

(論文)

# 圧延中にも容易に設置可能な線材・棒鋼用寸法計測装置

## Easily Installable Bar and Wire Size Measurement Apparatus for Rolling



和佐泰宏\*  
Yasuhiro WASA

An easily installable apparatus was developed for accurately measuring the sizes of hot-rolled bars and wires during rolling. The apparatus is designed to measure the widths of the rolled products from their spontaneous light images and employs a telecentric lens which is immune to the influences of work motions during rolling. The diagonal direction edge detection algorithm, developed this time, enables high precision wide-range measurements based on high-resolution images. Because the dimensions are measured in real time, the apparatus is useful for tests to determine rolling process conditions.

まえがき = 線・棒鋼材の圧延工程において、圧延材の熱間での形状計測はロールギャップや圧延速度などの圧延条件を決定する際に重要である。リアルタイムで高精度な寸法計測が簡易に実現できれば圧延条件設定も容易になり、効果が大きい。従来、平行光をワークに照射し、その際に生じる影の長さからワーク幅を計測する装置が利用されてきた<sup>1)</sup>。平行光の代わりにレーザを走査し、同様の原理で寸法計測する装置も市販されている。これらの装置は、基本的にワークを挟んで投光・受光部を対向配置する必要があり、アライメント調整などに手間を要する。設置場所やコストの面でも簡易計測とは言い難く、ライン内の所定の位置に常時設置されるもので、試験圧延時などで任意の位置での圧延材寸法を測定するといった使い方ができない。そこで、簡易に使い、かつ0.1mm程度の高精度を有する形状計測装置を開発した。本装置は、テレセントリックレンズと高分解能カメラを用いた受動型でワーク振動の影響を受けにくく、ワークサイドのみから簡易に設置できるため、圧延作業中にも設置できることが特徴である。

### 1. 熱間寸法計測装置仕様

圧延工程の操業現場で簡易に利用できる寸法測定装置としては、以下の要件を満たす必要がある。

- 1) 圧延ラインの片側から1m程度離れた非接触測定が可能なこと。
- 2) 広い設置場所を要さない小型軽量で、できれば可搬型が望ましい。
- 3) 操業中でも設置・撤去が可能で調整も容易なこと。
- 4) 圧延材の振動やブレにも影響されず、十分な測定精度を有すること。

これらの要件を満たす測定手法として、熱間圧延材の自発光赤熱画像を計測する手法を採用した。測定対象が



図1 テレセントリックレンズと高分解能カメラ  
Fig. 1 Telecentric lens and high resolution camera

表1 装置仕様  
Table 1 Instrument specification

	Type	Telecentric lens
Lens	Working distance	1,300mm
	Image gain	0.15
	Distortion	5%
	F value	12 ~ 60
	Size	134 x 555mm
Camera	Mount	C MOUNT
	Pixel size	6.0 x 6.0 μm
	Resolution	2,008 x 2,044
	I/F	IEEE1394
	Type	CMOS monochrome

振動して、測定装置からの距離が変化しても測定結果に影響が出ないように大口径テレセントリック型レンズを採用し、高精度かつ幅広い測定レンジを確保できるように高分解能カメラの対角方向で幅計測を行うこととした(図1)。主な仕様を表1に示す。

\*技術開発本部 生産システム研究所

## 2. テレセントリックレンズ

周知の通り、通常レンズでの画像計測では近くのもの大きく写り、遠くのもの小さく写るため、正確な寸法計測には距離補正が必要になる。圧延中のように不規則に被写体が振動する場合には、その補正は容易ではない。テレセントリックレンズは通常のレンズとは異なり、概略レンズ軸に平行な光のみを結像させるようにしたレンズで画角が0に近く、被写体との距離が変化しても撮像倍率は変化しないという特徴がある。すなわち、圧延材が振動してレンズとの距離が変化しても正確にその形状を測定することができ、画像計測に適している。

作動距離 1,300mm, 120mm の大口径レンズを採用することで操業に悪影響を及ぼすことなく圧延中にも十分離れた位置から調整・測定が可能である。このレンズを用いて、2mm ピッチのチェック模様のテストパターンを 1,300mm から 1,360mm までの距離を変化させて撮影した画像を図 2 に示す。ピント合致度は設計作動距離から離れるにつれて劣化するものの、チェック模様の大きさは変化しない。すなわち、像倍率は距離により不変であり、振動を有する対象の画像計測に有効であることがわかる。作動距離から離れるに従いピントがぼけてくるということは、厳密に画角が0の光のみを取込んでいるのではないことを意味しており、ワークを作動距離に設置すべきであることは通常レンズと同じである。多少のぼけが発生しても像倍率は不変であり、適切な画像処理により<sup>2)</sup>、境界を抽出できるので画像計測には支障は生じない。

