

圧延ロールのインプロセス真直度測定のための自律的手法の研究

東北大学工学研究科機械電子工学専攻

教授 清野 慧

(平成6年度奨励研究助成AF-94032)

キーワード：測定，形状，インプロセス，精度，圧延ロール

1. 研究の目的と背景

鋼板の圧延をはじめ各種の圧延工程において，ロールの摩耗による形状変化をインプロセスで測定して，圧延形状精度を制御，向上させたいという要求が高まっている．しかし，測定の基準となる高精度な走査案内は熱的環境の厳しい一般の圧延工程で構築することは難しい問題がある．

一方，複数のプローブ情報を用いて，形状の情報と走査の際の運動誤差を同時に検出し，演算によって運動誤差を取り除いた形で形状を取り出すソフトウェアデータムの手法が種々開発されている^{1)~8)}．それによって，走査案内の運動精度以上の精度で形状を測定することができる．また，熱による走査案内の運動特性の変化の影響も取り除くことができるため，圧延工程でロールの真直形状をインプロセスで測定できることが期待される．

従来のソフトウェアデータムでは，サンプリング間隔とプローブ間隔が等しい逐次法がよく用いられる^{1)~5)}．この方法はデータ処理が簡単で，取り上げた離散点データにはデータ処理上誤差が全くないという長所を持つ．しかし，プローブ間隔の2倍以下の波長成分が測定できない．特に段差や傷のような高周波成分を含む形状に対しては，横分解能不足の問題がある．プローブ間隔を狭くすると，低周波成分の精度が悪くなり，実際の問題の解決にならない．そこで，筆者らは逐次という条件を除くための新しいデータ処理法を示し⁶⁾，一般多点法^{7) 8)}や混合法⁹⁾などの非逐次法について検討してきた．その結果，なめらかな連続形状に対して横分解能の問題をほぼ解決した．しかしこれらの方法では，フーリエ変換の手法を用いてデータ処理を行っているため，傷などの不連続形状を含む圧延ロールの測定にはそのまま応用しにくい．

不連続形状測定のための方法として，逐次2点法と直線補間内挿法を組合せた方法が試みられた¹⁰⁾．この方法は測定対象に十分な直線範囲があればよい結果を与えるが，それ以外の場合に対しては適用範囲などはまだ不明確のようである．

そこで本研究では，圧延ロールのインプロセス測定の基礎研究として，逐次2点法のデータを一般2点法による形状の一部を基準領域にして関連づける手法を体系化した合成法¹¹⁾について検討する．この方法は非逐次法のなめらかな曲線に対する精度の良さと，逐次法の離散点でのデータ処理上の正しさを活かし，高精度に不連続形状を表現できる特徴がある．また，基準領域選択の最適化と自動化を行うことによって，合成法の高精度化を試みた．さらに，光学式プローブを使って，不連続領域を含む直線形状と走

