



自走式精密検査ロボットの開発

Development of Autonomous Precision Inspection Robots

JFEスチール（株） スチール研究所
サイバーフィジカルシステム研究開発部
主任研究員

小林正樹
Masaki Kobayashi

JFEスチール（株） 東日本製鉄所
（京浜地区）厚板部
主任部員

竹村悠作
Yusaku Takemura

JFEスチール（株） スチール研究所
サイバーフィジカルシステム研究開発部
主任研究員

山下浩二
Koji Yamashita

JFEスチール（株） 東日本製鉄所
（京浜地区）制御部
主任部員

宮長 淳
Sunao Miyanaga

JFEスチール（株） 東日本製鉄所
（京浜地区）商品技術部
主任部員

宮脇光庸
Koyo Miyawaki

1 はじめに

鉄鋼製品の品質向上は重要な課題であり、欠陥の無い製品をお客様に提供するため、当社は様々な検査装置の開発・導入に取り組んできた。

鉄鋼製品の1つである厚板は一般的に板厚6mm以上の鋼板を指し、その用途・使用箇所はインフラ、建築、船、海溝、発電所、タンク、容器、建機等、多岐にわたるため（図1）、厚板内部の品質管理は強度保証の観点からも非常に重要である。

そのため、厚板内部の超音波探傷検査には、従来からオン

ライン自動探傷（専用装置）が適用されてきた。一方、板厚等の制約から、熟練者によるオフライン手動探傷も一部で適用されてきたが、人手では厚板上で検査機器を動かす精度、検査結果を記録する正確性、および作業能率などに限界があるため、検査信頼性と作業能率のさらなる向上が課題となっていた。

上記背景のもと、当社はこのたび、独自に自走式精密検査ロボット（以下、本ロボットとする）を開発し、世界で初めて厚板オフライン探傷プロセスに適用・導入した¹⁾。厚板自走式超音波探傷ロボットとして、手動探傷作業を自動化し、検



図1 厚板の用途例 (Online version in color.)

*第57回機械振興賞 機械振興協会会長賞受賞

査信頼性と作業能率の更なる向上を実現した。本稿では、開発技術の概要について紹介する。

2 開発のねらい

厚板オフライン手動探傷の自動化を検討し、自動化手段として自走式ロボットとオンライン自動探傷と同じ専用装置を比較した。その結果、自走式ロボット方式を実現できれば、メリットが非常に大きいことが分かった（図2）。

- (1) ロボットが厚板サイズ・配置を認識して、厚板上を漏れなく移動し探傷できれば、厚板サイズに制約はなく配置精度も不要となる。
- (2) 探傷必要枚数に応じて、ロボットの同時稼働台数を増減する柔軟な運用が可能である。
- (3) 運搬容易なロボットであれば、使用後・不使用時は検査場の外へ運搬・保管しておけば、同じ場所で他作業が可能となり検査場の運用に柔軟性を確保できる。

3 開発技術の概要

本ロボットは、次に述べる高精度測位システム（自己位置情報）と超音波探傷器（検査センサ情報）を、独自開発の小型・軽量ロボットで紐付けるものである。本ロボットは厚板上を漏れなく高精度に移動し、厚板全面の精密な超音波探傷が可能である（図3）。

本ロボットは小型・軽量設計を追求した結果、20kg/台を達成し、人力で運搬可能なため高い運用性も実現している。小型・軽量化と運用性・能率も両立させるために下記の特長がある。

- (1) 2輪駆動・非操舵化：以前に開発済の自走式ロボット²⁾は、4輪駆動・4輪操舵であり大きく重いものとなっていたため、ユーザビリティ（使いやすさ）の観点から課題があっ

た。そこで本ロボットでは設計を根本的に刷新し、搭載モータ数を10個から限界の2個までミニマム化し、限界小型・軽量化を実現した（2輪駆動・非操舵化、探触子走査機構の非搭載化）。

- (2) バッテリ駆動・データ通信無線化：4～5時間の連続稼働が可能である。ロボットへの有線繋ぎ込みも不要化し運用性・動作性も向上した。
- (3) 超音波探触子 2個化：板面内の同一箇所を2個の探触子で重複探傷しない効率的な移動ルートも自動作成し、探傷能率も向上した。

