}(k)\} \\ g(k+1) &= \frac{S(k) \cdot f(k+1)}{\lambda_1 + f^T(k+1) \cdot f(k+1)} \\ S(k+1) &= \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \left\{ S(k) - \frac{Z(k+1)}{1 + \sqrt{\lambda_2/\lambda_3} \cdot Z(k+1)} \right. \\ &\quad \left. \times S(k) \cdot f(k+1) f^T(k+1) \right\} \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} f(k+1) &= S^T(k) \cdot a^T(k+1) \\ Z(k+1) &= \frac{1}{\lambda_2/\lambda_3 + f^T(k+1) f(k+1)} \end{aligned} \quad (23)$$

Table 1 Classification of recursive estimation for roll eccentricity control

Setting parameters	Estimation algorithm
$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0$	Least square estimation
$\lambda_1 = \frac{1}{\sigma_e^2}$ $\lambda_2 = \lambda_3 = 1.0$	kalman filter (σ_e^2 : variance of ΔP_e)
$\lambda_1 = \lambda_2 = \delta$ $\lambda_3 = 1$	Exponentially weighted least square estimation ($0.995 < \delta < 0.999$)

4.5 収束性の判定

オフライン推定法では、キスロール回転状態で偏心パラメータを推定するので、その間、圧延を行なうことができない。そこで、推定時間を短縮するために、推定パラメータの収束性を自動的に判定し、推定を終了するシステムとした。収束性を判定する方法を以下に示す。

逐次推定法では、パラメータの収束と共に推定誤差の共分散が減少してゆく。共分散の減少は誤差共分散行列 $B(k)$ の固有値の減少によって定量化されるが、個々の固有値を求めるには固有値演算用のソフトウェアを用意する必要があり、逐次推定中に演算を行なうことは計算負荷が過大となり、現実的ではない。

いっぽう、 $B(k)$ が正定値行列であることから、すべての固有値が正である。したがって、全固有値の合計、すなわち、 $B(k)$ のトレースの逐次計算値を監視することによって、推定パラメータの収束性を判定することが可能である。

収束の判定条件を次式に示す。

$$\text{tr}(B(k)) < \Gamma \quad (24)$$

ただし、 Γ は、収束判定のためのしきい値であり、パラメータの推定精度維持と圧延停止時間の短縮化を勘案して、シミュレーションと実機テストの結果により、適切な値を決定した。

5. シミュレーションによる考察

冷延タンデムミルの No. 1 スタンドを想定し、ロー

Table 2 Simulation conditions for roll eccentricity control

Roll		Top Back-up roll	Bottom Back-up roll	Top Back roll	Bottom Back roll
Items					
Fig 6~12	Amplitude [μ]	5.0	3.0	1.0	2.0
	Phase angle [deg]	-90	90	45	45
Fig 13, 14	Amplitude [μ]	5.0	4.0	2.0	3.0
Roll diameter [mm]		1420.0	1380.0	522.0	544.0

ル偏心の推定および、制御シミュレーションなど、各種のシミュレーションを行なった。その方法を以下に述べる。

- ① 制御対象として、Fig. 2.2 のゲージメータ AGC を備えた 4 段圧延機を想定した。
- ② 偏心によるロール表面の変動として、バックアップロールとワークロールの偏心を正弦波で近似し（基本周波数成分のみ）、白色ノイズを付加した信号を㉔の位置に加える。想定した偏心量や初期位相角などの条件を Table 2 に示す。
- ③ オフライン推定法では、荷重変動や、角度データを用いて偏心量の推定を行なう。その結果を基にして (10) 式で制御量を計算し、㉔の位置に入力して制御シミュレーションを行なう。
- ④ オンライン推定法では、荷重変動や、角度データを用いて偏心波形の推定を行ないながら、(11) 式で計算された制御量を㉔の位置に入力して制御シミュレーションを行なう。

