

連携記事

鉄鋼生産プロセスにおけるカメラ活用事例

The Application Examples of Camera in Steel Production Process

日本製鉄（株）
インテリジェントアルゴリズム研究センター
所長

伊藤邦春
Kuniharu Ito

日本製鉄（株）
デジタル改革推進部
部長

中川義明
Yoshiaki Nakagawa

日本製鉄（株）
計測・制御研究部
部長

梅村 純
Jun Umemura

日本製鉄（株）
システム制御技術部
システム制御技術室 室長

空尾謙嗣
Kenji Sorao

1 はじめに

鉄鋼業では、中長期的な世界需要の伸びが予測される一方で、国内での中長期的な需要減少、グローバル競争の激しさの増大、少子高齢化による労働力不足の懸念など、取り巻く環境の厳しさが増している。加えて足元の新型コロナウイルスの感染拡大による世界経済活動の停滞もあり、製造現場での操業安定化、歩留向上、コスト削減への対応が急がれる。

鉄鋼業ではこれまでも製造ラインの操業自動化による操業安定化やコスト削減に長年取り組んできており、製造設備に取り付けられた各種センサー信号に基づいた圧延や搬送の制御など、機械設備への自動制御の導入は進んでいる。

一方で、人、装置の外観、製品/半製品など、直接センサーを取り付けることが難しい対象については、主に人による監視や非接触による計測が試みられてきた。鉄鋼業における監視業務の一例を表1に示す。

安全管理、品質管理、操業管理、工程管理、設備管理、などさまざまな生産管理業務において、人による監視が重要な役割を果たしている。また、監視対象をカメラで撮像することで、遠隔での監視を可能としている事例も多い。

しかし、人による直接監視、もしくはカメラを用いた遠隔監視のいずれも、常に人が監視を続ける必要があり、見逃し

などのリスクも内在していた。見逃しリスクの低減、人による判断ばらつきの低減、3K作業の削減などを目的とした監視業務の自動化へのニーズは大きい。

一方、近年のIoT (Internet of Things) 技術やAI (Artificial Intelligence) 技術の急速な発展と低廉化により、これまでは熟練作業者の五感と経験に頼らざるを得なかった作業においても、その一部を安価に機械で代替できるようになってきた。特に深層学習など近年の画像認識技術の向上、カメラや周辺システムの低廉化の進展により、カメラを用いて人による監視を代替する動きが加速している¹⁾。さらにハイスピードカメラなど、人よりも認識能力が高いカメラの活用も進んでいる^{2,3)}。

本稿では、鉄鋼製造プロセスにおけるカメラ活用事例として、監視カメラなど汎用のカメラで撮像した画像を深層学習で認識し操業監視に活用している事例 (2章) と、高精度な計測が必要なため光学系も含めて開発した事例 (3章) を紹介する。

2 深層学習の活用事例

2.1 製品搬送状態異常予兆監視

鉄鋼業には、生産性向上を目的に、複数のコイルを溶接し、ベルトのような形態で連続処理する設備がある (図1)。

コイルの搬送には多くの搬送ロールを使用しており、板の形状が板幅方向で不均一な場合や搬送ロールのアライメント状態などの操業条件によっては、板が通板方向に直角な方向に寄って、最悪設備に衝突し、コイルが破断することがある。板破断の頻度は少ないが、破断発生時の操業への影響は大きい。これまではカメラ画像を人が監視し、板寄り発生時は通板速度を下げるアクションを取っていた。人による検知は可能だが、常時監視が困難であることが課題であった。

表1 監視業務の一例

分類	具体例
安全管理	作業者の位置検知、不安全行動監視
品質管理	鉄鋼中間製品・製品表面品位計測
操業管理	操業監視、トラブル検知、製品形状計測
工程管理	製品トラッキング、物流監視
設備管理	設備点検、設備監視
システム基盤	データ解析システム基盤

