

配管点検ロボット 無線式 Scan-WALKER[®]

Wireless Scan-WALKER[™] for Piping Inspection

徳元 勇太 TOKUMOTO Yuta 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 主任研究員
西澤 佑司 NISHIZAWA Yuji 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
松藤 絵夢 MATSUFUJI Emu JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）エネルギー部 エネルギー技術室 主任部員

要旨

製鉄所の副生ガス配管は、腐食や減肉による漏洩事故防止のため定期点検が必要である。従来の超音波板厚計による点検は、電力ケーブルや探触媒体供給のための有線ホースにより点検範囲が制約される。そこで、遠隔操作可能な無線式の点検ロボット（無線式 Scan-WALKER[®]）を開発した。永久磁石を用いた低消費電力の渦流探傷センサと、磁気クローラーにより配管表面を爬いながら吸着移動する機構を組み合わせたことで、直径 500 mm 以上の配管の広範囲なスクリーニング点検を実現した。さらに、IMU とエンコーダーによる自己位置推定機能も搭載し、点検経路や溶接ビード、減肉をカラーマップで可視化し、実用性を高めている。

Abstract:

In steel works, flammable gas pipelines require periodic inspections to prevent leakage accidents caused by corrosion and wall thinning. Generally, inspections using ultrasonic thickness gauges are limited in range due to cable constraints, so a remotely-control wireless inspection robot was developed. By combining a low-power eddy current flaw detection sensor using permanent magnets with a magnetic crawler mechanism that adheres to and moves along the pipe surface, extensive screening inspection of pipes with diameters of 500 mm or more was achieved. Additionally, the robot is equipped with a self-position estimation function using an IMU and encoders, enabling visualization of inspection routes, weld beads, and wall thinning on a color map, thereby enhancing its practicality.

1. はじめに

製鉄所では、コークス炉、高炉、転炉から副生ガス（一酸化炭素やメタン、水素を主成分とする可燃性ガス）が発生し、所内燃料として再利用されている。副生ガスは所内の大口径の高架配管で低圧輸送されており効率的な輸送が可能だが、広範囲で配管の管理やメンテナンスが必要となる。

副生ガスはタール分や水分などの不純物を含むことが多く、配管内で凝集しドレンを生じる。ドレンが配管内部に滞留すると、配管内面の鉄のイオン化が促進され、腐食が進行する。最終的に配管に穴が開くと、副生ガスが漏洩し、火災や爆発などの重大な事故につながる危険性があるため、配管の健全性を保証する減肉点検は不可欠である。

従来から、配管の減肉点検では肉厚測定が行われている。手作業による超音波板厚計を用いた肉厚測定¹⁾や、スキャナー機能を有する超音波探傷器による測定²⁾が一般的である。これらの点検方法は、超音波探触子へ接触媒質の供給が必要であり、広範囲を測定する場合、ホースなどにより水や超音波ジェルを供給する必要があるため、ホースの取り扱

いが難点である。一方、接触媒体が不要な漏洩磁束式の配管腐食診断装置（有線式 Scan-WALKER[®]）³⁾も活用されているが、低周波の漏洩磁束探傷法を用いているため有線による励磁電源からの電力供給が必要であり、点検範囲に制限がある。そのため、有線式 Scan-WALKER での点検は有線で届く範囲に限られる。

そこで、点検範囲を拡大するために無線式点検ロボット（無線式 Scan-WALKER[®]）を開発した。本開発のコンセプトは、製鉄所内配管総延長の大部分を占める水平配管に対し、減肉の兆候が見られるエリアを特定し、広範囲にわたって装置を遠隔操作して走行・点検するスクリーニング点検を行うことである。このため無線式 Scan-WALKER は、外部電力源や探触媒質の供給を不要とし、内蔵バッテリーからの電力供給のみでモーター駆動、センサによる探傷、およびマイコンによるデータ処理と無線通信をできるようにした。