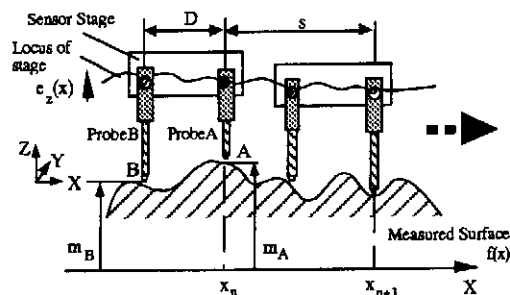


図1 2点法の原理

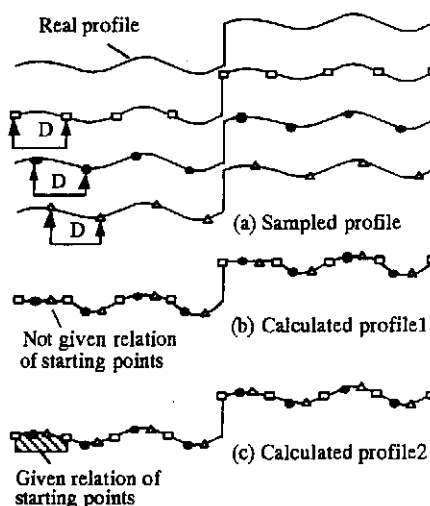


図2 合成法の原理

査案内の運動誤差を測定したので，その結果も合わせて報告する．

2. 測定原理

2.1 一般2点法と逐次2点法

図1に示すように，2点法は2本の変位計を用いて形状測定を行う．変位計の出力は次のようになる．

$$m_A(x_n) = f(x_n) + e_z(x_n) \quad (1)$$

$$m_B(x_n) = f(x_n - D) + e_z(x_n) \quad (2)$$

案内誤差 $e_z(x_n)$ を取り除くために， $m_A(x_n)$ ， $m_B(x_n)$ の差を取り，2点法の差動出力は次のようになる．

$$m(x_n) = m_A(x_n) - m_B(x_n) = f(x_n) - f(x_n - D) \quad (3)$$

$f(x_n)$ の一階微分は次式で近似できる．

$$m'(x_n) = m(x_n)/D = (f(x_n) - f(x_n - D))/D \quad (4)$$

$m'(x_n)$ の一階積分 $z(x_n)$ は近似的に案内誤差の影響を除去

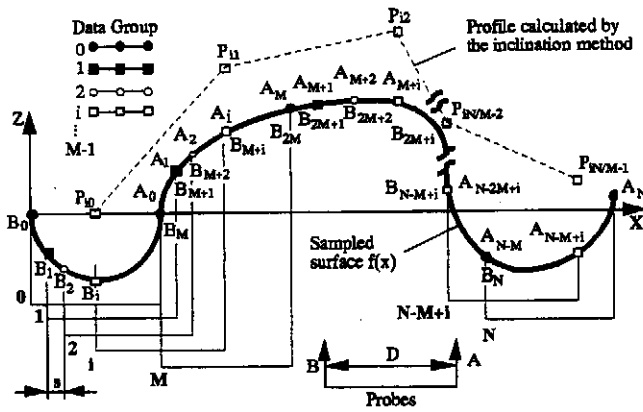


図3 合成法の計算アルゴリズム

した形状を表わす。

$$z(x_n) = \sum_{i=1}^n m'(x_i) s = z(x_{n-1}) + m'(x_n) \cdot s \quad (5)$$

$s=D$ の場合は逐次2点法と呼ばれ、 $s \neq D$ の場合は一般2点法と呼ばれる。

波長の長い成分（低周波成分）に対して、積分型2点法は高い精度を持つ。また逐次2点法は誤差を含まず元の形状を離散点で再現することができる⁷⁾。

なお、求めた形状 $z(x_j)$ を式(1)に代入して、案内誤差 $e_j(x_j)$ を求めることができる。

2.2 合成法

合成法の考え方を図2に示す。逐次法の利点を利用して横分解能を上げるための方法として次の方法が考えられる。まず図2(a)に示すようにスタート点を少しずつシフトして逐次2点法用データ群を得る。逐次2点法で得られた離散データ点は正しい相対的な位置関係を持つ。また、スタート点をずらして得られた離散的なデータ点も正しい相対的な位置関係を有する。しかし逐次2点法では、離散的な測定点は出発点の不定性があり、図2(b)のように各逐次データの出发点をゼロにして処理しても、各組の逐次データの間に関連性がないため、正確な形状情報が得られず横分解能の問題解決にならない。一方、図2(a)のデータ全部を使って一般2点法で処理することもできる。一般2点法は低周波の形状成分を正しく表現できる。そこで、一般2点法で得た曲線の一部のなめらかな範囲を用いて逐次2点法データ群の関連づけをすれば、逐次2点法データ群を持つ出発点の不定性は解消される。その結果、図2(c)のように他の測定範囲に含まれる高周波領域を含むすべての点がサンプリング間隔の許す範囲で正しく求まる。それで、段差や傷のような不連続形状に対するソフトウェアデータムの横分解能不足の問題を解決することになる。

