

熱間丸棒鋼の本数カウント技術開発

片桐崇大*¹, 森山 稔*¹, 望月喬史*²

Development of Technology for Counting Hot Round Bars

Takahiro KATAGIRI, Minoru MORIYAMA and Takafumi MOCHIZUKI

Synopsis

Identification management in manufacturing is important for product inventory management and troubleshooting in response to abnormal occurrences. Special steel bars have different properties depending on the steel type, making identification management essential. Because visual identification is difficult, they are managed by counting the number of bars during production. Counting the number of bars is performed visually by operators, but due to high workload, concerns about reduced productivity, and potential errors, automation has been advancing. However, in the case of hot round bars that are conveyed, the incandescence from the bars and vibrations during the conveyance process cause noise in measurement equipment, leading to concerns about counting errors, and thus automation has not progressed. In this paper, to develop a counting system specifically designed for hot round bars, studies on the following were conducted:

- (1) Selection of a non-contact method and optical equipment for hot round bars.
- (2) Design of a counting algorithm for data containing noise.
- (3) Development of a prototype and its counting results.

1. 緒言

製造業における識別管理は、製品を各製造工程で特定し追跡するため、在庫管理の効率化や問題発生時の原因究明において重要な役割を果たす^{1), 2)}。

特殊鋼棒鋼は鋼種ごとの特性が大きく異なるため識別管理が求められるが、形状や色の差異はほとんど無く、外観による識別は極めて難しい。大同特殊鋼(株)では識別管理の1つとして、整列した丸棒鋼に対する本数カウント（以下、カウントという）に取り組んでいる³⁾。

カウントは、製造工程において丸棒鋼を前工程から受け入れる際や、次工程へ払い出す際に実施され、製造予定の本数と照合する。これにより、本数から丸棒鋼の識別管理が可能となるため、全工程でカウントが必要とな

る。カウントは作業者の目視により実施されるが、作業負荷が高く、生産効率の低下や誤カウントの発生が懸念されるため、自動化が進められている。しかし、熱間材の搬送工程では、赤熱による自発光が計測のノイズとなり、計測結果に影響を与えるため、自動化は困難である。そのため、熱間材を対象としたカウントの自動化が求められている。

カウントの自動化には、画像処理⁴⁾や形状処理⁵⁾による方法がある。しかし、画像処理方法は二次元画像を用いるため、丸棒鋼に別の丸棒鋼が重なる状態（以下、重なり状態という）の判定が難しく、結果の信頼性に欠ける。形状処理方法においては、搬送時の振動や熱間材の自発光によるノイズが原因で、実際の形状と計測した形状に誤差（以下、形状不良データという）が生じる場

2024年9月25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)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

合、誤カウントの発生が懸念される。

そこで、形状不良データに対する誤カウントの発生を解決するため、形状処理によるカウント方法を検討した。

2. 開発仕様

本稿では、熱間丸棒鋼を対象に、形状不良データに対してカウント可能で、重なり状態の判定ができる方法について、下記3点を検討した。

- (1) 熱間材を対象とした計測方法と光学機器の検討
- (2) 形状不良データに対するカウント方法の検討
- (3) 試作機の開発とカウント結果

Table 1 に開発仕様を示す。計測対象は最高温度が約1000℃の熱間丸棒鋼で、カウント装置は、設備制約より丸棒鋼から2600mmの高さに設置する。

Table 1. Development specification.

Target	Hot round bar
Round bar diameter	$45 \leq \phi \leq 90$ mm
Material temperature	≤ 1000 °C
Working distance	2600 mm
Accuracy of target counting	100 %
Accuracy of overlapping detection	100 %

3. 計測方法と光学機器の検討

Fig. 1 に形状データを取得するための形状計測器を示す。形状計測器は2台のカメラ、ラインレーザ、特定波長域のみを透過させるバンドパスフィルタの光学機器で構成される。形状計測器の開発にあたって、①計測方法、②光学機器を検討した。

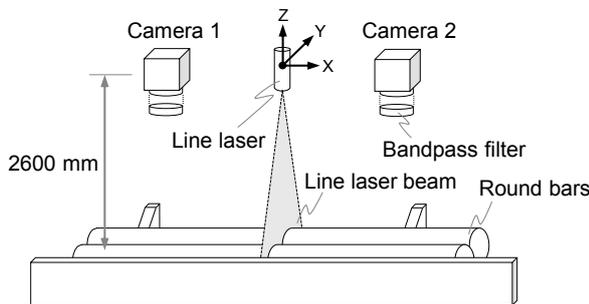


Fig. 1. Configuration of shape measuring equipment.