2. 点検ロボットの開発

2.1 点検ロボットに必要な機能

製鉄所の水平方向の副生ガス配管のスクリーニング点検を実現するため、ロボットには以下の機能が求められる。

①最大厚さ 12 mm の鋼製配管に対し 40%以上の減肉を検知

2026 年 3 月 17 日受付

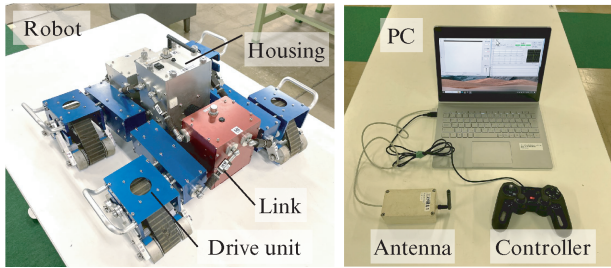


図1 開発したロボットの外観⁶⁾
Fig. 1 Appearance of the developed robot⁶⁾

- ②外径 500 mm 以上の配管に倣って周方向もしくは軸方向を走行・旋回
- ③移動位置と点検結果をカラーマップにより可視化

詳細な開発内容は次節以降で順次解説するが、上記を実装した点検ロボット無線式 Scan-WALKER を図1に示す。

2.2 減肉計測センサの開発

減肉の計測には一般的に超音波が用いられるが、前述のとおり接触媒質の供給が必要でホースの取り回しに問題がある。そこで、接触媒質不要な電磁気的な方法を検討した。従来の電磁石を使用した方法では消費電力が大きく、ロボットに内蔵可能な大きさのバッテリーでは長時間動作できないため、永久磁石を使用して直流磁場を印加する方法^{4,5)}を選定した。鉄鋼材料の欠陥検出方法として、直流漏洩磁束探傷と磁化渦流探傷の二つを候補とした。直流漏洩磁束探傷は、被検査材を磁化し、欠陥部分で漏洩する磁束を磁気センサで検出する技術である。しかし、十分な磁場を印加する必要があり、ロボットに搭載可能な大きさの永久磁石で必要な磁場が発生できるか懸念がある。一方、磁化渦流探傷は被検体表面に渦電流を誘導し、その渦電流の変化から肉厚変化を検出する技術である。磁気飽和のための磁石を、通常良く用いられる電磁石ではなく永久磁石にすることで、装置の省電力化および吸着補助の効果を見込んでいる。

これらを踏まえて最適な探傷方法を実験により選定した。製鉄所構内における副生ガス配管の典型的な肉厚である 6～12 mm をターゲットとし、元厚の 40% 減肉が検知できることを目標とし、図2に示すように減肉を模擬した人工欠陥により各探傷方法の減肉検知性能を比較した。欠陥のない部分の出力をノイズレベルと定義し、欠陥部の信号を評価している。その結果、約 0.5 V を閾値として欠陥部が判定できることがわかった。図2より直流漏洩磁束探傷は目標の 40% 減肉の検出は困難であり、探傷能力が不足しロボットのセンサとして適さない。一方、磁化渦流探傷は目標である 40% 減肉を S/N $\geq$ 3 で検出でき、十分な探傷能力を有していることから、ロボットに搭載するセンサとして採用した。