4 技術上の特長

自走式ロボットを本件のような品質保証に関連する分野で使用する場合、高精度な自己位置認識が必要である。自己位置情報と検査センサ情報を紐付けるためである。一般的な測位精度としては±数10mmのオーダが通常であるが、精密な検査目的においては不十分である。

そのため、屋外GPSを模した屋内型高精度測位システムを採用した。本ロボットには測位システムの受信部一式および自己位置算出・移動制御用PCが搭載される。人工衛星に相当する複数のレーザ灯台からは、所定角度の広がりを持つ有効到達距離30～40mの赤外線レーザが、レーザ灯台を中心として全周360°に所定周期で3次元的に常時放射される。赤外線レーザの重複領域が、各レーザ灯台を基準とした三角測量の原理による高精度測位が可能な領域である。例えば図4は、レーザ灯台3個から形成される高精度測位領域内に、本ロボット3台が稼働する矩形エリアを設定した場合の状況図である。

本ロボットは、検査対象の厚板の寸法、置かれている方向を自動で算出・認識する自動教示機能を実装している。自動教示完了と同時に厚板上面にxy平面を定義、所定の探傷規

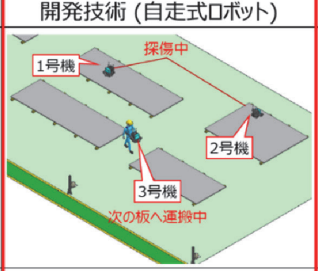
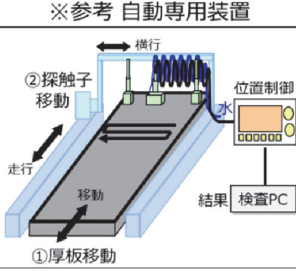
開発技術（自走式ロボット）	※参考 自動専用装置
	
20kg/台	大型（数10トン）
制約なし	装置サイズに制約される
精度不要→どの向きでもOK	搬送ライン上に限られる
他作業も実施可能	設置場所は専有され他作業不可

図2 自走式ロボットと専用装置の比較（Online version in color.）

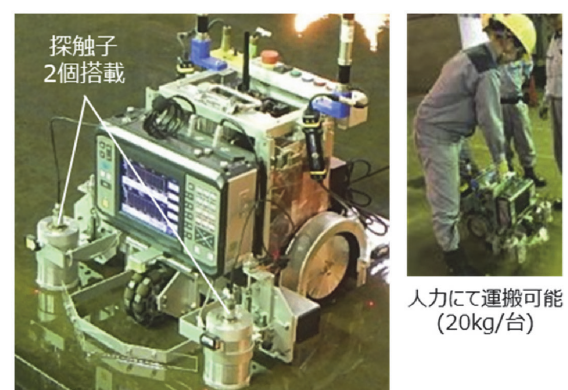


図3 自走式精密検査ロボット（Online version in color.）

格に基づいて厚板を探傷するための移動ルート（探傷ルート）も自動作成する。自動教示後、連続で探傷動作に移行するが、探傷中、本ロボットは目標ルートから算出される目標位置と現在位置の差分を連続認識し、自己位置を補正制御しつつ目標ルートを自動で高精度追従しながら超音波探傷する。

ステアリング機構非搭載のため、移動制御（直進、カーブ、その場回転、等）は左右車輪の回転速度制御のみで実現される。移動パターンは切り返し方式（スイッチバック方式）を採用している。厚板全体を板幅中央で前半（大きな動きとしては紙面左から右）と後半（大きな動きとしては紙面右から左）に2分割する（図5）。

本ロボットは最エッジ（厚板の端）まで探触子を到達させることができる。後半の探傷開始時には180°回転して反対側のエッジに探触子を向け、前半と同様の探傷動作を行う。

本ロボットは1台で厚板1枚を探傷し、複数台の同時運転も可能である。基本動作としては、板中央からエッジ方向（1→2）に探傷するi番目の探傷パスと、当該探傷パスの終点2から所定の探傷ピッチだけ離れた次の（i+1）番目の探傷パ

