

ロバスト制御による冷延ミルの高精度板厚制御

西田 吉晴*・北村 章*・山本 昌生*²・樽本 慎一*²

Thickness Control Based on Robust Control Method for Reverse Cold Rolling Mill

Yoshiharu NISHIDA, Akira KITAMURA, Syosei YAMAMOTO and Shinichi TARUMOTO

Synopsis : This paper describes a new robust method for thickness control of reverse cold rolling mills. Recently, high accuracy in thickness is required exceedingly. However, there are fluctuation of parameters, nonlinearity, lag-times in the inputs, lag-times in the outputs and so on, in the nonstationary state under accelerating and decelerating conditions. They make accuracy in thickness worse, and it is necessary to design control systems that have robustness for them. In this new approach, mutual interaction between thickness control and tension control is decoupled. Padé approximation is employed for the lag-times in the inputs, and the disturbance observer is applied to compensate the fluctuation and the nonlinearity. The lag-times in the outputs are compensated by a predictive control method. Simulation studies show that the new approach improves the response of the thickness control system and achieves the robustness for them, and that the delivery thickness deviation is obviously reduced. This robust control system has been applied to the actual rolling mill, and the strip length without tolerance is remarkably shortened.

Key words : reverse cold rolling mill ; modeling error ; lag-time ; thickness control ; robust control ; disturbance observer ; padé approximation ; predictive control ; decoupling.

1. はじめに

近年、冷延鋼板については、自動車鋼板用を中心として高い板厚精度が要求されている。それにともない、各種のAGC (Automatic Gauge Control)^{1)~3)}が開発されて、その適用によって定常部 (高速圧延時) の板厚精度は大きく改善されている。しかし圧延速度が変化する加速減速時など非定常状態において、従来の制御手法では圧延速度に依存する入出力上のむだ時間や非線形要素を含めた圧延状態の変化 (塑性係数やミル定数などのパラメータや圧延速度の変動) に対応することができない。非定常状態における圧延状態の変動要因として以下のものが考えられる。

- ① 圧延速度の変化による摩擦係数の変化
- ② 入側板厚の変動
- ③ ミル定数や塑性係数の推定誤差
- ④ 圧延速度の変化にともなうむだ時間の変化
- ⑤ 入側や出側の張力変動
- ⑥ 摩耗や熱膨張などによるロールの偏心
- ⑦ 計測ノイズの影響

以上に示された非定常状態の要因を正確にモデリングすることは、定常状態を仮定した圧延理論では困難であり、線形系を仮定した従来の制御手法では板厚精度の向上は難しい。

圧延状態の変動要因のうち、星野ら⁴⁾は入側板厚変動やミル定数と塑性係数の変化やロール偏心などを考慮した制御手法を提案している。しかしこの板厚制御システムでは、むだ時間の影響などの変動要因を考慮していない。

そこで本論文ではそれら変動要因の影響を取り除き、むだ時間の影響を考慮した板厚制御法を提案する。また本手法を可逆式圧延機に適用した結果について考察する。

2. 制御対象

本論文では可逆式圧延機を制御対象とし、非定常状態における板厚制御技術について述べる。可逆式圧延機は圧延速度の加減速を繰り返す必要があるため、非定常な状態が多く存在する。そのため、非定常状態における板厚精度の向上は、オフゲージ長さの減少に寄与することから、可逆式圧延機において最も重要な課題となっている。可逆式圧延機は、Fig. 1 に示すように入側と出側の板厚と張力および荷重を計測できる。しかし、X線板厚計の設置位置と油圧圧下装置間を圧延材が移動することから、圧延機直下の板厚とその計測値との間に圧延速度に依存したむだ時間が生じる。本可逆式圧延機の圧延特性や計測系のブロック図をFig. 2 に示す。本ブロック図は平衡点近傍で線形化した数式モデルに基づいている。図中の記号の意味を以下に示す。

平成4年7月8日受付 平成4年12月8日受理 (Received on July 8, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992)

* (株)神戸製鋼所電子技術研究所 (Electronics Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku Kobe 651-22)

* 2 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

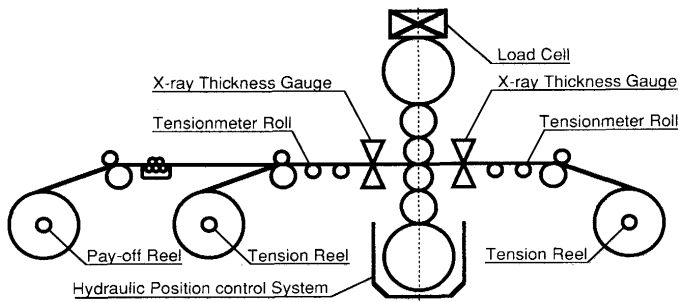


Fig. 1. Schematic diagram of the reverse cold rolling mill.

