

鋼管外面手入れの自動化に向けた ティーチングレス研削ロボットシステムの開発と実機導入

Development and On-Site Installation of a Teaching-Less Grinding Robot System for the Automation of Steel Pipe Outer Surface Finishing

渡邊 拓 WATANABE Taku JFE スチール 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 主査研究員
角谷 拓馬 SUMIYA Takuma JFE スチール 知多製造所 製造部 小径シームレス管工場 副工場長
山下 浩二 YAMASHITA Koji JFE スチール 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 グループリーダー
石田 匡平 ISHIDA Kyohei JFE スチール 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長・博士（工学）

要旨

鋼管表面の欠陥を研削除去する作業は作業者に大きな負担がかかるため自動化が求められているが、既存の大型設備による自動加工は能率が悪い。そこで筆者らは、3次元形状測定・点群処理と2次元画像処理を組み合わせ、欠陥部の形状を抽出し、その形状に基づいてツールの接触姿勢や加工軌跡を自動生成するシステムを開発した。ロボットアームが加工軌跡に従い動作し、圧力制御装置で研削深さを安定的に制御、さらに送り速度を調整することで高品質な研削を実現している。このシステムの導入により作業能率が約2.5倍向上し、安全性と職場のエンゲージメントも改善された。

Abstract:

Grinding-based removal of surface defects on steel pipes places a heavy burden on workers, creating a strong demand for automation. However, existing automated processing using large equipment suffers from low efficiency. To address this issue, JFE Steel developed a system that extracts defect geometry by combining 3D shape measurement and point cloud processing with 2D image processing, and then automatically generates the grinder contact posture and machining path based on the extracted shape. A robot arm follows the generated machining path, while a pressure-control device ensures stable control of grinding depth. In addition, feed-rate adjustment enables high-quality grinding. With the introduction of this system, work efficiency improved by approximately 2.5 times, and both workplace safety and employee engagement were enhanced.

1. はじめに

製鉄所では製鉄—製鋼—圧延工程の自動化が進む一方、圧延後の精整工程は多品種の鋼材を扱い、検査、矯正、手入れなど作業の種類も多岐にわたるため自動化が難しい。

その中でも、表面欠陥をグラインダーで除去する手入れ作業は、振動、騒音、粉じんなどにより作業者の負荷が大きく、また回転体に近接する危険な3K作業である。難製造材の増加や品質要求の高度化により手入れ作業量が増加する一方、3K作業のため担い手は減少し、将来的に作業者確保が困難になると見込まれる。

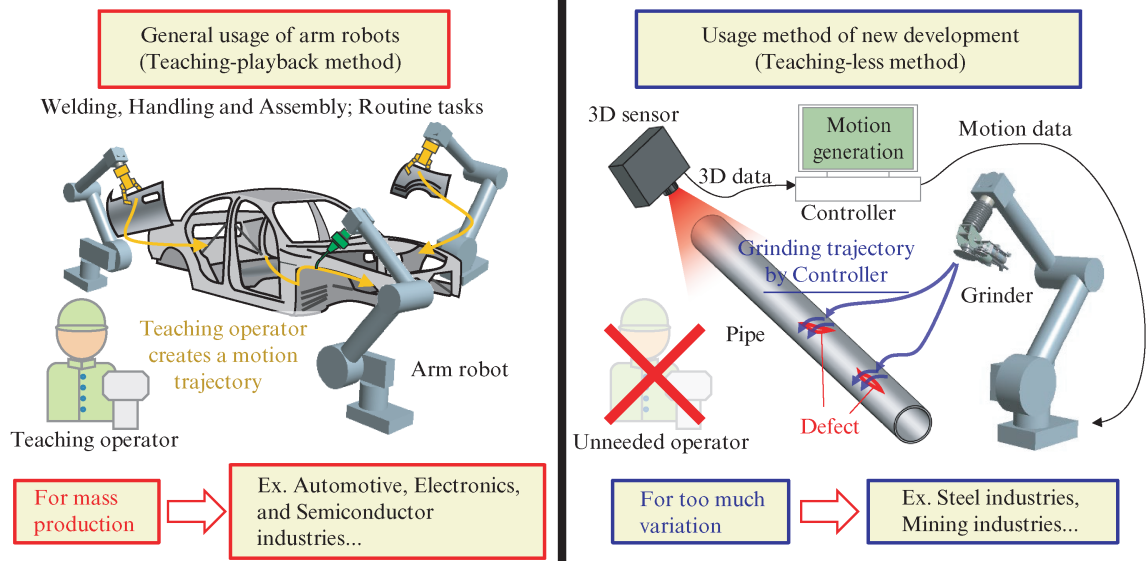
手入れ作業の自動化については、厚板製品やスラブでは表面疵のみを研削できる大型の門型装置が実用化¹⁾され、広い平面上の任意の位置を研削できるようになっている。しかし、鋼管は立体的な曲面形状であるため、これら平面向けの大規模設備では対応できず、別のアプローチが必要と