ス始点の3に移動する移動パスを交互に移動する。探傷パスにおける走行精度は±2mm以内を実現しており、これは人や一般的な移動ロボットでは実現が難しい移動精度と考えている。その結果、精密な厚板全面探傷を可能とした。

5 実用上の効果

図6に探傷結果の一例を示す。3本の人工疵を施した厚板の探傷結果（マップ）であり、所定位置に直線形状で切れ目なく3本の疵を検出できている。疵はその程度に応じてカラーマッピングされるため一目瞭然である。探傷マップは、厚板面上の座標と当該位置の疵情報が紐付けられており、社内・公的規格に基づいて自動で合否判定される。

本ロボットにて、探傷作業から探傷マップ作成・合否判定に至るプロセスを自動化できる。その結果、手動探傷作業を自動化・効率化するだけでなく、人手を介さなくなるためオ

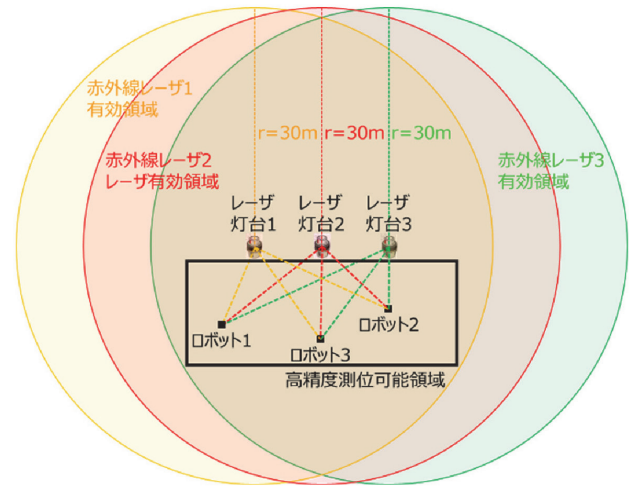


図4 レーザ灯台と高精度測位可能領域の例（Online version in color.）

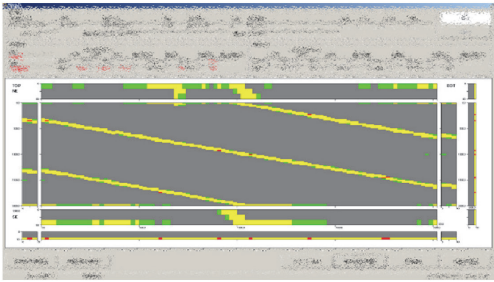
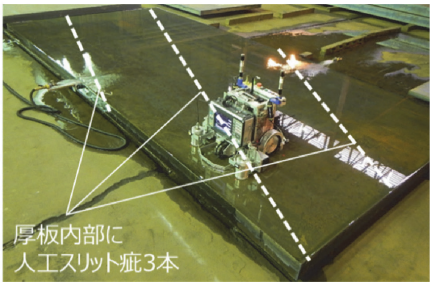