ロボット走行中の揺れや配管径の変動によって、配管表

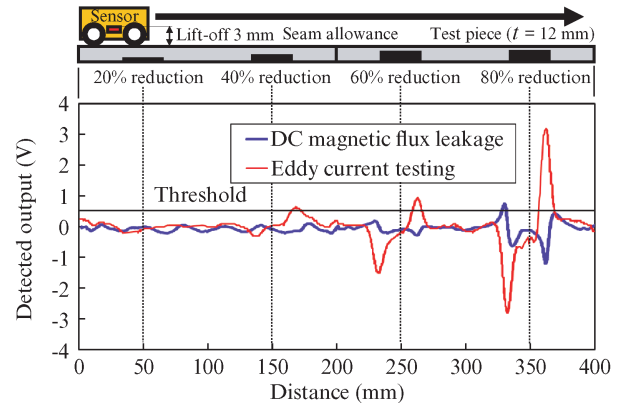


図2 欠陥の検出方法の評価⁶⁾
Fig. 2 Evaluation of defect detection methods⁶⁾

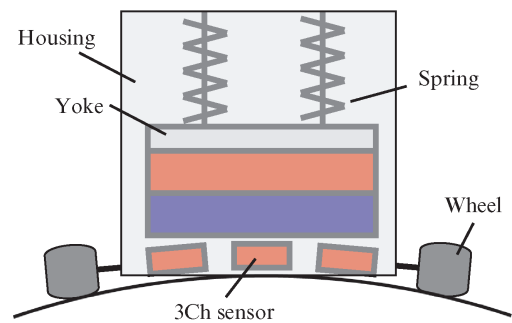


図3 渦流探傷センサのハウジング⁶⁾
Fig. 3 Housing structure for eddy current testing sensor⁶⁾

面からセンサまでのリフトオフが変動し検出性能が低下する。このためセンサの検出性能を適正に保持するためには、リフトオフを一定に保つ対策が必要である。そこで、リフトオフが一定となる専用のセンサ用ハウジングを開発した。図3に開発したセンサ用ハウジングの構造を示す。ヨーク下部にセンサを3チャンネル並列に配置しており、ハウジングの両端の車輪が配管の表面に倣うことでリフトオフを 3 mm に保てる。また、ロボット走行中の揺れ対策として、センサ用ハウジングの上部とヨークを圧縮バネで接続し、ロボット走行中のヨーク部の衝撃を吸収する仕組みを導入した。

2.3 機体の開発

図4に開発したロボットの機能ブロック図を示す。中央にセンサ用ハウジングを備え、その前後にモーターコントローラー基板およびバッテリーを備えるハウジングを有する。このセンサ用ハウジングと前後のモーターコントローラー基板用ハウジングは、リンクとヒンジで接続され、測定対象である配管に倣うように設計した。同様に、センサ用ハウジングと、その左右のモーターケース/クローラーの接続にもそれぞれリンクとヒンジを使用することにより、走行方向および配管径に合わせてロボットの機体を倣わせることができる設

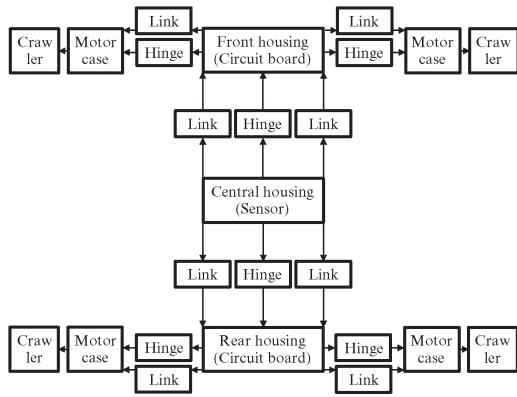

 図4 ロボットの機能ブロック図⁶⁾

 Fig. 4 Functional block diagram of robot⁶⁾

計とした。

ロボットは配管面上を吸着しながら移動する必要がある、無線化を考慮して吸着に電力消費を必要とせず、段差のある配管上の曲面を移動できる磁気クローラーによる吸着走行方式を採用した。ロボットの自重保持に必要な吸着力を推定するため図5に示す静的な釣り合い条件において力の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Force horizontal}}$ 、後方のクローラー（点P）を回転中心の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Moment P}}$ を検証した。ロボットの重量 Mg は 250 N であり、それぞれの吸着力は以下の式（1）（2）で計算できる。

$$F_{\text{Force horizontal}} = \frac{Mg \times f}{\mu} \quad \text{..... (1)}$$

$$F_{\text{Moment P}} = \frac{Mg \times L_G \times f}{l} \quad \text{..... (2)}$$