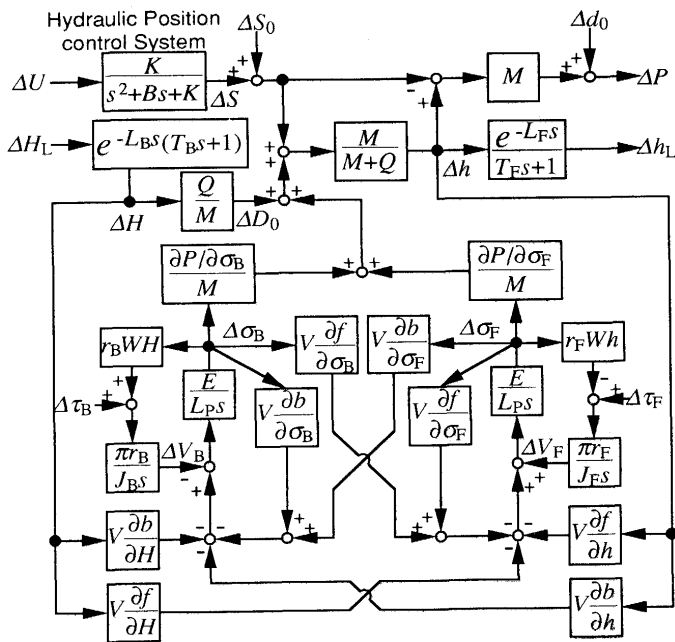


Fig. 2. Block diagram of the reverse cold rolling mill.

- b : 後進率
 d_0 [N] : P に加わる外乱
 E [N/m²] : ヤング率
 f : 先進率
 H, H_L [m] : 入側板厚, 入側板厚の計測値
 h, h_L [m] : 出側板厚, 出側板厚の計測値
 J_B, J_F [kgm²] : 入側, 出側のリール系慣性モーメント
 L_B, L_F [s] : 入側, 出側の移送に起因するむだ時間
 L_p [m] : ミルとリール間の距離
 M [N/m] : ミル定数
 P [N] : 圧延荷重
 Q [N/m] : 塑性係数
 r_B, r_F [m] : 入側, 出側コイルの半径
 S, S_0 [m] : ロールギャップ, ロール偏心
 T_B, T_F [s] : 入側, 出側X線板厚計の時定数
 U [m] : ロールギャップの指令値
 V [m/s] : ロール周速度
 V_B, V_F [m/s] : 入側, 出側の材料速度
 W [m] : 板幅

σ_B, σ_F [N/m²] : 入側, 出側張力
 τ_B, τ_F [Nm] : 入側, 出側リールモータのトルク
 Δh や ΔP や $\Delta\sigma_B$ は出側板厚変動や荷重変動や入側張力変動であり, Δ は平衡点からの偏差を表している。また油圧圧下系の動特性を二次遅れ系で記述し, X線板厚系を一次遅れで表している。また簡単のため以下の記号を導入する。

- B_B, B_F : $E_L V \times (\partial_b / \partial \sigma_B), E_L V \times (\partial_b / \partial \sigma_F)$
 B_h [N/m³] : $E_L V \times (\partial b / \partial H)$
 B_h [N/m³] : $(E_L VM / (M + Q)) \times (\partial b / \partial h)$
 E_L : E / L_p
 F_B, F_F : $E_L V \times (\partial f / \partial \sigma_B), E_L V \times (\partial f / \partial \sigma_F)$
 F_h [N/m³] : $E_L V \times (\partial f / \partial H)$
 F_h [N/m³] : $(E_L VM / (M + Q)) \times (\partial f / \partial h)$
 N : $M / (M + Q)$
 N_B [m²] : $(\partial P / \partial \sigma_B) / M$
 N_F [m²] : $(\partial P / \partial \sigma_F) / M$

Fig. 2 において簡単のため $\Delta d_0, \Delta S_0$ を省略し, ΔU と ΔH を入力とし, Δh と ΔP と ΔS を出力とする制御対象の状態方程式は次式で示される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta S \\ \dot{\Delta S} \\ \Delta \sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta \sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K-B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -B_h & 0 & -B_B-N_B B_h & -E_L-B_F-N_F B_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi r_B^2 WH}{J_B} & 0 & 0 & 0 \\ -F_h & 0 & -F_B-N_B F_h & 0 & -F_F-N_F F_h & E_L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\pi r_F^2 WH}{J_F} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta S \\ \dot{\Delta S} \\ \Delta \sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta \sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -B_h - \frac{Q}{M} B_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi r_B^2 WH}{J_B} & 0 \\ 0 & -F_h - \frac{Q}{M} F_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_F^2 WH}{J_F} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta H \\ \Delta \tau_B \\ \Delta \tau_F \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1a)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta P \\ \Delta S \\ \Delta \sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta \sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & 0 & NN_B & 0 & NN_F & 0 \\ -NQ & 0 & NMN_B & 0 & NMN_F & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta S \\ \dot{\Delta S} \\ \Delta \sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta \sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1-N & 0 & 0 \\ 0 & NQ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta H \\ \Delta \tau_B \\ \Delta \tau_F \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1b)$$

以下では上記のシステムに基づいて議論を行うが、実際の圧延機系にはFig. 2 に示したむだ時間 L_B と L_F が存在していることに注意されたい。本論文ではむだ時間 L_B と L_F を考慮した上で、本システムを制御対象として扱う。

