

鋼管の表面欠陥を自動で研削除去する ロボットシステム

J F E スチール株式会社

代表取締役社長 広瀬 政之

J F E 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	渡邊 拓
J F E 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	山下 浩二
J F E スチール(株) 知多製造所	製造部	角谷 拓馬
J F E スチール(株) DX戦略本部	デジタル化推進部	小菅 駿之介
J F E スチール(株) 知多製造所	企画部	中村 紘大

はじめに

風力発電などと並んで、環境への影響が小さい天然ガスは低炭素社会の実現に貢献し、今後も需要が高まる見込みである。天然ガス田には硫化水素などの腐食成分が多く含まれており、高深度からの採取を行うため高圧にさらされる。このような環境で使用される鋼管には、多くの合金成分が含まれ、高強度かつ高い耐腐食性能が要求される。

このガス田用鋼管は強度を高めるため、継ぎ目のない「シームレス鋼管」が求められる。シームレス鋼管は、材料に非常に大きな塑性変形を与えて製造するため、外表面にさまざまな要因で欠陥が発生することがある。

欠陥が発生した場合、作業者がグラインダーを使用し、欠陥を滑らかに削り取ることで除去している。この欠陥除去作業は、グラインダーを長時間使用するため過酷な 3K 作業となっており、作業者の確保が難しくなっている。

そこで、J F E スチール(株)では欠陥除去作業を自動化するためのロボットシステムを開発した(図1)。このシステムは、動作柔軟性が高い6軸アームロボットに圧力制御装置とグラインダーを持たせ、3Dセンサにより鋼管表面の欠

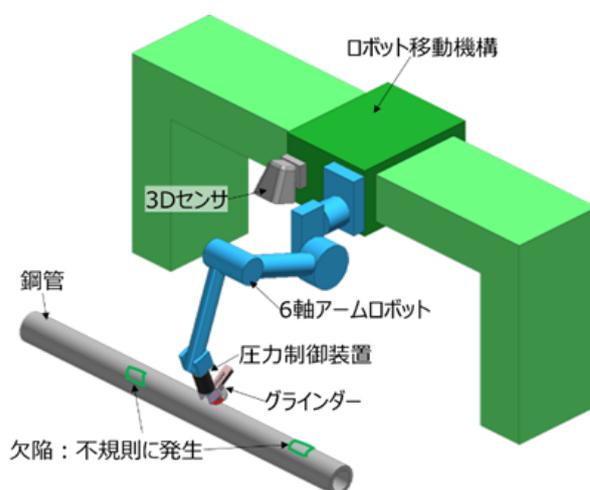


図1 鋼管自動研削ロボットシステムの概要

陥形状を認識し、自動でロボットが研削する動作を生成する「ティーチングレス研削」システムとなっている。これにより、作業者を3K作業から解放し、エンゲージメントを高めるとともに、労働生産性の向上を達成した。

開発のねらい

鋼管を含む鉄鋼製品の表面欠陥を除去する技術について調査・検討した(表1)。

門型フレームにグラインダーを搭載した装置では、鋼管のような曲面に対応できないという課題があり、全長を研削する装置や欠陥検査装

表1 自動研削に関する従来技術との比較

方式	全周・全長 研削装置	門型 加工装置	検査装置 + 研削装置	本装置
	加工時間	○ 欠陥部のみで短い	× 不要部加工するため長い	× 全長検査+研削中は検査停止で長い
曲面対応	× 平面のみ	○ 可能	○ 可能	○ 柔軟なロボで可能

置と一体化した装置では、加工時間が長いという課題がある。

鋼管表面に発生する欠陥は、不規則な位置に多様な形態で発生する。また、対象となる鋼管はφ63～180と非常に多種多様な径を持つ。このような条件下で欠陥を高速に研削除去するためには、従来技術によらない新たな技術の開発が必要であることが明らかになった。