3. 1 計測方法の検討

熱間材を非接触により形状計測する方法を検討した。なお、接触式による熱間材の形状計測は機器の耐久性が課題となるため、非接触式により計測することとした。

3. 1. 1 非接触による形状計測方法の比較

計測方法を熱間材の自発光に対する耐ノイズ性と、運用における較正の容易さの観点から選定した。Table 2 に非接触による形状計測方法の比較を示す。形状計測方法は、TOF (Time Of Flight) 法⁶⁾、光切断法⁷⁾、ステレオカメラとラインレーザを組み合わせた方法⁸⁾ (以下、ステレオカメラ法という) がある。

TOF 法は熱間材の自発光成分がセンサに干渉し計測が困難となるため、耐ノイズ性が弱い。一方で、光切断法やステレオカメラ法は高出力レーザや、バンドパスフィルタの使用により、耐ノイズ性を確保できる。

光切断法は較正に寸法が既知の物体を用いるため⁹⁾、運用時の較正作業が煩雑になる。一方で、ステレオカメラ法においてはステレオカメラの較正のみで完了するため¹⁰⁾、光切断法よりも較正作業が容易である。

以上より、形状計測方法としてステレオカメラ法を採用した。

3. 1. 2 ステレオカメラ法の計測原理

Fig. 2 にステレオカメラ法の計測原理を示す。本方法は計測対象にラインレーザを照射し、ステレオカメラによりラインレーザの照射位置座標を算出する。これにより、丸棒鋼の形状を取得することができる。

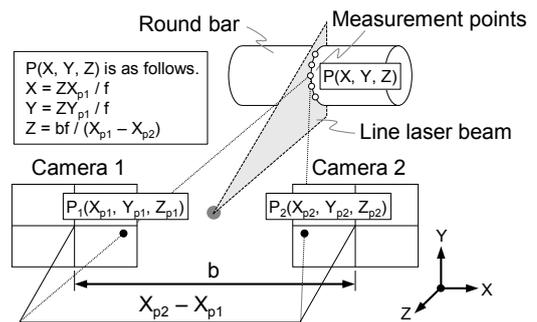


Fig. 2. Principle of stereo camera method.

Table 2. Comparison of non-contact shape measurement methods.

Non-contact shape measurement method	Noise immunity	Calibration	Evaluation
TOF (Time Of Flight)	Poor	Simple	Not adopted
Light section	Average	Difficult	Not adopted
Stereo camera with line laser	Average	Simple	Adopted

3. 2 光学機器の選定

計測で用いる光学機器は、カメラ、ラインレーザ、バンドパスフィルタである。そのため、これらの光学機器を選定した。なお、カメラの選定方法に関しては文献11のとおりである。

3. 2. 1 ラインレーザ

ステレオカメラ法におけるラインレーザの役割は、撮像した画像からラインレーザ光を検出させ、ステレオカメラの対応点とすることである。今回、ラインレーザ光の検出には、熱間材の自発光とラインレーザ光の弁別が重要となる。そこで、ラインレーザの発振波長と出力について検討した。

まず、ラインレーザの発振波長を検討する。熱間材の自発光波長域は赤外をピークに可視光域まで広がるため、自発光と赤色ラインレーザ光の弁別は難しい。また、一般的なカメラは緑色波長域に高い感度がある。そこで、本開発では緑波長のラインレーザを使用することとした。

