

狭隘空間内を観察する内視鏡ヘッドの開発

Development of an endoscopic head for observing inside narrow spaces

○ 野村雄太*, 南齊俊佑*, 星崎みどり*, 関健史*, 長縄明大*

○ Yuta Nomura, Shunsuke Nansai, Midori Hosizaki,

Takeshi 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), 機構設計 (Mechanism design)

連絡先 : 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院理工学研究科
長縄 明大, Tel.: (018)-889-2726 E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

現在, 産業工場や電力供給施設などでは, 種々の流体を搬送するために, たくさんの配管が使用されている. また, 配管の漏れや破損を未然に防ぐために, 配管は定期的に検査を行なう必要がある. 検査は, 利用者や第三者への被害の回避, 長年にわたる機能不全の回避, 長寿命化への時宜を得た対応などの設備に係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施される.

しかし, 狭小空間や小口径配管内の損傷検査は, 人間が直接行うことが不可能である. そこで, 配管内部の損傷を検査するために, 配管検査ロボットを用いることが大変有効である.

現在開発されている配管検査ロボットの一例として, 直径 100 mm 以上の配

管における使用を想定し, 超音波を利用し 360°方向の損傷の探査が可能な自走式ロボットが開発されている.

移動機構として, Tomonari Yamamotoらが開発した空気圧中空軸アクチュエータ機構が挙げられる^[1]. この機構は, チューブ内に空気を送り込むことによって, 壁面を保持しているローラーが移動し, 配管内の移動が可能となるインチワーム型のロボットである. また, ベルト伸縮機能を加えることにより, 保持力と反発力の両方を発生させることが可能となり, ストローク長が延伸し, 配管内の高速移動が実現された.

本研究室においては, スコープと渦電流探傷装置を組み合わせた構造を持ち, 配管内のおおよその損傷の位置を特定することが可能である 1 インチおよび 1/2

インチ配管用ヘッドが開発されている。本ヘッドは、光ファイバスコープで得られる配管内の画像や補修用のレーザー光を、管内壁面へ反射させるためのミラーを内部に配置している^[2]。

しかし、駆動装置として、圧電素子で構成される超音波アクチュエータが計 12 個使用されており、小型であるが構造が複雑であるという課題がある。

そこで、本研究では、内径 30mm の配管内部を内視鏡で観察することを想定したカメラヘッドの開発を行う。30mm を想定した理由として、現在開発されている内視鏡ヘッドは、比較的、径の大きい配管を想定したものが多く、小口径の配管内部を観察する場合、寸法の制約により、機構の配置が困難となる。また、先端部を屈曲させることができず、配管の長手方向の画像のみしか得られず、配管の半径方向へミラーで映像を屈曲させる機能を有するヘッドの需要があるためである。撮影画像の解析が機構カメラヘッドは、既成の内視鏡の先端に取り付けて使用することを想定する。カメラヘッドには、損傷部分を局所的に観察することを目的として指定した回転角でミラーを回転させる回転機構を取り付ける。

また、実際の配管内部の損傷は、形状が複雑であり、撮影画像から損傷の種類や発生要因を特定することが困難となる場合が多い。画像処理を配管検査に適用した研究事例は少なく、本研究では、取得した画像内における対象物の大きさを判別することが可能となる画像処理を施す。

2. 設計コンセプト

本研究で設計するロボットは、内径 30mm の配管内においての使用を想定しているため、装置全体の幅が 30mm に収まるようにモータ及び回転機構を配置する必要がある。装置は配管内部に挿入して使用することを想定しており、装置が配管内部で回転すると損傷位置の特定が困難となるため、重量バランスが均衡に保たれるように設計する必要がある。また、Fig. 1 (左図) のような設計の場合、装置と配管内面との距離が常に一定に保たれないため、Fig. 1 (右図) のような装置が常に配管の中心に配置される設計とする。