後方のクローラー（点P）からロボットの重心位置までの距離 L_G は 110 mm，クローラーからロボット中心までの距離 l は 140 mm，静止摩擦係数 μ は 0.5，最低限必要な安全率 f を 1 とすると力の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Force horizontal}}$ は約 510 N，後方のクローラー（点P）を回転中心の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Moment P}}$ は約 200 N である。

また、配管の下面に吸着した場合の静的な釣り合い条件において力の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Force bottom}}$ を検証した。ロボットの自重保持に必要な吸着力は、力の釣り合いだけを考慮して、以下の式（3）で計算できる。

$$F_{\text{Force bottom}} = Mg \times f \quad \text{..... (3)}$$

同様に最低限必要な安全率 f を 1 とすると力の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Force bottom}}$ は約 255 N である。上記より、ロボットが配管の側面に吸着した場合の力の釣り合いから得られる吸着力 $F_{\text{Force horizontal}}$ が最大であるため、ロボットの自重保持に最低限必要な吸着力は約 510 N である。今回は、

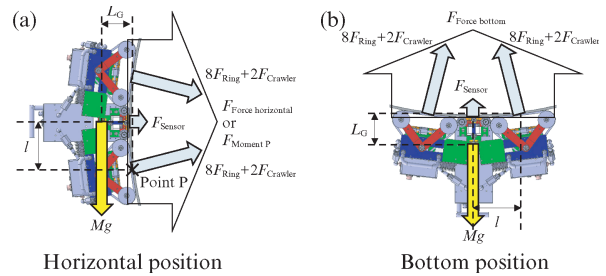

 図5 ロボットの配管吸着モデル⁶⁾

 Fig. 5 Adhesion model of robot to the pipe⁶⁾

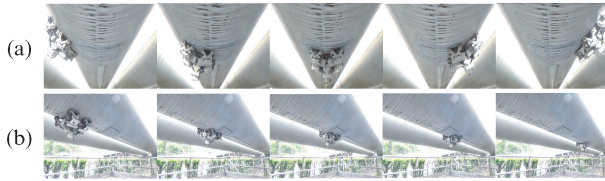
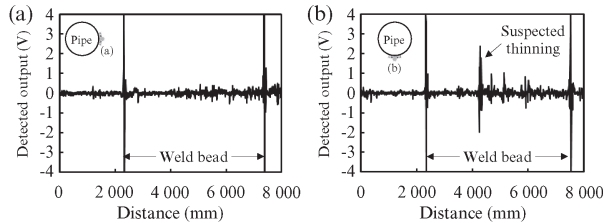
配管上の溶接ビードや補修用当て板等の段差を乗り越える際に、クローラーの吸着力の二輪分である前後どちらかが 0 N となると仮定しても、残る二輪のクローラーとセンサ用永久磁石安全率 3 以上である合計吸着力 1 530 N を保てることを設計の基本方針とした。一輪あたりのクローラーの吸着力 F_{Crawler} は 5 N，ロボット機体中央のセンサ用永久磁石の吸着力 F_{Sensor} は 300 N であり、二輪のクローラーとセンサ用永久磁石の合計の吸着力では必要な吸着力を確保できない。そこで、クローラー部にリング磁石を追加することで必要な吸着力を確保した。一輪あたりのクローラーに合計 4 個のリング磁石を追加しており、リング磁石の 1 個あたりの吸着力 F_{Ring} は 160 N である。これにより、例えば段差乗り越え時においてロボット前方の二輪のクローラーの吸着が機能しない場合でも、ロボット後方の二輪のクローラーとセンサ用永久磁石、追加した 8 個のリング磁石による吸着力は合計 1 590 N となり、安全率 3 以上である合計吸着力 1 530 N を上回ること安定した吸着走行ができる。