シミュレーション結果の説明と考察を次に示す。

- (1) シミュレーションにより偏心による荷重変動を計算した結果を Fig. 6 に示す（ただし、 $P_0 = 0.0$ ）。ワ

Fig. 6 Simulated force deviation due to roll eccentricity

ークロール偏心の影響は、ノイズ $\Delta P_e(k)$ によって明確には判別できない。

- (2) 本データに対してオフライン推定法を適用し、各ロールの偏心量 (e) と位相角 (ϕ) を推定した結果を Fig. 7 に示す。ともに推定開始から、約 8 秒で真値（図中の破線で示した設定値）に収束していることがわかる。また、誤差共分散行列のトレースの減少を Fig. 8 に示す。トレースの値は安定して減少するとともに、収束判定のしきい値を、この例では、 $\Gamma = 0.05$ とすれば良いことがわかる。推定された結果を用いて制御を行なったときの荷重変動を Fig. 9 に示す。制御中では、ほぼノイズ成分のみの変動であることがわかる。
- (3) 逐次型最小自乗推定とカルマンフィルタによるパラメータ推定と誤差共分散行列の収束性を比較するために、シミュレーションを行なった。その結果を Fig. 10.1, Fig. 10.2 に示す。ここでは、偏心による荷重変動と、BUR の偏心量の推定結果を示している。（ただし、推定結果の初期の部分は紙面の都合で一部を飽和させている。）また、収束判定基準 (Γ) を $\Gamma = 0.1$ と設定し、(24) 式の条件で推定を終了させている。Fig. 10.1 では、観測ノイズの大きい場合としてノイズの分散 (σ_v^2) を $25[\text{ton}^2]$ としている。

カルマンフィルタでは、パラメータ収束後の適切な時間で推定が終了しているのに対し、最小自乗推定では、パラメータが収束する前に推定が終了している。一方、Fig. 10.2 では、観測ノイズの小さい場合として $\sigma_v^2 = 0.06[\text{ton}^2]$ としており、カルマンフィルタでは、短時間で推定を終えているのに対し、最小自乗推定では、パラメータ収束後も推定を続けている。

一定変数を逐次型最小自乗推定で推定する場合、カルマンフィルタにおいてシステムノイズがなく、 $\lambda_1 = 1$ とした場合に等価である¹⁰。したがって、Fig. 10 の結果からもわかるように、推定パラメータの収束過程は、推定初期を除いて同等である。一方、誤差

Fig. 7.1 Estimated amplitude by the "Off-line estimation method"

Fig. 7.2 Estimated initial phase angle by the "Off-line estimation method"

Fig. 8 Decrease of trace of error covariance matrix " $B(k)$ "

共分散行列については、(13)式に示すように、観測ノイズの分散が、その収束に関与しており、その値が大きいほど収束が遅くなる。

本システムでは、誤差共分散行列(B)のトレース、すなわち、平均自乗誤差の収束で偏心パラメータの収束性を判定している。したがって、ノイズの分散値があらかじめ、計算あるいは観測してわかっている場合には、

カルマンフィルタとして機能させて、パラメータ推定の高精度化と推定時間の短縮を図る。

一方、ノイズの分散値がわからない場合には、逐次型最小自乗推定として機能させる。このとき、カルマンフィルタを適用した場合より推定時間がかかる場合があるが、推定精度を保証するために、 Γ を観測ノイズの分散が予想される最大の値をとる場合を想定して設定する。

(4) オンライン推定法によって偏心成分を推定した結果を Fig. 11 に示す。オンライン推定法では、BUR の1回転ごとに (9) 式に従って X_{m1} , X_{m2} を推定し、次回転では、その結果に基づいて制御量を計算する。さらに、その制御結果を制御残差と考え、推定と制御をくりかえす。したがって、制御量は各回転における X_{m1} , X_{m2} の収束値を (11) 式に代入し、その積分値に基づいて決定される。本図では、 X_{m1} , すなわち、(8) 式における sine 成分の推定結果とその積分結果の推移を示している。sine 成分は、各回転中に収束しており、その収束値の積分値が

安定して推移している。この積分値が1回転中で変化しないのは、積分を上 BUR の1回転ごと(基準パルスごと)に行なっているためである。また、積分値がゆるやかに変化するのは、ロール系差によって偏心の振幅や位相が変化するのに対応している。また、オンライン推定法による制御結果を Fig. 12 に示す。BUR の偏心のみを制御するモデルであるために、制御中でもワークロール (WR) 偏心の影響が残り、Fig. 9 の

Fig. 9 Decrease of thickness deviation due to roll eccentricity by the "Off-line estimation method"

Fig. 10.1 Comparison between Kalman filter and least square estimation ($\sigma_e^2 = 25$ (ton²)) Fig. 10.2 Comparison between Kalman filter and least square estimation ($\sigma_e^2 = 0.06$ ton²)

オフライン推定法の結果に比べて荷重変動が大きくなっていることがわかる。

- (5) オフライン推定法による荷重オフセット量の推定結果を Fig. 13 に示す。本図では、指数荷重型最小自乗法を適用した場合 ($\delta = 0.997$) と最小自乗推定の場合

Fig. 11 Estimated "sine" component and its integrated value in the "On-line estimation method"