なる。

鋼管手入れ自動化技術として、スパイラル搬送中に回転砥石を当てて全周・全長を研削する方式が実用化されている。しかし、鋼管表面疵は位置・大きさがランダムであるため、本方式では不要部まで研削することで加工時間が長大化し、肉厚不足による寸法不適合リスクも生じるため、適用範囲は限定的である。これに対し、疵部分のみを研削する装置²⁾も開発されており、非破壊検査装置と大型グラインダーを組み合わせ、疵位置を特定し、該当箇所のみを研削除去することで加工時間を短縮できる。しかし、検査と手入れを同一設備で同時に処理するため、疵が少ない場合は手入れ時間が、疵が多い場合は検査時間が制約され、工程全体の処理能力が低下する可能性がある。また、非破壊検査および搬送系を含むため導入コストが高いという課題も残る。

本稿では、既設の検査設備を活用しつつ鋼管表面の疵部のみを選択的に研削する、高い動作自由度を有する6軸ロボットアームにグラインダーを搭載した自動手入れ技術を提

2026 年 4 月 6 日受付

図1 従来のロボットアームの使用方法との比較¹⁸⁾Fig. 1 Comparison of arm robot usage methods¹⁸⁾

案する。本技術は、省力化と3K作業からの解放を通じて作業者エンゲージメントを向上させ、将来的な事業継続性を確保することを目的として開発した。

2. 鉄鋼業におけるロボットアーム活用と欠陥研削適用への課題

6軸以上の自由度を持つロボットアームは、多様な産業分野^{3,5)}で利用されている。鉄鋼分野においても、定型的作業の自動化⁶⁾に加え、鋼矢板のバリ除去⁷⁾などの加工工程への適用が報告されている。これらの多くは、オペレーターが作業手順やアーム姿勢を教示し記録した動作を再現する、ティーチングプレイバック方式に基づいて運用されている。

一方、鉄鋼産業で自動化が求められる作業の多くは対象物のばらつきが大きく、ティーチングプレイバック方式による画一的動作では対応が難しい。既報の適用事例では、ロボットハンドに位置補正機構等を付与することで限定的なばらつきへの対応を可能とし、自動化が実現できている。しかし、今回対象とする鋼管疵の手入れ作業は、鋼管寸法の多様性に加え、疵が製造条件に依存して表面の任意の位置に散在するため、定型動作に補正機構を組み合わせる従来方式では自動化が困難である。

国際ロボット連盟(IFR)によれば、2016年における産業用ロボットの用途のうち、切断、研削、バリ取り、フライス加工、研磨などの加工分野への適用率はわずか1.4%である⁸⁾。この限られた事例の中で、ロボットアームによる研削加工の自動化は、主に金型仕上げや航空機用タービンブレードの精密研削など、手仕上げを要する加工工程で1990年代から検討されている⁹⁾。

研削加工の自動化では、砥石先端軌跡(加工軌跡)の自動生成技術が重要である。これまでに、CAD/CAMデータに基づく加工軌跡生成¹⁰⁾、2次元画像上で定義した軌跡をCADモデルにマッピングして3次元軌跡へ変換する手法¹¹⁾などが提案されている。また、CADデータを用いない方法として、複雑曲面をもつ铸造品に対し、接触圧力検知と視覚センサを連動させて接触姿勢・位置を計測し、その記録から軌跡を自動生成する手法も報告されている¹²⁾。

これらの手法はいずれも、事前に準備されたCADデータなどの形状情報に基づいて加工軌跡を生成するか、加工前にツールを対象物へ接触させ、力覚情報を利用して砥石姿勢を定義する必要がある。しかし、鋼管表面の疵手入れ作業では形状情報は存在せず、利用可能な情報はロボット前方の現物形状のみである。さらに疵は製造のたびに異なる位置に散在するため、事前接触を要する手法では都度ティーチングが必要となり、自動化にはつながらない。

ロボットアームを研削加工に適用するためには、所望の研削深さを得るために砥石と加工対象との接触力を制御する必要がある。多くの力制御手法が提案されてきた¹³⁾。これらは各軸制御系に追加ループを組み込むことで力制御を実現している。しかし、報告例で用いられるロボットはオープンアーキテクチャに対応した小型機が中心であり、大型ツールを使用し高い接触力が発生する疵手入れ作業には適用が難しい。一方、高剛性・大可搬の産業用ロボットアームに対する力制御の適用例として、ハイブリッド・コンプライアンス制御を用いた報告¹⁴⁾がある。同報告によると、トルク指令型制御は高いコンプライアンスを実現する一方で実用的な位置剛性を確保できず、位置指令型制御では一般的産業用ロボット並みの剛性が得られるものの設定可能なコンプライ