装置の概要

除去対象である鋼管表面の欠陥部を含めた形状を測定可能な3Dセンサと、測定された3D形状データに基づいて研削動作を自動生成し、人によるティーチングなしでロボットによる自動加工を行う「ティーチングレス方式」のコンセプトを提案した(図2)。

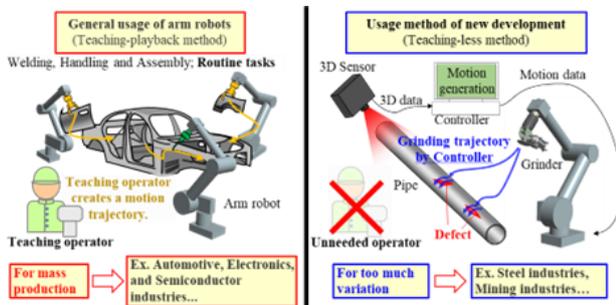


図2 ティーチングレス研削方式

© 2025日本鉄鋼協会¹⁾

「ティーチングレス方式」は、一般的なロボットの使用方法である専門の作業者が事前に設定

した動作を繰り返す「ティーチングプレイバック方式」とは異なり、ロボット、グラインダー、3次元センサに加え、3次元データを処理する制御装置や研削圧力を一定に保つ圧力制御装置を備えている。鉄鋼業界に多く存在する、手入りに代表される眼前の情報だけに頼り、自動でロボットが動作することが必要な作業に適している。

技術上の特徴

(1) 欠陥位置・形状の認識:

現状の人手作業では、非破壊検査ラインで欠陥の有無を検査し、欠陥が検出された箇所には「マーキング」を施し、その状態でグラインダーラインに送り、作業者はマーキングを目安に研削除去を行っている。ロボットによる自動化においても、この作業フローを踏襲し、欠陥マーキングを自動検出する技術を開発した。

まず、ロボット前に搬送された鋼管を3Dセンサで測定し、搬送装置など不要部分を含んだ3Dデータを取得する。この点群から位置閾値を利用して不要部分を削除する3D点群処理を行い、鋼管のみの3Dデータを得る。次に、鋼管3DデータのRGB情報を用いて鋼管の2D画像を作成し、色抽出や各種フィルタリングなどの2D画像処理

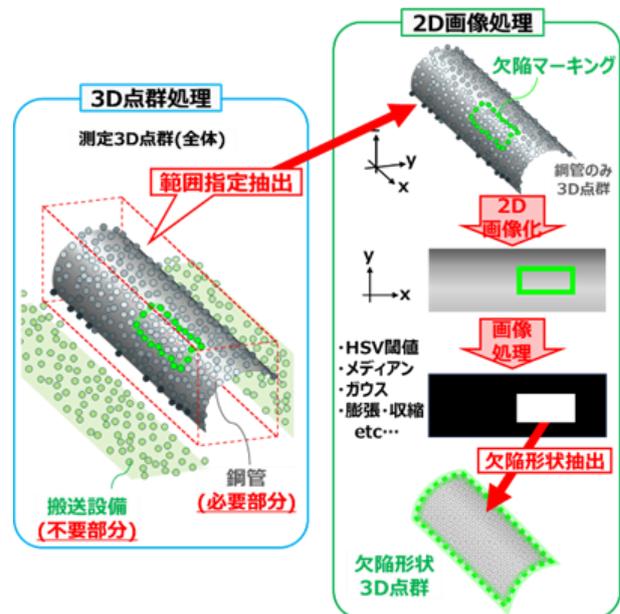


図3 欠陥3D形状の抽出

を適用することで欠陥マーキングを選別する。この選別されたマーキング位置に存在する 3D データを抽出することで、欠陥部の 3D 点群データを自動で取得することが可能となる (図 3)。

(2) 研削加工軌跡の自動生成:

前項で抽出した欠陥マーキング形状に倣って加工点を配置する。この加工点に対し、砥石の接触姿勢(角度)と速度・圧力の情報を設定することで、研削軌跡が得られる。この研削軌跡は、事前に設定した条件と測定された現物マーキングに基づいて自動生成される。この研削軌跡データをロボットへ伝送することで、ティーチングレス研削が可能となる (図 4)。