次に、ラインレーザの出力について検討する。文献12では、出力が35 mWの大出力レーザと赤外カットフィルタを使用して自発光とレーザ光を弁別している。しかし、大出力レーザは目や皮膚に対して重大な損傷を与えるため、厳格な安全対策が必須であり、保守や運用が煩雑になる。そこで、安全対策が不要な1 mWの低出力ラインレーザを使用することとした。

次に、低出力ラインレーザ光を検出するため、バンドパスフィルタを選定する。

3. 2. 2 バンドパスフィルタ

バンドパスフィルタは特定の波長域のみを透過させる光学フィルタで、カメラレンズの直前に装着することにより、熱間材が放つ光の波長域を遮断する。そこで、熱間材の自発光とラインレーザ光の弁別が可能なバンドパ

スフィルタの透過波長域を選定するため、ラインレーザ光の検出実験を実施した。

検出実験では、異なる透過波長域のバンドパスフィルタを使用し、低出力レーザを熱間丸棒鋼に照射したときのSignal Noise Ratio（以下、S/Nという）を評価した。Table 3に実験条件を、Fig. 3に使用したバンドパスフィルタの透過波長域とレーザの発振波長、熱間材の自発光域をそれぞれ示す。

Table 3. Experimental conditions.

Material temperature		1000 °C
Line laser	Wavelength	525 nm
	Power	1 mW
Transmission wavelength range of bandpass filter		525 ± 50.0 nm 525 ± 12.5 nm

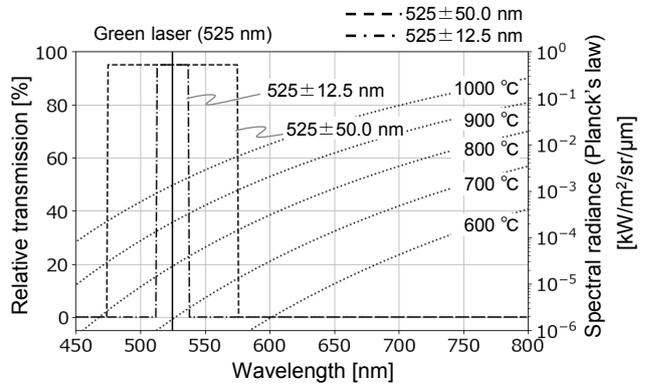


Fig. 3. Relation between transmission wavelength range of bandpass filter, laser wavelength, and spectral radiance.

Table 4に実験結果を示す。バンドパスフィルタを使用しない場合はレーザ光の検出が困難となるが、バンドパスフィルタを使用する場合にはS/Nが高くなる。透過波長域が525 ± 50.0 nmのバンドパスフィルタは、熱間材の自発光成分が残存するため、S/N ≈ 1.3となる。一方で、透過波長域が525 ± 12.5 nmのバンドパスフィルタにおいては、ラインレーザ光のみが撮像され、S/N ≈ 5.0となる。

Table 4. Experimental results.

Item	Bandpass filter		
	Without bandpass filter	525±50.0 nm	525±12.5 nm
Transmission wavelength range	-	525±50.0 nm	525±12.5 nm
Image			
Signal / Noise (S/N)	S/N ≈ 0	S/N ≈ 1.3	S/N ≈ 5.0

以上より、透過波長域が $525 \pm 12.5 \text{ nm}$ のバンドパスフィルタを採用した。

4. カウント方法の検討

前章で検討した計測機器により取得した丸棒鋼の形状データから、カウントする方法を検討した。

4. 1 カウント処理フロー

Fig. 4 にカウント処理フローを示す。形状データの取得後、形状データから丸棒鋼を同定する。そして、同定後に重なり状態を判定し、重なり状態のときカウントはせずに作業員へ異常通知する。重なり状態ではないとき、丸棒鋼の同定数をカウント本数として処理を完了する。次節以降はカウント処理フローに従って、各処理内容について説明する。

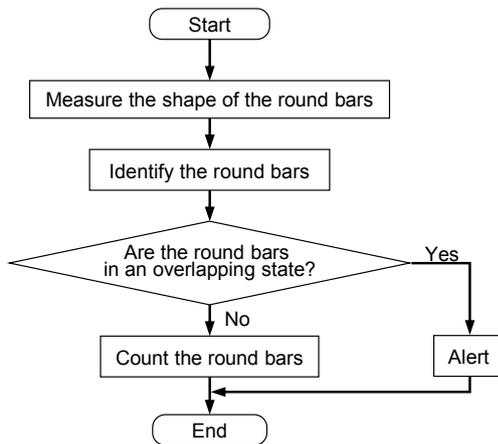


Fig. 4. Flow chart for counting the round bars.