テレセントリックレンズのデメリットは、広いレンジを撮像しようとするときレンズが大きく重くなってしまうことであり、一台での撮影レンジには限界がある。本装置に採用したレンズは、実用面からほぼその限界に近いものではないかと考える。

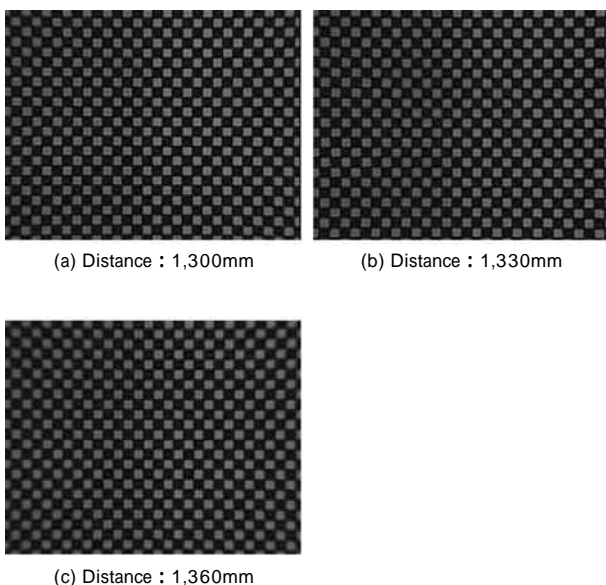


図 2 テレセントリックレンズの距離依存性

Fig. 2 Image changes due to distance between lens and work

## 3. 画像処理による材幅計測

図 3 に圧延中の材を本測定装置で撮影した画像例を示す。圧延材の圧延方向に対して斜め 45° にカメラを傾け、測定対象がほぼ中央に写るようにしたもので、画像の右上から左下に引いた対角線上での測定対象と背景の境界を抽出し、その間隔から測定対象の幅を計測する。カメラを傾けることで1.4倍の測定幅まで計測レンジを拡大することが可能となる。カメラ画像を汎用 I/F である IEEE1394 を介してパソコンに取り込み、ソフトウェアのみで画像処理する。画像処理・計測の手順は以下の通りである。

- 1) カメラの電気的な点状ノイズを除去する前処理として、画像全面に 3 × 3 の中央値フィルタを施す。
- 2) 画像対角線上の輝度が大きく変化する 2 点 (上エッジ, および下エッジ) を中心に検知エリアを移動する。
- 3) 検知エリア内の画像を 2 次微分し、水平ラインごとのピークを連ねて最小二乗法で境界線のフィッティングを行い、対角線との交点を算出する。
- 4) 上エッジと下エッジの交点の距離から測定対象の幅を計算する。このときレンズひずみなどは、オフラインでエッジ位置と画素との関係を利用してあらかじめ校正しておく。

## 4. 校正・精度検証

高精度画像計測では、レンズやカメラ撮像素子のひずみ特性の補正を精密に行う必要がある。図 4 に示すような精密直動ステージ上に円柱ターゲットを配し、一定間隔で移動させながら、ターゲットと背景の境界エッジの画像上での動きの対応をとって校正する。理想的には直動ステージと撮像素子上でのエッジ位置とは直線関係に

