

板圧延における板厚制御応答特性の同定

鷺北 芳郎*・角谷 泰則*・木村 和喜*

System Identification for Gage Control Property of Strip Rolling Process

Yoshiro WASHIKITA, Yasunori KADOYA and Kazuyoshi KIMURA

Synopsis : This paper describes a system identification method on the gage control system of steel rolling. System identification is a useful method for modeling a controlled object to design and tune a high performance controller. However, in online identification during commercial rolling, it is usually difficult to identify exact open loop properties of the system, because the power of the observed signals is relatively small in low frequency, especially in cold rolling. Therefore, we developed an identification algorithm based on auto-regressive moving average model with exogenous input (ARMAX) model to satisfy the specified steady state gain constraint, which is often obtained from the physical model or constants. Furthermore, to remove influence of the causality between input and output signals yielded from feedback gage control, we firstly identified tension response properties using the above new algorithm, and secondly calculated gage control properties by way of interactive model between tension and gage. The effectiveness of the proposed method was demonstrated on the feedforward gage control system of a reversing cold mill.

Key words : gage control; frequency responses; system identification; ARMAX model; least-squares method; reversing cold mill.

1. 緒言

厳格化し続ける寸法精度に対する需要家の要求に答えるには、鋼種、操業条件、設備の経時変化等によらず、制御系が常に高性能を発揮・維持することが重要であり、このためには制御対象を正確にモデリングし、制御系の補償器を設計・調整する必要がある。代表的な制御対象のモデリング方法には、サブシステム毎に、物理、化学的な自然科学法則にもとづく数学的モデルを作り、これらを統合して制御対象全体のモデルを作成する物理モデルによる方法と、制御対象をブラックボックスとみなして制御対象の入出力の観測データに統計的モデルあるいは伝達関数をあてはめ、入出力関係が観測結果に合うようにそれらのパラメータを決定するシステム同定による方法があるが¹⁾、操業条件や設備の経時変化に対応するには、実プラントの入出力データから制御対象の応答特性を推定するシステム同定手法の方が有用である。

システム同定では、一般に、ステップ信号、正弦波信号、M系列信号などをテスト入力し、このときの出力信号から制御対象の応答特性を同定する²⁾。鉄鋼プラントでは、コークス炉温制御を対象に投入熱量のステップ変更実験を実施し、その結果に基づき、炉温応答特性を自己回帰モデルで同定する方法が報告されている³⁾。しかし、板圧延プロセスの場合、鋼種、寸法、操業条件等の組合せが多数あり、全ての条件に対して前述の同定実験を行うことは困難

である。また、操業条件の変化や圧延設備の経時変化等により、応答特性が変化する場合があり、その変化に対応するためには、さらなる同定テストが必要となる。

これに対し、テスト入力を用いずに、通常操業中のデータから制御対象の応答特性を同定しようとする試みが報告されている^{4,5)}。しかし、同定用のテスト入力をしない場合には、入出力信号の周波数的な偏りのために同定されたパラメータがバイアスを持つことがある⁶⁾。また、制御対象にフィードバック制御がかかっている場合は、ループ経路に1つ以上の遅れがあり、さらに、外乱と出力が無相関でなければ同定されたパラメータはバイアスを持つ⁷⁾。特に冷間圧延の板厚制御特性を同定する場合、低周波の板厚変動は制御されるため、圧延パスが進むにつれて低周波帯の信号パワーが小さくなり、制御上、最も重要な低周波帯の制御特性が正しく同定できない。

そこで著者らは、実操業中に測定された圧延データに基づき、拡大最小2乗法によるARMAXモデル(Auto Regressive Moving Average model with eXogenous input)の同定方法⁸⁾を用いて、制御対象の応答特性を同定する方法を検討した。この際、制御対象の物理量間の釣合などの静的な関係が明らかである場合には、それから導出される定常ゲインを満足するようにARMAXモデルのパラメータを推定することにより、低周波帯の制御特性も正しく同定する方法を考案した。

