

狭小空間観察用内視鏡ヘッドの開発

Development of an Endoscopic Head for Observation in Confined Spaces

○平澤翔太*, 星崎みどり*, 南斉俊佑*, 関健史*, 長縄明大*

○Shota Hirasawa*, Shunsuke Nansai*, Midori Hoshizaki*, Takesi Seki*, Akihiro Naganawa*

*秋田大学

*Akita University

キーワード： 内視鏡 (Endoscope), 配管検査 (Piping inspection), カメラヘッド (Camera head), 画像処理 (Image processing), 駆動機構設計 (Drive mechanism design)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学情報データ科学部

長縄 明大, Tel.: (018)-889-2726 E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

産業工場や電力供給施設では、多様な流体搬送のため多数の配管が敷設されている。Fig. 1 に示すように、配管には腐食や亀裂などの損傷が生じ、漏洩や破損の原因となる。

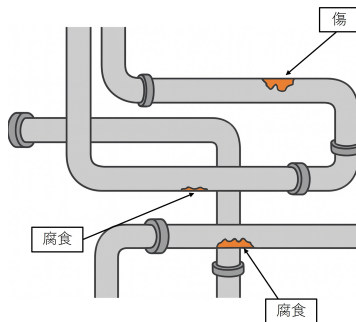


Fig. 1 配管のイメージ図

これを防ぐには定期的な点検が必要であり、配管検査は利用者や第三者への被害回避、長期にわたる機能不全の予防、ならびに長寿命化に向けた適切な保守管理を目的として実施される。

しかしながら、狭小空間や小口径配管内の損傷検査は人手による直接作業が困難であるため、配管検査ロボットの活用が有効である。

現在開発されている配管検査ロボットの例として、直径 100 mm 以上の配管を対象に、超音波センサにより 360° の損傷探知が可能な自走式ロボットが報告されている。移動機構としては、Yamamoto らによって提案された空気圧中空軸アクチュエータ機構が挙げられる¹⁾。この機構では、チューブ内への空気圧供給により内壁を保持するローラが移動し、さらにベルトの伸縮機構を組み合わせることで保持力と反発力を両立し、高速移動が可能である。また、本研究室では、スコープと渦電流探傷装置を組み合わせ、損傷位置を特定可能な 1 インチおよび 1/2 インチ配管用の検査ヘッドを開発してきた²⁾。この検査ヘッドは光ファイバスコープを用いて画像を取得し、レーザー光をミラーで反射させることで補修を行う構造を備えている。

しかし、駆動装置として、圧電素子を用いた超音波アクチュエータを計 12 個搭載し小型化は達成しているものの、構造が複雑で製造性に難がある。

そこで本研究では、内径 30 mm の配管内部を観察対象とし、観察に適した新たなカメラヘッドの開発を目的とする。この寸法を対象とした理由は、従来の内視鏡ヘッドが比較的径の大きな配管を対象としているためである。また、本カメラヘッドはミラーを回転させて視野を屈曲させることで、指定した方向の局所観察を可能とする構造を採用する。これにより、先端カメラでは得られない半径方向の観察を実現する。

さらに、既往研究である野村らの手法³⁾は、内視鏡画像を 2 値化し輪郭抽出によって対象の大きさを測定するものであり、検出対象の種類やノイズ除去の観点では限定的であった。本研究では、これに対して、深層学習に基づく画像復元モデル SwinIR によるノイズ除去、CLAHE によるコントラスト補正、色空間条件を用いたマスク処理、モルフォロジー処理を組み合わせることで、傷の自動検出および実寸測定を高精度に実現するアルゴリズムを構築する。これにより、複雑形状の損傷に対してもより高い検出精度を目指す。

2. 設計方針

本研究で開発するカメラヘッドは、限られた内径空間で高精度な観察を実現するため、以下の方針で設計を行った。

1) 視野確保のための光学設計

従来の内視鏡は先端固定式であり、長手方向の視野しか得られていなかった。近年では側視カメラを備えた内視鏡も増えており、横方向も撮影可能となっている。しかし、これらは観察方向が固定されているため、全周的な観察や任意方向からの局所観察には対応できない。この制約

を克服するため、Fig. 2 のようにミラーを 45° に配置し、回転機構により視野を任意の角度に屈曲させる構造を採用した。これにより任意の方向からの観察が可能となり、従来困難であった損傷部の詳細な確認が容易になる。