3. ロバスト制御手法

3・1 ロバスト制御手法の概要

本制御手法は圧延状態の変動要因①～⑦やむだ時間に対してロバストな（さまざまな誤差要因の影響を受けずに高い制御精度が得られる）制御手法であり、本制御系の概要はFig. 3 に示される。Fig. 3 の $\Delta\hat{D}$, $\Delta\hat{d}$, $\Delta\hat{h}$ は ΔD , Δd , Δh の推定値を示しており、本論文において $\hat{\cdot}$ は各パラメータの推定値を表すものとする。また本ロバスト制御系は以下の手順によって設計される。

〈Step 1〉 張力系に対する圧下系の影響の非干渉化し、非干渉化された圧下系を新たに制御対象とすることによって制御系の構成を単純化している。

〈Step 2〉 入側板厚のむだ時間 L_B をPadé近似⁵⁾し、圧下系の状態量の中に組み込む。

〈Step 3〉 変動要因①～⑦を外乱(ΔD , Δd)として扱い、〈Step 1, 2〉で与える圧下系に対して外乱推定オブザーバ⁵⁾を適用し、変動要因による圧延状態の変化やむだ時間 L_B に対してロバスト性を与える。

〈Step 4〉 予測制御⁷⁾を用いて出側板厚のむだ時間 L_F の影響を除去する。

ここで、外乱推定オブザーバ⁵⁾は制御対象のモデルに基づき、実際の制御対象の出力とモデルの出力を比較しながら、制御対象に負荷されている外乱を推定し、補償する制御手法のことである。また、Padé近似⁵⁾はむだ時間の近似手法であり、予測制御⁷⁾はむだ時間を含む制御系の未来値を予測し補償する手法である。

3・2 張力系に対する圧下系の影響の非干渉化

圧下系と張力系の非干渉制御について検討する。まず、(1)式のシステムを張力系と圧下系に分割する。分割された張力系の状態方程式表現を以下に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta\sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_B - N_B B_h - E_L - F_F - N_F B_h & 0 \\ \frac{\pi r_B^2 W H}{J_B} & 0 & 0 & 0 \\ -F_B - N_B F_h & 0 & -F_F - N_F F_h & E_L \\ 0 & 0 & \frac{\pi r_F^2 W h}{J_F} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\sigma_B \\ \Delta V_B \\ \Delta\sigma_F \\ \Delta V_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -B_h - B_h - \frac{Q}{M} B_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi r_B}{J_B} & 0 \\ -F_h - F_h - \frac{Q}{M} F_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\pi r_F}{J_F} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta H \\ \Delta\tau_B \\ \Delta\tau_F \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$[\Delta\sigma_B \quad \Delta V_B \quad \Delta\sigma_F \quad \Delta V_F]^T = [\Delta\sigma_B \quad \Delta V_B \quad \Delta\sigma_F \quad \Delta V_F]^T \quad (2b)$$

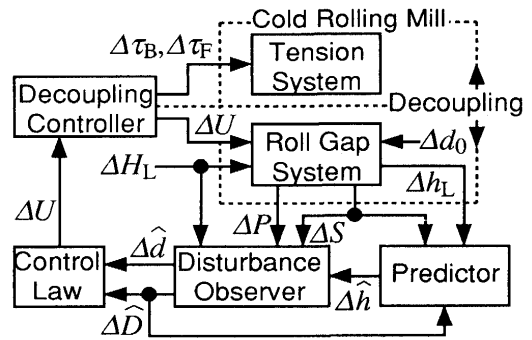


Fig. 3. Block diagram of robust control system.

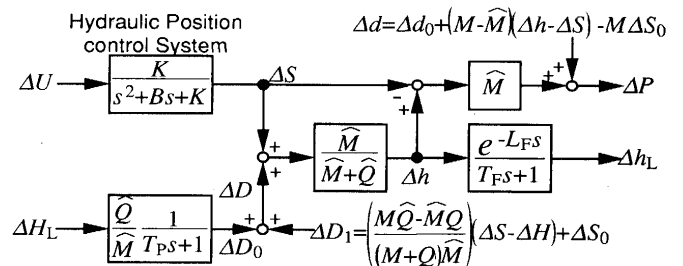


Fig. 4. Block diagram of decoupled roll gap system.

この張力系は圧下系による干渉(ΔS による $\Delta\sigma_B$, $\Delta\sigma_F$ に対する干渉)が存在する。(2)式から明かなように、この干渉を補償するためには ΔV_B , ΔV_F を ΔV_{BD} ($= -B_h \Delta S / E_L$), ΔV_{FD} ($= F_h \Delta S / E_L$)に一致させる必要がある。いま ΔV_{BD} , ΔV_{FD} を ΔV_B , ΔV_F の目標値とし、フィードフォワードとPI制御を施せば $\Delta\tau_B$, $\Delta\tau_F$ は

$$\Delta\tau_B = (J_B s / \pi r_B + G_{BP} + G_{BI} / s) \Delta V_{BD} - (G_{BP} + G_{BI} / s) \Delta V_B \quad (3)$$

$$\Delta\tau_F = (J_F s / \pi r_F + G_{FP} + G_{FI} / s) \Delta V_{FD} - (G_{FP} + G_{FI} / s) \Delta V_F \quad (4)$$

