

Just-In-Time モデリングを用いた厚鋼板の幅制御

J F E スチール株式会社
茂森 弘靖

1. はじめに

厚鋼板の圧延制御システムにおいて、圧延機のセットアップモデルは、製品寸法（厚み、幅、長さ）を目標値どおりに精度良くフィードフォワード制御するために重要な役割を担っている。生産性および製品品質を改善するためには、精度の良い予測モデルを構築することが必要不可欠である。本稿では Just-In-Time モデリング^[3]と呼ばれる方法を用いた厚鋼板の幅制御のセットアップシステムについて紹介する。この方法はデータベースに蓄積された大量の実績データから予測の必要が生じる毎に局所的な予測モデルを作成する方法である。

Just-In-Time モデリングには様々な方法があるが、そのなかでも局所回帰 (Locally weighted regression)^{[1][2]}と呼ばれる方法を用いている。距離関数にはユークリッド距離や正規化ユークリッド距離を用いることが一般的であるが、本稿では、大域的な線形重回帰モデルの偏回帰係数の絶対値を重みとする 1 次ノルムを用いる方法を紹介する。

2. 圧延セットアップシステム

2.1 従来のセットアップシステム

図 1 に従来のセットアップシステムの概要を示す。プロセス計算機のセットアップ機能において、目標の幅を得るためのロール隙を物理モデルをもとに計算し、設定する。幅予測モデルは様々なスラブ寸法、製品寸法に対して精度良く予測できるように、スラブ寸法、製品寸法毎に区分された多数のパラメータテーブルを持っている。予測モデルの精度を維持するために、製鉄所のスタッフは統計解析を行い、それらのパラメータテーブルを修正入力する作業を実施している。その作

業の負荷が非常に高く、頻繁に行うことができないため、モデルの精度、ひいては寸法制御精度を維持することが困難になっている。

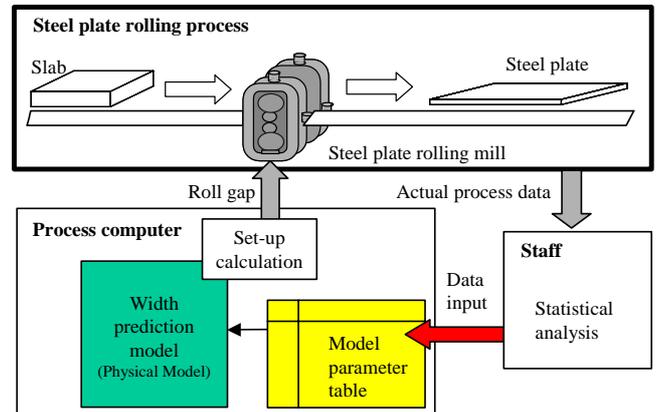


図 1 従来のセットアップシステム

2.2 新しく開発したセットアップシステム

図 2 に新しく開発したセットアップシステムの概要を示す。セットアップ計算は、数個の説明変数をもつ局所回帰モデルをもとに行う。モデルパラメータの同定は、圧延実績を自動的に蓄積したデータベースの中のデータをもとに行われる。局所回帰モデルを同定する前にデータベースの中の異常データを除去する前処理が行われる。幅予測モデルのパラメータ計算が自動的に行われることにより、スタッフはパラメータテーブルのメンテナンスをする必要がなくなる。

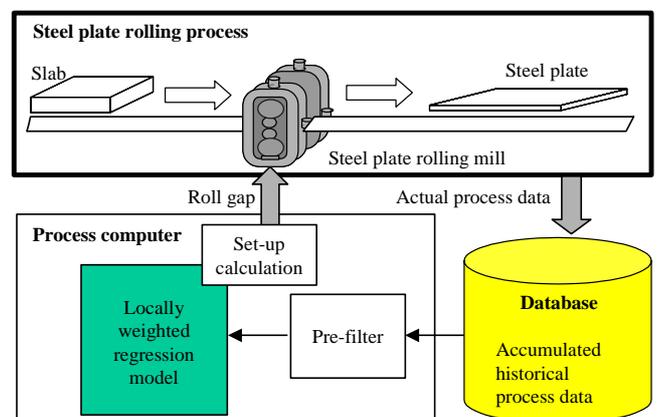


図 2 新しく開発したセットアップシステム

3. データセット

幅予測モデルのためのデータセットは、圧延機の圧延実績を蓄積したデータベースに格納されている。データベースに格納されている全ての観測データを用いて予測モデルを作成する。観測データ数は約10000である。

目的変数は圧延後の製品幅である。説明変数は目的変数と物理的な因果関係のあることが明確な数個を選択している。それらは、スラブの寸法、圧延温度、製品および圧延中の厚みなどである。