2) 小型・軽量で確実な駆動系

対象配管は内径 30 mm と小型であるため、駆動系も軽量・コンパクトでなければならない。そこで中空円筒を駆動対象としてトルク計算を行い、安全率を考慮して最小必要トルクを見積もった。さらに、専用ドライバキットと小型ステッピングモータを採用し、所定角度での確実な停止・保持機能を持たせた。

3) 画像処理との親和性

撮影した画像から傷を定量化するため、取得画像の安定性やノイズ低減が重要となる。ミラー面の回転精度や光源配置を考慮して、反射像が常に一定の位置に収まるよう設計した。これにより、後段の画像処理（SwinIR によるノイズ除去、CLAHE による補正など）が最大限の効果を発揮できる。

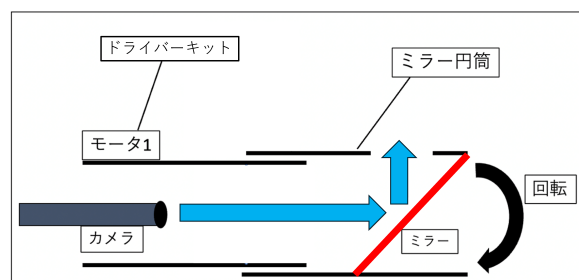


Fig. 2 設計方針

3. 使用機器

3.1 内視鏡

内視鏡には、狭小空間における視認性の確保を目的として、工業用の内視鏡を用いる。本機

器はモニター、ケーブル、およびカメラから構成されており、カメラは柔軟性のあるケーブルの先端に装着されている。この構成により、配管のような曲がりやすい経路にも対応可能であり、奥行きのある空間でも視覚的な情報を取得できる。実際に使用した内視鏡を Fig. 3 に示し、使用した内視鏡の仕様を Table 1 に示す。

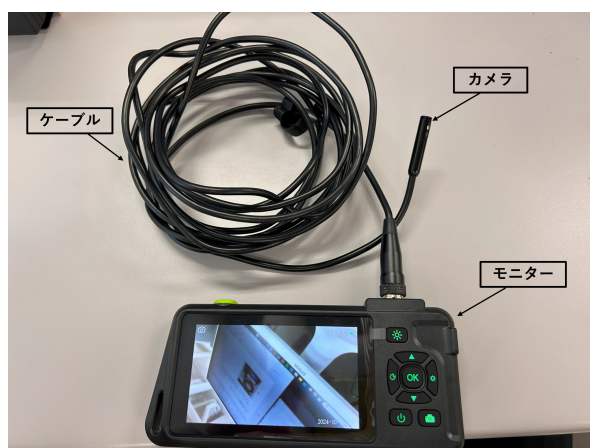


Fig. 3 内視鏡

Table 1 内視鏡の主な仕様

項目	内容
カメラ画質	フル HD (1080p)
焦点距離	30～100mm
視角	70°
ストレージ	microSD カード
防水性能	IP67 (カメラプローブ部)
バッテリー	約 3500mAh
充電時間	約 4 時間
接続方法	USB 接続

3.2 ドライバーキット

モータの駆動制御には、ステッピングモータとその専用ドライバーキット（型式：SDIC01-01）を使用する。ステッピングモータは、指令に応じて一定の角度で正確に回転動作を行うことができるため、本研究で求められるミラーの安定かつ高精度な角度制御に適している。また、通電中は位置保持機能を有しており、停止中に外力が加わっても角度を維持できるという利点がある。

さらに、Fig. 4 に本研究で用いたドライバーキットの外観を示す。本装置は USB ケーブルを介して PC から制御信号を送信し、モータの回転角度や回転方向を制御できる構成となっている。ドライバーキット本体にはモータ接続端子および電源入力端子を備えており、軽量かつコンパクトなため、狭小空間での使用にも適している。

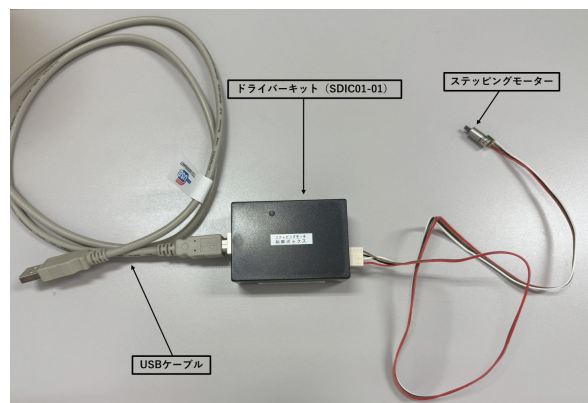


Fig. 4 ドライバーキット (SDIC01-01)