となり、 ΔV_B , ΔV_F は ΔV_{BD} , ΔV_{FD} に一致する。ただし G_{BP} , G_{BI} , G_{FP} , G_{FI} は制御ゲインである。以上の非干渉制御によって圧下系と張力系をそれぞれ単独に制御することができ。以下では非干渉化された圧下系を対象としたロバストコントローラを構成する。

3・3 Padé近似によるむだ時間の状態量への組み込み

むだ時間を考慮せずにコントローラを設計すると制御ゲインを大きくすることができず、むだ時間や外乱の存在によって制御精度が劣化する。そこで、本手法ではむだ時間 L_B をPadé近似⁵⁾によって圧下系の状態量に組み込み、むだ時間の影響を考慮し、むだ時間 L_B に対しロバストなコントローラを設計する。むだ時間 L_B をPadé近似し圧下系に組み込んだシステムをFig. 4 に示す（ここでは一次のPadé近似を用い、 T_p は近似式の時定数である）。このシステムでは、真値 M , Q (未知パラメータ)を用いるかわりに推定値 $\hat{M}$, $\hat{Q}$ (既知パラメータ)を用い、圧延状態の変化(各パラメータ

タの真値と推定値のずれや入側板厚変動などを外乱 ΔD ($=\Delta D_0+\Delta D_1$)と Δd で表し、むだ時間 L_B を状態量の中に組み込んでいる。この結果、むだ時間 L_B や圧延状態の変動の影響を容易に考慮することができる。Fig. 4 のシステムの状態方程式は次式で示される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta D_0 \\ \Delta S \\ \Delta \dot{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -K-B & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta D_0 \\ \Delta S \\ \Delta \dot{S} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\hat{Q}}{\hat{M} T_P} \\ 0 & 0 \\ K & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta H_L \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta P \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{M}}{\hat{M}+\hat{Q}} & \frac{\hat{M}}{\hat{M}+\hat{Q}} & 0 \\ \frac{\hat{M}^2}{\hat{M}+\hat{Q}} - \frac{\hat{M}\hat{Q}}{\hat{M}+\hat{Q}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta D_0 \\ \Delta S \\ \Delta \dot{S} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\hat{M}}{\hat{M}+\hat{Q}} & 0 \\ \frac{\hat{M}^2}{\hat{M}+\hat{Q}} & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta d \end{bmatrix} \quad (5b)$$

次に、(5)式の圧下系を制御対象として制御系設計を行う。

(5)式では非干渉制御により $\Delta\sigma_B$ と $\Delta\sigma_F$ が零に制御されていることを前提としている。しかし、張力によるAGCなどの使用によって σ_B と σ_F を変化させる場合、以下に示すように(5)式において新たな変数 $\Delta\bar{h}$ と $\Delta\bar{P}$ を Δh と ΔP の代わりに用いれば、 $\Delta\sigma_B$ と $\Delta\sigma_F$ が零のときと同様に議論できる。

$$\Delta\bar{h} = \Delta h - (E_B \Delta\sigma_B + E_F \Delta\sigma_F) / (M + Q) \quad (6)$$

$$\Delta\bar{P} = \Delta h - M (E_B \Delta\sigma_B + E_F \Delta\sigma_F) / (M + Q) \quad (7)$$

(5)式では Δh に対するむだ時間 L_F を考慮せず、 Δh が観測されるものとしている。これはFig. 4 のシステムに対しむだ時間 L_F をPadé近似し状態量に含めると、次節で与える外乱推定オブザーバの動特性から Δh の情報が除去されてしまうからである。 Δh の情報は制御系を構成する上で重要であり、これを防ぐために本手法では Δh を出力とする(5)式の圧下系に対して外乱推定オブザーバを適用し、 Δh のむだ時間 L_F に対しては3・5節において予測制御を適用することによって対処する。

3・4 外乱推定オブザーバの設計

(5)式のシステムでは圧延状態の変動を以下の外乱 ΔD ($=\Delta D_0+\Delta D_1$)と Δd で記述し、加算的な外乱として扱っている。

$$\Delta D = \frac{(\hat{M} + \hat{Q})}{(M + Q) \hat{M}} \left(\frac{M\hat{Q} - \hat{M}Q}{\hat{M} + \hat{Q}} \Delta S + Q \Delta H + M \Delta S_0 \right) \quad (8)$$

$$\Delta d = (M - \hat{M})(\Delta h - \Delta S) + \Delta d_0 - M \Delta S_0 \quad (9)$$

ここで、 ΔD は M と Q の変動や ΔH やロール偏心などによる外乱を示し、 Δd は M の推定誤差、摩擦係数の変動、荷重の測定誤差、あるいはロール偏心 ΔS_0 などによる外乱を表している。ここで ΔD_1 と Δd をオフセット(一定値)外乱として考え、 ΔD と Δd を推定し、その推定値 $\Delta\hat{D}$ と $\Delta\hat{d}$ に基づいて制御する制御手法について記述する。