本稿では、板圧延プロセスのプロセスモデルを活用した

拡大最小2乗法による ARMAX モデルの同定方法を示すとともに、冷間可逆式圧延機のフィードフォワード板厚制御を対象に、本同定技術の適用可能性について述べる。

2. 定常ゲインを指定した ARMAX モデル同定

板圧延プロセスでは、圧延理論に基づくプロセスモデルが確立されているため、制御対象内の物理量間の釣合などの静的な関係が明らかである場合が多い。そこで、この静的な関係により決定される定常ゲインを指定し、定常ゲインが指定値となるように離散時間確率モデルを同定する方法を述べる。ここでは、離散時間確率モデルとして、入出力信号に偏りがあってもモデルパラメータ推定値のバイアス補償効果が期待できる ARMAX モデルを用いた。

ARMAX モデルは、Fig. 1 に示す線形時不変システムの離散的な入出力関係を (1) 式で表したものである⁸⁾。

$$y_t = -\sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^m b_i u_{t-i} + \sum_{i=1}^p c_i e_{t-i} + e_t \dots (1)$$

ここで、 t は離散的な時刻 ($t=0, 1, \dots$)、 u_t は入力信号、 y_t は観測信号であり、右辺第3, 4項は、式誤差を平均値0の白色雑音 e_t を用いて自己回帰モデルで表したものである。

(1) 式の ARMAX モデルの同定、すなわちパラメータ ($a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m, c_1, \dots, c_p$) の推定には、拡大最小2乗法の計算アルゴリズム⁸⁾を用いる。

この際、制御対象の物理量の釣合などの静的な関係から得られる情報を制約条件として用いることにより、特に低周波帯の同定精度の向上を図る。今、単位ステップ入力 $u_t=1$ ($t=0, 1, \dots$) を加えた時に、定常出力応答 $y_{\infty}=K$ が得られることが、圧延理論などのプロセスモデルから予め解っているとすると、(1) 式の ARMAX モデルがこの定常ゲイン特性を満足するには、パラメータ a, b が (2) 式の制約条件を満たさなければならない。

$$\sum_{i=1}^m b_i = K \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i \right) \dots (2)$$

この制約条件により、同定するパラメータは1つ減り、それを $\theta = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_{m-1}, c_1, \dots, c_p)^T$ とおくと、 θ を時間の経過とともに更新する逐次計算アルゴリズムは (3) ~ (6) 式ようになる。

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \frac{P_{t-1} \varphi_t}{1 + \varphi_t^T P_{t-1} \varphi_t} (y_t - K u_t - \varphi_t^T \theta_{t-1}) \dots (3)$$

$$P_t = P_{t-1} - \frac{P_{t-1} \varphi_t \varphi_t^T P_{t-1}}{1 + \varphi_t^T P_{t-1} \varphi_t} \dots (4)$$

$$\varphi_t = (-y_{t-1} + K u_{t-m}, \dots, -y_{t-n} + K u_{t-m}, u_{t-1} - u_{t-m}, \dots, u_{t-m+1} - u_{t-m}, -e_{t-1}, \dots, -e_{t-p})^T \dots (5)$$

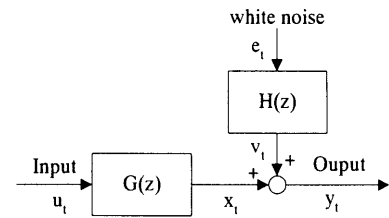


Fig. 1. Block diagram of system.

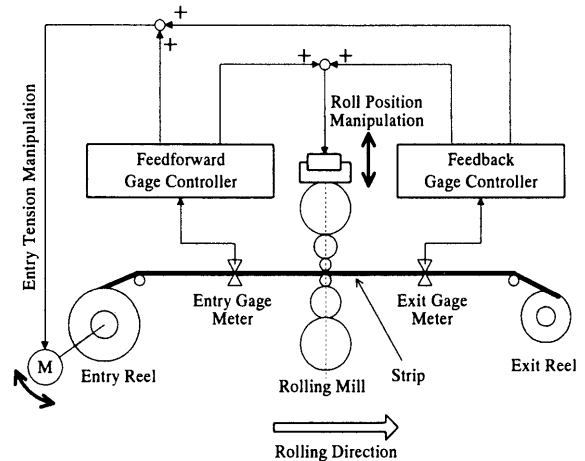


Fig. 2. Gage control system of reversing cold mill.

