

圧延材の熱間本数カウント技術

高橋信幸*¹, 渡邊 光*², 森山 稔*¹

Counting Technology of Hot-Rolled Bars

Nobuyuki TAKAHASHI, Hikaru WATANABE and Minoru MORIYAMA

Synopsis

Number counting systems for round steel bars produced by rolling lines are of great importance in the field of in-process inventory management. Many steel companies, however, have installed number counting systems in static and specific environments. Development of a number counting system for high-temperature bars and bars that are conveyed is much more difficult because of the risk of misjudgment with conventional technology. In this paper, we developed number a counting system that can handle such difficult situations. The following studies were conducted.

- (1) Non-contact measurement method for hot round bars and round bars that are conveyed.
- (2) Counting algorithm based on cross-sectional profile data from round steel bars.
- (3) Improved robustness against misalignments of round bar material and disturbances to measured values.

Furthermore, our system is applicable to all shapes of steel products, not only round steel bars.

1. 緒 言

圧延ラインにおいて製造される丸棒材は、客先要求により、材質、寸法、長さなどが異なるため、識別管理を目的とした本数カウント（以下、カウントという）を実施する必要がある。そのため、装置化が求められているが、Fig. 1 に示すような、自動カウントが困難な丸棒材（以下、困難材という）への対応は遅れており、作業者の目視カウントで対応しているケースも多い。しかし、目視カウントは作業負荷が高く、生産ロス、誤カウントの発生が懸念されるため装置化が望ましい。

カウントの装置化は、画像処理による方法^{1), 2)}、3D 断面形状データ（以下、形状データという）を用いる方法³⁾が知られている。しかし、画像処理による方法は、

2D 画像からカウントを行うため、3D 構造の把握が必要となる丸棒材の重なりや、端曲がりなどの困難材に対して、カウントの信頼性に欠ける。

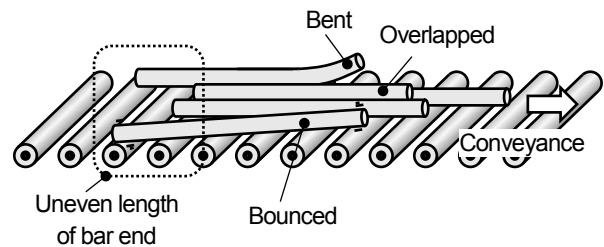


Fig. 1. Targets that are difficult to count automatically.

そこで、本稿では困難材に対し、形状測定器から取得した形状データを用いるカウント方法を検討した。以下 3 点の検討結果について述べる。

2022年 4月 20日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)星崎工場 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

- (1) 測定方法の検討
- (2) カウント方法の検討
- (3) ロバスト性向上の検討

2. 開発仕様

2.1 測定対象材

Table 1 に測定対象材を示す。装置は搬送中の丸棒材をカウントすることとし、丸棒材のサイズは事前に測定されているため既知とする。

Table 1. Measurement target.

Item		Specification
Target		Hot-rolled round bar
Conveying speed		1 m/s.
Material size	Diameter	$17 \leq \Phi \leq 60$ mm
	Length	$3000 \leq L \leq 6000$ mm
Material temperature		0 - 1000 °C
Maximum number of counts		20

2.2 形状測定器設置位置

Fig. 2 に設置予定の圧延ラインと形状測定器設置位置、Fig. 3 に設置位置詳細をそれぞれ示す。形状測定器は、設備制約により搬送ラインから 600 mm の高さに設置し、直下を通材する丸棒材全長分の形状データを取得する。

Table 2 に形状測定器の測定仕様を示す。なお、フレームレート、測定分解能については、アルゴリズム検討のための暫定値とした。

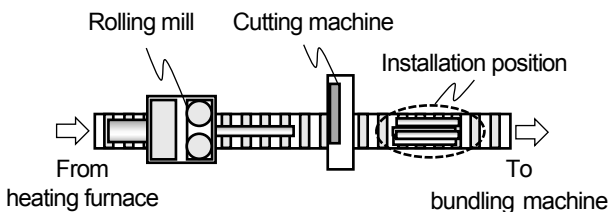


Fig. 2. Overview of rolling process and measurement position.

