

2025年度 新産業創出研究会「研究成果報告書」

「低コスト全方位カメラデバイスを用いた配管内壁の輪帯一括自動点検システムの開発」

[福山大学工学部電気電子工学科 ・ 准教授] [佐賀 正典]

1. はじめに

我が国における少子高齢化の急速な進展は、あらゆる産業分野での労働力不足を引き起こしているが、とりわけ高度経済成長期に集中的に整備された社会インフラの老朽化対策は、国家的な喫緊の課題となっている。下水道管や工業用配管、トンネルといった地下・閉鎖空間の設備点検は、暗所、多湿、狭小という過酷な環境下での作業を強いられるため、人手による点検の継続は限界に達しつつある。このような背景から、ロボット技術や AI を活用した計測・点検作業の自動化・省力化への要請は極めて強い。これまで、こうしたニーズに対して広角レンズや魚眼カメラを用いた視覚システムが提案されてきたが、実用化にあたっては大きな障壁が存在していた。市販の特殊レンズは極めて高価であり、導入コストが膨らむことに加え、撮影画像に生じる特有の幾何学的歪みが機械学習等の画像認識アルゴリズムとの親和性を著しく阻害するという問題である。その結果、従来のシステムでは各現場の多様な配管条件に即した柔軟な運用が困難であり、高精度な自動診断の実現には至っていなかった。

これに対し本研究では、申請者がこれまでマルチエージェント移動ロボット用に独自開発してきた「仰角を持つ反射光学系全方位カメラ」を配管点検用途へと抜本的に最適化し、管内壁を一括観測可能な低コスト自動診断システムを構築した。本デバイスは、一般的な双曲面ミラーを用いた全方位カメラとは一線を画し、反射ミラーの形状設計により撮影範囲(仰角)を任意に調整できるという内製技術ならではの利点を有する。2025年度は、最新の 1230 万画素イメージセンサ(IMX477 等)への刷新と、Raspberry Pi 5 を用いた高速エッジコンピューティング環境の整備により、高精細な画像取得とリアルタイム解析の両立を実現した。さらに、全方位画像を極座標展開してパノラマ画像へと変換する独自のソフトウェア処理を実装することで、YOLOv8 等の深層学習に基づく物体検出モデルの性能を最大限に引き出し、模擬瑕疵に対して検出率 90%以上、誤検出率 0%という実用化に向けた有効性を確認した。

本システムは、可視光のみならず赤外線やサーモカメラへのマルチスペクトル展開が容易な構造となっており、将来的には目視困難な配管減肉の非破壊検知や、農業分野における環境計測への応用も視野に入れている。本研究により確立される低コストかつ高精度な全方位視覚プラットフォームは、重要インフラ保全の飛躍的な効率化に寄与するのみならず、広範な産業分野における DX(デジタルトランスフォーメーション)を牽引する革新的な技術基盤となることを目指すものである。

2. 概要

本システムは、独自設計により内製化した反射光学系デバイスと、最新の物体検出アルゴリズムである YOLOv8 を高度に統合した配管点検基盤である。本デバイスの最大の特徴は、市販の双曲面ミラーを用いた全方位カメラとは異なり、反射面に独自の曲率と仰角を持たせている点にある。これにより、カメラ直近から遠方までの配管内壁を死角なく、かつ鉛直方向に近い角度で効率的に捉えることが可能となった。

本年度は、システム全体の高解像度化とリアルタイム処理能力の向上に注力した。ハードウェア面では、イメージセンサをソニー製 1230 万画素 CMOS イメージセンサ(IMX477)等へ刷新し、さらに反射ミラーにはサブミクロン単位での精密研磨加工を施した新型半球ミラーを採用した。これにより、内径 580mm や 600mm といった大型金属管においても、内壁の微細なテクスチャを鮮明に描画する光学性能を獲得した。演算ユニットには Raspberry Pi 5 を導入し、高性能な CPU およびアクセラレータを活用することで、高画素データの高速なハンドリングを可能にするエッジ処理環境を構築した。

ソフトウェア面では、全方位画像(生データ)特有の放射状の幾何学歪みが、CNN(畳み込みニューラルネットワーク)における特徴抽出の精度を著しく低下させるという課題に対し、独自の極座標展開アルゴ