$$e_t = y_t - K u_{t-m} + \sum_{i=1}^n a_i (y_{t-i} - K u_{t-m}) - \sum_{i=1}^{m-1} b_i (u_{t-i} - u_{t-m}) \dots (6)$$

また、 b_m は同定されたパラメータを (2) 式に代入することにより、(7) 式で得られる。

$$b_m = K \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i \right) - \sum_{i=1}^{m-1} b_i \dots (7)$$

以上によって推定されたパラメータ a, b を用いると、入力 u から、雑音を除いた出力 x への応答特性を表す伝達関数 (8) 式が得られる。ただし、 z^{-1} は遅延演算子である。

$$G(z) = \frac{\sum_{i=1}^m b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} \dots (8)$$

なお、上記では、離散時間確率モデルとして ARMAX モデルを用いて説明したが、本手法は ARX モデルに対しても同様に適用することができる。

3. 冷間圧延機の板厚制御システムへの適用検討

本章では、板圧延プロセスの例として、Fig. 2 に示す冷間可逆式圧延機の板厚制御に対する ARMAX モデルの同定方法を述べる。

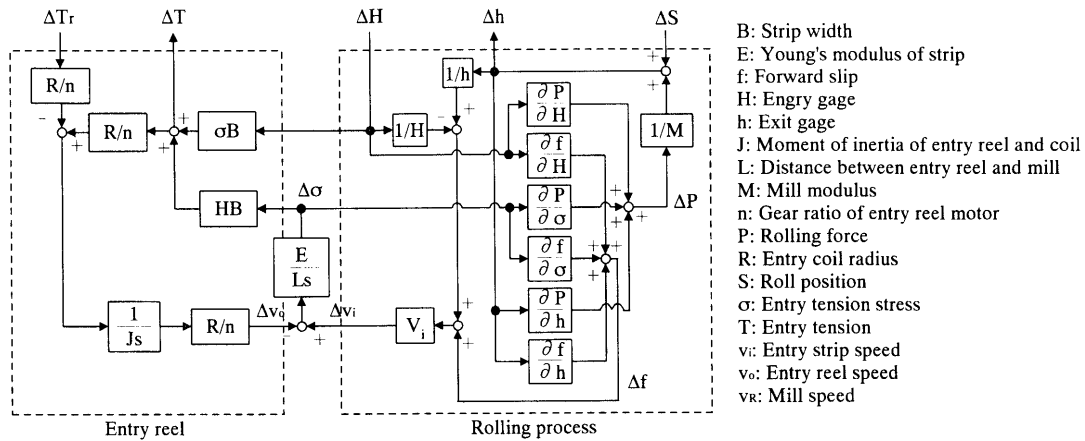


Fig. 3. Block diagram of reversing cold strip mill.

3.1 冷間可逆式圧延機の物理モデル

冷間可逆式圧延機の物理モデルは、(9)~(14)式で与えられる⁹⁾。なお、記号の定義はFig. 3中に示す。

(1) ゲージメータ式

$$h = S + \frac{P}{M} \dots\dots\dots(9)$$

(2) 体積速度一定式

$$Hv_i = hv_r(1+f) \dots\dots\dots(10)$$

(3) 圧延理論式 (圧延荷重式, 先進率式)