2.4 走行性能

製鉄所内で供用されている副生ガス配管（外径 1 600 mm，元厚 7.9 mm）を用いて、ロボットが配管に倣って走行できるかどうか、その走行性能を検証した。図6（a）の写真に示すように、ロボットは配管の周方向を走行できた。また、配管の真下部に高さ 10 mm の補修板が溶接されていたが、ロボットは乗り越えられた。次に、軸方向の移動についても同様の検証を行った。図6（b）の写真に示すように、ロボットは配管の軸方向に沿って走行できた。この場合も、配管の真下部に高さ 10 mm の補修板がある状態で、落下せずに乗り越えられた。その他に、周方向と軸方向にライン状に存在する溶接ビードの乗り越えにも成功している。また、ロボットは直進操作だけでなく旋回操作も可能であり、直進操作時に配管自体が斜めに設置もしくは走行時に重力の影響を受けて旋回した場合でも、ロボットの走行方向を修正し、直進させることが可能であった。

2.5 探傷性能

ロボットのクローラーにはエンコーダーを内蔵しており走

図6 製鉄所内の配管走行試験⁶⁾Fig. 6 Pipe moving test in steel works⁶⁾図7 配管走行試験時の検出信号⁶⁾Fig. 7 Detection signal during pipe moving test⁶⁾

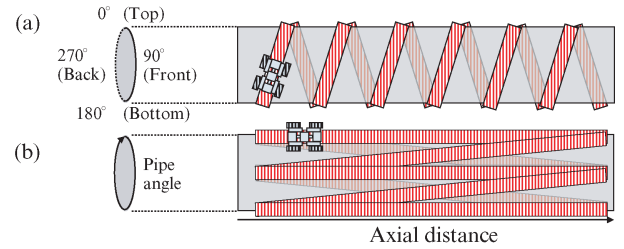
行した距離を記録できる。エンコーダーの回転数から得られたロボットの走行距離と、各位置で収集された検出信号を組み合わせることで、ロボットの走行経路上の減肉が疑われる信号の位置を特定できる。実際に、ロボットを使用して配管を点検し、減肉が疑われる信号の検出とその位置の減肉の有無を検証した。

減肉が少ない傾向の真横とドレンが滞留し減肉が多い傾向の真下をロボットで直進走行させ減肉を点検した。図7 (a) に示す配管の真横の位置の検出信号と図7 (b) に示す真下の位置の検出信号を比較すると、図7 (b) では距離約4000 mmの位置で溶接ビードと異なる閾値以上の信号を検出し、減肉があることが示唆された。一方、この周辺を別途手作業で超音波板厚計を用いて板厚測定したところ、配管敷設時の元厚7.9 mmに対して最小板厚3.0 mmを示し、実際に局所減肉を確認できた。

3. 点検データの可視化

3.1 データの描画

スクリーニング点検時のロボットは、図8 (a) に示すように周方向を螺旋状に走行するか、図8 (b) に示すように軸方向を繰り返し走行する。作業者が配管上の減肉位置を視覚的に判断するためには、ロボットの移動経路に合わせた点検結果をカラーマップとして描画する必要がある。そこで、横軸はロボットの点検開始地点を原点とした配管の軸方向距離を示し、縦軸は配管の真上を0度として時計回りに360度まで表示した周方向角度を示す二次元展開図とした。点検カラーマップで暖色は減肉部である。なお、減肉部と同様に溶接ビードも検出されマップ上に暖色で表示される

