<ショート・ペーパー>

熱延仕上げミルにおけるルーパ高さのロバスト制御†

藤崎 泰正*・浅田 秀樹**・北村 章*

Robust Control of Looper Angle for Hot Strip Mills

Yasumasa FUJISAKI*, Hideki ASADA** and Akira KITAMURA*

We propose a robust controller for a hot strip mill looper system with the change in rolling conditions. The transfer function of the looper system was derived using a statistical method and its variation characteristics were shown. We designed a robust controller based on an internal model control structure. This controller was applied to the hot strip mill looper system and its robust stability was confirmed.

Key Words: robust control, hot strip mill, looper, internal model control

1. はじめに

熱延仕上げミルでは、各圧延スタンド間のストリップ張力は成品の精度に大きな影響を及ぼすため、スタンド間に設置されているルーパの高さを安定に制御することは重要な課題である¹⁾。従来ルーパ高さの制御は、設定値からの偏差に応じて上流側圧延機のミルモータ回転速度を PI 制御することにより行われていた (Fig. 1)。しかし実操業では、ストリップの材料特性

Fig. 1 Hot strip mill looper system

† 第34回システム制御情報学会研究発表講演会で発表 (1990・5)

* (株)神戸製鋼所電子技術研究所 神戸市西区高塚台 1-5-5

** (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 加古川市金沢町 1

* Electronics Reserch Laboratory, Kobe Steel, Ltd., Kobe

** Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd., Kakogawa

(Received October 15, 1990)

(Revised February 27, 1991)

やストリップとロール間の滑りなどが圧延中に変化し、特定鋼種圧延時にルーパがハンチングする場合がある。

本論文では、ルーパ高さ系にパラメータ変動があってもハンチングが起こらない、ロバストな制御方法を提案する。まずルーパ高さ系のモデリング方法を示し、そのモデルと変動特性を求める。つぎにその変動特性に対応したロバスト制御系の設計手順を与え、その効果をシミュレーションで確認する。最後に実機テストによりロバスト制御の効果を明らかにする。

2. 制御対象のモデリング

ルーパ高さ系のモデルには、ストリップの材料特性やストリップと圧延ロール間の滑りなど、正確に把握しきれない変動するパラメータが含まれている。そこで、ルーパ高さ系の入出力応答よりモデリングを行った。

まず、ミルモータ速度修正量にステップ入力を加えてからルーパ角が変化するまでの時間より、制御対象の入出力間むだ時間を調べた。以後のモデリングでは、このむだ時間 (約 245 ms) を補償している。

つぎに、制御対象のモデルを求めるため、1) ルーパ角目標値、2) ミルモータ速度修正量にステップ入力を加え、ルーパ角の応答を計測し、1) より定常ゲインを、2) より ARMA モデルとその周波数特性を求めた。

ここでルーパ高さ系は PI 制御されていることに注意されたい。1) の実験では目標値を変更するため、テスト信号を大きくできず、制御対象の動特性は十分に把握できない。逆に、2) の実験では目標値を変化させないためテスト信号を大きくできるが、定常ゲインを正確に求められない。このため 2 種類の実験を行った。

ルーパ高さ系を AR 項 2 次、MA 項 1 次と仮定し、モデリングした結果を Fig. 2 に示す。これより、ルーパ高さ系の動特性は 2 次遅れ系で記述できることがわかる。そこで、ルーパ高さ系のむだ時間項以外の動

Fig. 2 Response of actual system and model

特性 $P(s)$ を

$$P(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

とすれば、ループ高き系のモデルは $P(s)e^{-Ls}$ なる「2 次遅れ+むだ時間」系となる。ただし、 L はむだ時間、 k は定常ゲイン、 ω_n は共振周波数、 ζ は減衰係数である。なお ω_n や ζ は、(1) 式を後向き矩形公式で離散化した式と ARMA モデルの係数との対応より計算できる。

ここで 2 次遅れ系でモデル化できた理由について考察する。まずミルモータの時定数は約 0.1 s であり、その応答はループ力学系より十分速い。またストリップ伸びの時定数はヤング率などより 10 s 程度と考えられ、その応答はループ力学系に比べて十分遅い。よってこれらの動特性がモデリングの際現れず、その結果ループ力学系の動特性（2 次）だけが現れたと解釈できる。

また、モデルの変動特性を明らかにするために、種々の圧延条件でテストを繰り返した。モデリング結果のゲイン線図例を Fig. 3 に示す。これよりループ高き系の減衰係数は、特に大きく変化することがわかる。

Fig. 3 Gain diagram of loop system

3. コントローラ的设计

コントローラには、むだ時間を含む制御対象でも適用可能な IMC (Internal Model Control) 構造²⁾を用いた (Fig. 4)。ただし $C(s)$ はコントローラの伝達関数、 $F(s)$ はフィルタの伝達関数である。 $C(s)$ を以下に