$$P = P(H, h, \sigma) \dots\dots\dots(11)$$

$$f = f(H, h, \sigma) \dots\dots\dots(12)$$

(4) 張力変動式

$$\frac{L}{E} \frac{d}{dt} \sigma = v_i - v_o \dots\dots\dots(13)$$

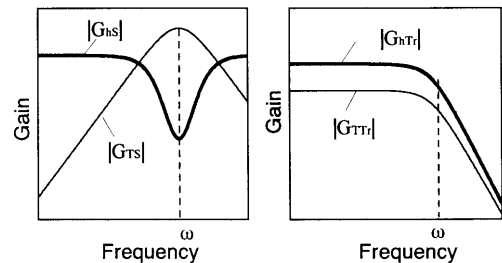
(5) 入口リールの運動方程式

$$J \frac{d}{dt} \frac{nv_o}{R} = \frac{R}{n} (T - T_r) \dots\dots\dots(14)$$

(9)~(14)式を基準状態近傍で線形近似し、基準状態からの変化量をΔを付けて表すと、ブロック線図Fig. 3を得る。ここで出口張力、出口リールの制御系は、入口側に比べて出口板厚への影響が小さいため無視した。

操作量は圧下位置ΔSあるいは張力指令ΔT_rであり、圧下位置ΔSから、張力ΔT、出口板厚Δhへの伝達関数G_{TS}(s)、G_{hS}(s)、張力指令ΔT_rからΔT、Δhへの伝達関数G_{Tr}(s)、G_{hTr}(s)は(15)~(20)式で表され、そのゲイン線図はFig. 4のようになる⁹⁻¹¹⁾。圧下位置操作の場合は、固有振動数ωの近傍で、張力が共振するため板厚変化が小さくなる。張力指令を変更する張力操作の場合は、ωより大きい周波数帯で、張力の追従が悪くなるため板厚変化も小さくなる。

$$G_{TS}(s) = \frac{HB E v_i}{L} \frac{M}{M - \partial P / \partial H} \frac{s}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2} \dots\dots\dots(15)$$



(a) Roll position manipulation (b) Tension manipulation

Fig. 4. Gain characteristics of G_{TS}, G_{hS}, G_{Tr} and G_{hTr}.

$$G_{hS}(s) = \frac{M}{M - \partial P / \partial h} \left(1 + \frac{1}{HBM} \frac{\partial P}{\partial \sigma} G_{TS}(s) \right) \dots\dots\dots(16)$$

$$G_{Tr}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2} \dots\dots\dots(17)$$

$$G_{hTr}(s) = \frac{\partial P / \partial \sigma}{M - \partial P / \partial h} \frac{1}{HB} G_{Tr}(s) \dots\dots\dots(18)$$

$$\omega = \frac{R}{n} \sqrt{\frac{HBE}{JL}} \dots\dots\dots(19)$$

$$\zeta = -\frac{nv_i}{2R} \left[\frac{\partial P / \partial \sigma}{M - \partial P / \partial h} \left(\frac{\partial f}{\partial h} + \frac{1}{h} \right) + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right] \sqrt{\frac{JE}{HBL}} \dots\dots\dots(20)$$

3.2 冷間可逆式圧延機の板厚制御特性の同定

冷間圧延における板厚制御では、圧延後の板厚を板厚計で測定してその偏差を修正するフィードバック制御、外乱となる圧延前の板厚偏差を板厚計で測定して圧延後の板厚に影響を与えないように操作量を決定するフィードフォワード制御などが実施されている¹²⁾。フィードフォワード制御 (以下FFAGC) は、入口板厚検出値ΔHに基づき、出口板厚がΔh=0となるように圧下位置ΔS、あるいは入口張力ΔT_rを操作するが、板厚の検出遅れや、アクチュエータ、板厚変化の応答遅れの影響も予め考慮して、外乱となる入口板厚変動の影響を相殺する操作量を決定できるため、最も有効である。