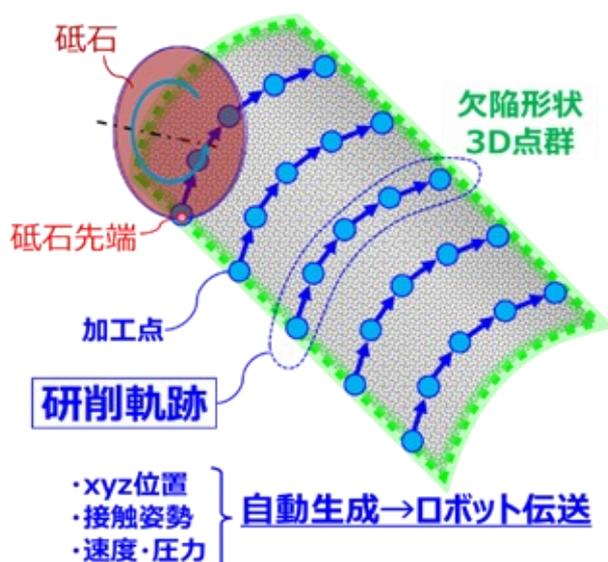


図4 研削加工軌跡の自動生成

(3) 研削深さコントロール・高品質な研削面:

ロボットによる研削においても、熟練作業者と同等の研削深さのコントロールと高品質な仕上げが求められるため、圧力制御装置と研削速度制御を導入した。

圧力制御装置は、ロボットアーム先端とグラインダーの間に備え付けられ、空気圧を用いて鋼管とグラインダーの接触圧力を一定に制御する装置となっている。この装置を用いてロボット研削実験を行い、研削圧力と研削深さの関係を整理した (図 5)。

実験結果から、研削圧力と深さは一次関数と

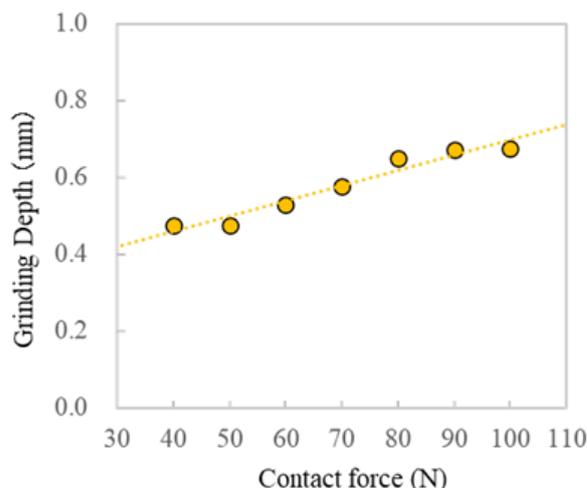


図5 研削圧力と研削深さの関係

© 2025日本鉄鋼協会¹⁾

実験結果から、研削圧力と深さは一次関数として近似可能であることが確認できたため、研削中の圧力を適切に設定することで、目標とする研削深さを達成することが可能となった。

研削速度を一定にして研削を行うと、研削面と未研削部の境界で段差が発生する。この段差は使用中の割れの起点となり得るため、品質不良と判定される。熟練作業者は研削中の状況を細かくフィードバックしながら、段差ができない滑らかな面を得るように研削するが、ロボット研削でそのような細やかなフィードバックを行うことは困難である。

そこで、開発したシステムでは、研削時間が長いほどより深く削れるという Preston の法則を応用し、研削中の速度を連続的に変更するよう制御することで、研削境界部の段差の発生を抑制し、高品質な研削面を得ることが可能となった (図 6)。