以下の設計要件を考慮し、Fig. 2 に設計コンセプトを示す。内視鏡先端にミラーを組み込んだ円筒を取り付け、その円筒を回転させることにより、直角方向の画像の取得を可能とする。

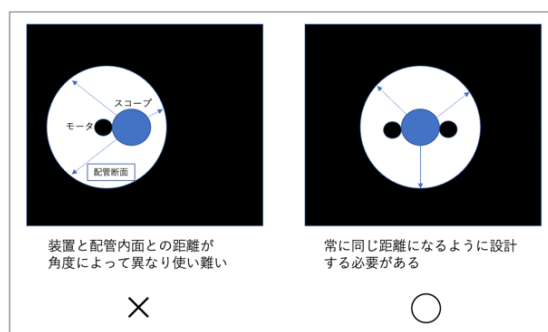


Fig. 1 設計要件

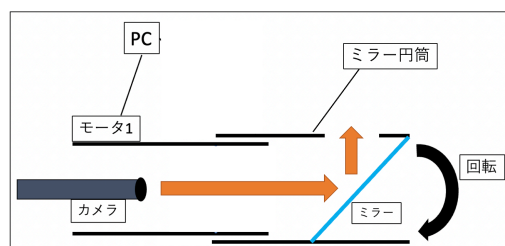


Fig. 2 設計コンセプト

3. 主な使用装置

内視鏡は、工業用内視鏡を使用する。モニター、ケーブル、カメラから構成されており、カメラはスコープの先端部に取り付けられている。内視鏡の画像を Fig. 3 に示す。また、内視鏡の仕様を Table 1 に示す。

モータの制御には、Arduino Uno、モータドライバを用い、アクチュエータとしてステッピングモータを用いる。

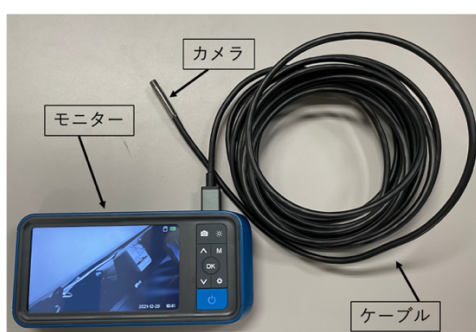


Fig. 3 工業用内視鏡

Table 1 内視鏡の仕様

解像度	100 万画素
撮影解像度 (画素)	1920×1080
焦点距離	30~100 (mm)
視角	70°

4. 使用モータについて

4.1 必要トルクの計算

円筒を中空軸と仮定し、内・外径、全質量から、中空軸の定理より、モータの駆動に必要なおおよそのトルクを計算した^[3]。計算過程を以下に示す。

Fig. 4 の円筒において、内径 $d_1 = 6$ mm、外径 $d_2 = 8$ mm、全質量:25g とすると、せん断応力 τ は、

$$\tau = \frac{F}{A}$$

と表される。ここで、

$$F = 25 \times 10^{-3} \times 9.8[\text{N}]$$

$$A = (4.0^2 \times \pi) - (3.0^2 \times \pi)[\text{mm}^2]$$

であるため、せん断応力 τ は、

$$\tau = \frac{25 \times 10^{-3} \times 9.8}{(4.0^2 \times \pi) - (3.0^2 \times \pi)}$$

$$\approx 0.009 \times 10^6[\text{Pa}]$$

となる。

モータの必要とするトルクは、中空軸の定理より、

$$T = \frac{\pi}{16} \times \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \times \tau$$

$$T = \frac{\pi}{16} \times \frac{(8.0^4 - 6.0^4) \times 10^{-12}}{8.0 \times 10^{-3}} \times 0.009 \times 10^6$$