(5)式において ΔD_1 と Δd をオフセット外乱として状態量に含め、外乱推定オブザーバ⁹⁾を構成すれば

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & 0 & 0 \\ -\omega_1 & -\omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{Q}{MT_B} \\ -\frac{(M+Q)\omega_1}{M} & 0 & -\omega_1 & 0 \\ -M\omega_2 & \omega_2 & M\omega_2 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta P \\ \Delta S \\ \Delta H_L \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{D} \\ \Delta\hat{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} \quad (10b)$$

となる。ただし、 ω_1 、 ω_2 はオブザーバの収束ゲインである。(10)式の外乱推定オブザーバはオブザーバの存在条件⁹⁾を満足することから、得られる $\Delta\hat{D}$ 、 $\Delta\hat{d}$ は真値 ΔD 、 Δd に収束することが保証される。その収束速度は ω_1 、 ω_2 によって決定される。

次に、得られた推定値 $\Delta\hat{D}$ 、 $\Delta\hat{d}$ を用いた制御則について検討する。 Δh を零とするギャップ操作指令値 ΔU の与え方は、Fig. 4 から明らかなように ΔD が既知であれば、

$$\Delta U = -\Delta D \quad (11)$$

とすればよい。あるいは Δd が既知であれば、ゲージメータAGCの手法を拡張し、

$$\Delta U = -(\Delta P - \Delta d) / \hat{M} \quad (12)$$

とすればよい。(11)式の制御則を実施すれば、Fig. 4 から Δh が零になることは明らかである。ここでは(12)式の制御則について詳しく検討しよう。通常、ゲージメータAGCは $\hat{M}$ にパラメータ推定誤差がある場合、システムが不安定になることがある。しかし、(12)式を用いれば不安定になるこ

とはない。この理由は、(9)式より(12)式が

$$\Delta U = (\Delta S - \Delta h) / M - \Delta S_0 \quad (13)$$

と変形され、(13)式より本制御則を用いた時の ΔS は油圧圧下系の動特性を無視すれば

$$\Delta S = -Q\Delta H / M + \Delta S_0 \quad (14)$$

となり、不安定化することなく Δh を零にすることができるからである。したがって、(11)式と(12)式をもとに、本法におけるギャップ指令値 ΔU_0 を求めると次式となる。

$$\Delta U_0 = \alpha_0 ((\beta_0 - 1) (\Delta P - \Delta \hat{d}) / \hat{M} - \beta_0 \Delta \hat{D}) \quad (15)$$

ただし、 α_0 はチューニング率、 β_0 ($0 \leq \beta_0 \leq 1$)は設計パラメータであり、 α_0 を1にすれば Δh は零にできる。

3.5 予測制御によるむだ時間 L_F の補償

(10)式の外乱推定オブザーバはむだ時間 L_F を無視し、入力として Δh を用いているため、オブザーバの収束ゲインなどを大きくすることができず、本ロバスト制御の性能を十分に発揮することができない。本節では予測制御⁹⁾を適用して Δh を推定することにより、本ロバストコントローラに対するむだ時間 L_F の影響を除去する。まず、出側X線板厚計の動特性 $G_{SF}(s)$ を一次遅れ系で近似する。

$$G_{SF}(s) = \frac{1}{T_F s + 1} \quad (16)$$

このとき予測制御によって Δh の推定値 $\Delta \hat{h}$ は

$$\frac{d}{dt} \Delta \hat{h} = \frac{1}{T_F} \left\{ \frac{\hat{M}}{\hat{M} + \hat{Q}} (\Delta \hat{D} + \Delta S) + \Omega_2 (\Delta \hat{h} - \Delta h) \right\} + \Omega_1 (\Delta \hat{h} - \Delta h) \quad (17a)$$

$$\Delta \hat{h} = \Delta h_L + \frac{\hat{M}}{\hat{M} + \hat{Q}} \frac{1 - e^{-L_F s}}{T_F s + 1} (\Delta \hat{D} + \Delta S) \quad (17b)$$

で与えられ、むだ時間を含まない Δh の推定値 $\Delta \hat{h}$ を得ることができる。この Δh の推定式(17)において(17b)式の部分がむだ時間を補償している箇所である。

(17)式による推定値 $\Delta \hat{h}$ を(10)式の外乱推定オブザーバの Δh の代わりに用いれば、むだ時間 L_F を考えることなく外乱 ΔD と Δd を推定することができる。

以上のように、むだ時間 L_B をPadé近似で考慮し、むだ時間 L_F を予測制御で補償し、圧延状態の変化を外乱推定オブザーバで補償することにより、ロバスト制御系が構成される。