図8 配管のスクリーニング点検⁶⁾Fig. 8 Screening inspection of pipes⁶⁾

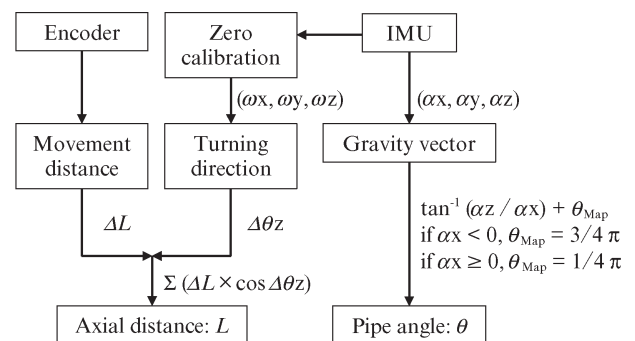
が、溶接ビードは連続する線状に示され、視覚的に減肉部と区別できる。

3.2 自己位置推定

今回の点検対象となる高架上の副生ガス配管は、周辺に特徴点を抽出できる物体がない環境やGPSの機能しにくい遮蔽物に囲まれた環境に敷設されることが多い。そこで、周辺環境に影響されない内界センサであるエンコーダーとIMU（慣性計測ユニット）を組み合わせた自己位置推定方法を提案し、マッピングに必要なロボットの位置である、配管の軸方向距離と周方向角度を推定した。

ロボットの駆動用モーターにエンコーダーを直結し、ロボットの中心にIMUを内蔵した。ロボットの走行方向によって配管中心から見たIMUの3軸方向が変化するため、自己位置推定式は4パターンに分けた。作業者が水平配管を正面から見た場合を想定した見かけ上のロボットの走行方向を、周方向下向き、周方向上向き、軸方向右向き、軸方向左向きと定義した。

スクリーニング点検時に最も頻度の高い走行方向となる軸方向右向き走行時の位置推定の計算方法を説明する。図9にロボットの位置推定のフロー図を示す。まず、エンコーダーより測定した駆動モーターの回転数から微小時間で移動したロボットの移動距離 ΔL を算出する。次に、IMUより測定した角速度 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ のドリフト誤差をゼロ調整により補正し、配管の中心方向に向いたIMUの軸である z 方

図9 自己位置推定フロー⁶⁾Fig. 9 Flow of self-position estimation⁶⁾

向の角速度 ωz から微小時間でロボットが旋回した角度 $\Delta\theta z$ を算出する。これらのデータを組み合わせ、微小時間で移動したロボットの角度と距離から軸方向成分を算出し、その総和である以下の式 (4) からロボットが移動した軸方向距離 L を算出する。

$$L = \Sigma(\Delta L \times \cos \Delta\theta z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、ロボットが位置する配管の角度を算出するために、IMU から得られた加速度 ($\alpha x, \alpha y, \alpha z$) を用いて、配管中心から見た配管の真上からロボット位置までの角度を算出する以下の式 (5) から配管角度 θ を計算する。ここで、 θ_{Map} は配管角度を補正するための角度であり、配管角度 θ の範囲を配管中心から見た配管の真上を 0 度とし、周方向を時計回りに 360 度となるように変換する。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\alpha z}{\alpha x} + \theta_{\text{Map}} \begin{cases} \text{if } \alpha x < 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{3}{4} \pi \\ \text{if } \alpha x \geq 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{1}{4} \pi \end{cases} \quad \dots\dots (5)$$

これらにより、軸方向右向き走行時の位置が推定できる。走行方向による 4 パターンの自己位置推定式を表 1 に示し、軸方向右向き以外の走行方向の計算方法の記載は省略する。