4. 局所回帰モデル

新しく開発したセットアップシステムで用いている厚鋼板の幅予測モデルの作成方法について説明する。

目的変数と説明変数が既に定義され、それらの観測データが既に与えられているものとする。目的変数は次のように表現される。

$$y^n, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

説明変数は次のように表現される。

$$x_m^n, \quad m=1, 2, \dots, M, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

ここで、 M は説明変数の数で、 N は観測データの数である。要求点を次のように表現する。

$$x^r = [x_1^r, x_2^r, \dots, x_M^r]^T \quad (3)$$

ここで T は行列の転置を表す。そして、観測データをもとに単純な線形重回帰モデルのパラメータを推定する。その線形重回帰モデルは次式のように定義される。

$$Y = b + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_M X_M \quad (4)$$

線形重回帰モデルの偏回帰係数を次のように表現することにする。

$$a = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T \quad (5)$$

これは以降に述べる距離の定義に用いられる。

距離 L は、説明変数空間における要求点からの距離で、次のように定義される。

$$L(x, x^r, a) = \sum_{m=1}^M |a_m| |x_m - x_m^r| \quad (6)$$

偏回帰係数は、目的変数の変化量に対する各説明変数の変化量の寄与度と考えることができる。その寄与度を重みとする距離である。

次に、 N 個の観測データそれぞれについて、要求点からの距離を求める。 n 番目 ($n=1, 2, \dots, N$)の観測データの要求点からの距離は、次の式から求めることができる。

$$L^n = L(x^n, x^r, a) \quad (7)$$

ここで、

$$x^n = [x_1^n, x_2^n, \dots, x_M^n]^T, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

また、 $1 \sim N$ 番目の観測データの要求点からの距離をまとめて次のように表現することにする。

$$l = [L^1, L^2, \dots, L^N]^T \quad (9)$$

次に、要求点からの近さを表す類似度 W を下記のように定義する。

$$W(L, p, l) = \exp[-\{L/(p \quad (l))\}] \quad (10)$$

ここで、 (l) は、 l の標準偏差を表し、 p は調整パラメータである。

次に、 N 個の観測データそれぞれについて、要求点からの類似度を求める。 n 番目 ($n=1, 2, \dots, N$)の観測データの要求点からの類似度は、次の式から求めることができる。

$$W^n = W(L^n, p, l), \quad n=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

また、 $1 \sim N$ 番目の観測データの要求点からの類似度をまとめて次のように表現することにする。

$$w = [W^1, W^2, \dots, W^N]^T \quad (12)$$

そして、与えられた N 個の観測データとそれぞれの類似度 w を用いて、局所回帰モデ

ルを作成する．その局所回帰モデルの構造は式(4)と同じである．

モデルパラメータベクトル u は次式のように表現される．

$$u = [b, a_1, a_2, \dots, a_M]^T \quad (13)$$

モデルパラメータベクトル u は，次式で表される誤差評価関数 J を最小化するように計算して求める．

$$\begin{aligned} J &= e^T V e \\ &= [y - Q u]^T V [y - Q u] \end{aligned} \quad (14)$$

ここで，

$$y = [y^1, y^2, \dots, y^N]^T \quad (15)$$

$$V = \text{diag}[W^1, W^2, \dots, W^N] \quad (16)$$

$$Q = [q^{1T}, q^{2T}, \dots, q^{NT}]^T \quad (17)$$

$$q^n = [1, x_1^n, x_2^n, \dots, x_M^n] \quad (18)$$

$$y = Q u + e \quad (19)$$

モデルパラメータベクトル u は，次式から求めることができる．

$$u = [Q^T V Q]^{-1} Q^T V y \quad (20)$$

5. 新システムの適用結果

上述の局所回帰モデルを用いた新しく開発したセットアップシステムは，実機に適用されている．この方法の適用により，幅制御誤差は従来のシステムに比べて，約20%低減できた．また，スタッフが行っていたモデルパラメータのメンテナンス作業も不要になった．

6. おわりに

本稿では，西日本製鉄所で実施しているJust-In-Timeモデリングを用いた厚鋼板のセットアップシステムを紹介した．このシステムは製品品質の向上と製造コストの低減に寄

与している．また，モデルのメンテナンス負荷の低減にも寄与している．

本システムはS-PLUSを用いて実装している．

参考文献

- [1] Cleveland W. S. and Delvin S. J., Locally weighted regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, Journal of the American Statistical Association, 83, 403, 1988.
- [2] Zheng Q. and Kimura H., Locally weighted regression based on k bipartite neighbors, 42nd Japan Joint Automatic Control Conference, Tokyo, 143-144, 1999.
- [3] Zheng Q. and Kimura H., Just-in-time modeling for function prediction and its applications, Asian Journal of Control, 3, 35-44, 2001.