4. シミュレーションによる考察

4.1 シミュレーションによる非干渉化の検討

圧下系と張力系の干渉の存在をシミュレーションによっ

て確認し、非干渉制御の有効性を検証する。いま、 ΔS から $\Delta \sigma_B$ への伝達関数を $G_B(s)$ 、 ΔS から $\Delta \sigma_F$ への伝達関数を $G_F(s)$ とし、ギャップ指令 ΔU の代わりに $\Delta u (= M\Delta U / (M + Q))$ を用いれば、(1)式のシステムにおいて Δu から Δh への伝達関数は

$$\Delta h = \frac{K}{s^2 + B_S + K} \Delta u + \Delta h_B + \Delta h_F \quad (18)$$

$$\Delta h_B = \frac{K G_B(s)}{s^2 + B_S + K} \Delta u \quad (19)$$

$$\Delta h_F = \frac{K G_F(s)}{s^2 + B_S + K} \Delta u \quad (20)$$

となる。ここで Δh_B 、 Δh_F はそれぞれ圧下系と張力系の干渉に起因する出側板厚の変動分であり、 Δu を入力とする伝達関数は(19)、(20)式で表される。(19)式で示される Δu から Δh_B への伝達関数(入側張力系と圧下系の干渉)のゲイン線図をFig. 5に示す。本図より Δu の Δh_B への影響は最大-20 dB(ギャップ操作によって Δh を1変化させたときに Δh_B は0.1変化する)となり、圧下系と張力系の間に干渉が存在する。そこで前章で述べた非干渉化を行う。通常、非定常状態におけるパラメータ推定値には30%程度の誤差が存在する。(3)、(4)式の非干渉制御を行った場合、30%のパラメータ推定誤差が存在しても(19)、(20)式の伝達関数のゲイン(張力系と圧下系の干渉の大きさが抑えられ、Fig. 5に示すように干渉の影響は-35 dB(ギャップ操作によって Δh を1変化させたときに Δh_B 、 Δh_F は0.02変化する)以下まで低減できる。

一方、非線形要素や30%以上のパラメータ推定誤差などが存在する場合、非干渉制御だけでは干渉の影響を-35 dBまでしか低減できない。そこで、3.3~5節で述べた圧下系に対する外乱推定オブザーバと同様に張力系に対しても外乱推定オブザーバを適用することにより、Fig. 5に示すように干渉の影響を-40 dB以下に低減することができ、十分に非干渉化することができる。

以上より(3)、(4)式およびオブザーバを用いた非干渉

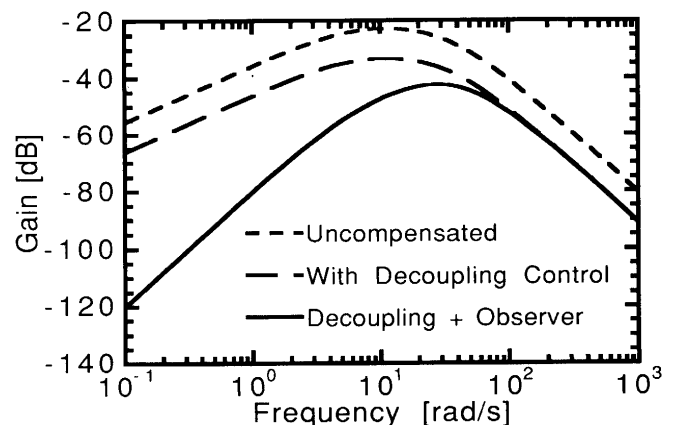


Fig. 5. Gain diagram of transfer function (Equation (19)).

制御は有効であることがわかる。

4・2 従来法との比較

本手法の有効性を検証するために、ゲージメータAGCや絶対値AGC、あるいはむだ時間などを考慮していない従来の外乱推定オブザーバのみを用いた場合と本ロバスト制御を用いた場合について、シミュレーションによって比較する。

まず、むだ時間を $L_F=0.05\text{s}$ とし、出側板厚変動 Δh が $1\mu\text{m}$ 変化する場合のステップ応答をFig. 6に示す。本図より、絶対値AGCはむだ時間を考慮していないことからゲインをあ

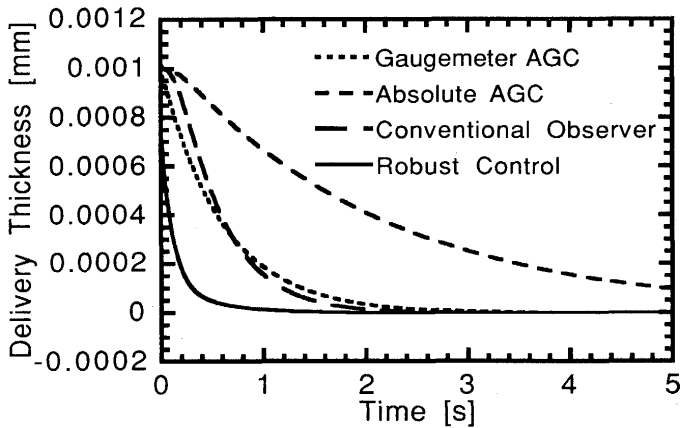


Fig. 6. Step response of robust control system compared with the conventional ones.