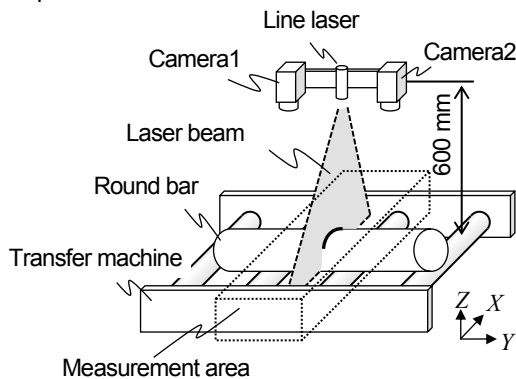


Fig. 3. Configuration of shape measuring equipment.

Table 2. Measurement specification.

Item		Specification
Framerate		20 fps
Measurement area	X, Y	1000x100 mm
	Z	100 mm
Measurement resolution	X, Y	0.5 mm
	Z	1 mm

3. 測定方法の検討

一般的な 3D 形状測定手法は、接触式と非接触式に大別されるが、接触式は測定に伴う表面きずの発生が懸念されるため、非接触式が望ましい。

非接触式での形状測定手法としては、光切断法^{4)~7)}や TOF (Time Of Flight) 法^{8)~10)}などが知られており、同手法を用いるセンサが多く市販されている。

しかし、光切断法の較正は特殊な治具が必要となるため、運用時の較正作業が煩雑となる。また、TOF 法は測定速度が遅いため、搬送中の丸棒材に対する動的カウントに適していない。

その他の形状測定手法として、ラインレーザとステレオカメラを組み合わせた形状測定手法（以下、ステレオカメラ法という）が報告されている^{11)~13)}。ステレオカメラ法は、熱間材表面へラインレーザをスキャンさせ、ステレオカメラにより表面形状を連続測定する手法である。同手法は、ステレオカメラの較正のみで完了するため、光切断法と比較し較正が容易である。従って、本稿では形状測定手段としてステレオカメラ法を採用することとし、以降に概要を説明する。

Fig. 4 にステレオカメラ法の概略を示す。形状測定器はラインレーザとステレオカメラによって構成され、ラインレーザは、丸棒材表面に断面形状に沿った輝線を生成するために使用される。

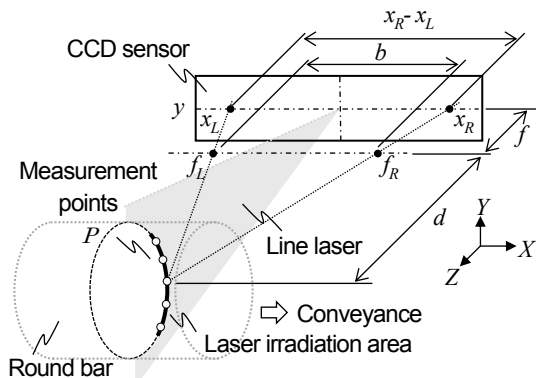


Fig. 4. Principle of stereo camera measurement method.

ステレオカメラ法は、2台のカメラにて同一の測定点 P を撮像し、CCD センサへ投影された測定点 x_R, x_L から、測定点 P までの距離 d を測定する手法である。(1) 式に示すように、測定点 P までの距離 d はセンサ面上の測定点 x_R, x_L により決定される。したがって、カメラにより撮像されたラインレーザの輝線から、丸棒材表面の形状データを測定することができる。

$$d = \frac{b \cdot f}{(x_R - x_L) - b} \quad (1)$$

- b : カメラ間距離
- f : 焦点距離
- d : 測定点 P までの距離
- x_R, x_L : センサ面上の測定点
- f_L, f_R : レンズ焦点

4. カウント方法の検討

形状測定器より取得した形状データから、カウントを行う基本的なアルゴリズムを説明する。なお、検証の対象とする丸棒径は、小径となるほど、データ点数の減少や測定誤差影響の増加などの理由により困難性が増すため、対象材の最小径である $\phi 17 \text{ mm}$ を用いた。

4. 1 形状データと本数について

Fig. 5 に、丸棒材 3 本の断面形状データを示す。各丸棒材頂点付近の最大値を局所最大値と定義すれば、局所最大値の個数が丸棒本数となる。しかし、外乱による形状データ不良や頂点付近のデータ欠損が生じた場合、局所最大値の個数は丸棒本数と必ずしも一致しない。

そこで、既知である丸棒径と形状データとの誤差を利用したカウント手法を検討した。

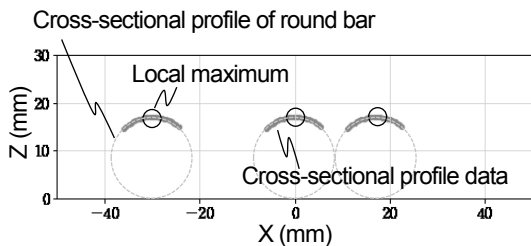


Fig. 5. Example of measured shape data.