Fig. 4 Internal model control structure

示す。

$$C(s) = \frac{F(s)}{P(s)(1 - F(s)e^{-Ls})} \quad (2)$$

$P(s)$ は不安定零点をもたない安定な伝達関数なので、 $F(s)$ を安定かつ $F(s)/P(s)$ がプロパーとなるよう選べば、

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{1 + P(s)e^{-Ls}C(s)} \frac{-P(s)e^{-Ls}}{1 + P(s)e^{-Ls}C(s)} \right] \\ & \frac{C(s)}{1 + P(s)e^{-Ls}C(s)} \frac{1}{1 + P(s)e^{-Ls}C(s)} \\ & = \begin{bmatrix} 1 - F(s)e^{-Ls} & \{F(s)e^{-Ls} - 1\}P(s)e^{-Ls} \\ F(s)/P(s) & 1 - F(s)e^{-Ls} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

は安定かつプロパーとなり、制御系は安定である³⁾。

さて、IMC 構造において、設計パラメータは $F(s)$ である。ループがハンチングしないコントローラを設計するためには、この $F(s)$ を制御系がロバスト安定となるように決めればよい。ところで、安定余裕の指標となる相補感度関数⁴⁾ $T(s)$ を計算すれば、

$$T(s) = \frac{P(s)e^{-Ls}C(s)}{1 + P(s)e^{-Ls}C(s)} = F(s)e^{-Ls} \quad (4)$$

となる。ロバスト安定性を確保するには、制御対象の変動の大きい周波数域で $T(s)$ のゲイン、すなわち $F(s)$ のゲインを小さくすればよい。そこで、 $F(s)$ にはローパス特性をもつ 4 次のバターワースフィルタを採用した。そして、その遮断周波数を 3 rad/s とした。この値はループ高き系の共振周波数 (Fig. 3 参照) より小さいため、制御対象の減衰係数の変化による共振周波数付近での大きなゲイン変動の影響を受けにくい制御系が構成できる。また、 $F(s)$ の定常ゲインは 1 とした。このことにより、制御系は積分特性をもち、ループ高さについて定常偏差は残らない。

以上に示した手順でロバストコントローラを設計して、安定化効果をシミュレーションにより確かめた。比較対象には、PI コントローラを選んだ。その結果を Fig. 5 に示す。このように、制御対象の減衰係数

Fig. 5 Simulation results of robust control

が小さくなった場合、PI 制御ではルーパーが不安定振動するが、ロバスト制御では安定となることがわかる。

4. 実機テスト結果

実機では、ロバスト制御は DDC のプログラムとして実現される。そこで前述の制御則を、後向き矩形公式により制御周期 35 ms で離散化した。さらに数式処理を用いて、離散化したコントローラの伝達関数を、積分器とそれ以外の積の形でプログラム化した。このように表現すれば、コントローラの係数を求める際に演算誤差が生じても制御系は積分特性を失わない。以上の結果をもとに、実際の 7 スタンド熱延仕上げミル第 4 ルーパーにおいて、ロバスト制御と PI 制御を比較検討した。

まず、ルーパー角のステップ応答を Fig. 6 に示す。このように、ロバスト制御を用いても PI 制御と同等の応答特性を実現できる。つぎに、各コイルの定常部

Fig. 6 Application results of robust control

Fig. 7 Effect of robust control

でのルーパー角偏差平均値をコイル内ルーパー角偏差の代表値とし、この値の統計的性質を調べた。その度数分布を Fig. 7 に示す。ロバスト制御のほうが PI 制御よりも平均値が改善されており、その散らばりも小さいことがわかる。このことは、ロバスト制御により、ルーパー高さの安定性を保ったまま、低周波域でのゲインを上げることができ、その結果定常特性が向上したと解釈できる。また、ロバスト制御では制御則が一定であるのに対し、PI 制御では、材料寸法、鋼種でパラメータを切り替えている。このことも考慮すれば、ロバスト制御のルーパー高さ安定化効果はかなり大きいことがわかる。

5. ま と め

本論文では、ルーパー高さのロバスト制御方法を提案した。まずルーパー高さ系は「2 次遅れ+むだ時間」系でモデル化でき、圧延条件により特に減衰係数が大きく変化することを示した。つぎに IMC 構造を用いたロバスト制御系の設計方法を与え、シミュレーションによる PI 制御との比較から、ロバスト制御のもつルーパー安定化効果を確認した。最後に実機テストを行い、ロバスト制御と PI 制御のステップ応答、ルーパー角偏差平均値を比較し、ロバスト制御の制御効果を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) J.C. Price: The Hot Strip Mill Looper System, IEEE Trans. Industry Applications, **IA-9-5**, 556/562 (1973)
- 2) 西谷紘一: プロセス制御系の設計, システムと制御, **30-1**, 16/25 (1986)
- 3) M. Vidyasagar: Control System Synthesis—A Factorization Approach, MIT Press (1985)
- 4) 荒木光彦: 周波数応答法の考え方, システム/制御/情報, **34-1**, 2/8 (1990)