4. 2 丸棒鋼の同定方法

形状データは、ノイズを含んだものや扁平型のような形状不良データとなることがある。文献3の形状データと丸棒鋼直径の誤差からカウントする方法は、形状不良データに対して誤カウントの発生が懸念される。そのため、形状不良データに対するカウント方法を検討した。

4. 2. 1 同定方法の基本方針

Fig. 5 に形状データ例を示す。丸棒鋼は曲率を持つため、隣接する丸棒鋼の境界はZ方向の局所最小値となる。そのため、形状データの全範囲で局所最小値の位置を探索し、その位置の間を丸棒鋼と同定することで、丸棒鋼の本数をカウントする。なお、Z方向の局所最小値は局所探索法により求める¹³⁾。

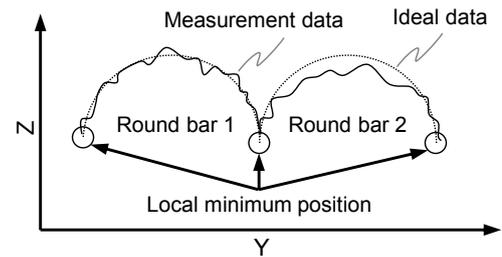


Fig. 5. Explanation of local minimum position in measurement data.

4. 2. 2 丸棒鋼境界の探索

Fig. 6 に丸棒鋼境界探索の概要を示す。具体的には、下記の順序で丸棒鋼境界を探索する。

- (1) 形状データにおけるZ方向の最大値を基準位置(以下、初期基準位置という)とする。
- (2) 基準位置のY方向正側において、任意の探索範囲でZ方向の最小値を探索する。
- (3) (2) で探索した最小値を基準位置として更新する。
- (4) 基準位置の更新がなくなるまで(2)、(3)を反復する。
- (5) 反復終了後、基準位置を初期基準位置のY方向正側における局所最小値位置とする。
- (6) 同様に初期基準位置のY方向負側における局所最小値位置を、(2)～(5)の順序で求める。

この探索処理により、各局所最小値位置の間を1本の丸棒鋼と同定できる。

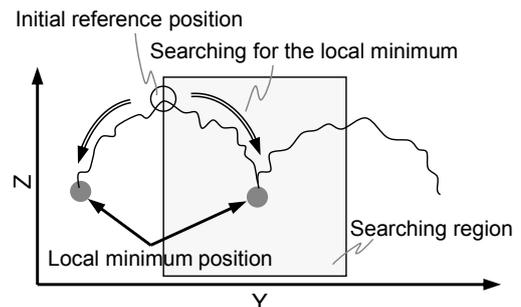


Fig. 6. Searching for the local minimum position.

次に、形状データからすべての丸棒鋼を同定する。処理の概要を Fig. 7 に示す。形状データから丸棒鋼を同定後、同定した丸棒鋼データを除外(以下、マスクという)する。そして、マスクされた形状データから再度、丸棒鋼を同定しマスクする。この処理を繰り返すことで、形状データからすべての丸棒鋼を同定する。

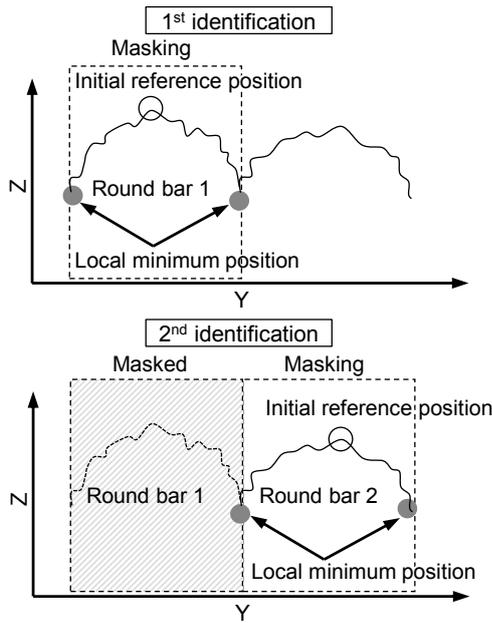


Fig. 7. Description of the identification process.