4. 2 丸棒径に対する形状データの誤差

Fig. 6 に示すような丸棒径 $\phi 17 \text{ mm}$ の基準円を考えると、基準円と形状データを形成する各測定点との誤差が算出できる。また、この誤差は基準円と丸棒材の中心が一致する位置で最小となることがわかる。

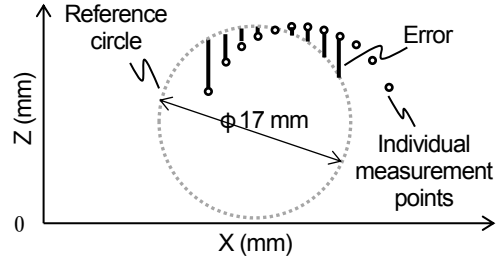


Fig. 6. Error between reference circle and measurement point.

Fig. 7 に誤差の算出方法、(2)、(3) 式に算出式をそれぞれ示す。(3) 式に示すように、平均誤差 e_m は基準円位置 x_r によって決まる。したがって、 x_r を変化 (X 方向へ走査) させながら、平均誤差 e_m を算出することで、形状データに対する誤差の分布を得ることができる。

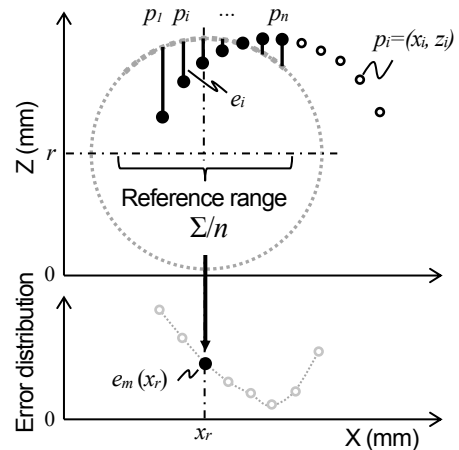


Fig. 7. Explanation of calculation method.

$$e_i(x_r) = z_i - \left\{ \sqrt{r^2 - (x_i - x_r)^2} + r \right\} \quad (2)$$

$$e_m(x_r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i(x_r)| \quad (n > 0) \quad (3)$$

r, x_r : 基準円の半径, 中心位置

(x_i, z_i) : 測定点 p_i の X, Z 座標

n : 参照範囲内の測定点数

e_i : 各測定点での誤差

なお、参照範囲は、形状測定器が有効な形状データを測定できる範囲と定義する。また、参照範囲は対象材の曲率、温度、肌状態などにより変わるため、一意に決定できないハイパーパラメータである。本稿の例では丸棒径の 70% とし、 $17 \times 0.7 \approx 12 \text{ mm}$ より、 $\pm 6 \text{ mm}$ を参照範囲として設定した。

4. 3 誤差分布の局所最小値と本数

Fig. 8 に、Fig. 5 の形状データから求めた誤差分布を示す。丸棒材の本数は、形状データの局所最大値に対応

する、誤差分布の局所最小値の個数と一致する。従って、局所最小値の個数をカウントすれば本数をカウント可能であるが、一般的な最小値検出処理のみでは、点化する複数の局所最小値をカウントすることは難しい。

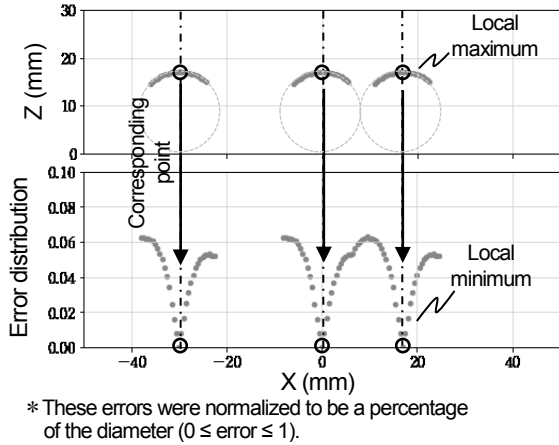


Fig. 8. Cross-sectional profile data and error distribution.