4. 駆動用モータに関する検討

4.1 駆動トルクの見積もり

本研究で用いた駆動トルクの算出方法は、野村らの研究³⁾と同一であるため、ここでは詳細を省略する。同手法に基づき必要トルクを見積もった結果、設計上の安全率を考慮して 1.0 mN m 以上の出力が必要であることを確認した。この値を満たすことを前提として、次節では使用するモータの選定について述べる。

4.2 使用モータ

本研究では、装置の幅を 30mm 以内に収める必要があるため、可能な限り小型かつ必要トルクを満たしているモータを選定する。本研究では、アイカムスラボ製の小型ステッピングモータ (MUBD02) を用いる。本製品は、プラスチック製のマイクロ歯車が搭載されており、小型かつ軽量であり、不思議歯車方式により 1 段で 1/100

程度までの減速が可能である。また、本製品は、出力トルクが2.0 mNmであり、前項で算出した必要トルク1.0 mNmを上回っているため、使用には問題ないと考えられる。

4.3 制御方法

本研究では、出力トルクが1.0 mNmを上回り、1 rpm程度の低速での回転が要求される。また、制御の簡便性と再現性の向上を目的として、マイクロアクチュエータドライバキット（型番：SDIC01-01）を用いている。Fig. 5にステッピングモーターとドライバキットの接続図を示す。このキットは、バイポーラ型2相ステッピングモータ（1ch）を搭載し、USBによるシリアル通信でPCからの制御が可能である。ドライバICにはローム製BD6735FVが使用されており、付属のデモ用ソフトウェアにより、ステップ数や回転速度をGUI上で設定することができる。

本システムにより、精度の高い低速回転制御が可能となり、試験環境における安定した動作が得られた。

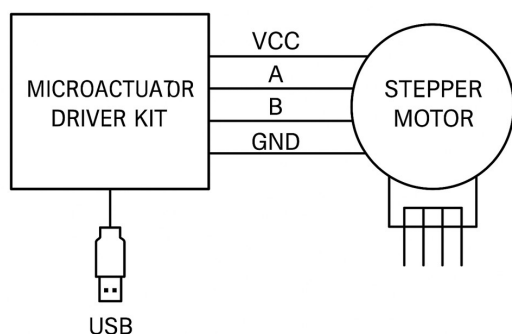


Fig. 5 ドライバキットの接続図

5. 設計した内視鏡ヘッド

本ロボットは、ファイバースコープ（内視鏡）および専用の観察用ヘッドで構成される。システム全体の構成をFig. 6に、寸法をFig. 7に示す。開発したヘッドは、既製のスコープ先端部に装

着して使用することを前提としており、内部にはレンズ用円筒およびミラー用円筒が同軸上に二重構造で配置されている。これらはねじ固定により一体化されており、ミラー用円筒内部には、観察方向を90°屈折させるためのミラーを45°の角度で組み込んでいる。

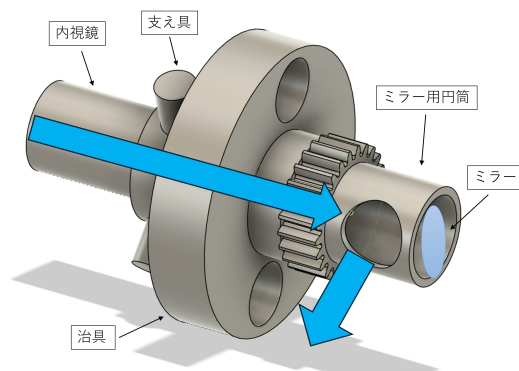


Fig. 6 設計した内視鏡ヘッドの概略図

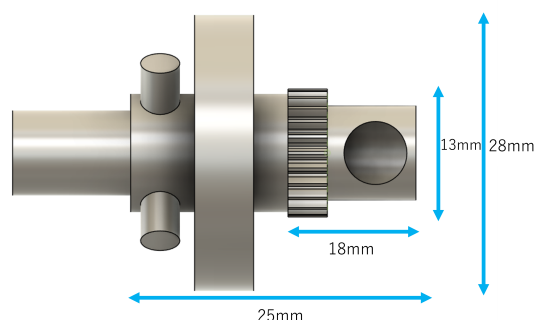


Fig. 7 設計した内視鏡ヘッドの寸法

ミラー用円筒は、外部から治具によって固定されたステッピングモータによって回転駆動され、それに連動してミラーが回転する構造となっている。使用しているステッピングモータには、停止時に位置を保持する機能が備わっているため、装置の基準位置から損傷箇所までの角度を記録することが可能である。