そこで、既設のITV (Industrial Television, 監視カメラ) 画像を毎秒30枚の静止画に分解し、1枚ごとに深層学習モデルを用いて板寄りの発生確率を予測し、予測結果をリアルタイム処理し、グラフ化して現場のモニタに表示する仕組みを開発した(図3)。板寄り発生時の3~5分前に予兆を検知できるなど、現場オペレータと同レベルで検知可能との評価を得ている。

2.2 コイル緩衝材欠落検知技術⁴⁾

自動車用鋼板は製造・検査手入・保管の多くの工程を経て出荷しており、保管工程においては、倉庫内の設置スペースを有効活用するために、製品であるコイルを段積みしている(図4)。段積みはコイル上に置かれた帯状の緩衝材を介して別のコイルを積み上げ、自動クレーンによって入庫、配置替え、出庫作業を行っているが、この作業の中で積み上げられたコイルが移動すると、下段コイルの緩衝材が上段コイルに吸着することによって緩衝材が欠落する場合があります。緩衝材が欠落したまま他のコイルを積み上げると、コイル同士が接触して出荷前の製品コイル表面にキズが生じるおそれがある。

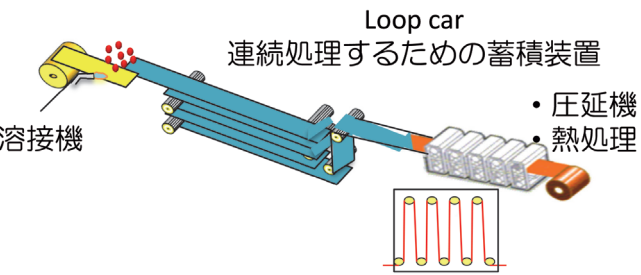


図1 連続処理設備の一例

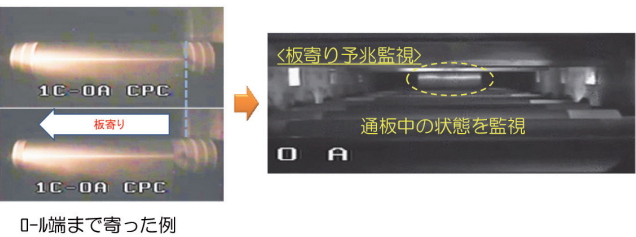


図2 搬送中の板寄り現象

る。そこで、稼働中の自動クレーンに取り付けたカメラから撮影したコイルおよび緩衝材の画像から、緩衝材の欠落を検知する技術を開発した。

緩衝材は梱包したコイルの上に置かれる。梱包にはビニルや紙が用いられ、またビニルには透明や有色のものがある。それに加え梱包材のシワによる反射の有無、天井照明の明るさの違い、時間帯による日光の違い、あるいはコイルのサイズの違い、撮影距離も加わって、クレーンから撮影した画像には非常に多くのバリエーションがある(表2)。

一般に画像から物体を識別するには、フィルタなどの前処理の後に、検出したい物体を特徴付ける特徴量を設計し、その特徴量の分布に対するルールを設定する手法が考えられる。しかし検出対象やそれ以外の背景など画像にバリエーションが多い場合、そのような特徴量やルールをひとつひとつ設計・設定することは、長大な時間と手間を必要とすることが多い。そこで、識別モデルの開発に深層学習を用いることとした(図5)。

深層学習を用いることにより、識別モデルに必要な特徴量と、特徴量を組み合わせて判定するルールの両方を、教師画像からの学習により獲得することができた。

識別モデルでは、入力された画像が、緩衝材がある画像なのか、ない画像なのかの2状態(2クラス)の判別を行うこととした。そのため、教師画像には緩衝材がある場合とない場合のそれぞれを収集する必要がある。しかし、正常状態である緩衝材がある画像に対し、異常状態である緩衝材がない画像は発生頻度が低いため通常の操業のみでは収集できる枚数が限られる。そこで、操業の合間に故意に緩衝材を取り外して撮影した。さらに、ひとつの画像に対して拡大・縮小・反転・位置ず