4. 4 局所最小値のカウント方法

最小値検出処理と、任意範囲のデータを除外する処理（以下、マスクという）を組み合わせることで、局所最小値を正確にカウントする方法を考案した。Fig. 9に処理例を示し、概要を以下に説明する。

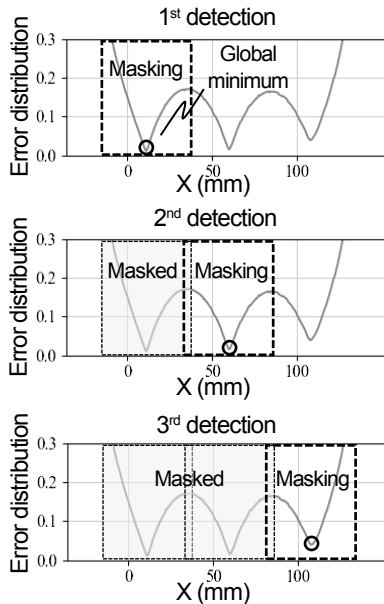


Fig. 9. Description of the counting process.

まず、誤差分布の最小値を検出する。ここで、検出された最小値は、複数ある局所最小値の1つである点に注目し、丸棒材はX方向で重複しないと仮定すれば、検出された最小値周辺を丸棒径に相当する範囲でマスクすることができる。

次に再度、最小値を検出する。この時、直前のマスク操作により、検出済みの局所最小値周辺が取り除かれているため、ダブルカウントすることなく次の局所最小値を検出できる。従って、以上の操作を誤差分布のすべてがマスクされるまで繰り返し実行した回数が本数となる。

5. ロバスト性向上の検討

ここまで、基本的なカウントアルゴリズムを紹介したが、実際の測定環境では、Fig. 10に示すように、丸棒材の曲がりや搬送中の跳ねなどによって、高さ方向のズレが発生することが考えられる。また、形状測定器の測定誤差も無視できない。

しかし、前述のアルゴリズムは、それらが考慮されておらずロバスト性が高いとはいえない。そこで、アルゴリズムのロバスト性向上について以降に説明する。

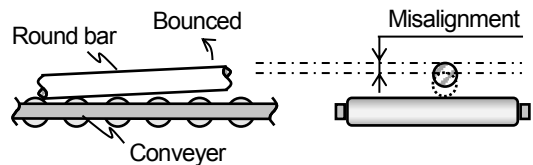


Fig. 10. Height misalignment factors.

5. 1 高さズレの影響

Fig. 11に許容する最大高さズレとして、丸棒径の半径分+8.5 mmを丸棒材RB2へ加えた誤差分布を示す。なお、許容する高さズレ量は任意であるが、本稿の例では測定対象の丸棒材の半径と設定した。

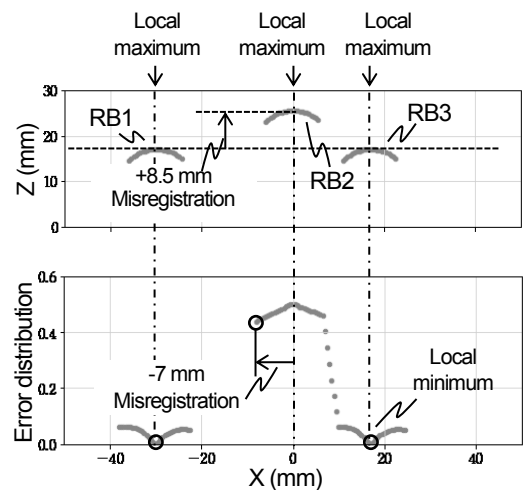


Fig. 11. Explanation of misregistration of the height direction.