リズムを実装した。このソフトウェア処理により、全方位画像を数学的円筒展開・パノラマ画像へとリアルタイム変換し、歪みを最小限に抑えた状態での物体認識を可能にした。この「パノラマ展開+領域分割」プロセスの導入は、標準的な物体検出モデルとのシームレスな接続を実現するだけでなく、計算負荷の最適化と検出精度の安定化を両立させる本システムの基幹技術となっている。

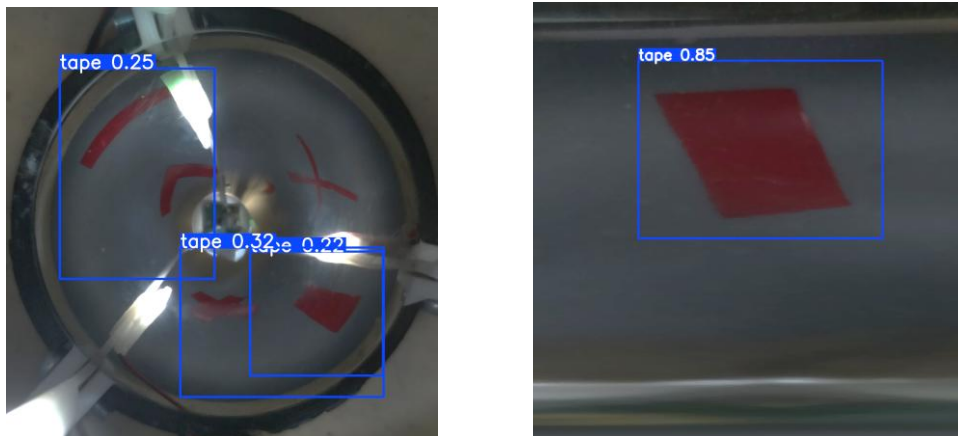


図1:学習方法の改良による検出率の向上

3.研究成果および今後の課題

実証実験では、まず内径 130mm の管内に模擬瑕疵として赤色のビニールテープを配置し、検出精度の検証を行った。瑕疵のパターンは、実現場で想定されるクラックや腐食等の形状を模し、直線、十字、L字に加え、難易度の高い「幅 1/2 の直線および十字」を含む計 5 種類を定義した。学習フェーズにおいては、管内を 50 回撮影して得られた全方位画像を教師データとして使用し、アノテーションプラットフォーム「Roboflow」を用いてラベル付けを行った。この際、全方位画像特有の周辺部の歪みや照明環境の変化に対応するため、回転、反転、明度変更、およびぼかし処理を施すデータオーグメンテーション(データ拡張)を適用した。これにより、元の画像枚数に対して学習データを 3 倍に拡充し、モデルの汎用性を高める工夫を施した。初期の検出実験では、再度貼り直した模擬瑕疵を撮影した 5 枚の全方位画像(生データ)に対し、深層学習型物体検出モデル YOLOv8 を適用した。しかし、反射光学系特有の強い幾何学的歪みの影響により、信頼度 (Confidence) が低迷し、検出率が安定しない、あるいは見落としが生じるという課題に直面した。この課題を解決するため、全方位画像を極座標展開してパノラマ画像へと変換し、その変換後の画像を用いて再学習を行う手法へと転換した。パノラマ画像を 300×300 pixel の領域に分割し、さらに隣接領域間で 200 pixel のオーバーラップを設けて解析するアルゴリズムを実装した。この再学習プロセスにより、モデルは歪みの少ない安定した瑕疵形状を学習することが可能となり、最終的な検証では検出率 90%以上、誤検出の発生が見られないという極めて高い実用性を確認するに至った。特にオーバーラップ処理の導入は、画像端部に跨る瑕疵の分断を防ぎ、見落としを完全に防止する上で非常に有効であることを実証した。これは、一括観測による点検作業の劇的な効率化と信頼性向上に直結する成果である。

さらに本年度は、より実務的なニーズに応えるべく、大型配管への適用実験に着手した。具体的には、精密研磨を施した独自の切削半球ミラーを用いた新型デバイスにより、内径 580mm および 600mm の二種類の大型金属管の撮影を実施した。その結果、従来の小径管用ミラーでは困難であった広範囲の照射と集光を両立し、大型管の内壁全周にわたって極めて鮮明かつ高精細な画像データを得ることに成功した。これは、内製ミラーの曲率設計と表面粗さの向上が、遠方の内壁観測においても有効に機能することを示唆している。

一方で、これらの大型管における検出精度については、現時点では視覚的な確認に留まっており、詳細な定量評価の実施が急務である。今後は、光学系の更なるハードウェア・チューニングを継続すると