この際、FFAGC補償器が板厚制御特性G_{hS}(s)、G_{hTr}(s)の

逆特性をもつように設計・調整すれば、幅広い周波数にわたって、出口板厚変動を抑制できる¹³⁾。このためには、板厚制御特性 $G_{hs}(s)$, $G_{htr}(s)$ を正確にモデリングする必要があるが、(16), (18)式で得られた物理モデルでは、入口ロールのトルク制御応答を無視している、入口ロールを1慣性系と仮定しているなどの近似が含まれている。物理モデルの精度向上対策として、入口ロールを多慣性系でより詳細に記述するなどの方法も考えられるが、質点間のバネ定数(ねじれ剛性係数)、減衰係数などのパラメータの値は未知であり、モデルの次数を増加させても精度が向上するとは限らないため¹⁾、実圧延データから $G_{hs}(s)$, $G_{htr}(s)$ を ARMAXモデルで同定することを検討した。ただし、圧延中は通常、 Δh の検出値に基づいて ΔS あるいは ΔT_r を操作するフィードバック板厚制御(以下FBAGC)も実施しているため、フィードバック制御系の可同定性が問題となる⁷⁾。本制御系では、 Δh の検出に無駄時間(圧延機直下から板厚計までの圧延材移動時間)があり、また、入力 ΔS あるいは ΔT_r にはFBAGC以外の外乱入力(ロール偏心などの外乱やFBAGC以外の制御の入力)が加わるため、 Δh に加わる外乱と Δh が無相関であれば、開ループ特性 $G_{hs}(s)$, $G_{htr}(s)$ は同定可能である。

そこで、外乱と出力との相関を軽減するため、 ΔS あるいは ΔT_r とフィードバック制御の入力である Δh との関係を同定するのではなく、Fig. 5, 6のように、 ΔS から入口張力 ΔT への応答特性 $G_{TS}(s)$, ΔT_r から入口張力 ΔT への応答特性 $G_{Tr}(s)$ を ARMAXモデルで同定し、 Δh への応答特性 $G_{hs}(s)$, $G_{htr}(s)$ は、同定された $G_{TS}(s)$, $G_{Tr}(s)$ を(16), (18)式にそれぞれ代入して計算するという間接的な方法とした。ここで、 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ は(21)~(23)式で与えられる定数であり、これらの要素であるミル剛性係数、入口張力・出口板厚から圧延荷重への影響係数は、通常、セットアップモデルの学習¹⁴⁾により予測精度の維持・向上が図られており、ミル剛性係数、冷間圧延の場合の圧延荷重の予測誤差は5%程度であるため、 $G_{TS}(s)$, $G_{Tr}(s)$ から $G_{hs}(s)$, $G_{htr}(s)$ を計算する際に生じる誤差の影響も同程度で小さい。

$$\alpha_1 = \frac{1}{HBM} \frac{\partial P}{\partial \sigma} \dots\dots\dots(21)$$

$$\alpha_2 = \frac{M}{M - \partial P / \partial h} \dots\dots\dots(22)$$

$$\alpha_3 = \frac{\partial P / \partial \sigma}{M - \partial P / \partial h} \frac{1}{HB} \dots\dots\dots(23)$$

3・2・1 圧下位置操作から入口張力・出口板厚への応答特性

圧下位置 ΔS と入口張力 ΔT の関係 $G_{TS}(s)$ を ARMAXモデル(24)式で表す。

$$\Delta T_r = -\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \Delta T_{r-i} + \sum_{i=1}^m \tilde{b}_i \Delta S_{r-i} + \sum_{i=1}^p \tilde{c}_i e_{r-i} + e_r \dots\dots\dots(24)$$

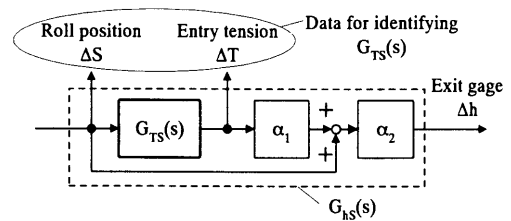


Fig. 5. Block diagram of $G_{hs}(s)$.

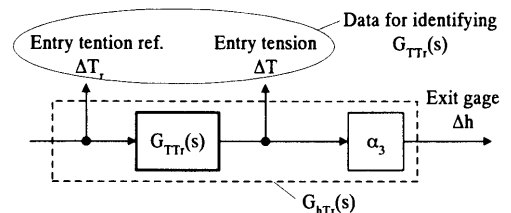


Fig. 6. Block diagram of $G_{htr}(s)$.