Fig. 11 に示すように、高さズレを加えたRB2の平均誤差は、頂点付近で最大なり、最小値は頂点からX方向に-7 mmズレていることがわかる。

Fig. 12 に Fig. 11 の誤差分布に対するカウント結果（マスク処理結果）を示す。Fig. 12 に示すように、高さズレを持つ丸棒材の誤差分布は凸形状となり、局所最小値が中心位置からズレてしまう。その結果、マスク残り（マスク範囲の不適）が発生し、1本分多く局所最小値を誤カウントしてしまう。

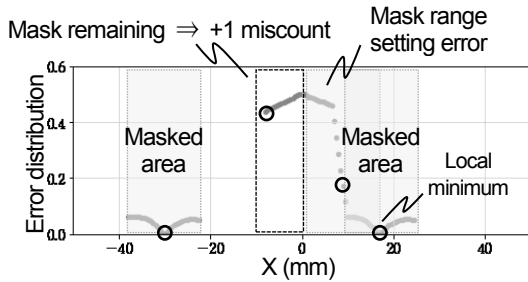


Fig. 12. Description of the miscount caused by the remaining mask.

5. 2 局所最小値の位置ズレ要因

Fig. 13, 14 に局所最小値の位置ズレ要因を示す。まず、Fig. 13 に示すように、基準円が離れている状態を考えると、図中黒点で示すように参照範囲内の測定点は少なく誤差は小さい。

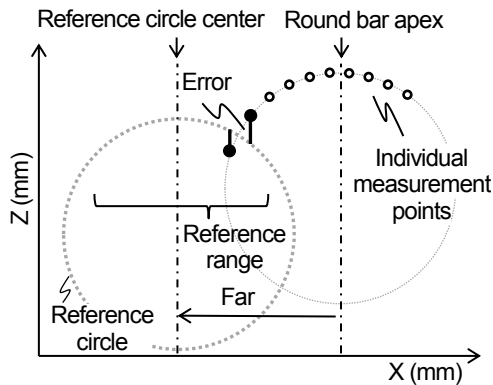


Fig. 13. Condition where there is little overlap between the reference circle and individual measurement points.

次に、Fig. 14 に示すように、基準円が頂点へ近づくと、参照される測定点が増加し、誤差が大きくなる。丸棒材が適切な高さ位置に存在していれば、基準円が頂点に近づくとつれて誤差は小さくなるため、誤差分布は凹形状となる。しかし、高さズレがある場合は、その誤差が大きくなるため、誤差分布は Fig. 12 のような凸形状となる。よって、前述の局所最小値の位置ズレに伴うマスク残りにつながる。

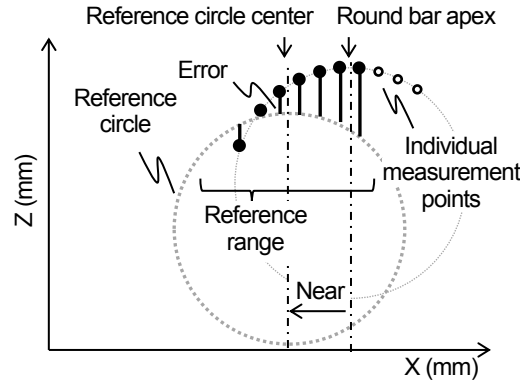


Fig. 14. Condition for the reference circle to approach the vertices of individual measurement points.

5. 3 局所最小値の位置ズレ改善

局所最小値の位置ズレに伴うマスク残りについて、参照範囲内の測定点数に応じた補正係数（以下、ペナルティ係数という）を平均誤差の算出に導入することで改善を図る。

(4) 式にペナルティ係数 $penalty(n)$ 、(5) 式にペナルティ係数を考慮した平均誤差 e'_m をそれぞれ示す。(4) 式に示すように、ペナルティ係数は、測定点数 n に反比例するので、参照範囲内の測定点数が少ないほど平均誤差の値は大きくなり、測定点数が多いほど平均誤差の値は小さくなる。その結果、誤差分布は凸形状から凹形状となるため、局所最小値の検出とマスク操作の繰返しが正確に実施され、誤カウントが低減する。ここで、 N_{max} は参照範囲内に存在する最大測定点数である。例として、参照範囲 12 mm、分解能 0.5 mm とした場合、 $N_{max} = 12 \div 0.5 + 1 = 25$ となる。また、 a は、形状測定器の分解能や計測誤差、丸棒材の径、搬送中の高さズレなどにより決まるハイパーパラメータであり、本稿では $a = 5$ に設定した。

$$penalty(n) = aN_{max}/n \tag{4}$$

$$e'_m(x_r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \times penalty(n) \tag{5}$$