2.3 合成法の計算アルゴリズム

合成法による形状処理は次の手順で行う。

1) 2本の変位計で被測定面を走査する

図3に示すように2本の変位計A、Bで被測定面を走査する。プローブ間隔をD、サンプリング間隔をs、サンプリング数をNとする、また、 $M=D/s$ とし、整数とし、 $s=1$

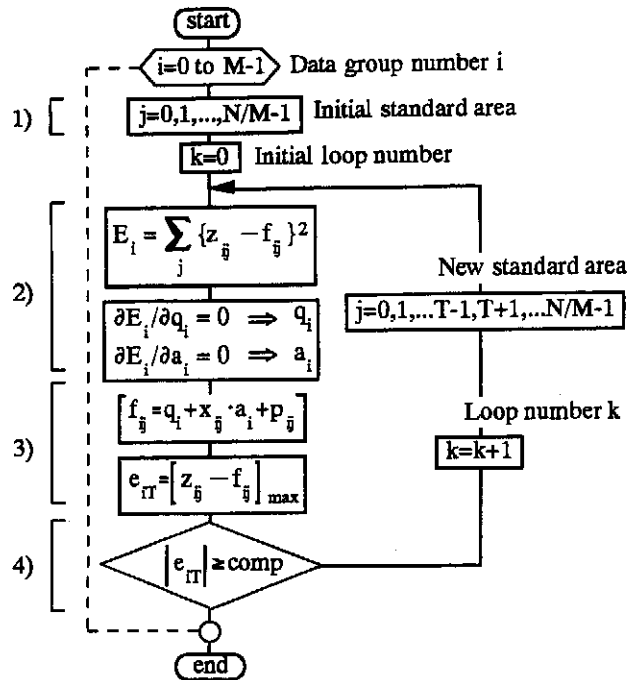


図4 基準領域の選択の流れ図

として以下の検討を行う。

2) 積分型2点法で形状 $z(x_j)$ を求める

サンプリングして得られた全データを用いて、積分型2点法で近似形状を求める。

$$z(x_n) = z(x_{n-1}) + (m_A(x_n) - m_B(x_n)) / D \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

3) 逐次2点法で形状を求める

M組の逐次2点法があり、各組にはN/Mの点がある。出発点をずらしたデータ群は次式の離散点 x_{ij} 上で与えられる。

$$x_{ij} = i \cdot s + j \cdot M \quad (i=0 \sim M-1, j=0 \sim N/M-1) \quad (7)$$

ただし、iはデータグループの番号で、jは各データグループのデータの番号である。

固定したiに対して、出発点の高さをゼロとしたとき各離散点の形状の高さ p_{ij} は次のようになる。

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^j [m_A(x_{ik}) - m_B(x_{ik})] \quad (8)$$