を比較して示している。また、本シミュレーションでは、荷重オフセット量を、

$$P_{of}(t) = 34 \times \sin\left(\frac{2\pi}{34}t + \pi\right) \quad [\text{ton}] \quad (25)$$

としている。(Fig. 13 の破線で示す。)

指数荷重型最小自乗法を用いる方が、オフセット量をより精度良く推定していることがわかる。また、本方法による偏心パラメータのうち、偏心量の推定結果を最小自乗推定の場合と比較して Fig. 14 に示す。本方法を適用した方が、振動が小さく、より速く推定できることがわかる。

Fig. 12 Decrease of thickness deviation due to roll eccentricity by the "On-line estimation method"

Fig. 13 Estimated force offset by exponentially weighted least square estimation compared with least square estimation (square root filter)

本方法は重み付き最小自乗推定と等価であり、(21)式において k を現在時刻とすると、 δ^{k-m} は過去になるほど小さくなる重みであり、過去値の推定値への寄与を小さくする働きがある。この重み付けの効果で、ゆっくりと変動するパラメータの推定にも適用できる¹⁰。本システムでは、荷重オフセット量に変化するロール熱上げ時など、荷重の平均値がゆっくり変動する場合に適用する。

6. 実機適用結果

冷延タンデムミル No.1 スタンドに適用した結果を以下に述べる。制御システムの概略を Fig. 15 に示す。ロール偏心制御は PLC (プログラマブルロジックコントローラ) で実現されており、材料塑性係数などのパラメータは、圧延コイルごとに上位のプロセスコンピュータから伝送される。また、本タンデムミルでは、

Fig. 14.1 Estimated amplitude by least square estimation

Fig. 14.2 Estimated amplitude by exponentially weighted least square estimation

No.2 スタンド出側, No.5 スタンド出側に X 線板厚計が設置されており、偏心制御の結果は、No.1 スタンドの圧延荷重変動とこれらの板厚計データによって確認される。また、以下に示す各実験時の諸条件を、Table 3 に示す。

(1) オフライン推定法の実機適用結果を Fig. 16, Fig. 17

Fig. 15 Outline of tandem cold mill and its computer control system

Table 3 Conditions for rolleccentricity contrn actual rolling

Figure number	Fig. 16, 17	Fig. 18	Fig. 20	
Estimation method	off-line	on-line	off-line	on-line
Algorithm	kalman filter	Least square estimation	E. W. L. S. E.	Least square estimation
Parameters	$\lambda_1 = 2.0$ $\lambda_2 = 1.0$ $\lambda_3 = 0.5$ $r = 0.05$	$\lambda_1 = 1.0$ $\lambda_2 = 1.0$ $\lambda_3 = 1.0$	$\lambda_1 = .997$ $\lambda_2 = .997$ $\lambda_3 = 1.0$ $r = .01$	$\lambda_1 = 1.0$ $\lambda_2 = 1.0$ $\lambda_3 = 1.0$
Dimension	$n1=n2=2$,	$n3=n4=1$ (off-line) $=2$ (on-line)		
Back-up roll diameter [mm]	TBR: 1490.0 BBR: 1497.2	TBR: 1521.4 BBR: 1520.1	TBR: 1480.9 BBR: 1477.9

Fig. 16 Estimated result of eccentricity amplitude by the "Off-line estimation method" for actual rolling

Fig. 17 Applied result of the "Off-line estimation method" for actual rolling (Roll contact mode)

に示す。Fig.16では、推定時の荷重変動と上バックアップロールの偏心量の推定結果を示している。パラメータが安定して推移し、収束している。ここでは、パラメータ推定にカルマンフィルタを用いた。ノイズの分散については、あらかじめ推定計算し、その結果から $\lambda_1 = 2.0$ と設定した。 Γ については、小さい値をとる

ほうが高精度の推定となるが、推定に時間がかかる。そこで、シミュレーションの結果($\Gamma = 0.1$)を参考として推定精度を重視し、 $\Gamma = 0.05$ と設定した。この結果、適切な時間で推定が判定できていることがわかる。また、この推定結果に基づき、キスロールにおいて制御した結果をFig.17に示す。偏心による荷重変

Fig. 18 Applied result of the "On-line estimation method" for actual rolling (Roll contact mode)

動 16 Ton が 6 Ton 以下に減少し、偏心の影響が十分に除去されている。

- (2) キスロールにおいてオンライン推定法によって制御を行なった結果を Fig. 18 に示す。偏心による荷重変動 36 Ton が 16 Ton 以下に減少し、バックアップロールの偏心の影響が除去されている。