4. 2. 3 探索範囲の決定

Fig. 8 に示すように、探索範囲を、過少、または過大に定義すると、隣接する丸棒鋼境界の局所最小値位置を求めることができない。そのため、探索範囲を適切に定義する必要がある。

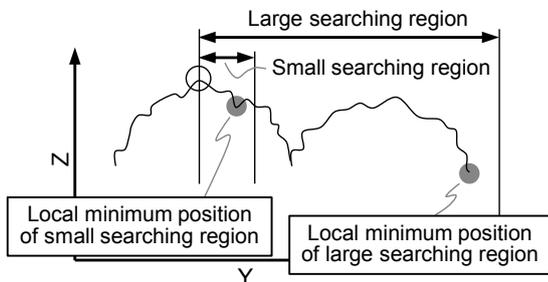


Fig. 8. Explanation of incorrect local minimum position.

丸棒鋼境界は初期基準位置から丸棒鋼直径の範囲内にあると仮定し、探索範囲を (1) 式と定義した。(1) 式に示すように、探索範囲は探索回数に反比例する。これにより、探索範囲は探索回数の増加に応じて徐々に狭くなるため、初期基準位置から最近傍にある丸棒鋼境界の局所最小値位置を求めることができる。

$$L = D / s \tag{1}$$

- L : 探索範囲
- D : 丸棒鋼直径
- s : 探索回数

ここで、(1) 式を用いて丸棒鋼境界の局所最小値位置を求めるには、下記 2 点の条件を満たす必要がある。

- ① 丸棒鋼直径は事前に計測した既知情報である。
- ② 実際の丸棒鋼直径と計測した丸棒鋼直径の誤差が限りなく小さい。

しかし、形状不良データは、実際の丸棒鋼と計測した丸棒鋼の直径に誤差が発生するため、②の条件を満たさない。そこで、(1) 式の丸棒鋼直径を変数の探索円直径とし、探索円直径を段階的に変化させることで、形状不良データに対する探索範囲を決定することとした。

4. 2. 4 形状不良データに対する探索範囲の決定

Fig. 9 に形状不良データに対する探索範囲決定の概要を示す。具体的には、下記の順序で探索範囲を決定する。

- (1) 探索円直径を用いて丸棒鋼を同定する。
- (2) 初期基準位置と検出した 2 つの局所最小値位置の三位置を通る基準円を算出する。
- (3) 基準円と形状データ間の面積と基準円間の重複面積の和を誤差面積とする。
- (4) 探索円直径を変化させ、(1) ~ (3) の処理を実施する。
- (5) 誤差面積が最小となる時の探索円直径を用いて探索範囲を決定する。

本方法により、形状不良データに対する探索範囲を決定できる。

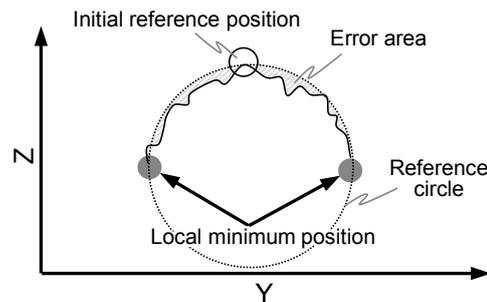
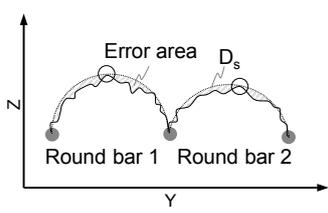
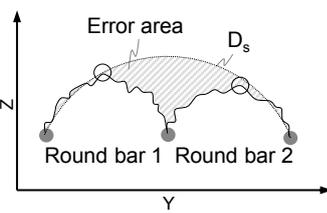
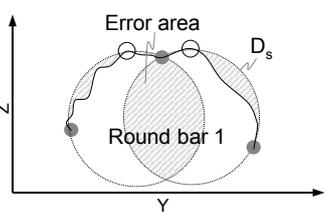


Fig. 9. Error area between reference circle and measurement data.