本装置の停止状態における治具左端からミラー用円筒右端までの全長は25 mm、最大幅は28 mmであり、設計要件である30 mm以内に収まっている。さらに、ミラー用円筒の回転角に関わら

ず、スコープと配管内面との距離は常に一定に保たれるため、配管内面の観察を安定かつ効率的に行うことができる。

6. 試作品

試作品を内視鏡に取り付けた様子を Fig. 8 に示す。本試作品は、Autodesk Fusion 360 を用いて三次元設計を行い、その設計データを基に 3D プリンターで造形したものである。設計にあたっては、内視鏡の寸法や使用環境を考慮し、確実に装着できるよう精密な形状調整を行った。

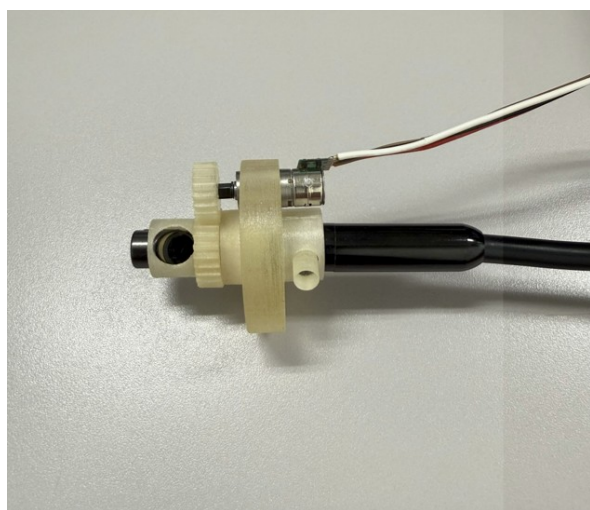


Fig. 8 内視鏡ヘッドの装着図

7. 画像処理

本研究で提案する傷検出アルゴリズムは、Python 環境 (Anaconda, IPython) 上で実装し、主要ライブラリとして OpenCV を用いた。取得した内視鏡画像に対する処理はリアルタイムではなく、撮影後に保存した静止画像を対象としてオフラインで逐次実行した。これにより、処理速度よりも検出精度を優先した評価が可能となった。以下に各処理の詳細を示す。

7.1 ノイズ除去

本研究では、内視鏡画像に含まれる微小な輝度ムラや高周波ノイズを抑制し、傷検出処理の精

度を向上させるために、深層学習に基づく画像復元モデル SwinIR (Swin Transformer for Image Restoration) を用いてノイズ除去処理 (デノイジング) を行った⁴⁾。

SwinIR は、局所的な自己注意機構 (Window-based Self-Attention) と階層的特徴表現を組み合わせた Swin Transformer アーキテクチャに基づいており、従来の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) ベースのデノイジング手法と比較して⁶⁾、広域な文脈情報を効果的に取り入れつつ微細構造を保持できる点が特徴である。

本研究では、事前学習済みの SwinIR ノイズ除去モデル (Gaussian noise $\sigma=15$) を用いて、内視鏡画像に対してノイズ除去処理を適用した。これにより、照明ムラや微細な感度ノイズが効果的に抑制され、後段の領域抽出および輪郭検出において不要な誤反応が減少した。特に、傷周辺の濃淡が安定化し、形状の完全性が保持されることで、傷の長さや直線性を高精度に測定することが可能となった。

7.2 傷の大きさ測定・検出

本研究では、内視鏡画像上に撮影された傷を自動的に検出し、その物理的な長さ (mm) を測定する手法を開発した。まず、局所コントラスト強調のために CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) 処理を施し、視認性を向上させた⁵⁾。次に、HSV 色空間および RGB 条件を組み合わせた 2 種類のマスク処理を行うことで、傷の領域を高精度に抽出した。加えて、画像中心部の円形領域 (ROI) に処理を限定することで、周辺ノイズによる誤検出を低減した。