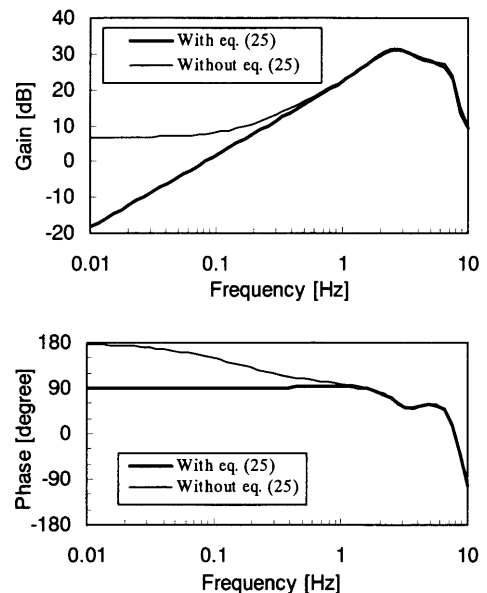


Fig. 7. Bode diagram of identified $G_{TS}(s)$.

ただし、物理モデル(15)式より、定常ゲインは $G_{TS}(0)=0$ であることが明らかである。これは、圧下位置を変更しても、十分に時間が経過すれば、入口ロールトルクの釣合によって、入口張力は圧下位置変更前の値に戻ることを意味している。したがって、定常ゲインに関する制約(25)式の下で、サンプリングされた ΔS , ΔT から ARMAXモデル(24)式のパラメータを同定する。

$$\sum_{i=1}^m \tilde{b}_i = 0 \dots\dots\dots(25)$$

圧延中の実績データに基づき、同定された $G_{TS}(s)$ のボード線図を Fig. 7に示す。同定された周波数特性は、物理モデル(15)式で表される微分十二次遅れ系の特性(ゲイン特性は Fig. 4の $|G_{TS}|$)とほぼ一致している。また、Fig. 7中には、定常ゲイン $G_{TS}(0)=0$ の制約条件(25)式を考慮しなかった場合の同定結果も示しているが、この場合、同定さ

れたモデルの定常ゲインは約7dB (=2.24)であり、物理モデルから得られる特性とは大きく異なる。これは入出力データの低周波成分が小さく、低周波域での特性を正確に把握できなかったためである。このように物理的なプロセスモデルが構築でき、制御対象の定常ゲインが既知の場合には、制約条件を考慮した本手法が有効であることが確認できる。

本例では定常ゲインは物理的に0に等しいため、制約条件として与えた定常ゲインに誤差はないが、一般には物理定数などから求められる値であり、誤差を含む場合もある。しかしFig. 7からわかるように、定常ゲイン制約の有無による同定結果の差は低周波帯以外では小さいので、定常ゲインの誤差の影響は比較的低周波帯に限られると考えられる。これに対して、定常ゲイン制約を付加しない場合には低周波帯での誤差が非常に大きくなるので、入出力信号の低周波成分が小さいような場合には、定常ゲインにある程度の誤差があっても本手法は有効と考えられる。

また、制約条件を考慮した同定結果を用いて、圧下位置から入口張力を一段予測した結果をFig. 8に示す。高周波の推定誤差は残っているが、実用周波数帯(~5Hz)では同定結果は良好である。

同定された $G_{TS}(s)$ を(16)式に代入して $G_{hs}(s)$ を求め、これに圧下装置の応答特性を乗算して算出した圧下位置指令から出口板厚への応答特性 $G_{hs}(s)$ を定常ゲインで正規化してFig. 9に示す。圧下位置操作による出口板厚制御特性は、周波数2Hz付近でゲインが小さくなっている、すなわち圧下位置操作による出口板厚修正能力が小さくなっていることがわかる。これは、Fig. 4で説明したとおり、この周波数域で圧下位置を操作した場合、入口張力が共振して大きく変化し、圧下位置操作による出口板厚修正量を打ち消してしまうためである。このような周波数域の入口板厚外乱に対しても、出口板厚偏差が生じないようにするには、Fig. 9のゲイン特性の逆特性を持つ補償器にてフィードフォワード板厚制御を行う必要がある。