実用上の効果

本装置は、JFEスチール(株)知多製造所の小径シームレス管工場に導入され、2025年5月から商業生産を開始している。

本装置は、従来の人手によるグラインダー研削除去と比較して、より大きな研削圧力をかけ

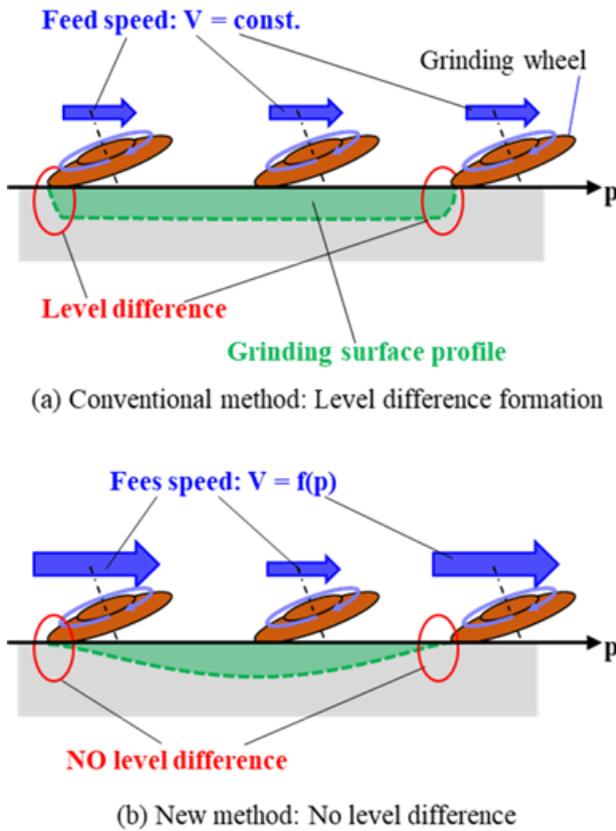


図6 速度制御による高品質な研削面形状

© 2025日本鉄鋼協会¹⁾

ることが可能であり、休憩時間も必要ないため、作業の生産性が向上した。具体的には、処理能率が約 2.5 倍となり、作業にかかる時間のばらつきも低減した。

作業処理能率向上以外の効果として、従来の手作業による研削では、作業者ごとに研削技能に差があり、熟練するまでに時間を要していた点が改善された。本装置による研削面品質は、ロボット特有の再現性により常に高品質であるため、オペレート教育を受けた者は、その日から熟練作業者と同等の研削面品質で手入れを行うことが可能となった。

また、作業者の体力や技量に依存せずに手入れが可能となったため、従来のグラインダー研削作業が必要な職場では活躍が難しかった女性を登用することが可能となった。さらに、ロボット職場となったことで若年者の定着率が向上し、幅広い層の人材が活躍できるようになった。

知的財産権の状況

本開発品の装置に関する特許登録は下記の通りである。

① 日本国特許第 7248148 号

名称：疵研削システム、疵研削方法、およびこれを用いた鋼製品の製造方法

概要：3次元測定データを活用し、欠陥部のみをロボットで研削除去する技術

② 日本国特許第 7647939 号

名称：研削システム、軌跡生成方法、及び製品の製造方法

概要：研削中の速度可変制御を行うことによる研削面品質の向上

上記の他、国内出願 6 件（うち登録 3 件）、外国出願 7 件（うち登録 4 件）となっている。

むすび

本装置では、3K 作業である「グラインダーによる欠陥除去作業」を、ロボットアームと 3D センサを用いてティーチングレスで研削するシステムを開発し、従来のティーチングベースのシステムでは実現困難であった、多種多様な寸法・形状を持つ欠陥部分のみを選択的に自動で研削除去する技術を実現した。

JFE スチール（株）では、本装置をはじめとする自動化技術を積極的に導入し、3K 作業から作業者を解放し、エンゲージメントを向上させることで、これからも持続可能な企業として社会貢献を進めていく。

引用文献：

- 1) T. Watanabe, H. Makita, T. Sumiya, K. Yamashita and K. Ishida: Tetsu-to-Hagané, 111(2025), 814 (in Japanese).
https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.73.4_S251