得られたマスク画像に対して、モルフォロジー処理 (クロージングおよび膨張) を適用し、ノイズ除去および連結処理を行った後、外部輪郭を抽出した⁷⁾。抽出された輪郭のうち、一定面積以上であり、かつ細長く、画像中心近傍に存在するものを有効な傷候補として選別した。

抽出された傷輪郭について、端点間の最大距離 d_{px} を求め、事前にキャリブレーションにより算出したスケール係数 $s = 0.016$ (mm/px) を用いて実寸の長さ L を算出した。

$$L = s d_{px}$$

本手法により、照明条件や背景に依存せず、画像の傷を安定的に検出し、長さをミリ単位で定量化することが可能となった。本研究における画像処理のフローチャートを Fig. 9 に示す。

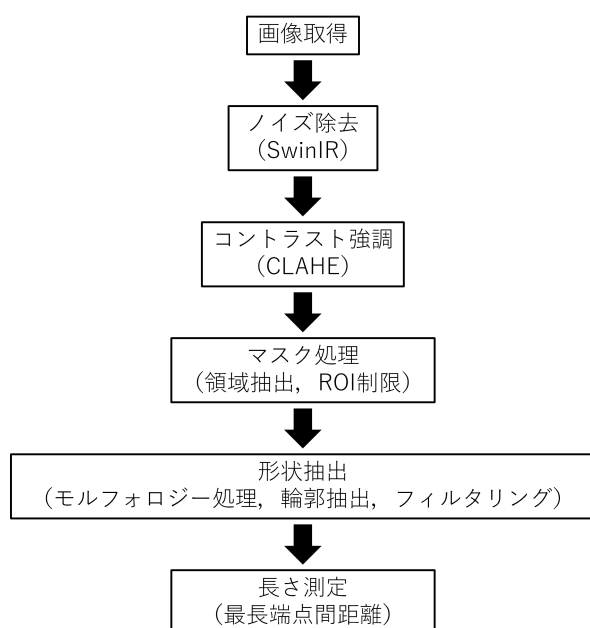


Fig. 9 画像処理のフローチャート

8. 実際の配管を用いた撮影実験

8.1 撮影実験の条件と結果

本研究で開発した傷検出アルゴリズムの有効性を検証するため、内径 30 mm の配管を対象に撮影実験を行った。Fig. 10 に実験全体像を、Fig. 11 と Fig. 12 に撮影の様子および取得画像を示す。

対象配管にはあらかじめ傷マーキングを施し、開発した内視鏡カメラヘッドを挿入して観察画像を取得した。撮影には 3 章で示した内視鏡カメラ（フル HD, 視野角 70°, 焦点距離 30~100 mm）を使用し、ズーム機能は用いず等倍表示

とした。撮影は内蔵 LED 光源を用いた暗室環境で実施し、同一の傷を対象に条件を一定に保ちながら 3 回行った。撮影条件は、内視鏡先端からレンズまでの水平距離を 16 mm, レンズから対象面までの垂直距離を 14 mm とし、両者の合計距離は

$$16 \text{ mm} + 14 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

となり、内視鏡の最低焦点距離を満たしている。

取得画像には照明条件やカメラ感度に起因する輝度ノイズや濃淡の不均一が含まれていたため、7 章で述べた処理フロー（SwinIR によるノイズ除去, CLAHE によるコントラスト補正, 成分抽出, モルフォロジー処理, 輪郭抽出, 特徴量に基づくフィルタリング）を適用した。

その結果、抽出された傷の輪郭から端点間の最大距離を求め、7 章で述べたスケール係数を用いて実寸換算を行った。以上より、実環境に近い条件下においても提案手法が高精度な傷の検出と寸法測定に有効であることを確認した。