アンス範囲は限定的であった。また、他の報告でも位置制御ベースのコンプライアンス設定は接触状態の不安定性などから困難とされており、産業用ロボットアームによる実用的な力制御研削手法はいまだ確立されていない。

筆者らは前述の課題を踏まえ、鋼管疵手入れ作業の自動化に向けて以下の技術目標を設定した。

- (1) 多様な径の鋼管表面に散在する疵位置の特定
- (2) 教示作業なしで疵のみを研削する動作の自動生成
- (3) 安定した研削深さ、滑らかさ

これらの目標に対し、筆者らは疵を含む鋼管形状を取得する3次元測定装置、測定データに基づき研削動作を自動生成する演算・制御装置、一定の研削圧を維持する圧力制御装置を組み合わせた設備構成を提案した。これにより、従来困難であった、非定型作業である鋼管手入れの自動化が可能となる。図1に従来手法と提案手法の比較を示す。従来のティーチングプレイバック方式は、一定形状でばらつきの少ない対象を扱う自動車・電機分野で有効である。一方、提案手法は、疵のように位置がランダムで現物情報のみが利用可能な作業に適しており、鉄鋼分野に残る手作業の自動化に寄与することが期待される。

3. 欠陥位置の自動検出技術

図2に従来の検査・手入れ工程を示す。検査ラインで欠陥が検出されると疵の存在位置を示すマーキングが施され、手入れラインでは作業者がこれを目視で研削し除去する。今回、検査工程は従来のまま利用し、手入れ作業のみをロボットで自動化する方針とした。

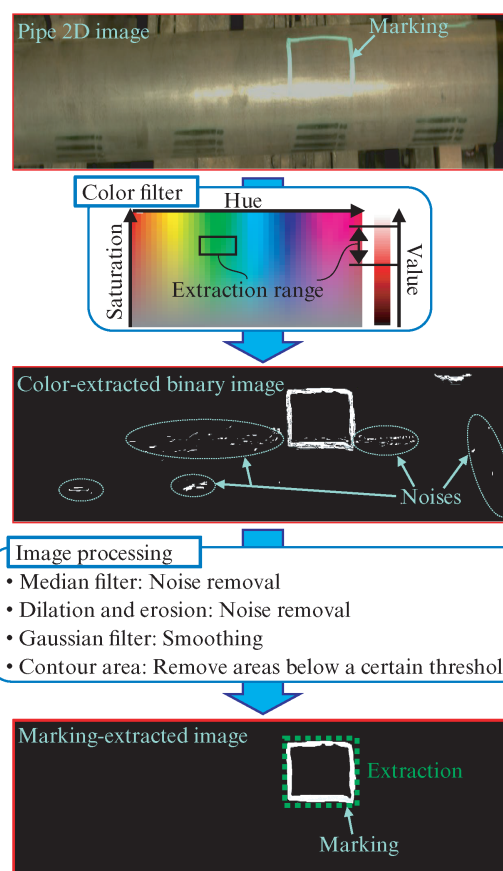
具体的には、欠陥検出を別工程で実施し、マーキングされた鋼管がロボット前に搬送される方式である。マーキングは欠陥寸法に応じて形状・位置が毎回変化し、鋼管径も多様であるため、マーキング済み鋼管の3次元形状および色情報から研削対象領域を抽出するデータ処理技術を開発した。

手入れ対象の鋼管の3次元測定には、位相シフト方式の3次元カラーカメラを用いた。近年の画像処理技術により奥行き方向再現性 ± 0.3 mm級の測定とRGB色情報の取得が可能であることから本方式を採用した。3次元測定データは 1920×1080 画素の各点に位置(x, y, z)とRGB値を含む $1920 \times 1080 \times 6$ の配列構造であり、この一体化された位置・

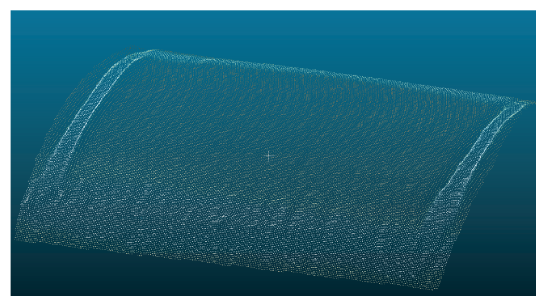
色情報を用いて後続の処理を行う。

測定データには鋼管以外の搬送設備や環境ノイズなどの不要領域が含まれる。この不要領域については、各点位置情報のxおよびz方向の上限・下限閾値を設け、範囲外のデータのRGB値を(0, 0, 0)に置換することで除去する。

続いて、図3(a)に示すように、色抽出、二値化、ノイズ処理といった画像処理を適用することでマーキング領域のみを抽出する。抽出されたマーキング画素に紐づく位置情報を用い、図3(b)に示すようにマーキング部の3次元点群を取得する。