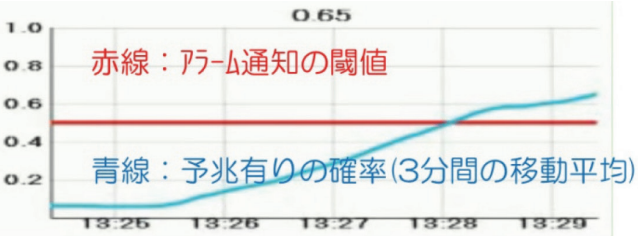


図3 板寄り予兆検知の一例

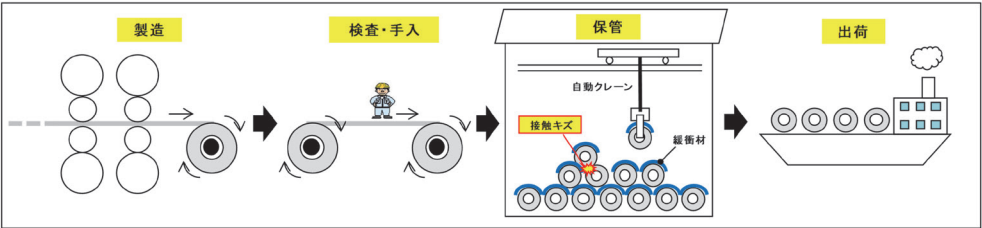


図4 自動車用鋼板製品工程概要

表2 クレーン上からの試験撮影結果

No.		①	②	③	④
計測条件	緩衝材	白+白	黒+黒	白+白	白+茶
	梱包	青透明ビニル	紙	透明ビニル	透明ビニル
	明るさ	普通	普通	明るい	明るい(橙)
撮影画像					
特徴		緩衝材が白い	緩衝材が黒い	緩衝材が白い	コイル部が明るい
評価		明るさや色の違いで緩衝材の特徴を抽出できる			

No.		⑤	⑥	⑦	⑧
計測条件	緩衝材	茶+白	茶+茶	白+茶	なし+茶
	梱包	透明ビニル	紙(一部)	紙(一部)	紙
	明るさ	暗い	明るい	明るい	明るい
撮影画像					
特徴		全体的に暗い 部分的に輪郭有	梱包と緩衝材が酷似 バンド部に境界	梱包と緩衝材が酷似 梱包にシワ有	端部のバンドが 緩衝材と酷似
評価		明るさや色以外の部分的であいまいな特徴の抽出が必要である			

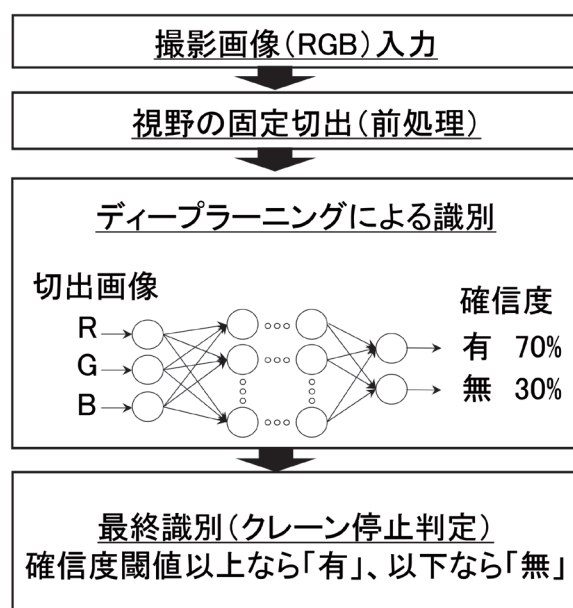


図5 ディープラーニングによる識別

らし等のデータ拡張を施すことで画像の枚数を増加させた。

深層学習によって構築した識別モデルの精度を評価した結果を表3に示す。

学習には用いなかった画像100枚(緩衝材あり50枚、なし50枚)の識別率は100%であった。このように深層学習を用いることで、高精度な緩衝材の欠落を検知できる識別モデル