4) 合成法による形状 f_{ij} を求める

添え字iを固定したそれぞれの逐次法の結果 f_{ij} は、出発点の高さ q_i と全体の傾き a_i を自由度として持ち、次のように表すことができる。

$$f_{ij} = q_i + x_{ij} \cdot a_i + p_{ij} \quad (9)$$

積分型2点法で得た形状 $z(x_j)$ から基準領域を選択し、次のように最小自乗法で q_i, a_i を決める¹¹⁾。

$$E_i = \sum_j \{z_{ij} - f_{ij}\}^2 \quad (10)$$

$$\partial E_i / \partial a_i = 0 \quad (11)$$

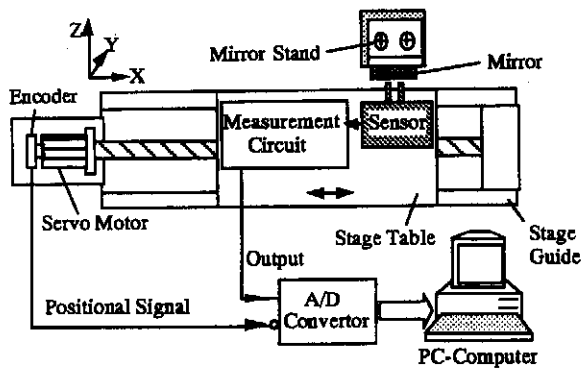


図5 測定システム

$$\partial E_i / \partial q_i = 0 \quad (12)$$

3. 基準領域選択の最適化と自動化

合成法による形状の精度は、 q_i と a_i を求めるときに選んだ基準領域の形状精度によって決まる。合成法の精度を高めるために、前報まで¹⁾¹⁾¹²⁾は、単独の変位計の出力を参考にして、一般2点法による形状のなるべくならぬ領域を作業上で探して基準領域に選択する方法を用いた。

段差形状では、エッジ部など高周波成分が抜け落ちる部分は比較的簡単に判別できるので、上記の選択法は十分に有効である¹²⁾。しかし、一般形状などそれ以外の場合においては、形状精度の悪い領域を完全に基準領域から除去しきれない恐れがある。また、サンプリング時の偶然誤差の影響を低減するため、なるべく多くの点を基準領域に選ぶのが望ましいが、この点においても上記の選択法は最適の結果を見出せない。また、選択プロセスは自動的に行われていないのも非効率である。

そこで、本研究では、基準領域を選ぶときの原則を次のようにし、基準領域選択の最適化と自動化を行った。

- a) 形状精度の悪い点を基準領域から除去する。
- b) サンプリング時の偶然誤差の影響を低減するため、なるべく多くの点を基準領域に選ぶ。

その原則のもとに、次の基準領域選択法を用いた。その流れ図を図4に示す。また、全ての過程はコンピュータで自動的に行う。

- 1) 一般2点法の結果 z_j の全ての点を基準領域に選ぶ。
- 2) 基準領域を使って、 q_i 、 a_i を決める。
- 3) q_i 、 a_i を用いて式(9)のように f_j を補正し、 f_j と z_j の基準領域における差を求める。その差の最大値 e_{nr} が定められたしきい値 $comp$ より大きいとき、最大値の点 x_{nr} を選び出し、基準領域から除く。
- 4) 差の最大値 x_{nr} がしきい値 $comp$ より小さくなるまで、2)から3)まで繰り返す。

これで精度の高い基準領域を選択することができる。通常、 $comp$ は変位計のドリフト特性や分解能などで決めた形状測定精度の限界に設定する。それによって、その測定精度の限界まで逐次2点法データ群の出発点の高さを求めることができる。