(a) Image processing for marking extraction



(b) Marking point cloud

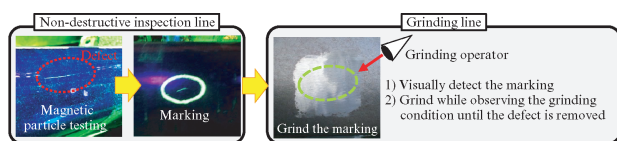


図2 欠陥検査と手入れ作業の工程¹⁸⁾

Fig. 2 Inspection and maintenance workflow¹⁸⁾

図3 画像処理を用いたマーキング検出ロジック¹⁸⁾

Fig. 3 Process to extract marking¹⁸⁾

4. ロボット研削動作の自動生成

3章で得られたマーキング点群に基づく加工軌跡生成手法について述べる。図4に示すように、ノイズ除去後のマーキング点群をx-y平面へ投影し、各点座標の最大値 $x_{\max}$, $y_{\max}$, 最小値 $x_{\min}$, $y_{\min}$ から加工範囲 Lx , Ly を設定する。

ここで加工原点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ を式(1), (2)で定義する。

$$x_0 = x_{\min} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y_0 = y_{\min} \quad \dots\dots\dots (2)$$

P_0 からx方向に初期位置 L_{x0} , 加工軌跡点間隔 ΔL_x , y方向に初期位置 L_{y0} , 加工軌跡点間隔 ΔL_y の位置にそれぞれ加工軌跡点 $P_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ ($0 < i < N, 0 < j < M$)を配置する。各加工軌跡点のx, y位置は式(3), (4)で定義される。

$$x_{ij} = x_{\min} + L_{x0} + i\Delta L_x \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$y_{ij} = y_{\min} + L_{y0} + j\Delta L_y \quad \dots\dots\dots (4)$$

加工順について、あるjにおけるiが昇順になるように並べた一連の加工軌跡点を加工軌跡パスと定義し、このパスをjが昇順になるように並べたデータ構造を加工軌跡と定義する。ある加工軌跡点 P_{ij} のz位置 z_{ij} は P_{ij} の周辺のK個の測定点群 $p_{m1}(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}), p_{m2}(x_{m2}, y_{m2}, z_{m2}), \dots, p_{mK}(x_{mK}, y_{mK}, z_{mK})$ と既知の P_{ij} のx, y位置 (x_{ij}, y_{ij}) から式(5)によって求められる。

$$z_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \{|x_{mk} - x_{ij}| + |y_{mk} - y_{ij}|\} z_{mk}}{4} \quad \dots\dots (5)$$

このとき、K個の点はx-y位置に関するkd-treeを用いた最近傍探索¹⁵⁾によって抽出される。

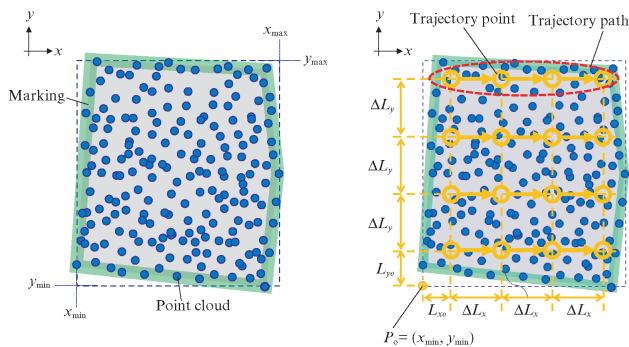


図4 加工軌跡配置概要¹⁸⁾

Fig. 4 Determination of the x, y positions of the trajectory path¹⁸⁾

次に砥石の接触角度を計算する手法について述べる。近傍探索で得られた加工軌跡点 P_{ij} とK個の点群に対し、主成分分析を用い加工軌跡点 P_{ij} の法線 $n_{ij}(p_{ij}, q_{ij}, r_{ij})$ を推定¹⁶⁾し、式(6)により無次元化した法線ベクトル $N_{ij}(P_{Nij}, Q_{Nij}, R_{Nij})$ を求める。

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} P_{Nij} \\ Q_{Nij} \\ R_{Nij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{p_{ij}}{\sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2 + r_{ij}^2}} \\ \frac{q_{ij}}{\sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2 + r_{ij}^2}} \\ \frac{r_{ij}}{\sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2 + r_{ij}^2}} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

次に加工軌跡点 P_{ij} と $P_{i,j+1}$ の間を結ぶ加工方向ベクトル $f_{ij}(a_{fij}, b_{fij}, c_{fij})$ を式(7)によって定義する。

$$f_{ij} = \begin{pmatrix} a_{fij} \\ b_{fij} \\ c_{fij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i,j+1} - x_{ij} \\ y_{i,j+1} - y_{ij} \\ z_{i,j+1} - z_{ij} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