を開発することができた。

2.3 厚板製品ID識別

厚板とは、船舶、建設産業機械、建築、橋梁、エネルギープラントなどに使用される板状の鉄鋼製品である。製鉄所で製造後、主に船舶で出荷され、中継地を経由して顧客に届けられる。この一連の物流において、製造した厚板製品を正確にトラッキングし、注文仕様通りの製品を顧客に届ける必要がある。厚板製品には製品表面や側面に製品を認識するためのIDが印刷、刻印、ラベルなどの形態で示されている。現状は、一枚毎に製品現品のIDを手で確認し、製品山毎のリストと突き合わせる作業を実施している(図6)。

この作業は、厚板製品を搬送するごとに実施する必要がある、作業負荷が高いという課題があった。そこで、スマートフォンのカメラで製品山の側面を撮影し、撮影画像から製品IDを自動認識する仕組みを開発した。

このID認識のタスクは、文字や数字の認識であるが、通常の紙資料の電子化に利用されるOCRの利用環境と異なり、影が映りこむ、明るさが足りず文字の有無を確認できない、屋外の場合は朝日や夕日によってハレーションが起こるなど撮影環境上の課題がある。また地鉄に直接印字する場合は、地鉄の表面性状の影響も受ける。

画像処理の工夫によってID印字部分を顕在化する処理を開発することも考えられるが、上述したような多様な条件すべて

表3 緩衝材有無判定性能評価結果

収集画像	学習用 (反転・拡大縮小・位置ずらし)	評価用	識別率※
緩衝材有	1483枚×54倍=80082枚	50枚	100% (50/50)
緩衝材無	177枚×54倍=9558枚	50枚	100% (50/50)

※「緩衝材無」確信度70%以上を最終識別結果「緩衝材無」とする場合

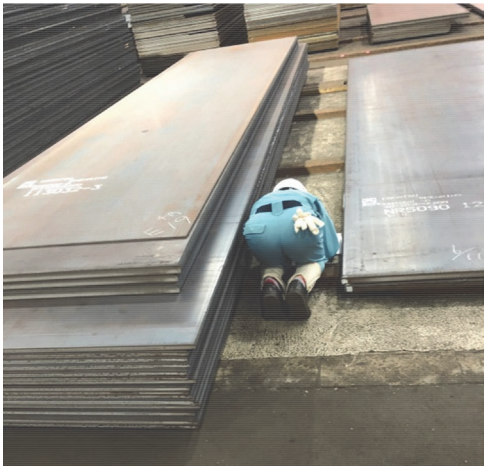


図6 現品突き合わせ作業の一例

に適用可能なアルゴリズムを開発することは容易ではなかった。

そこで、IDを構成するどの種類の文字が写真中のどこにあるかを出力する物体検知のタスクを深層学習モデルを用いて構築した。学習には、撮影環境を整えて収集した画像とともに、従来OCRで識別できなかった画像も用いた。図7に示す通り、初回トライアルとして写真6枚分を学習データとして学習した深層学習モデルでは、一部の文字しか認識できないが、学習データ数を写真1942枚分として学習を行うと、ほぼ全ての文字を正しく認識できることが判った。

このように、深層学習モデルの識別率を向上させるためには、十分な質、量の学習データを準備し、モデルの追加学習と評価を継続的に実施することが欠かせない。モデル精度向上のための取り組みについては、次節にて述べる。

2.4 深層学習活用上の課題と解決手段

深層学習は、モデル開発者が画像特徴量を定義しなくても、教師データを「質、量ともに適切に与える」ことで、活用する用途や環境の変化に対応できるメリットがある。しかし、教師データの収集には様々な実用上の課題が発生する。例えば、深層学習を操業異常の検知に活用する場合、操業異常の発生頻度が低いと、異常時の画像（教師データ）を集めにくいという課題がある。このような教師データが集めにくいケースでは、手作業で操業異常時の画像を生成する、ある