図6 本ロボットによる探傷マップの1例（Online version in color.）

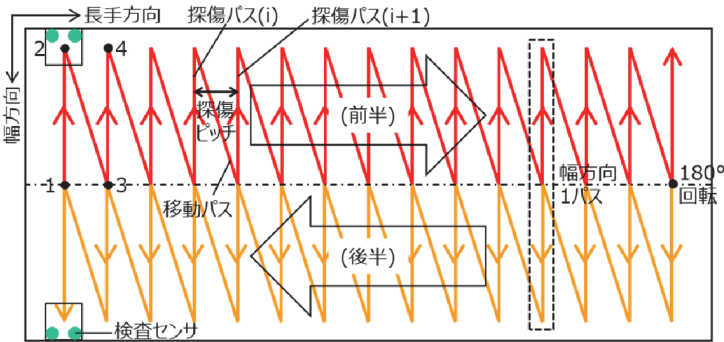


図5 本ロボットの基本的な移動パターン（Online version in color.）

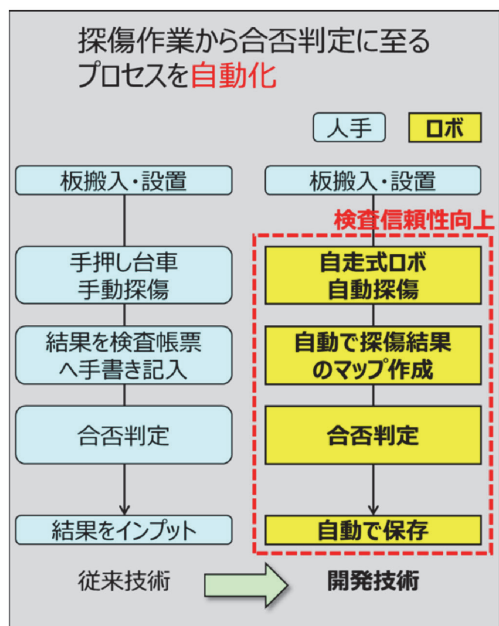


図7 本ロボットによる探傷プロセス自動化 (Online version in color.)

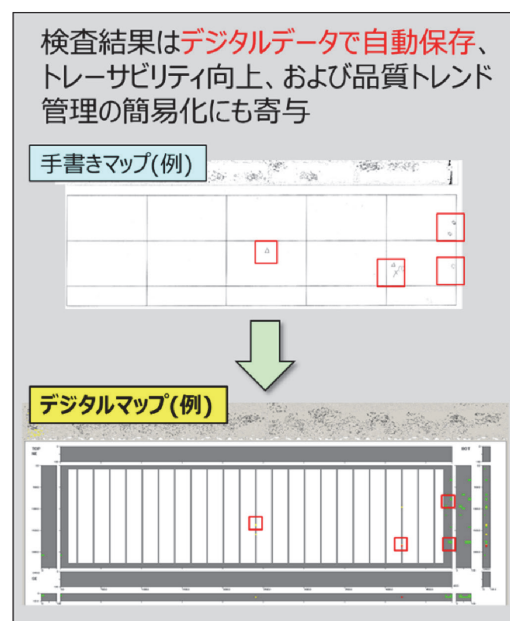


図8 デジタルデータ化による品質管理 (Online version in color.)

ンライン自動探傷と同等まで検査信頼性の向上も可能となった（図7）。

また、本ロボットの探傷能率は人とほぼ同等でありながら、探傷精度は目標ルート $\pm 2\text{mm}$ 以内と非常に高精度であるため探傷自体の付加価値も高い。本ロボットが自動探傷中、人は別の作業をすることも可能であり、検査場の運用もより柔軟となる。

検査結果は、板ごとに手書きで作成・ファイリングしていたものが、デジタルデータ・マップとして一括自動保存されるため、トレーサビリティの向上および品質トレンド管理の簡易化にも寄与している（図8）。

6 おわりに

今回、厚板のオフライン探傷工程における手動探傷作業の一連のプロセスを自動化できる厚板自走式超音波探傷ロボットを世界で初めて開発した。既に東日本製鉄所（京浜地区）の厚板工場に3台導入を完了し運用中である。今後も当社西日本製鉄所（福山地区・倉敷地区）の厚板工場への展開を進め、作業効率化を図りながら厚板品質のさらなる向上に努めていく。

また、今回は本ロボットを厚板超音波探傷用としたが、搭

載する検査センサを超音波探触子から別のセンサに換装すれば、当該センサに応じた別の精密検査も可能な汎用性を有している。すなわち鋼板以外の他材質（例えば銅、アルミ等）の板の検査も可能であり、また製鉄所以外の現場（例えば建設現場）等における検査も可能である。今後も製造現場におけるあらゆる分野の課題をDXも最大限活用して解決し、持続可能な社会の実現に貢献していく。

当社は、「JFE Digital Transformation Center」(『JDXC™』)を開設し、製造プロセスのCPS（サイバーフィジカルシステム）化を進めるなど、DX（デジタルトランスフォーメーション）を積極的に推進し、革新的な生産性向上および安定操業の実現を目指している。今後も、製造現場におけるあらゆる分野の課題をDXも最大限活用しつつ解決し、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) JFEスチール株式会社：プレスリリース記事，(2021.3.2)
- 2) 小林正樹，山下浩二，館野純一：設備点検・検査自動化のためのロボット自律走行制御，JFE技報，(2019) 44，34.

(2023年10月31日受付)