加工方向ベクトル f_{ij} を無次元化した $F_{ij}(A_{fij}, B_{fij}, C_{fij})$ を式(8)により求める。

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} A_{fij} \\ B_{fij} \\ C_{fij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a_{fij}}{\sqrt{a_{fij}^2 + b_{fij}^2 + c_{fij}^2}} \\ \frac{b_{fij}}{\sqrt{a_{fij}^2 + b_{fij}^2 + c_{fij}^2}} \\ \frac{c_{fij}}{\sqrt{a_{fij}^2 + b_{fij}^2 + c_{fij}^2}} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (8)$$

図5に加工軌跡と砥石の姿勢の関係を示す。図5は加工軌跡点 P_{ij} 先端に砥石先端部分が接触している状態を示している。砥石の姿勢はその回転軸と直交する砥石姿勢の単位

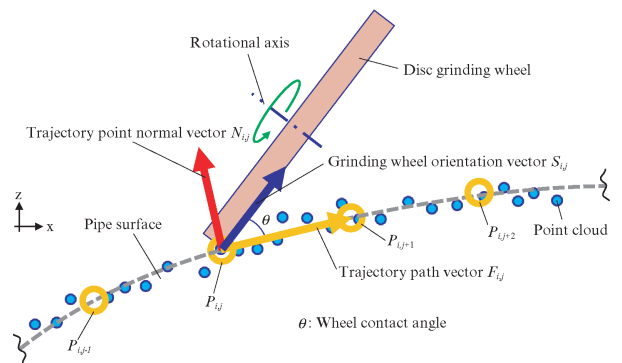


図5 研削中の砥石姿勢の定義¹⁸⁾

Fig. 5 Definition of grinding wheel contact posture¹⁸⁾

ベクトル S_{ij} によって定義される。砥石姿勢ベクトル S_{ij} は

- (1) 法線ベクトル N_{ij} と加工方向ベクトル F_{ij} と共面である
 - (2) 加工方向ベクトル F_{ij} と一定の角度 θ をなす
- すなわち、式 (9)～(11) という条件下で求められる。

$$S_{ij} = t\vec{F}_{ij} + s\vec{N}_{ij} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\cos \theta = A_{fij}A_{Sij} + B_{fij}B_{Sij} + C_{fij}C_{Sij} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\cos \alpha = A_{Sij}A_{Nij} + B_{Sij}B_{Nij} + C_{Sij}C_{Nij} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで A_{Sij} , B_{Sij} , C_{Sij} は砥石姿勢ベクトル S_{ij} の各成分, t, s は実数である。

また, S_{ij} と N_{ij} がなす角度を α としたとき, N_{ij} , F_{ij} は各成分ともに既知のため α は式 (12) により表される。

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{\vec{F}_{ij} \cdot \vec{N}_{ij}}{|\vec{F}_{ij}| \cdot |\vec{N}_{ij}|} \right\} - \theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

式 (9)～(12) を整理し, 式 (13) の連立方程式を得る。これを解くことで A_{Sij} , B_{Sij} , C_{Sij} が求まる。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -A_{fij} & -P_{Nij} \\ 0 & 1 & 0 & -B_{fij} & -Q_{Nij} \\ 0 & 0 & 1 & -C_{fij} & -R_{Nij} \\ A_{fij} & B_{fij} & C_{fij} & 0 & 0 \\ P_{Nij} & Q_{Nij} & R_{Nij} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{Sij} \\ B_{Sij} \\ C_{Sij} \\ s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cos \theta \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

上記で求めた各加工軌跡点 P_{ij} , 砥石姿勢ベクトル S_{ij} を加工順に配列し, 加工軌跡点 P_{ij} をアームロボットの手先位置, 砥石姿勢ベクトル S_{ij} を手先のアームロボットの手先姿勢として, 逆運動学計算を行うことでロボットの加工動作を計算する。以上の処理により, ティーチングを行うことなくマーキング部を研削する加工軌跡を自動生成できるようになった。

5. 研削深さと品質のコントロール

安定した研削深さを得るためには, 砥石と加工対象の接触力制御が不可欠であり, ロボットアームとエンドエフェクターの間に, 高圧空気を利用して一定圧力を発生させる圧力制御装置を用いた。本装置を介することで内部ストローク機構が作動し, 形状変動に追従しながら一定の接触力を維持でき, 過負荷防止と安定した研削力の確保が可能となる。

図 6 に本装置を用いた研削実験の結果を示す。ある鋼種

において, 接触力と研削深さは Preston の法則¹⁷⁾ に従い比例関係を示すことが確認された。他鋼種でも同様の傾向が得られたため, 研削圧力 f を式 (14) で表される単純モデルにより決定した。ここで h_0 は目標の研削深さ, a_{cf} , b_{cf} は鋼種ごとに事前実験で決定したパラメータである。

$$f = \frac{h_0 + b_{cf}}{a_{cf}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

次に, 速度制御による研削面品質向上について述べる。

図 7 (a) は接触力一定・速度一定で研削した場合の仕上げプロファイルを示す。両端部に段差が生じており, この段差は応力集中や非破壊検査への悪影響となる。そこで Preston