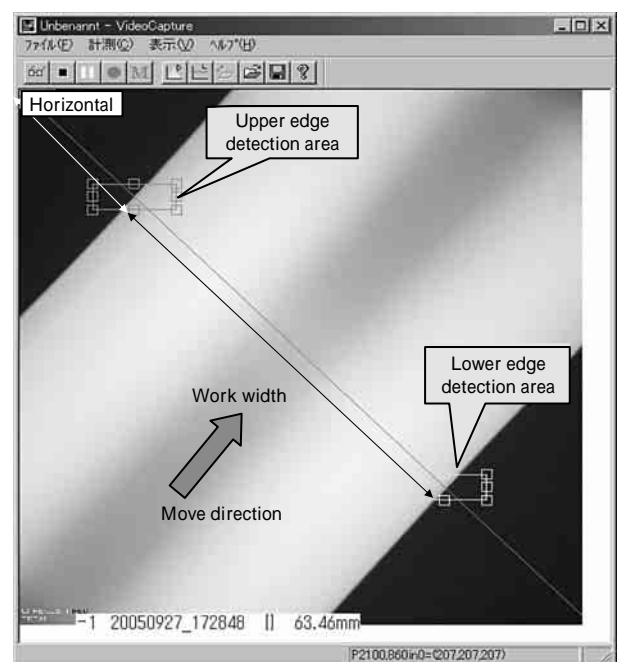


図 3 熱間材幅の画像計測画面

Fig. 3 Image measurement screen of hot work width

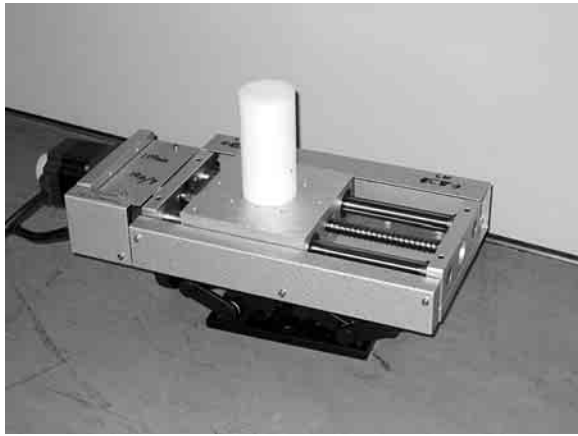


図4 直動ステージ上の円柱ターゲットによる収差校正  
Fig. 4 Lens distortion calibration using cylinder target on linear stage

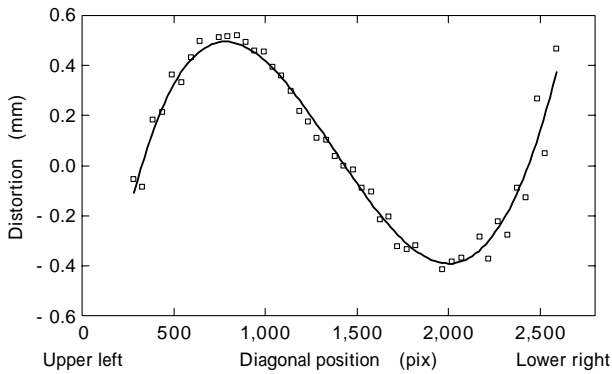


図5 レンズ収差測定結果  
Fig. 5 Lens distortion calibration result

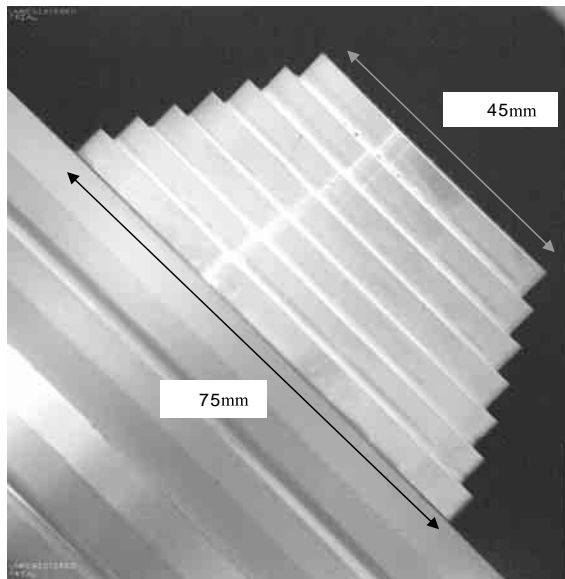


図6 精度評価用ディスクターゲット  
Fig. 6 Disk shape target for measurement accuracy evaluation

なるべきであるが、各種ひずみの影響でずれる。一例として校正結果のひずみを被写体での寸法換算で算出した結果を図5に示している。0.1mm精度を確保するためにはこのひずみを無視することはできず、詳細なひずみ補正が必須になる。実際には、この校正データを5次曲線による最小二乗フィッティングでスムーズひずみ補正曲線(図5中の実線)になるようにした。

これらの校正・補正を行った後、図6に示すような 45

表2 ディスクターゲットによる精度測定  
Table 2 Accuracy measurement using disk shape target

Target diameter mm	Left edge pix	Left edge position mm	Right edge pix	Right edge position mm	Compensation mm	Width mm	Error mm
45.00	660.0	17.35	1,770.5	62.51	-0.15	45.01	0.01
50.00	595.9	14.84	1,831.9	65.01	-0.15	50.02	0.02
55.00	531.5	12.33	1,893.0	67.48	-0.15	55.01	0.01
60.00	466.3	9.82	1,954.7	69.98	-0.15	60.01	0.01
65.00	401.6	7.36	2,019.0	72.56	-0.15	65.06	0.06
70.00	422.6	8.16	2,163.2	78.32	-0.15	70.01	0.01
75.00	354.6	5.60	2,223.7	80.70	-0.15	74.96	-0.04

~75mmの複数ディスクを重ねたディスクターゲットで測定精度検証を行った。その結果を表2に示す。45~75mmのレンジにおいて計測誤差は、最大で0.06mmと目標の0.1mm以内であることを確認した。