Table 5 に探索円直径と誤差面積の関係を示す。Table 5 の (a) より、誤差面積が小さいとき、丸棒鋼境界の局所最小値位置を求めるため、2 本の丸棒鋼を 2 本と同定する。一方、誤差面積が大きいたとき、Table 5 の (b), (c) のように 2 本の丸棒鋼を 1 本と同定、または 1 本の丸棒鋼を 2 本と同定する。このように、誤差面積が最小となる探索円直径を用いることで、形状不良データに対する適切な探索範囲を決定できる。

Table 5. Relation between search circle diameter and error area (D_s : search circle diameter).

	(a) D_s is the optimal value.	(b) D_s is the larger value.	(c) D_s is the smaller value.
Image			
Correct number	2	2	1
Count number	2	1	2
Result	OK (2=2)	NG (2≠1)	NG (1≠2)
Error area		(a) << (b), (c)	

4. 3 重なり状態の判定方法

重なり状態とは丸棒鋼に別の丸棒鋼が重なることであり、その例を Fig. 10 に示す。重なり状態のとき、丸棒鋼 RB3 の直下に隠れた丸棒鋼 RB2 の有無を判断できないため、誤カウントの発生が懸念される。そのため、形状データから重なり状態を判定する方法について検討する。

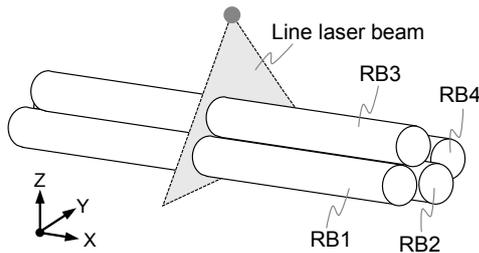


Fig. 10. Examples of overlapping bars.

Fig. 11 に Fig. 10 における重なり状態の形状データ例を示す。重なり状態にある丸棒鋼は隣接する丸棒鋼と比較し高くなる。そのため、隣接する丸棒鋼間の高さから、重なり状態を判定する。

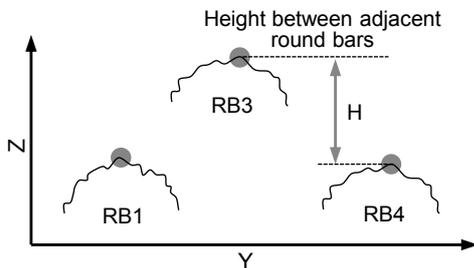


Fig. 11. Shape data of the overlapping state.

隣接する丸棒鋼間の高さを H としたとき、(2) 式を満たす場合に重なり状態とする。ここで、(2) 式における λ は計測精度や丸棒鋼の整列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、 $\lambda = 0.8$ とし、隣接する丸棒鋼間の高さが丸棒鋼径の 80% 以上のとき、

重なり状態と判定した。

重なり状態と判定した場合は作業員へ異常通知し、そうでない場合は、同定した丸棒鋼の数をカウント本数とする。

$$\lambda D \leq H \tag{2}$$

- λ : ハイパーパラメータ
- D : 丸棒鋼直径
- H : 隣接丸棒鋼間の高さ

5. 試作機の開発とカウント結果

考案したカウント方法を評価するため、試作機を開発し、実ラインでカウントを実施した。Fig. 12 に実ラインに設置した試作機を示す。

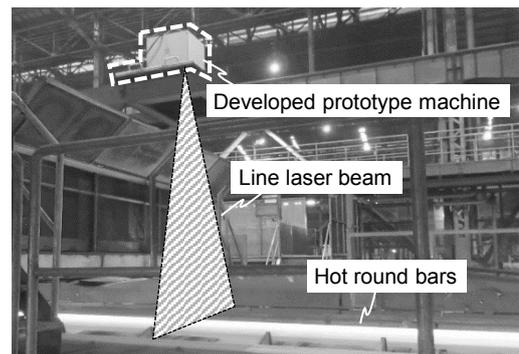


Fig. 12. Installation of the developed prototype machine on the production line.