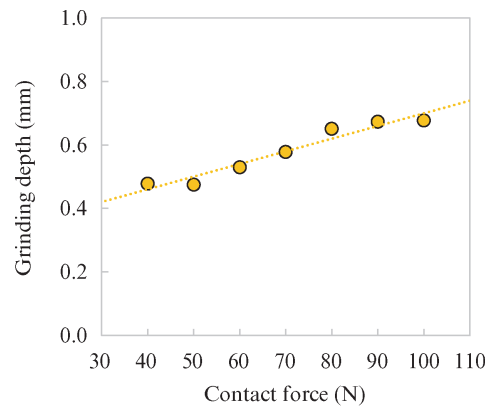
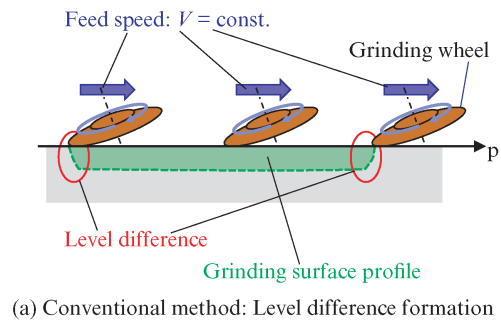
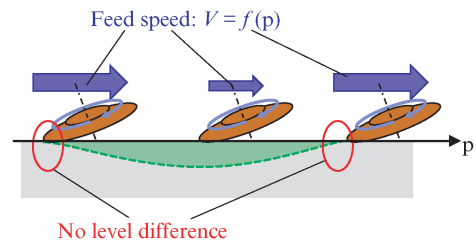


図 6 研削圧力と研削深さの関係¹⁸⁾

Fig. 6 Relationship between contact force and grinding depth¹⁸⁾



(a) Conventional method: Level difference formation



(b) New method: No level difference

図 7 速度制御による研削仕上げの表面品質の向上¹⁸⁾

Fig. 7 Enhancing surface quality of grinding finish through speed control¹⁸⁾

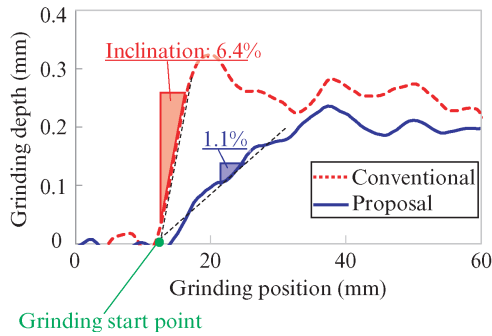


図8 研削表面形状測定結果¹⁸⁾
Fig. 8 Grinding surface profile¹⁸⁾

の法則を応用し、研削位置に応じて速度を連続的に変化させる手法を導入した。

本制御では、接触開始点など段差が生じやすい領域で研削速度を高めて接触時間を短縮し、除去深さが必要な領域では速度を低下させて接触時間を確保することで、図7 (b)に示すように段差のない滑らかな研削面を得られる。

提案手法の検証結果として、研削面プロファイルを図8に示す。従来手法では研削開始位置で研削深さの傾きが急峻となり段差と判定されるのに対し、新手法では傾きが緩和され、熟練作業者の仕上げと同等の平滑性が得られることを確認した。

図9に、自動生成した加工軌跡の模式図を示す。検出されたマーキング点群上に加工軌跡が自動配置され、各点における工具接触角度が設定される。研削時には圧力制御装置により砥石接触力が一定に保持され、さらに加工軌跡点の位置に応じて速度を連続的に変化させることで、所定の研削深さを確保しつつ滑らかで高品質な研削面を得られる

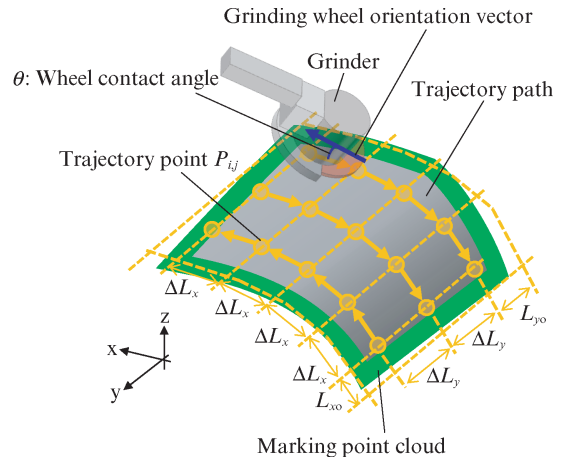


図9 自動生成された研削加工軌跡¹⁸⁾
Fig. 9 Automatically generated trajectory path¹⁸⁾

ようになった。

6. 実機導入状況と効率化評価

これまで述べてきた技術に基づいて開発した自動手入れロボットシステムは、2023年5月よりJFEスチール知多製造所で稼働している。図10に実機写真とシステム構成を示す。鋼管全長を跨ぐ門型フレーム上に長手方向へ移動可能な台車を配置し、その上にロボットアームと3次元センサを搭載するレイアウトを採用した。長手方向は台車移動、周方向はターニングローラーによる鋼管回転により、全長・全周の任意の位置に発生した疵を研削できるようになっている。