表 1 自己位置推定式⁶⁾

Table 1 Formulas for estimating self-position⁶⁾

Movement direction	Axial distance	Pipe angle
Circumferential downward	$L = \Sigma(\Delta L \times -\sin \Delta\theta z)$	$= \tan^{-1} \frac{-\alpha z}{\alpha y} + \theta_{\text{Map}} \begin{cases} \text{if } \alpha y \leq 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{1}{4} \pi \\ \text{if } \alpha y > 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{3}{4} \pi \end{cases}$
Circumferential upward	$L = \Sigma(\Delta L \times \sin \Delta\theta z)$	$= \tan^{-1} \frac{\alpha z}{\alpha y} + \theta_{\text{Map}} \begin{cases} \text{if } \alpha y < 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{3}{4} \pi \\ \text{if } \alpha y \geq 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{1}{4} \pi \end{cases}$
Axial rightward	$L = \Sigma(\Delta L \times \cos \Delta\theta z)$	$= \tan^{-1} \frac{\alpha z}{\alpha x} + \theta_{\text{Map}} \begin{cases} \text{if } \alpha x < 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{3}{4} \pi \\ \text{if } \alpha x \geq 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{1}{4} \pi \end{cases}$
Axial leftward	$L = \Sigma(\Delta L \times -\cos \Delta\theta z)$	$= \tan^{-1} \frac{-\alpha z}{\alpha x} + \theta_{\text{Map}} \begin{cases} \text{if } \alpha x \leq 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{1}{4} \pi \\ \text{if } \alpha x > 0, \theta_{\text{Map}} = \frac{3}{4} \pi \end{cases}$

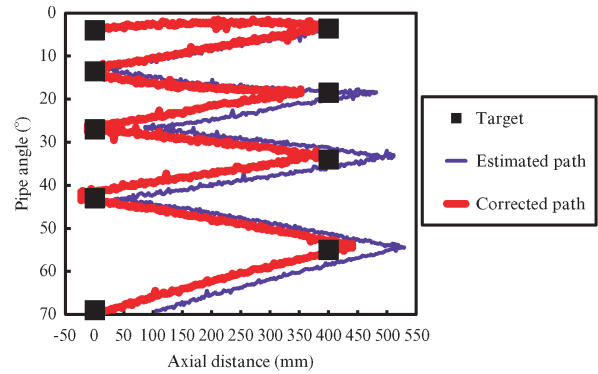


図 10 位置推定した移動経路⁶⁾

Fig. 10 Movement path through position estimation⁶⁾

3.3 自己位置推定の誤差対策

スクリーニング点検時の自己位置推定精度を検証するため、試験用に切り出した供用配管（外径 1 800 mm）上にロボットを吸着させ、配管上の角度で、約 5° から約 70° まで距離約 400 mm 間を前進と後退を軸方向右向きに繰り返し、走行中のロボットの位置を推定した。図 10 に示したグラフは自己位置推定によって得られたロボットの移動経路である。実測した実績位置に対して自己位置推定による推定位置は、軸方向距離では最大 120 mm 誤差を生じており、切り返しを繰り返すことで誤差が大きくなった。これは、切り返しのタイミングでロボットを旋回操作したときに、旋回中のロボットの位置はほとんど変化しないものの、モーターの回転によりエンコーダーの回転数がカウントされ、推定される軸方向の移動距離が変化するためであると考えられる。しかし、現実の旋回はほぼその場回転であり、ロボットの位置は変化しない。そこで、ロボットが旋回中はエンコーダーの回転数をカウントしないように対策し、400 mm の走行に対する推定値は、誤差±10%以内に改善した。

一方で、配管角度は実績値と推定値はほぼ一致していた。これは、ロボット加減速中の加速度が重力加速度と比較して小さく、ロボット走行時における IMU 内の加速度計の測