5. 1 試作機の開発

試作機は熱間材の直上に設置されるため、輻射熱により高温となる。光学機器は耐熱温度 45℃ 以上の高温環境下では故障リスクがあるため、ジェットクーラにより

冷却する。ここで、ジェットクーラとは圧縮空気を供給することで、冷風を発生させる機器である。

Fig. 13 に光学機器の冷却方法を示す。設備制約上、供給可能な圧縮空気量に制限がある。そのため、光学機器を金属板に取り付け、金属板を冷却することにより、1台のジェットクーラですべての光学機器を冷却する。

実ラインで試作機内部の温度が45℃以下を維持できているかどうかを確認するため、光学機器を取り外した試作機を実ラインに25日間設置し、試作機内部と外部の2箇所に熱電対を取り付け、温度計測を行った。

Fig. 14 に温度計測結果を示す。試作機内部の最高温度は約30℃、外部は約65℃となり、実ラインで装置内部の温度が45℃以下を維持できていることを確認した。

試作機内部の温度が機器の耐熱温度の45℃以下であったため、光学機器を取付け、カウントを実施した。

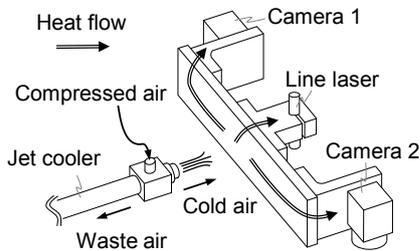


Fig. 13. Cooling system for optical equipment.

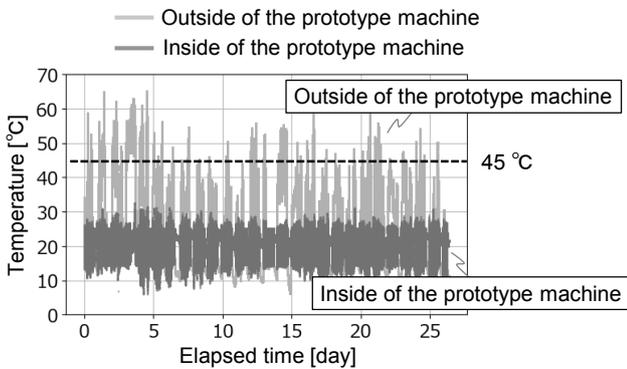


Fig. 14. Temperature measurement results of inside and outside the prototype machine.

5. 2 カウント結果

Table 6 にカウント結果を示す。2284 回のカウントを実施したところ、通材本数とカウント本数の一致数が2275回、重なり状態の判定数が9回であり、カウント精度100%、重なり状態の判定精度100%となった。ここで、重なり状態と判定した9回については、カウントをせずに作業者に異常通知をしている。

Table 6. Count results (n=2284).

	Correct	Incorrect	Overlap of bars
Result numbers	2275	0	9

Accuracy of target counting: 100%
Accuracy of overlapping detection: 100%

考案したカウント方法の挙動を生データから確認する。Fig. 15 に5本の熱間丸棒鋼をカウントした形状データの一例を示す。形状データは、Fig. 15(a) に形状が整っているもの、Fig. 15(b) に形状不良があるものを選んだ。図中の記号は同定した丸棒鋼を表しており、記号の位置は丸棒鋼を同定した際の初期基準位置と丸棒鋼境界位置である。形状データより、Fig. 15(a) と (b) のカウント本数は5本であり、通材本数の5本と一致している。また、記号の位置より丸棒鋼境界の局所最小値を探索できている。以上より、形状不良データに対しても、カウントできることを確認した。