本装置は、別工程で検出されたマーキングの長手方向位置を基にロボットを横行台車で該当位置へ移動させ、鋼管

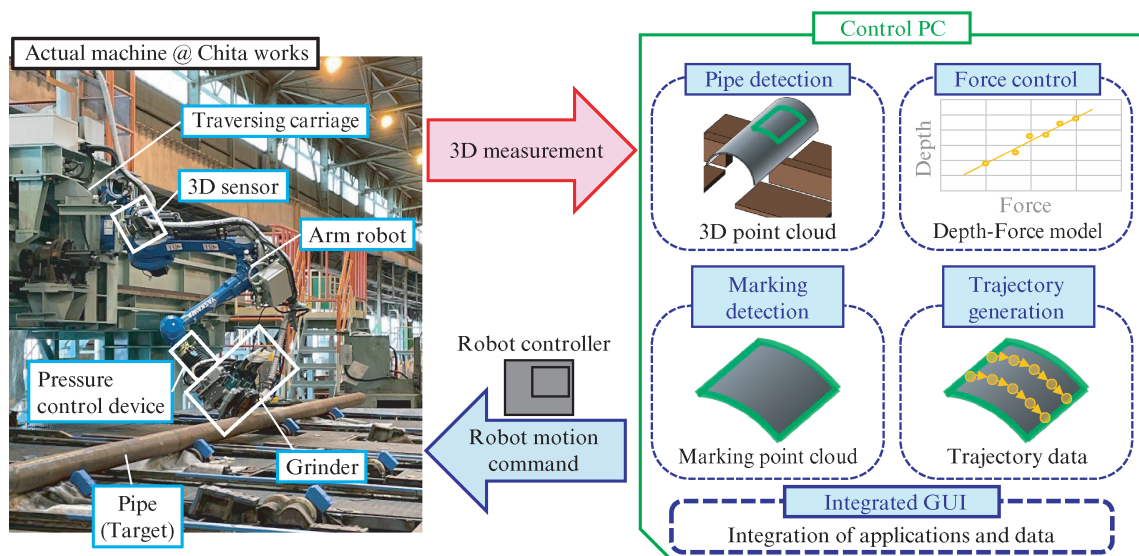
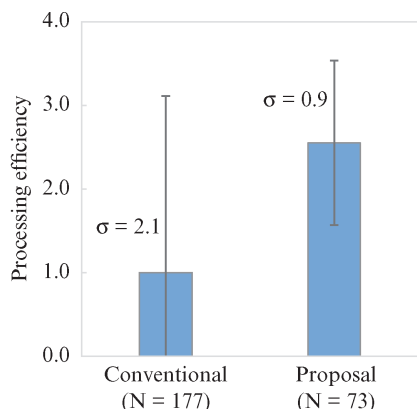


図10 自動化鋼管研削ロボットシステム¹⁸⁾
Fig. 10 Automated steel pipe grinding robot system¹⁸⁾

図 11 処理能率の比較¹⁸⁾Fig. 11 Comparison of processing efficiency¹⁸⁾

表面を3次元測定する。得られた点群データに対し、鋼管抽出処理およびマーキング点群の自動検出を行い、マーキング形状と事前設定パラメータから位置・姿勢・速度を含む加工軌跡を自動生成する。生成された軌跡はロボットコントローラーを介してロボットへ送信され、教示なしで多径鋼管に発生する多様な表面疵を自動研削できる。

図 11 に、高強度鋼種の手入れにおける、従来の手作業と本システムの処理能率比較を示す。処理能率は作業員 1 名あたりの単位時間で処理可能な鋼管本数とした。本システムは高出力グラインダーの連続運転が可能であるため、ロボット操作員を含めても処理能率は従来比約 2.5 倍となった。また、ロボットは作業時間のばらつきが従来の約半分であり、作業員の熟練度や体調に依存しない安定した研削が可能であることが確認できた。

本システムの導入により処理能力が向上しただけでなく、作業員がグラインダーを直接扱う必要がなくなった。これにより、振動疲労、火花曝露、切創災害といったリスクが解消され、職場の安全性が大きく向上した。また、作業品質が個人の技量や体力に依存しなくなったことで、年齢・性別に関わらず手入れ工程へ参画できるようになり、職場全体のエンゲージメント向上にも寄与した。