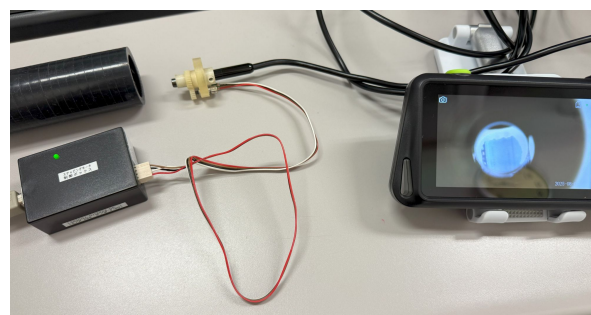


Fig. 10 撮影実験の全体像

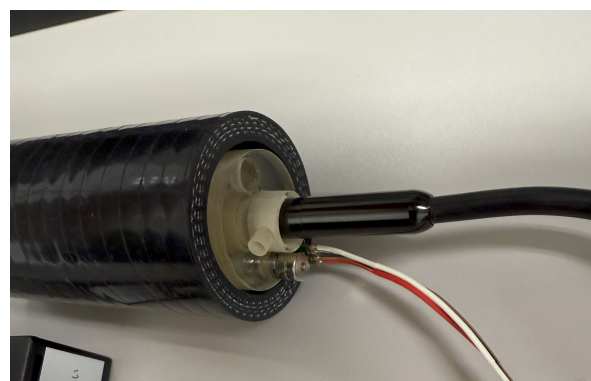


Fig. 11 撮影の様子

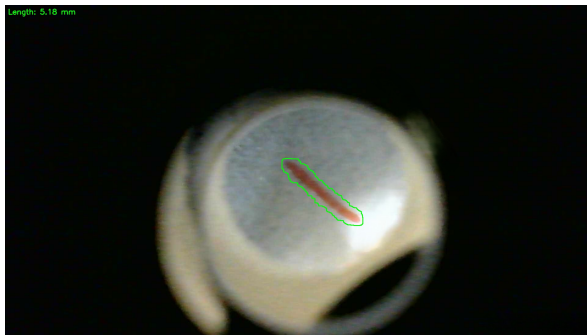


Fig. 12 撮影画像

Table 2 撮影実験結果（相対誤差）

試行回数	真値 [mm]	計測値 [mm]	相対誤差 [%]
1 回目	5.0	5.26	+5.2
2 回目	5.0	5.22	+4.4
3 回目	5.0	5.18	+3.6

8.2 考察

本実験では、真値 5.0 mm の傷に対して計測値は 5.18～5.26 mm と、誤差は +3.6～+5.2 % 程度であった (Table 2)。この誤差は、撮影時の照明条件やカメラ解像度による輪郭の不明瞭さ、傷マーキング形状の微細なばらつき、画像処理段階での二値化や輪郭抽出のしきい値設定などが影響した可能性がある。これらの要因を減らすためには、より均一な光源配置、高解像度カメラの利用、適応的なしきい値処理や学習ベースのパラメータ調整などが有効と考えられる。

9. 結言

本研究では、狭小空間観察を目的として新たに設計した内視鏡ヘッドを試作し、その有効性を評価するとともに、配管内部の撮影画像を対象とした傷の自動検出および長さの定量化を可能とする画像処理手法を構築した。ヘッドには 45° ミラー回転機構を組み込み、局所的かつ任意方向の観察を実現した。さらに、撮影画像に対して SwinIR によるノイズ除去と CLAHE を用いた前処理、およびマスク処理を組み合わせ

ることで、傷の輪郭を安定的に抽出できることを確認した。得られた輪郭から最長端点間距離を計測することで、実寸に近い傷の長さを算出することが可能となった。

今後は、本手法を用いた長期的な劣化傾向の解析、他種の損傷（例：腐食や摩耗）への適用、ならびにリアルタイム処理への展開を進めることで、配管診断におけるさらなる自動化と高精度化が期待される。

参考文献

- 1) T. Yamamoto *et al.*, "Development of a Pneumatic Inchworm-Type Pipe Inspection Robot," *Journal of Robotics*, vol. 12, no. 3, pp. 123–130, 2020.
- 2) M. Ito, A. Naganawa, K. Oka, and K. Sunakoda, "Development of a laser processing head to inspect and repair the damage inside of a half inch pipe," *2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2010)*, pp. 126–131, 2010.
- 3) 野村雄太, 南斉俊佑, 星崎みどり, 関健史, 長縄明大:「狭隘空間内を観察する内視鏡ヘッドの開発」, 計測自動制御学会東北支部 第 346 回研究集会, 2023.
- 4) J. Liang, J. Cao, G. Sun, K. Zhang, L. Van Gool, and R. Timofte, "SwinIR: Image restoration using Swin Transformer," *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops*, 2021.
- 5) K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization," in *Graphics Gems IV*, Academic Press Professional, Inc., pp. 474–485, 1994.
- 6) D. H. Nguyen, Y. S. Heo, and H. Myung, "Pipe defect detection using deep learning and convolutional neural network," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 3437–3444, 2021.
- 7) R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed., Pearson, 2018.