Fig. 16 に重なり状態と判定した形状データの一例を示す。形状データは、データの一部が明らかに高く、重なり状態であることがわかる。なお、Table 6 の重なり状態と判定したデータのすべてが、同様にデータの一部が高いことを確認している。

以上より、考案したカウント方法は形状不良データや、重なり状態の判定に対しても有効なことを確認した。

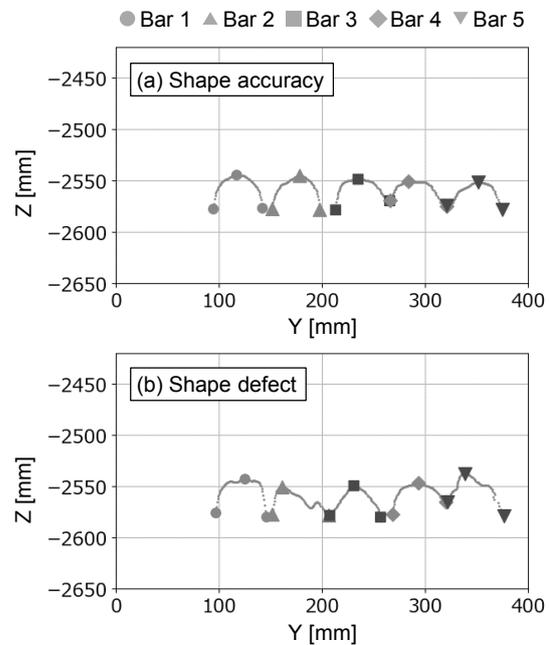


Fig. 15. Count results of the measurement data.

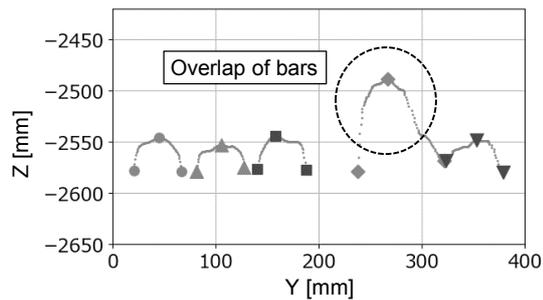


Fig. 16. Overlap determination results of the measurement data.

6. 結 言

本稿では、熱間丸棒鋼を対象としたカウントに対し、丸棒鋼形状からカウントする方法を考案し、実ラインでカウントした。

- (1) 熱間丸棒鋼の形状計測方法として、低出力ラインレーザとバンドパスフィルタを用いたステレオカメラ法を採用した。
- (2) 丸棒鋼形状から丸棒鋼を同定し、形状不良データでもカウント可能な方法を考案した。
- (3) 実ラインに試作機を設置しカウントした結果、カウント精度 100%、重なり状態の判定精度 100%となった。

(文 献)

- 1) 山田龍三: 電気製鋼, 77(2006), 225.
- 2) 宇田川佳久: 情報処理学会研究報告, 2010-IS-111(2010), 8.
- 3) 高橋信幸, 渡邊光, 森山稔: 電気製鋼, 93(2022), 29.
- 4) 大同特殊鋼(株): 特許第 5077093号(2012).
- 5) 山陽特殊製鋼(株): 特開平 9-305737(1997).
- 6) 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.
- 7) 中川啓二, 松尾啓史: Ricoh technical report, 39(2013), 195.
- 8) T. Ekkel, A. M. Meyer, T. Luhmann, H. Hastedt and F. Bethmann: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II -5/W2(2013), 79.
- 9) 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽三: 計測自動制御学会論文集, 48(2012), 12, 863.
- 10) Z. Zhang: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(2000), 11, 1330.
- 11) 森大輔, 新美清明, 高橋信幸, 濱井拓也: 電気製鋼, 88(2017), 19.
- 12) 高橋英二, 片山亮, 迫田尚和: 鉄と鋼, 101(2015), 190.
- 13) 梅谷俊治, 柳浦睦憲: オペレーションズ・リサーチ, 58(2013), 689.



片桐崇大



森山 稔



望月喬史