N_{max} : 最大測定点数 ($N_{max} > 0$)

a : ペナルティゲイン

5. 4 改善効果の確認

Fig. 15 にペナルティ係数を考慮した誤差分布を示す。ペナルティ係数の導入により、誤差分布の局所最小値のX方向のズレは、-7 mm から -2 mm へと改善することを確認した。また、誤差分布の形状が凸形状から凹形状となることがわかる。

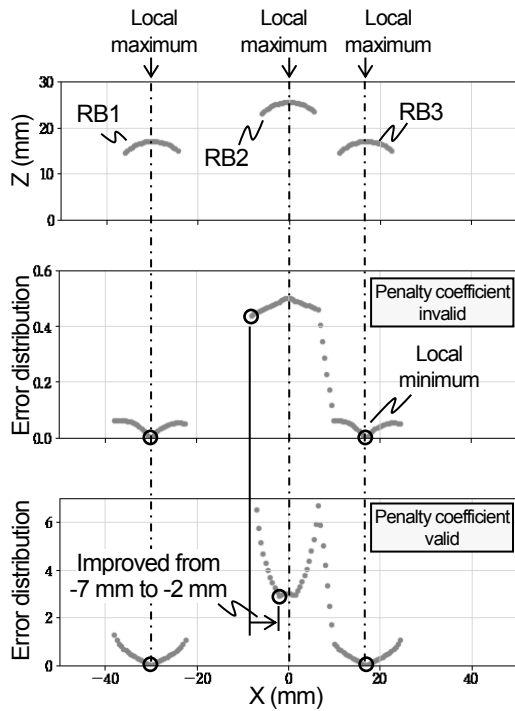


Fig. 15. Error distribution of misregistration of the height direction.

なお、改善後も位置ズレが -2 mm 存在するが、マスク範囲を拡大し適用することで対応することとした。丸棒径 +20 % マスク範囲を拡大した結果、カウント精度に影響しないことを確認した (Fig. 16)。

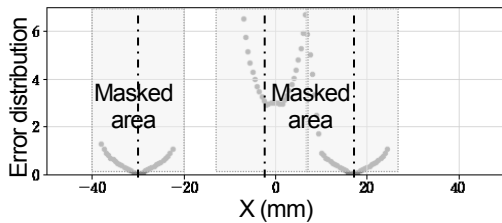


Fig. 16. Mask result with penalty factor enabled.

5. 5 外乱に対する改善効果

次に、外乱が加わった場合について検討する。Fig. 17 に、外乱を1点加えて算出した誤差分布を示すが、外乱によって疑似的な最小値が現れ、誤カウントの要因となることがわかる。

しかし、ペナルティ係数の導入により、疑似最小値の平均誤差は 10 となり、ペナルティ係数を考慮しない場合の平均誤差 0.06 と比較して値は大きく異なる。そこで、誤差分布へしきい値 th_e を設け、 th_e 超える値についてはカウントの対象外とすることで、外乱を除去できる。

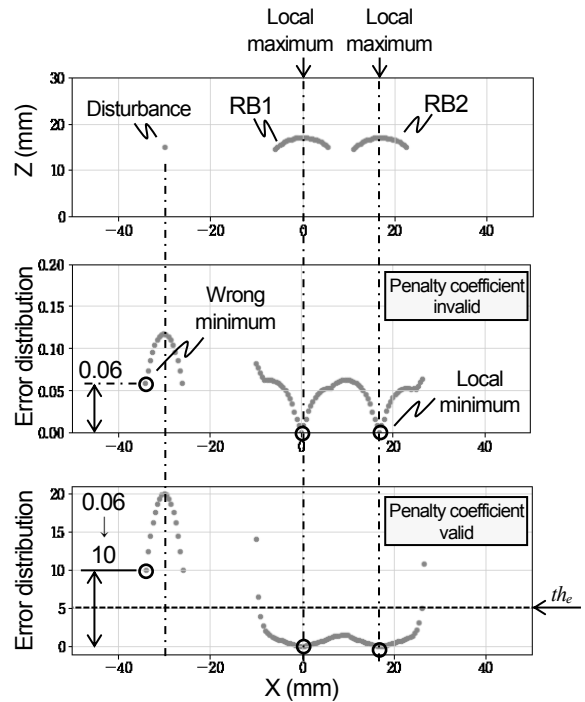


Fig. 17. Error distribution considering disturbance factors.