3.2.2 入口張力操作から入口張力・出口板厚への応答特性

入口張力指令値 ΔT_r と入口張力 ΔT の関係 $G_{Tr}(s)$ をARMAXモデル(26)式で表す。

$$\Delta T_t = -\sum_{i=1}^n \bar{a}_i \Delta T_{t-i} + \sum_{i=1}^m \bar{b}_i \Delta T_{r,t-i} + \sum_{i=1}^p \bar{c}_i e_{t-i} + e_t \dots\dots\dots(26)$$

ただし、物理モデル(17)式より、定常ゲインは $G_{Tr}(0)=1$ であることが明らかである。これは、張力指令分に相当するトルクを入口リールに加えることにより、十分時間が経過すれば、入口リールのトルクの釣合によって、張力指令と等しい張力が得られるという当然の結果である。したがって、定常ゲインに関する制約(27)式の下で、サンプリングされた ΔT_r 、 ΔT からARMAXモデル(26)式のパラメー

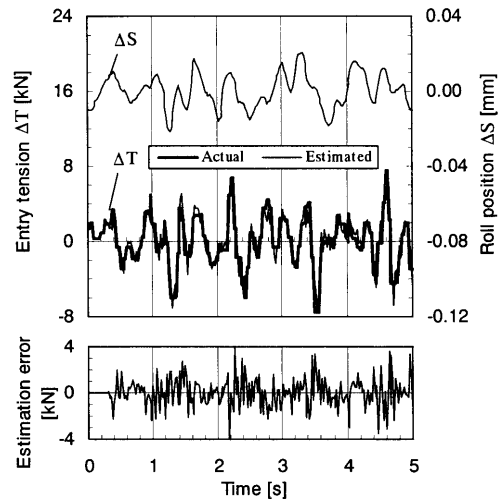


Fig. 8. Estimation accuracy of entry tension by ARMAX model identification.

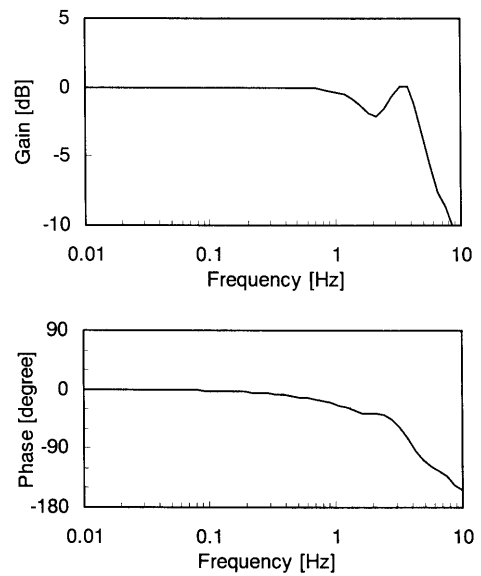
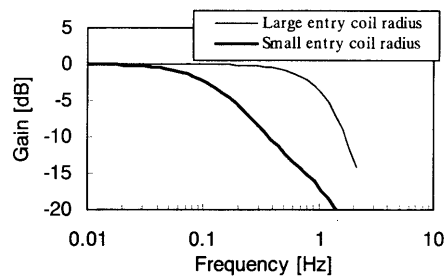


Fig. 9. Bode diagram of identified transfer function from roll position reference to exit gage.

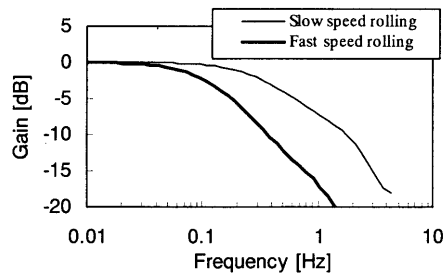
タを同定する。

$$\sum_{i=1}^m \bar{b}_i = 1 + \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \dots\dots\dots(27)$$