いは「GAN⁵⁾ (Generative Adversarial Network, 敵対的生成ネットワーク)」のような識別対象の特徴を含んだデータを生成するモデルを活用する⁶⁾、あるいは異常の識別ではなく、通常と異なる状態であることのみを検知の目的とするなどの方法が有効である。また、画像の大きさや角度、明るさ、色が異なるなど、データに偏りがあるケースでは、元の教師データの画像の大きさや角度などを変更したデータを生成し学習に用いる、いわゆる「水増し」も有効である⁷⁾。さらに、他の問題で学習済みの深層学習モデルを初期値として転用する「転移学習」や、少量の教師ありデータの特徴をとらえて、手に入りやすい対象の教師なしデータに正解を付与する「半教師あり学習」も有効である。

なお、教師データに正解タグを手作業で付与するアノテーション作業の省人化には依然課題が残っている。

2.5 深層学習活用フレームワーク

2.4節で述べた各手法を実行する計算機環境をモデル開発者が独自に整備し、継続的に活用することには多大な労力が必要となる。

そこで、全社共通のデータ解析のためのプラットフォーム「NS-DIG[®]」を開発した。深層学習を始めとする高度ICT技術をいち早く製造現場に導入するためには、多種・大量のデータ、いわゆるビッグデータの高速・高度な解析が必要である。「NS-DIG[®]」は、社内の誰もがいつでも迅速に活用できるよう、高度な画像解析、深層学習も実行可能な高い計算能力を備えている。また、深層学習モデルの生成、評価、追加学習を容易に実行できるアプリケーションも開発し、NS-DIG[®]上で利用が可能である。NS-DIG[®]の概要を図8に示す。

3 熱延鋼板の平坦度計測

監視カメラなど汎用のカメラ画像からでは計測が難しいニーズに対しては、光学系の設計から信号処理まで操業ニーズに合わせた計測システムの設計、開発が必要である。そのような事例の一つとして、熱延鋼板の平坦度計測の事例⁸⁾を紹介する。

近年、自動車のCO₂排出削減による環境対策として、軽量

化による燃費向上が強く求められており、その構造材である鋼板の薄手化、高強度化が進行している。これらの鋼板は熱間圧延プロセスにより製造されるが、薄手、高強度な鋼板の圧延は高圧下率、高圧延荷重のため、圧延ロールの変形が大きく、結果として平坦形状の悪化を招いていた(図9)。平坦形状が悪化すると、その後の鋼板冷却過程において冷却温度むらを生じ機械特性が悪化してしまい、製品として出荷できない。そこで、圧延機出側の平坦形状を平坦度計により測定し、圧延ロールの湾曲度を制御することで、鋼板の平坦度を向上させる必要がある。

従来の平坦度計には、レーザ三角測量法を用いて圧延方向2か所の高さ差から時々刻々と移動する鋼板表面の角度を測定し表面長さを求めるツインビーム距離計方式と、鋼板の広い範囲に多数の線状パターン光を投影して瞬時に投影範囲の形状を測定する方法がある。前者は、鋼板が蛇行した場合や、形状不良により生じた板波が圧延機を固定端として定在する場合に、測定精度が劣化する問題があった(図10)。後者は、

この対策として考案された方式であるが、レーザ光を用いたものは投影本数に限界があること、高輝度ランプを用いた場合は輝度むらや光源寿命が短いという問題があった。そこで、高精度・安定測定が可能なLEDドットパターン投影式の平坦度計を実用化し、高精度な平坦度自動制御を実現した。

近年開発された高輝度なパワーLED素子の寸法が0.5mm～数mmであることに着目し、多数のパワーLED素子を電子部品実装技術より基板上に精密に配列して光のドットパターンを形成する方法を考案した。新開発の平坦度計は2次元に配列した1200個のパワーLED素子により構成された周期的な光のパターンを拡大投影することで、最高温度950℃の熱間鋼板の表面においても明瞭に観察可能な周期的な光ドットパターンを広範囲(幅方向1.8m×圧延方向1.0m)に形成させた。この周期的なパターンを2次元カメラにて撮像して、表面角度分布を反映したパターンピッチ分布を演算することで瞬間的な鋼板形状を測定し(図11)、鋼板の上下パスライン変動や蛇行、板波の状態によらず幅方向の伸び率分布を高