7. おわりに

本稿では、3K 作業であるグラインダー手入れ作業を対象に、産業用ロボットアームと 3 次元測定装置を組み合わせ、教示作業なしで自動研削するシステムを提案した。従来の教示ベース方式では実現困難であった、多種多様な寸法・形状をもつ疵部のみの選択的研削を自動化した点に特徴がある。具体的には、3 次元形状測定と点群処理、2 次元画像処理により疵形状を抽出し、その形状に基づく工具接触姿勢を含む加工軌跡の自動生成、圧力制御機構による研削深さ制御、および速度制御による仕上げ面形状の最適化を組

み合わせ、教示不要の自動研削システムを構築し、実機工程として稼働させることができた。

本システムは 2023 年 5 月より知多製造所小径シームレス工場稼働し、従来比 2.5 倍の処理能率を実現した。これにより作業員は 3K 作業から解放され、職場の安全性向上とエンゲージメント改善に寄与した。

今後は別ライン、別工場への展開を見据え、さらなる技術開発を進める予定である。本技術の適用範囲を拡大することで、より多くの現場における自動化・効率化、作業環境改善、生産性向上を実現し、3K 作業からロボットオペレーション業務への職種転換によるエンゲージメント向上と事業継続性の強化を図っていきたい。

参考文献

- 1) 弓削直幸, 赤澤元, 中路茂, 佐藤康弘. 厚板自動研削グラインダー. 材料とプロセス. 1994, vol. 7, no. 5, p.1395.
- 2) 青柳和也, 兵藤繁俊, 菅野博, 山寺芳美. ステンレス鋼管の自動研削装置. 住友金属. 1991, vol. 43, p. 113-122.
- 3) 村山英之, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄. 自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボット. 日本ロボット学会誌. 2010, vol. 28, no. 5, p. 624-630.
- 4) 廣田幸伯. 特集「溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開」総説ロボット. 溶接学会誌. 2008, vol. 77, no. 2, p. 135-139.
- 5) Moura, F. M.; Silva, M. F. Application for automatic programming of palletizing robots. 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC 2018), IEEE, Piscataway, NJ. 2018, 48.
- 6) 石崎常臣. 製鉄所におけるロボットの実現性評価. 鉄と鋼. 1983, vol. 69, no. 10, p. 1266-1271.
- 7) 三戸谷暁生, 野呂弘幸, 高屋敷憲男, 三枝忠彦, 橋井昭雄, 吉田仁. 鋼矢板バリ取りロボットの導入. 鉄と鋼. 1987, vol. 73, no. 4, S-297.
- 8) Verl, A.; Valente, A.; Melkote, S.; Brecher, C.; Ozturk, E.; Tunc, L. T. Robots in machining. CIRP Annals. 2019, vol. 68, p. 799-822.
- 9) Domroes, F.; Krewet, C.; Kuhlentkötter, B. Application and Analysis of Force Control Strategies to Deburring and Grinding. Modern Mechanical Engineering. 2013, vol. 3, no. 2A, p. 11-18.
- 10) Márquez, J. J.; Perez-Garcia, J. M.; Chueco, J. R.; Vizán-Idoipe, A. Process modeling for robotic polishing. Journal of Materials Processing Technology. 2005, vol. 159, p. 69-82.
- 11) Solvang, B.; Korondi, P.; Sziebig, G.; Ando, N. SAPIR: Supervised and Adaptive Programming of Industrial Robots. 2007 11th International Conference on Intelligent Engineering Systems, IEEE, Piscataway, NJ. 2007, 281.
- 12) Zhang, H.; Chen, H.; Xi, N.; Zhang, G.; He, J. On-Line Path Generation for Robotic Deburring of Cast Aluminum Wheels. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, Piscataway, NJ. 2006, 2400.
- 13) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 佐藤和也, 泉清高, 末廣利範. オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットのための位置指令型インピーダンス制御. 精密工学会誌. 1998, vol. 64, no. 4, p. 552-556.
- 14) 桂川敬史, 五百井清, 久保田伸幸, 野呂治. 産業用ロボットにおけるハイブリッド・コンプライアンス/力制御の適用. 日本ロボット学会誌. 1994, vol. 12, no. 6, p. 893-898.
- 15) Bentley, J. L. Multidimensional binary search trees used for associative searching. Communications of the ACM. 1975, vol. 18, Issue 9, p. 509-517.
- 16) Hoppe, H.; DeRose, T.; Duchamp, T.; McDonald, J.; Stuetzle, W. Surface reconstruction from unorganized points. 1992. SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, the Association for Computing Machinery, New York, NY. 1992, 71.

- 17) Preston, F. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. *Journal of Glass Technology*. 1927, vol. 11, p. 214-256.
- 18) 渡邊拓, 牧田陽行, 角谷拓馬, 山下浩二, 石田匡平. 鋼管自動研削ロボットシステムの開発. *鉄と鋼*. 2025, vol. 111, no. 13, p. 814-823.

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献 18) の論文を、許可を得て転載、一部表現を変更して作成しております。