げることができず、5s後でも Δh を $0.1\mu\text{m}$ までしか制御できない。またゲージメータAGCはむだ時間の影響を受けないが、 ΔS を正帰還しているため、油圧圧下系の応答が遅くなり、2s後にしか Δh を零にできない。さらに従来の外乱推定オブザーバのみを用いた制御系ではむだ時間 L_F の影響を受けて収束ゲインをあげられないため、ゲージメータAGCと同等の応答しか得られていない。これに対し本ロバストコントローラは0.4s後には Δh がほぼ零に制御でき、高速な応答が得られている。これはPadé近似や予測制御によってむだ時間の影響が減少し、外乱推定オブザーバによって速やかに ΔH の変動を推定し、補償しているためである。次にゲイン線図によって効果を検討する。

まず、むだ時間の影響について考察する。Fig. 7 (a) (α_G :ゲージメータAGCのチューニング率)ではむだ時間を $L_F=0.05\text{s}$ としたときの ΔH から Δh へのゲイン線図を示している。本図より、各AGCや従来の外乱推定オブザーバを適用したものより本手法の方が ΔH の影響を受けにくく、 Δh を小さくできることがわかる。またFig. 7 (b)では $L_F=1\text{s}$ とした時のゲイン線図をしめす。本図より、むだ時間が1s程度ある時はむだ時間の影響を受けないゲージメータAGCは有効であり、絶対値AGCや従来のオブザーバに比べよい制御性能を示している。このゲージメータAGCに比べ本ロバストコントローラはより優れた制御性能を発揮しており、むだ時間に対して十分にロバストであることがわかる。さらに、

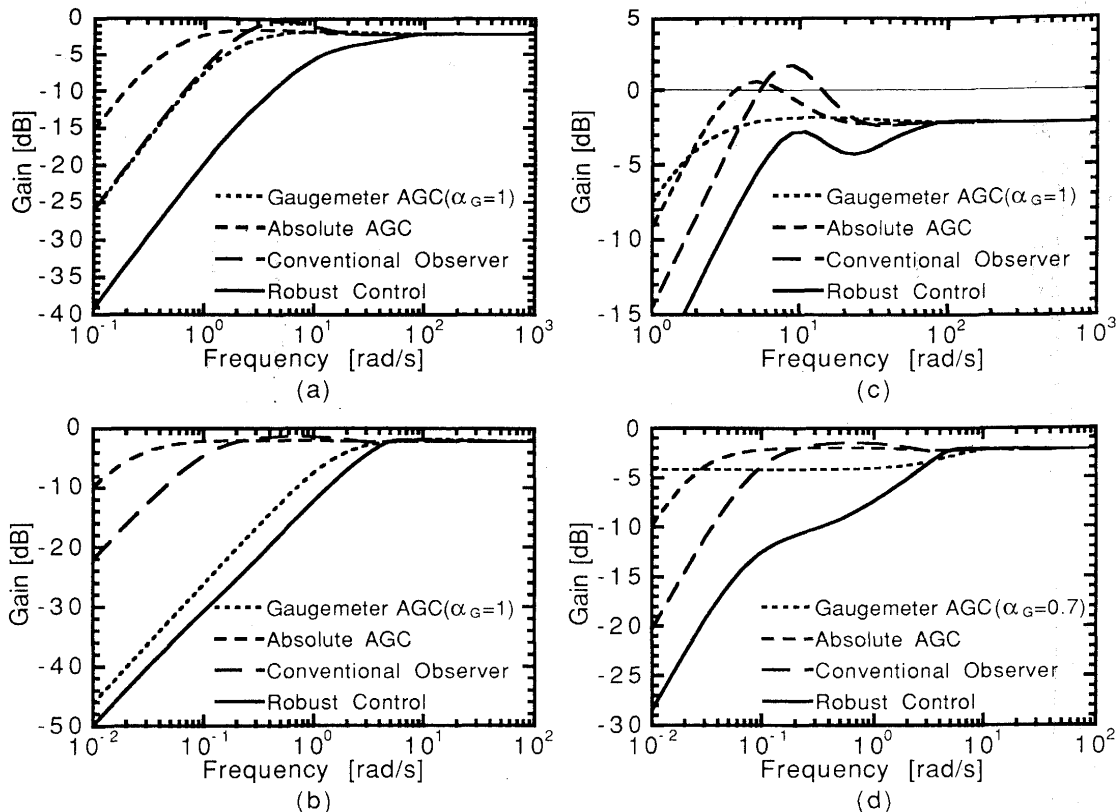


Fig. 7. Gain diagram of robust control system compared with the conventional ones (a) $L_h=0.05\text{s}$ (b) $L_h=1\text{s}$ (c) $L_h=0.05\text{s}$, Control gains are five times as large as suitable ones (d) $L_h=1\text{s}$, Estimation errors of M and Q are 30% of the whole.

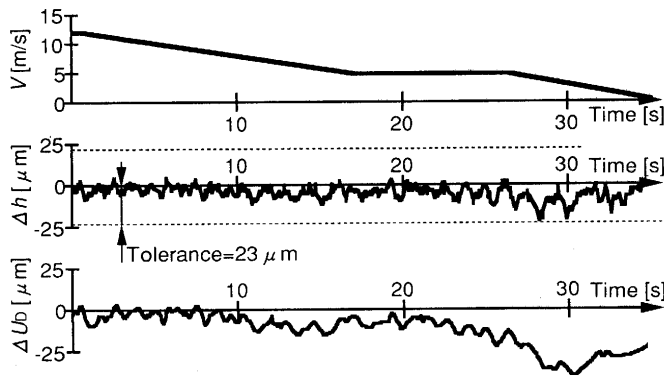


Fig. 8. Experimental results of robust control method.