## 5. 線材圧延ラインへの適用例

線材圧延ラインで、圧延中に材幅が大きく変化する条件において圧延実験を行い、本装置を用いた寸法計測を行った。複数配列されている圧延ロールスタンド間に測定装置を実験的に設置し、水平および垂直方向の材幅を2台の装置で同時測定した。2台のカメラはあらかじめ直交配置になるように結合しておき、実ライン上で視野中央に圧延材がくるように調整配置した(図7)。この設置作業は、圧延操作中でもワークサイドのみからのアクセスで容易に実施可能であった。

水平・垂直の同時性は、外部トリガによる電子シャッター(露光時間約10ms)方式で確保した。圧延材の温度によって、自発光輝度が大きく異なるため、カメラの絞りおよびシャッター速度は適切に調整する必要がある。



図7 線材熱延ラインでの材幅測定実験  
Fig. 7 Hot work width measurement at hot wire mill



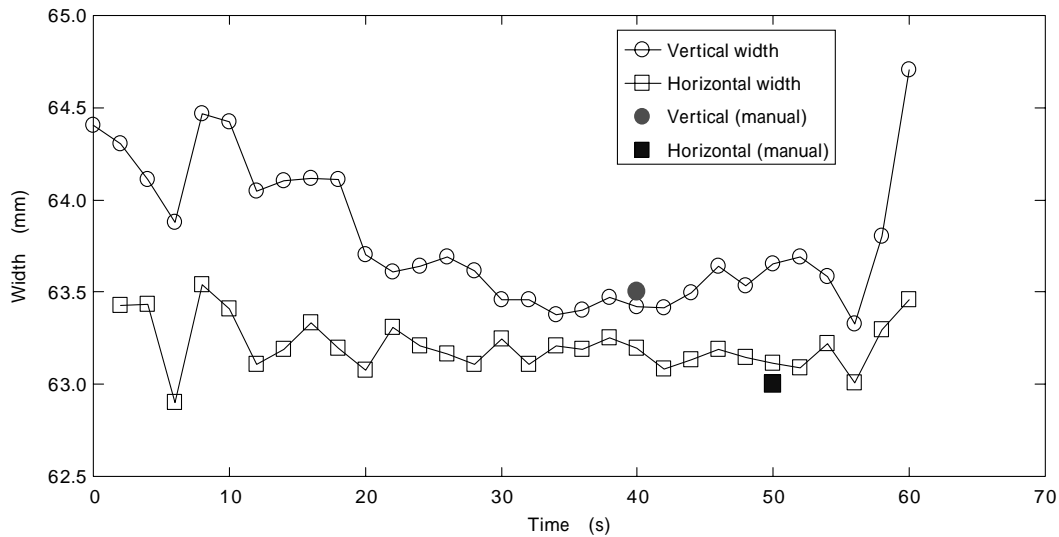


図8 試験圧延での材幅測定結果  
Fig. 8 Work width measurement result at test rolling

CMOS カメラでは、ソフト処理により電子的な自動調整が可能である。

測定結果を図8に示す。測定直前の圧延ロールが水平方向圧下のため試験圧延中の水平方向の寸法変化は少ないが、直交した垂直方向は、上流側の圧延条件の影響を受けて大きく寸法変化していることがわかる。同時に人手による直接接触測定を行った結果も図中に示しており、見込まれる測定精度内で画像計測結果とほぼ一致している。このように本測定装置を用いれば、圧延中でもワークサイドのみから簡易に設置でき、必要な寸法をリアルタイムで計測できるため、圧延プロセスの条件設定試験時などに有効である。なお、本測定装置を圧延ラインに常設してオンラインでの寸法計測を行うことも可能であるが、自発光測定方式ゆえに、エアパージによるヒューム対策や冷却水の飛散対策などの環境対策を十分に行う必要がある<sup>3)</sup>。

むすび = 熱間圧延材の高精度寸法計測が可能な簡易寸法測定装置を開発した。高温状態での自発光画像から材幅を測定するもので、圧延時の材ブレの影響を受けないようにテレセントリックレンズを採用し、高精度かつ広レンジで測定可能な高分解能カメラの対角成分を利用するアルゴリズムを開発した。さらに、精密ステージによるひずみ校正・補正を行い、80mm レンジにおいて目標の0.1mm 精度を実現することができた。これを線材圧延ラインに適用し、圧延中の材幅変化をリアルタイムで測定できることを確認した。この結果より、本装置は各種圧延パラメータの調整などに有効活用できることがわかった。

参考文献

- 1) 和佐泰宏ほか：SICE 講演大会 (1993) p.471.
- 2) 谷尻豊寿：最新画像処理入門、技術評論社 (1996) p.97.
- 3) 社団法人日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧第7巻 (2002) p.3.2.3.