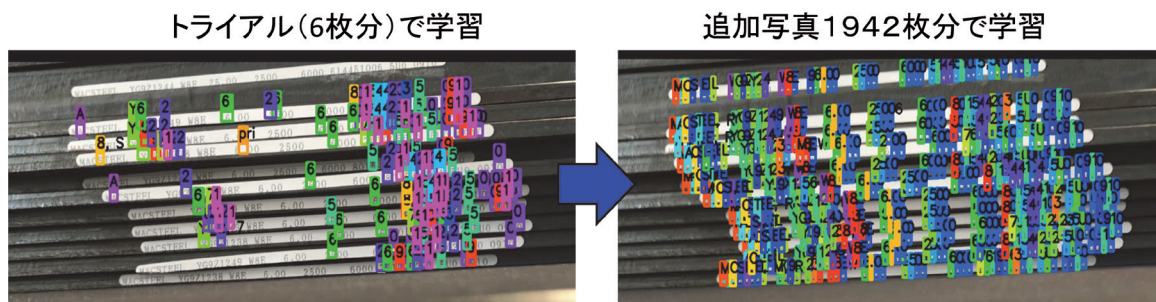


図7 学習量増加による識別率向上の一例

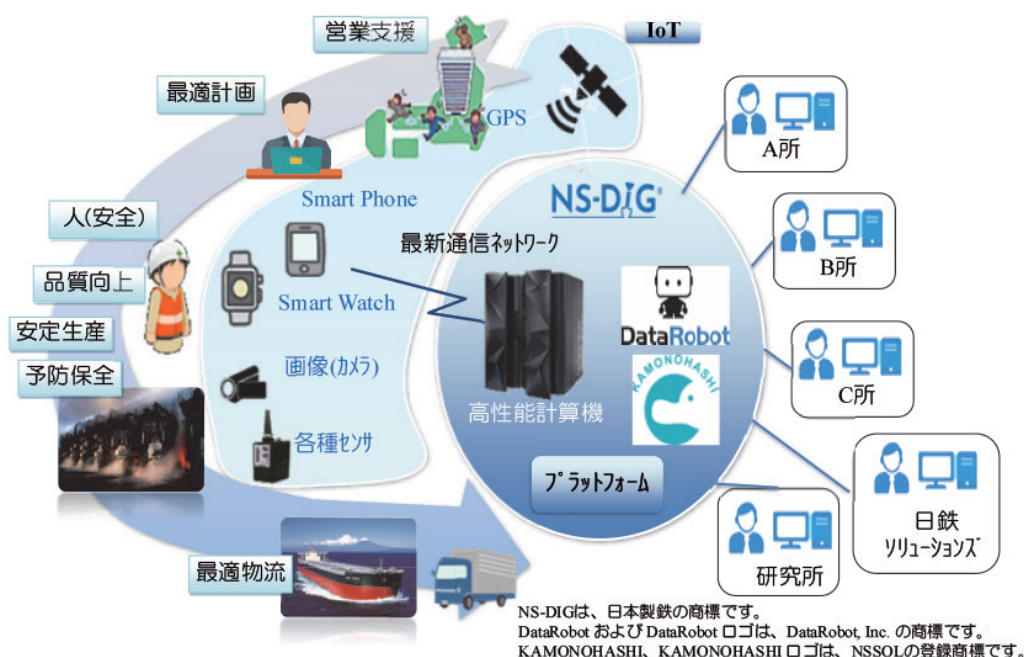


図8 NS-DIG®の概要

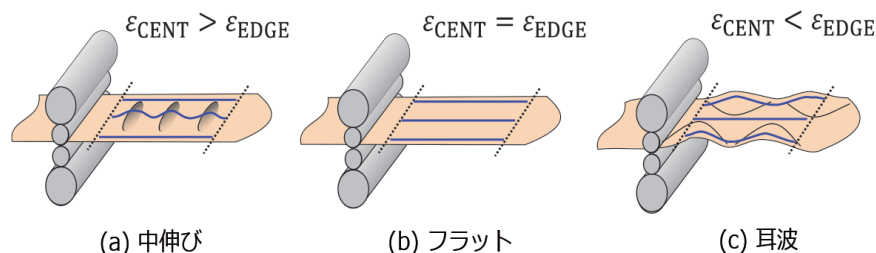


図9 熱延鋼板の平坦度

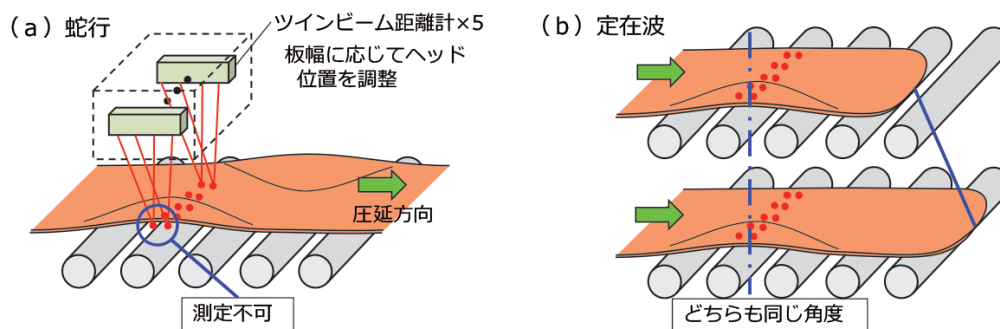


図10 ツインビーム距離計方式の課題

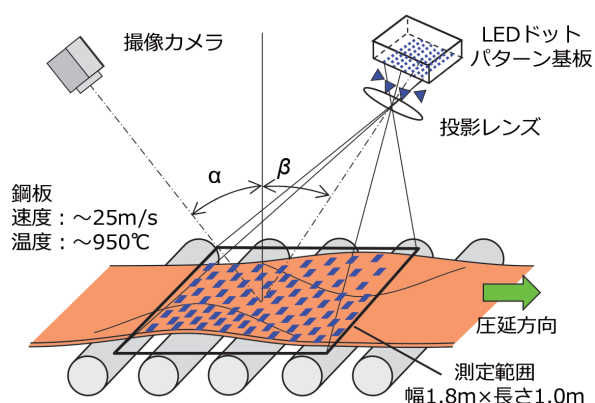


図11 新開発の平坦度計

精度に計算でき、従来人の目と経験に頼っていた平坦度測定を、作業者を介さずに高精度に初めて実現した。

投影パターンとして千鳥状パターンを採用し、幅方向に輝度分布を持たせることで、正反射条件にある部分のパターン潰れを抑制して、安定してパターンピッチを測定できる。この結果、平均測定成功率99.994%、コイルあたり測定成功率98.5%以上の安定した平坦度測定を実現し、全圧延材への制御適用が可能である。

4 おわりに

本稿では、当社の鉄鋼製造プロセスにおけるカメラ活用事例の一例を紹介した。カメラの低廉化と深層学習技術の進化

により、これまで人に頼らざるを得なかった画像認識タスクの自動化が安価に可能となってきた。用途に応じたカメラの選択指針や認識精度を踏まえたシステム全体の設計指針の明確化、さらには、他のセンサーと組み合わせることによる付加価値の向上などにより、カメラの活用のフィールドをさらに広げていくことが期待される。

参考文献

- 1) 石川憲二：機械設計, 61 (2017) 10, 6.
- 2) 神辺和宏：画像ラボ, 29 (2018) 9, 30.
- 3) 池内一茂, 大藪友道：画像ラボ, 29 (2018) 9, 21.
- 4) 鉄鋼生産現場にAI (ディープラーニング) を導入, <https://jpn.nec.com/rapid/case/nipponsteel/index.html>
- 5) I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville and Y. Bengio : Proc. NIPS 2014, (2014), 2672.
- 6) L. Perez and J. Wang : arXiv : 1712.04621 (2017)
- 7) C. Shorten and T.M. Khoshgoftaar : J. Big Data, 6 (2019), 60.
- 8) 伊勢居良仁, 加藤朋也, 大杉正洋, 太田武：鉄と鋼, 105 (2019) 1, 20.

(2020年11月6日受付)