- (3) Fig. 19 に実圧延時に、No.1 スタンドの荷重データを周波数解析した結果を示す。Fig. 19 (a) には、無制御時の周波数分析結果を示し、Fig. 19 (b) にはオフライン推定法による制御時の結果を示している。

BUR と WR の偏心による荷重変動が 1/2 以下に制御されている。また、Fig. 19 (c) にはオンライン推定法による制御時の周波数分析結果を示す。WR の偏心の影響は除去されないが、BUR については偏心による荷重変動が約 35 % 減少している。Fig. 19 (b) と (c) を比較すると、オフライン推定法による制御の方が BUR 偏心の制御効果がまざっている。これは、オフライン推定法の方が、ロール径差による偏心振幅と位相の変化を遅れなくとらえるためと考えられる。

- (4) 実圧延時に、オフライン、およびオンライン推定法を組み合わせる制御を行なった結果を、Fig. 20 に示す。オフライン推定法では、荷重オフセット量の変動があったため、指数荷重型最小自乗法を用いた。 $\lambda_1(\lambda_2)$ については、事前の推定テストにより、荷重オフセット量の収束性がよい値として、0.997 を選んだ。 Γ については、本方法が観測ノイズの影響を考慮していないことから推定精度を重視し、 $\Gamma = 0.01$ と選んだ。荷重変動の減少

(a) Non-control

(b) Off-line estimation method

(c) On-line estimation method

Fig. 19 Frequency analysis of eccentricity control

Fig. 20 Applied result of roll eccentricity control system for actual rolling (the "Off-line" & "On-line" estimation method)

と共に、偏心による板厚変動が減少し、最終製品板厚(No.5 スタンド出側)で、約 $\pm 6\mu$ が約 $\pm 3\mu$ 以下に制御されている。噛み止め後、オフライン推定法のみでは偏心振幅が増大するのに対して、2方法を併用するとはほぼ同じ制御結果を得る。これは、噛み止め時にロールの熱的偏りによる付加的な偏心が発生し、オフライン推定法のみでは対応できないのに対し、2方法を併用することにより、ロール1回転中にパラメータ推定ができることが最大の特徴であるオンライン推定法の制御効果が表われたものと考えられる。

7. おわりに

逐次推定法に基づくロール偏心の推定アルゴリズムを開発し、偏心制御システムを構築した。また、本システムを冷延実機に適用し、その効果を確認した。以下にその特徴と効果をまとめて示す。

本制御システムにおける逐次推定アルゴリズムの特徴は、

- (1) 数値演算上の誤差に起因する偏心パラメータ値の分散を防止し、収束性を保証するために平方根フィルタを適用している。
- (2) 観測雑音ノイズの分散があらかじめわかる場合には、カルマンフィルタの適用により、推定精度の保証と推定時間の短縮を図っている。
- (3) ロールの熱膨張などに起因して荷重オフセット量や偏心パラメータがゆるやかに変化する場合には、指数荷重形最小自乗法として機能させ、推定精度を向上させる。

制御システムとしての特徴は、

- (1) ロール固有の幾何学的な偏心と圧延中に発生する付加的な偏心に対応するため、オフライン推定法とオンライン推定法を組み合わせたシステムとしている。
- (2) オフライン推定法では、推定を効率的に実施するために、誤差共分散行列の固有値の減少にともない、偏心パラメータの収束を自動的に判定する。

最後に、冷延タンデムミルに適用した結果、ロール偏心に起因する荷重変動および板厚変動が半減以下に減少することが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 高橋, 美板: Gaugemeter AGC の進歩: 塑性と加工, 16巻, 168号, pp. 25~31 (1975)
- 2) 北村, 能勢, 小西, 中田: 油圧下 AGC の最適ゲイン設計; システム制御情報学会誌, 2巻, 5号, pp. 147~154 (1989)
- 3) 今井, 鈴木: 圧延におけるロールの偏心影響除去制御装置 (FARE) の実用化; 石川島播磨技法, 13巻, 2号, pp. 189~198 (1973)