Fig. 7 (c) は各AGCやコントローラの制御ゲインを適正な制御ゲインの5倍にした時のゲイン線図である。本図より、各AGCや従来の外乱推定オブザーバによる制御では周波数10rad/s付近でゲインが0 dBを越えており、 ΔH の振幅より Δh の振幅が大きく、各AGCや従来の外乱推定オブザーバが悪影響を及ぼしている。これに対して本ロバストコントローラは制御ゲインを5倍に上げて ΔH から Δh へのゲインは0 dB以下で、むだ時間やゲインの変化に対してロバストである。またFig. 7 (d) は $L_F = 1$ sとし、 M と Q に30%のパラメータ変動があった場合のゲイン線図である。本図に示されるように本ロバストコントローラは他のAGCや従来の外乱推定オブザーバに比べて Δh の変動が小さく、非定常状態におけるパラメータ変動に対してもロバストであることがわかる。

以上から本ロバスト制御手法はむだ時間やパラメータ変動や入側板厚変動などに対しロバストであり、非定常な圧延状態においても有効であることがわかる。

5. 実機による検証

本ロバスト制御手法をFig. 1に示す可逆式圧延機に適用したときの結果をFig. 8に示す。実機では本ロバストコントローラと従来のゲージメータAGCや絶対値AGC、あるいは加減速補償などが併用して用いられるため、本ロバストコントローラのチューニング率 α_0 を0.5~0.7の範囲で与えている。本図は減速時の実機適用結果であり、各パラメータは $h = 0.45$ mm, $W = 992$ mm, $M = 4 \times 10^9$ N/m, $Q = 15 \times 10^9$ N/m, $\alpha_0 = 0.7$ である。Fig. 8より、本ロバストコントローラによって Δh に対して適切な制御出力 ΔU_b が与えられており、 ΔU_b によって Δh の変動が抑えられ、減速が終了するまで Δh は許容偏差内に制御されている。

Table 1に本ロバスト制御適用時と従来のAGCのみを用いたときのオフゲージ長さの比率の比較を示す。板厚の許容偏差は元板厚が薄いほど小さいため、従来のAGCのみで

Table 1. Effect of robust control method on strip length without tolerance ($\pm 0.05 \times h$).

Delivery thickness h [mm]	$h \leq 0.2$	$0.2 < h \leq 0.3$	$0.3 < h \leq 0.4$	$0.4 < h \leq 0.5$
Number of sampling datas	11	24	9	4
$\frac{LRC}{LCC} \times 100$ [%]	45.0	50.4	51.6	82.1

LRC: Strip length without tolerance controlled by the robust controller

LCC: Strip length without tolerance controlled by the conventional controller

は薄板ほどオフゲージ長さは長くなっている。これに対し、Table 1から本手法の適用によってオフゲージ長さが改善され、特に要求精度のきびしい極薄材($h \leq 0.2$ mm)においてはオフゲージ長さの改善率が著しい。また板厚が厚い時のオフゲージ長さの改善率は低い、これは許容偏差が大きいため従来のAGCだけでも許容偏差内に板厚を維持することが可能であるためである。以上の結果から本ロバスト制御手法によって圧延状態の変化が大きな加減速時にはオフゲージ長さが短縮されており、高い板厚精度が達成されていることがわかる。すなわち、本制御手法が圧延状態の変化やむだ時間に対しロバストで、非常に有効な板厚制御手法であることが確認できる。

6. まとめ

圧下系と張力系の非干渉化を行い、Padé近似や予測制御を応用し、圧延状態の変動を外乱として外乱推定オブザーバを適用することによって、むだ時間やパラメータ変動あるいは入側板厚変動などが大きな非定常状態においても高精度の板厚制御が可能なロバスト制御手法を提案した。シミュレーションによって従来手法と本手法との比較検討を行い、むだ時間やパラメータ変動などに対して本手法がロバストであり、有効であることを検証した。また、可逆式圧延機に実機適用し、圧延状態が大きく変化する加減速時においてもオフゲージ長さを短縮できることを確認した。

文 献

- 1) 北村 章, 能勢和夫, 小西正躬, 中田隆正: システム制御情報学会論文誌, 2 (1989), p.147
- 2) 近藤勝也, 美坂佳助: 計測と制御, 28 (1989), p.445
- 3) 北村 章, 高橋哲也, 能勢和夫, 小西正躬, 菊池弘介: システム制御情報学会論文誌, 2 (1989), p.287
- 4) 星野郁弥, 木村英紀: 計測と制御, 27 (1988), p.325
- 5) S.Komada and K.Ohnishi: IEEE Trans. Industrial Electronics, 37 (1990), p.6
- 6) 自動制御便覧 (計測自動制御学会編), (1968), p.196
- 7) 渡辺慶二, 伊藤正美: システムと制御, 28 (1984), p.269
- 8) G.Gopinath: Bell System Tech. J., 50 (1971), p.1063