なお、しきい値 th_e は外乱を含まない正常な形状データの誤差分布を参考に設定すれば良く、本稿ではしきい値 $th_e=5$ に設定した。

5. 5 丸棒材の重なり判定

高さズレの極端な例として、丸棒材の重なりについての検討を実施した (Fig. 18)。丸棒材の重なりは、丸棒材 RB2 の直下に隠れた丸棒材 RB1 の有無を判断できないという問題点がある。

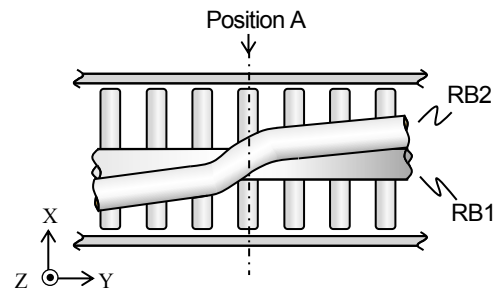


Fig. 18. Overlap of bars.

Fig. 19 に、Fig. 18 における位置 A での形状データを示す。Fig. 19 に示すように、重なり状態にある RB2 の断面位置 (Z 方向) は、RB1 と比較して明らかに高い。したがって、丸棒径を基準とする高さにしきい値 th_h を設けることで、丸棒材の重なりを判定することとした。

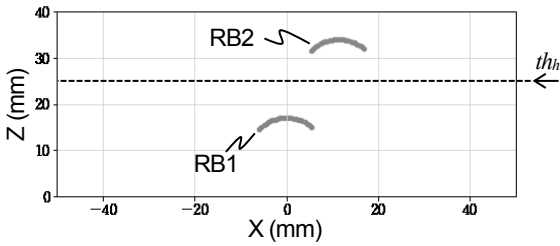


Fig. 19. Cross-sectional profile shape data with overlapping bars.

なお、しきい値 th_h は、対象材の曲がり、搬送速度、搬送ラインの状態などにより設定されるハイパーパラメータである。本稿では、丸棒径の 150 %、 $th_h = 17 \times 1.5 = 25.5 \text{ mm}$ と設定した。

6. 本数決定方法

ロバスト性向上についての最後の検討として、搬送中の丸棒材全長より取得した複数のカウント結果から、最終的な本数を決定する方法について述べる。

本数の決定方法としては、複数あるカウント結果の最大値を採用する方法が考えられる。しかし、除去できない外乱や想定外の丸棒材挙動などにより発生した異常値が含まれる場合、誤カウントの要因となる。

例として、Fig. 20 に丸棒材 10 本における通材開始から終了までのカウント結果を示す。最大値を本数とした場合、図中黒点で示す異常値が最大値となるため、11 本と誤カウントしてしまうことがわかる。

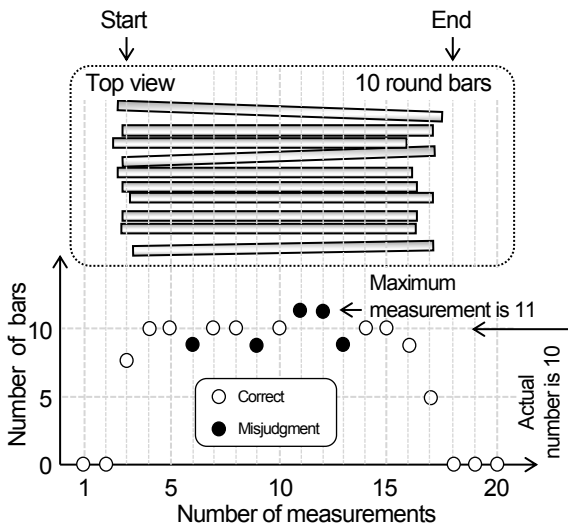


Fig. 20. Count result.