圧延中の実績データに基づき、本特性を同定した例をFig.10に示す。(a)は、圧延パス開始直後の入口リールのコイル径が大きい場合と、同じ圧延パスの終了直前の入口リールのコイル径が小さい場合とを比較して示しているが、圧延が進んで入口リールのコイル径が小さくなると、入口張力を変更できる周波数帯が狭くなることがわかる。これは(19)、(20)式より、固有振動数 ω 、減衰係数 ζ が入口リールのコイル半径 R 、入口リール・コイルの慣性モーメント J (コイル半径の変化により、間接的に変化)に応じて変化したためと考えられる。また、(b)は、異なる圧延速度で圧延した場合の同定結果を比較して示しているが、圧延速度が高速になると、入口張力を変更できる周波数帯



(a) Influence entry coil radius



(b) Influence of rolling speed

Fig. 10. Gain characteristics of identified transfer functions from entry tension reference to entry tension.

が狭くなることがわかる。これは(20)式より、圧延速度の増加によって減衰係数 ζ が大きくなったためと考えられる。

(18)式より、入口張力指令から出口板厚への応答特性は、入口張力指令から入口張力への応答特性に比例するので、入口張力変更による板厚制御を行う場合は、圧延が進んで入口リールのコイル径が小さくなる、あるいは圧延速度が速くなると、張力変更による板厚制御の効きが悪くなるということが同定されたことになる。このような板厚制御特性の変化が生じて高い板厚制御精度を維持するためには、同定された応答特性の変化を用いて、制御補償器を自動調整することが有効である。

4. 結言

制御対象の物理量間の釣合などの静的な関係が明らかである場合に、それから得られる定常ゲインを満たすようにARMAXモデルを用いて制御対象の応答特性を同定する方法を示した。さらに板圧延プロセスにおける実プラントの一例として、物理モデルが構築されており、プラントモデル構造が比較的明らかな可逆式冷間圧延機の板厚制御を対象に本同定技術の適用を試み、フィードバック制御の実施中であっても、制御対象の開ループ応答特性を正確に同定できることを確認した。

また、板厚制御の応答特性は入口リールのコイル径や圧延速度等の圧延条件に応じて変化することが物理モデルから予測されるが、このような板厚制御特性の変化を同定できることを確認した。本同定手法は、特に同定のためのテスト入力を加える必要が無く、通常圧延中に得られるデータのみから板厚制御特性を同定できるため、同定された板厚制御特性の変化に応じて板厚制御補償器をオンラインで自動調整することも可能になると考えられる。今後、実用化に向けた研究を進める予定である。

文 献

- 1) 片山 徹：システム同定入門、朝倉書店、東京、(1994)、4。
- 2) 片山 徹：システム同定入門、朝倉書店、東京、(1994)、39。
- 3) Y.Kashihara, Y.Matoba, T.Yamamoto and A.Murata: *Trans. Inst. Syst., Control Inf. Eng.*, **6-6** (1993), 253.
- 4) S.Nishino, H.Narazaki, A.Kitamura, Y.Fujita and M.Ishimaru: Proc. 8th SICE Symp. on Control Eng., SICE, Tokyo, (2000), 427.
- 5) K.Asano and K.Yamamoto: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 253.
- 6) 中溝高好：信号解析とシステム同定、コロナ社、東京、(1988)、140。
- 7) 相良節夫、秋月影雄、中溝高好、片山 徹：システム同定、計測自動制御学会、東京、(1981)、260。
- 8) 中溝高好：信号解析とシステム同定、コロナ社、東京、(1988)、155。
- 9) T.Kondo and Y.Misaka: *J. Soc. Instrum. Control Eng.*, **28-5** (1989), 445.
- 10) T.Ooi, F.Nishimura, T.Yanagita, S.Ban and Y.Seki: *Trans. Inst. Syst., Control Inf. Eng.*, **9-6** (1996), 274.
- 11) T.Ooi and Y.Washikita: *Trans. Soc. Instrum. Control Eng.*, **39-8** (2003), 777.
- 12) 高橋亮一：鉄鋼業における制御、コロナ社、東京、(2002)、156。
- 13) Y.Washikita, M.Okamoto, T.Ooi, Y.Mori and E.Hitotsumatsu: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 977.
- 14) N.Yoshiaki and T.Ooi: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 303.