もに、大型管特有の光量不足や反射特性を考慮したデータセットを拡充し、可視光および赤外線・サーモカメラを用いたマルチスペクトル解析による、目視困難な減肉や微細クラックの検知精度向上を図る。

4. おわりに

本研究を通じて、内製した精密反射ミラーと高画素カメラモジュールを組み合わせた低コストな全方位視覚システムが、複雑な配管内壁点検の自動化において極めて有効なソリューションとなり得ることが確認された。特に、従来の魚眼レンズ等では困難であった「仰角を活かした一括観測」と「パノラマ展開による高精度な瑕疵検出」を統合したことで、計算資源を抑制しつつ実用的な検出精度を両立できた点は、本研究の重要な到達点であると言える。

今後は、画像展開による歪み補正というプロセスをさらに一歩進め、球面幾何学の数学的モデルを畳み込みニューラルネットワーク(CNN)に直接組み込む「球面畳み込み(Spherical CNN)」等の高次アルゴリズムの実装に取り組む。これにより、画像変換に伴う画質劣化を回避し、さらなる処理の高速化と認識精度の向上を目指す。また、大型管での成果を基盤として、実現場特有の汚れ、水濡れ、不規則な凹凸等の外乱要因に対するロバスト性の検証を加速させる。

本年度の成果を基盤とし、2026年度はJST A-STEP(産学共同)等の外部資金獲得に積極的に挑戦する予定である。共同研究先である株式会社中山技研工業との連携を一層密にし、現場のニーズを反映したデバイスの小型化、および現場作業者が直感的に操作可能なUI/UXを含む「システムパッケージ化」を推進する。配管内壁点検のDX(デジタルトランスフォーメーション)を強力に牽引することで、我が国の重要インフラ保全における省力化と長寿命化の実現に寄与していく所存である。

5. 本研究の今後の計画

本研究で得られた「低コストかつ高精度な一括点検」の成果を、単なる研究室内での実証に留めず、実際のインフラ保守現場へ展開するため、次年度は技術の高度化と社会実装の加速を並行して推進する。技術面においては、本年度成功した内径580mm・600mmの大型管への対応をさらに確実なものとするため、精密研磨ミラーの光学性能を最大限に引き出すオートフォーカス機構の検討や、照明環境の最適化に取り組む。また、可視光では判別不可能な配管の肉厚減少や微細なクラックを非破壊で検知すべく、赤外線およびサーモカメラを統合した「マルチスペクトル全方位点検ユニット」の試作を行う。これにより、従来の点検手法では見落とされていた内部異常の早期発見を実現し、インフラの予防保全に寄与する。これらの高度な技術開発を支える資金基盤として、以下の公募事業への応募を強く視野に入れている。

- **JST A-STEP(産学共同)**: 本研究で確立した「仰角を持つ反射光学系」と「AI画像解析ソフトウェア」という技術シーズを、実用化フェーズへと引き上げるための可能性検証を実施する。共同研究先である株式会社中山技研工業との連携を深化させ、現場のフィードバックに基づいた「点検ロボット搭載型ユニット」としての試作・評価を加速させる。
- **総務省 SCOPE(地域ICT振興型)**: 老朽化が深刻な地方自治体の公共インフラ(下水道・共同溝等)を対象とした、低コストなリモート点検ソリューションとして提案する。地域課題に根ざしたICTの実装を通じて、点検コストの大幅な削減と、作業員の安全確保に直結する社会実装モデルを構築する。

以上の計画を通じて、2026年度中にはプロトタイプの実験投入試験を完了させ、配管点検業務のデジタルトランスフォーメーション(DX)を牽引する革新的な点検システムのパッケージ化と、早期の事業化を目指すものである。

6. その他

(1) 出願特許(タイトル・出願番号・発明者・特許権者など)

検討中である。

(2) 投稿論文(タイトル・学会名等)

“低コスト全方位カメラを用いた配管内壁点検システムの開発”, 伍賀, 尾石, 村上, 本田, 重廣, 中山,
第 34 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 予稿 pp.95-96

“身体性ロボティクス研究の展開”, 伍賀, 超異分野学会東京 2026, P-150

“配管点検の自動化に向けた全方位カメラデバイスの開発と認識特性の解析”, 伍賀・他, 福山大学
工学部紀要第 49 巻(予定)

(3) 本研究会の参加企業・団体名

株式会社中山技研工業

株式会社サリープロジェクト



競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。

<https://jka-cycle.jp/>