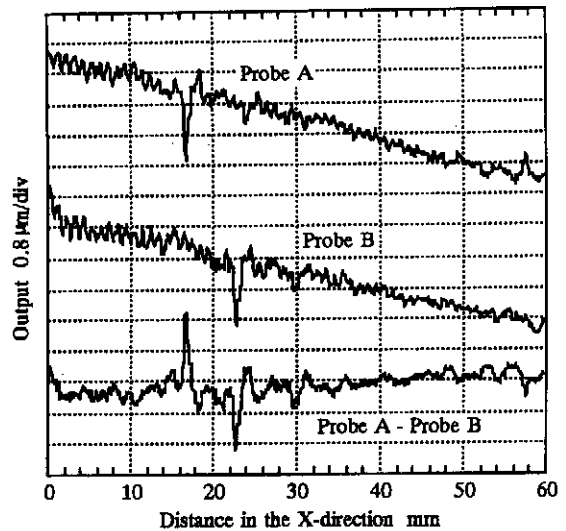


図6 変位計の出力データ

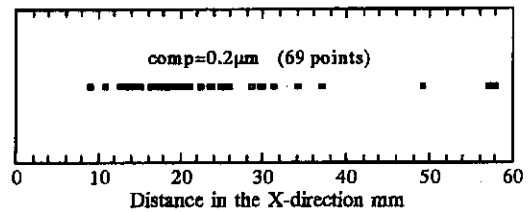


図7 基準領域から除去した部分

4. 実験

4.1 測定システム

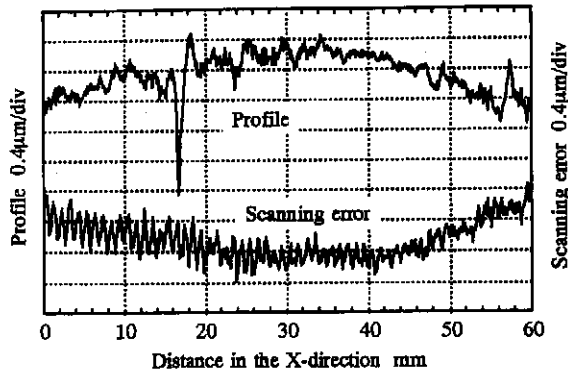
図5に測定システムを示す。2本の変位計が一体となった光学式センサを用いる。変位計の先端開口（スポット径）は2mmであり、プローブ間隔は6mmである。変位計の分解能は0.1mmである。センサはモータ駆動の一軸ステージに置かれ、空間的に固定された試料を走査する。位置決めはモータに内蔵されているエンコーダの信号を用いる。

4.2 測定結果

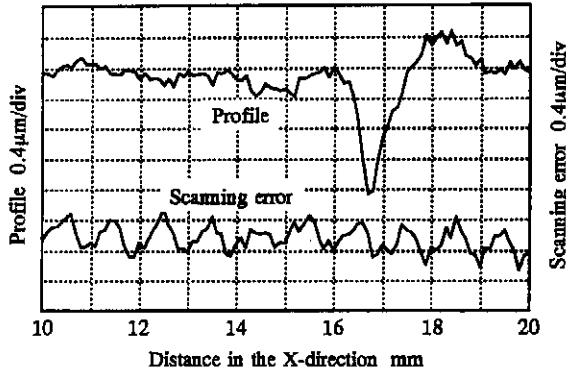
図6に変位計の出力データを示す。測定範囲は60mmであり、サンプリング間隔は0.1mmである。17mm付近では、リップル的な変化がある。その変化は2本の変位計の出力にプローブ間隔分の距離だけずれて現われているので、ステージの移動誤差によるものではなく、傷などによる形状成分であることが分かる。そのリップルは不連続的な形状である。

節3に示した手法を用いて合成法による形状処理を行った。図7に本手法を使って、基準領域から除去した部分を示す。しきい値は変位計の分解能を考慮して0.2mmにした。高周波変動の部分が基準領域から除去されたことが分かる。

図8に合成法によって求められた形状及び単独の変位計からその形状を除いたステージの運動誤差を示す。図8(a)には全測定範囲の結果を示し、図8(b)には10mmから20mmの範囲の結果を拡大して示す。リップル形状がしっ



(a)



(b)

図8 合成法による処理結果

かりと表現されていることが分かる。また図9、10にそれぞれ図8(a)に示す形状及び移動誤差の周波数分布を示す。プローブ開口で決まるカットオフ波長(約1mm)⁹⁾まで形状の波長成分が検出できていることが分かる。またステージのボールネジの送りと同周期(1mm)の移動誤差も検出されている。これによって、形状と運動誤差は正しく分離して求まったことが分かる。