そこで、本稿は確率的確からしさをもって本数決定を行う。Fig. 21 に Fig. 20 の本数に対するヒストグラムを示す。ヒストグラムから最頻値が 10 本、相対度数 47 %

であることがわかり、信頼できるとするしきい値を $th_{rf} = 30 \%$ とすれば、最頻値 10 本は信頼できる本数と判断できる。また、しきい値 th_{rf} を下回る場合は、異常な本数結果と判断することで誤カウントを抑制できる。

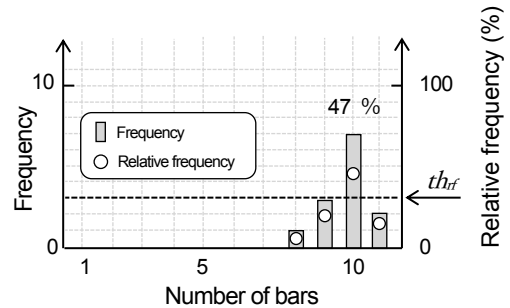


Fig. 21. Histogram of count result.

なお、しきい値 th_{rf} は丸棒材の全長や端部不揃いの程度によって決まるハイパーパラメータであり、本稿ではしきい値 $th_{rf} = 30 \%$ に設定した。

7. テスト結果

7. 1 製作した試作機

Fig. 22 に Fig. 2, 3 で示した圧延ラインへ仮設置した試作機を示す。試作した形状測定器のスペックに関しては、Table 2 に示した暫定値を使用することとした。また、レーザの波長、パワーの選定方法に関しては、先行する文献 11) のとおりである。

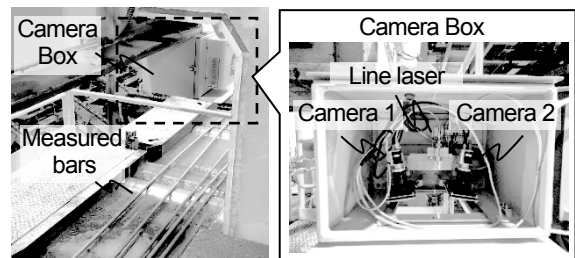


Fig. 22. Prototype equipment.

7. 2 テスト結果

テスト結果は、Table 1 に示す測定対象材について、309 回のカウントを実施したところ、誤カウントは 0 回であった。

以上より、高いロバスト性を持ったカウントが実現できることを確認した。

8. 結 言

本稿では、従来困難であった熱間材かつ搬送中の丸棒材に対応したカウント手法を紹介した。

- (1) 熱間かつ搬送中の丸棒材の検出方法として、非接触測定可能なラインレーザを用いたステレオカメラ法により、丸棒材の断面形状を測定する形状測定器を紹介した。
- (2) 上記の形状測定器を用いて測定した丸棒材の断面形状データと、既知である圧延寸法との誤差から、カウントを行うアルゴリズムを考案した。
- (3) 丸棒材の位置ズレや外乱に対し、ペナルティ係数を導入した結果、ロバスト性を向上させることができた。

(文 献)

- 1) 大同特殊鋼(株): 特許第 5077093号(2012).
- 2) 大同マシナリー(株)ホームページ: http://www.dm-daido.co.jp/pages/product_new_business_01.html.
- 3) 山陽特殊製鋼(株): 特開平 9-305737(1997).
- 4) 金田憲明, 成田十一, 大滝雄一郎, 本間智之, 渡邊健次郎, 伊関陽一郎, 大野宏: 工業技術研究報告書, 34(2005), 44.
- 5) 高井利久: 電気製鋼, 79(2008), 4, 305.
- 6) 濟木弘行, 丸茂康男: 天田財団 助成研究成果報告書, 17(2004), 46.
- 7) 谷口慶治: 画像処理工学(応用編), 共立出版, 1999, 140.
- 8) 橋本祐介, 村上憲一, 谷口研二: 映像情報メディア学会誌, 65(2011), 1801.
- 9) 東京貿易テクノシステム(株)ホームページ: <https://www.tbts.co.jp/product/detail.html?pdid=334>.
- 10) Leica Geosystems社ホームページ: <https://shop.leica-geosystems.com/jp/buy/3d-disto/3d-disto>.
- 11) 森大輔, 新美清明, 高橋信幸, 濱井拓也: 電気製鋼 88(2017), 19.
- 12) 村上慶: 画像処理アルゴリズムと実践アプリケーション, リンクス, 2008, 198.
- 13) 吉田寛和, 釜谷博行: 計測自動制御学会東北支部研究集会, 295(2015), 7.



高橋信幸



渡邊 光



森山 稔