- 4) 大井, 近藤: ロール偏心波形の同定; 第29回システムと制御研究発表講演会予行集, pp. 21~22 (1985)
- 5) 橋本, 阿部, 葉山, 花浦: 圧延機ロール偏心制御装置 (MARECS) の開発と実用化; 三菱重工技法, 18巻, 2号, pp. 248~253 (1981)
- 6) B. Schmit: Aufbau der Regelkreise Einer Modernen Zahlregerung; Stahl und Eisen, Vol. 97, No. 9, pp. 450~455 (1977)
- 7) A. Sage & I. Melsa: Estimation Theory with Applications to Communications and Control, McGraw Hill (1971)
- 8) P. Kaminski, A. Bryson & F. Schmidt: Discrete Square Root Filtering: A Survey of Current Techniques; IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-16, pp. 727~736 (1971)
- 9) T. Söderström, L. Ljung & I. Gustavsson: A Theoretical Analysis of Recursive Identification Methods; Automatica, Vol. 14, pp. 231~244 (1978)
- 10) 中溝: 線形離散システムの同定手法; システムと制御, 25巻, 8号, pp. 476~480 (1981)
- 11) I. D. Landau, 富塚: 適応制御システムの理論と実際, オーム社, p. 58 (1981)

付録 1

(18) 式の導出

(17) 式の右辺を展開すると、

$$I - 2\gamma(k+1)Z(k+1) \cdot f(k+1)f^T(k+1) + \gamma(k+1)^2 \cdot Z(k+1)^2 \cdot f(k+1)f^T(k+1)f(k+1)f^T(k+1)$$

を得る。ここで、(16) 式の関係を用いて $f^T(k+1)f(k+1)$ を消去して整理すると下式となる。

$$I - \left\{ 2\gamma(k+1)Z(k+1) - \gamma(k+1)^2 \cdot Z(k+1)^2 \cdot \left(\frac{1}{Z(k+1)} - \lambda_1 \right) \right\} \cdot f(k+1)f^T(k+1) \quad (\text{付 1.1})$$

(17) 式より、本式の $\{ \}$ の部分が $Z(k+1)$ に等しくなるように $\gamma(k+1)$ を定める。すなわち、 $\{ \} = Z(k+1)$ として整理すると、

$$(1 - \lambda_1 Z(k+1))\gamma(k+1)^2 - 2\gamma(k+1) + 1 = 0 \quad (\text{付 1.2})$$

となり、本式を解放して $\gamma(k+1)$ を求めると (18) 式となる。

付録 2

(23) 式の導出

- (1) パラメータ修正式は基本となる (13) 式の第1式である。

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + g(k+1) \cdot \{ \Delta P_e(k+1) - a(k+1) \cdot \hat{x}(k) \}$$

- (2) ゲインベクトルは、(13) 式に (16) 式の第1式を代入し、 λ_1 を σ_e^2 (観測ノイズの分散) と設定すれば、カルマンフィルタに、また、 δ と設定すれば、指数荷重型最小自乗法となる。

$$g(k+1) = \frac{S(k) \cdot f(k+1)}{\lambda_1 + f^T(k+1) \cdot f(k+1)} \quad (\text{付 2.1})$$

- (3) 誤差共分散行列の平方根行列 $S(k+1)$ については、カルマンフィルタの場合、(19) 式に (18) 式を代入して、 $\lambda_1 = \sigma_e^2$ と設定した式となる。

$$S(k+1) = S(k) - \frac{Z(k+1)}{1 + \sqrt{\lambda_1} \cdot Z(k+1)} \times S(k) \cdot f(k+1) f^T(k+1) \quad (\text{付 2.2})$$

ただし、

$$Z(k+1) = \frac{1}{\lambda_1 + f^T(k+1) f(k+1)} \quad (\text{付 2.3})$$

一方、指数荷重型最小自乗法の場合、

$$S(k+1) = \frac{1}{\sqrt{\delta}} \left\{ S(k) - \frac{Z(k+1)}{1 + \sqrt{\delta} \cdot Z(k+1)} \times S(k) \cdot f(k+1) f^T(k+1) \right\} \quad (\text{付 2.4})$$

ただし、

$$Z(k+1) = \frac{1}{\delta + f^T(k+1) f(k+1)} \quad (\text{付 2.5})$$

である。そこで、 λ_2, λ_3 を用いて、

$$S(k+1) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \left\{ S(k) - \frac{Z(k+1)}{1 + \sqrt{\lambda_2/\lambda_3} \cdot Z(k+1)} \times S(k) \cdot f(k+1) f^T(k+1) \right\} \quad (\text{付 2.6})$$

ただし、

$$Z(k+1) = \frac{1}{\lambda_2/\lambda_3 + f^T(k+1) f(k+1)} \quad (\text{付 2.7})$$

とし、 λ パラメータを Table. 1 のように設定すれば、(付 2.2), (付 2.3) 式 (カルマンフィルタ) と (付 2.4), (付 2.5) 式 (指数荷重型最小自乗法) を使い分けることができる。また、 λ パラメータをすべて 1 とすると、最小自乗推定となることは明らかである。