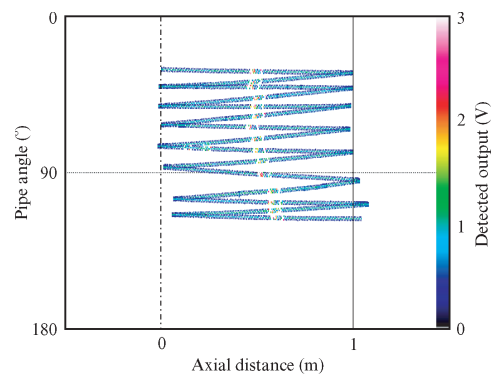


図 11 点検カラーマップ⁶⁾

Fig. 11 Inspection color map⁶⁾

定値が重力加速度と一致していたためである。

上記より、点検カラーマップ生成を目的とした場合、自己位置推定の実用性は十分と判断した。

3.4 点検カラーマップ

3.3 節と同じ配管（外径 1 800 mm）を使用し、ロボットを貼り付けて配管角度約 30° から約 120° まで距離約 1 000 mm 間を前進と後退を繰り返す管軸右向き走行し、点検カラーマップを生成した。配管には、ロボットの走行開始位置から軸方向距離 150 mm と 250 mm かつ周方向角度 80 度の位置に 25 mm 幅のアルミテープを貼り付けて内面キズを模擬した。また、軸方向距離 500 mm の周方向に 50 mm 幅のアルミテープを貼り付けて溶接ビードを模擬した。図 11 に示すように、点検カラーマップ上には移動経路および暖色で部分的に表示された模擬キズと模擬溶接ビードを可視化できていることから、視覚的な減肉位置の判断への有効活用が期待できる。

4. おわりに

本稿では、水平配管の局所減肉を全周でスクリーニング点検できる無線ロボット（無線式 Scan-WALKER®）を開発し、性能評価を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 磁化渦流探傷センサを搭載し、リンク機構により配管径に倣うことでスクリーニング点検できる、新しい無線式ロボットを開発した。実際の製鉄所内の供用配管を用いた走行試験により、ロボットによる移動・旋回性能と高さ 10 mm の段差を乗り越える能力を実証した。移動中に得られた信号から閾値以上の減肉が疑われる信号が確認でき、ロボットで検知した信号周辺を超音波板厚計で板厚測定したところ実際の減肉

を確認できたことで、有効性が実証できた。

- (2) 配管全周の減肉を可視化する点検カラーマップを提案し、エンコーダーと IMU を組み合わせたロボットの自己位置推定機能を追加開発した。試験用配管による点検試験で自己位置推定精度は±10%以内となり、また生成したカラーマップにより移動経路とともに経路上の模擬キズや模擬溶接ビードを可視化でき、ロボットの実用性を高めることができた。

本開発のロボットを製鉄所内の副生ガス配管の広範囲なスクリーニング点検に適用し、点検範囲の拡大を図っていく。

参考文献

- 1) 福田敏男, 油井拓紀, 酒本晋太郎, 阿部靖則, 長谷川泰久, 小林太, 新井史人. 配管腐食診断システムの研究. 超音波探傷法による平面情報をを用いた腐食種類, 規模の推定 (機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集 C 編. 2002, vol. 68, no. 666, p. 391-397.
- 2) 武田博之, 大場健二, 小林泉, 岡島弘之, 杉山栄, 加藤洋明. 原子力発電所の配管検査用自動超音波探傷装置. 日本原子力学会誌. 1980, vol. 22, no. 2, p. 108-110.
- 3) 檀上武克, 横山康雄, 明智吉弘, 壁矢和久, 卯西裕之. 設備の健全性評価技術架空配管・埋設配管の診断. JFE 技報. 2006, vol. 11, p. 23-28.
- 4) 菊池弘昭, 清水勇, 荒克之, 鎌田康寛, 小林悟. C114 磁束漏洩法を用いた配管減肉評価の実機適用性 (配管減肉検査・モニタリング, OS5 保全・設備診断技術), 動力エネルギーシステム部門 20 周年, 次の 20 年への新展開. 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集: シンポジウム. 2010, vol. 15, p. 117-118.
- 5) 橋本光男, 浅井晃一. 磁化渦電流探傷試験の数値解析評価法の検討. 鉄と鋼. 2004, vol. 90, no. 11, p. 897-901.
- 6) 徳元勇太, 西澤佑司, 松藤絵夢, 山下浩二, 石田匡平, 飯塚幸理. 広範囲のスクリーニング点検を実現できる磁化渦流探傷センサ搭載の無線式配管点検ロボットの開発. 鉄と鋼. 2025, vol. 111, no. 13, p. 803-813.

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献 6) 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。