5. 結 言

以上の結果をまとめると次のようになる。

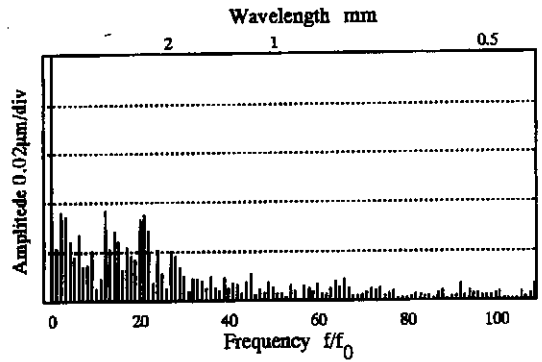
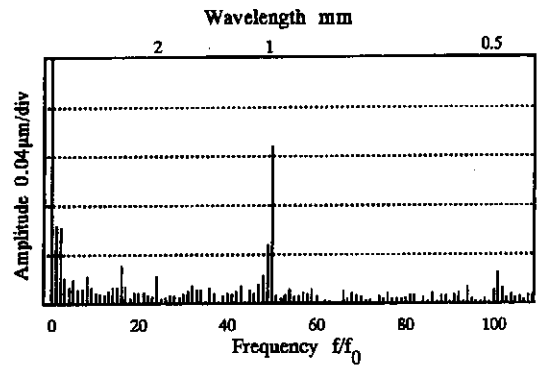
(1) 合成法の処理において、最適な基準領域を自動的に選択できる手法を提案した。この方法を用いることによって、形状精度の悪い点を基準領域から除去することができ、またより多くの形状精度の高い点を基準領域に選ぶことができる。その結果、プローブの分解能や安定性で決めた形状測定精度の限界まで形状を正しく評価することができる。

(2) 光学式センサを用いて、不連続成分を含む一般形状及び走査ステージの運動誤差の測定を行った。本研究の手法を適用することによって、形状と運動誤差を正しく分離し、表現することができる。

(3) 本研究の手法が圧延ロールのインプロセス真直度測定に適用可能なことが確認された。

謝 辞

本研究を実施することにあたり、天田金属加工機械技術振興財団から助成を受けたことを記し、謝意を表します。

図9 形状の周波数分布 ($f_0=1/51.2\text{mm}$)図10 運動誤差の周波数分布 ($f_0=1/51.2\text{mm}$)

参考文献

- 1) 田中宏明, 佐藤壽芳: 逐次2点真直度測定法の基本的な特性に関する研究, 日本機械学会論文集(C), 48-436 (1982), 1930-1935.
- 2) 小尾 誠, 古川 進: 逐次点測定法による真直度測定の考察, 日本機械学会論文集(C), 57-542 (1991), 3197-3201.
- 3) 田村洋一, 平卯太郎, 坂本貴保: 逐次多点法による表面プロフィール計測方法, 計測自動学会論文集, 25-5 (1989), 509-516.
- 4) Timothy R. Corle and Gordon S. Kino: Differential interference contrast imaging on a real time confocal scanning optical microscope, Applied Optics, 29-26 (1990), 3769-3774.
- 5) G.makosch and B.Drollinger: Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer, Applied Optics, 23-24(1984), 4544-4553.
- 6) 清野 慧: ソフトウェア基準法による形状計測, 精密工学会春季大会講演論文集, (1987), 168-169.
- 7) 清野 慧, 奥山栄樹: 平面のうねり形状の測定に関する研究(第2報), 精密工学会誌, 54-3 (1988), 513-518.
- 8) 清野 慧, 高 偉: 多点法によるソフトウェアデータムとその誤差評価, 日本機械学会論文集(C), 58-7 (1992), 2262-2267.
- 9) 清野 慧, 高 偉, 鎌田 治: 鏡面形状のオンマシン測定に関する研究, 精密工学会誌, 58-2 (1992), 247-252
- 10) 永田 努, 大堀真敬ほか: 逐次2点法を用いた超精密真直度に関する研究-補間測定による高精度化の試み, 日本機械学会論文集(C), 57-542 (1991), 3330-3304.
- 11) 清野 慧, 大垣英章: ソフトウェアデータムによる段差形状の測定, 精密工学会誌, 59-8 (1993), 1319-1324.