$$\approx 0.7[\text{mNm}]$$

余裕をみて、係数 1.5 をかけると、

$$T' = 0.7 \times 1.5$$

$$\approx 1.0[\text{mNm}]$$

となる。よって、出力トルクが、1.0[mNm] を上回るモータを使用する必要がある。

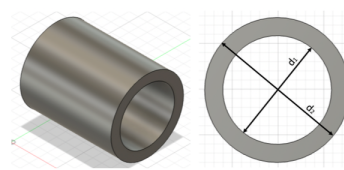


Fig. 4 中空丸軸

その結果、出力トルクが 1.0[mNm] を上回るモータを使用する必要があることが明らかになった。1.0[mNm]以上のトルクを発生させた上で、円筒を低速 (1rpm 程度) で回転させる必要があるため、本研究ではステッピングモータの使用が適している^[4]。

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ー(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 制御手法

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。Arduino Uno 及びモータドライバを用いて、1 パルスあたりの回転角を指定し、制御方法を採用する。また、一定間隔でパルスを発生させることにより、低速回転を実現する。

5. 設計した内視鏡ヘッド

ロボットは主にファイバースコープ(内視鏡)とヘッドによって構成されている。全体図を Fig. 5 に示す。開発したヘッドは、既製のスコープ先端部に取り付けて使用することを想定する。ヘッドは、レンズ用円筒、ミラー用円筒がねじによって二重に取り付けられており、ミラー用円筒内にミラーを 45° に組み込む。治具によって固定されたモータを回転させることによって、ミラーが連動して回転する。また、ステッピングモータは、停止位置を保持

する機能を有しているため、基準地点から損傷位置までの角度を記録することが可能である。停止時における治具の左端からミラー用円筒の右端までの寸法は 42mm である。また、全幅は 28mm であり、設計要件である 30mm 以内に収まっている。また、スコープと配管内面との距離は、ミラー用円筒の角度に依らず一定であるため、配管内面の観察が円滑となる。

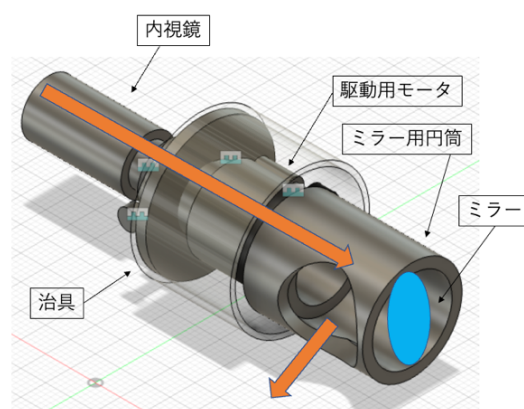


Fig. 5 設計装置の全体像

6. 試作品

試作品を内視鏡に取り付けた様子を Fig. 6 に示す。設計ソフトウェアは、Autodesk Fusion 360 を使用し、3D プリントにより印刷した。また、Arduino、モータドライバ、より、モータ駆動の回路を製作した。配線図を Fig. 7 に示す。



Fig. 6 内視鏡先端に取り付けた様子

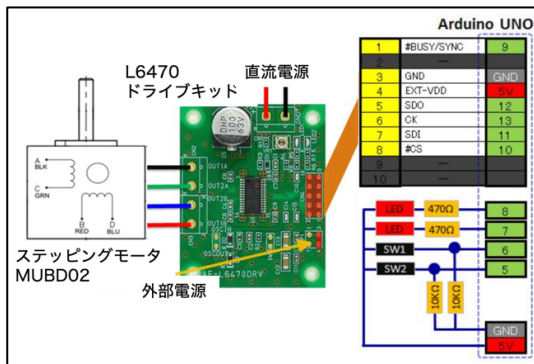


Fig. 7 製作した回路

7. 駆動実験

駆動実験の様子を Fig. 8 に示す。内視鏡先端にヘッドを取り付け、内視鏡から対象物までの垂直距離が常に 14mm となるように治具を壁面に押し当てた状態で、モータを 1rpm で駆動する。また、内視鏡とミラーの距離を 16mm 離すことにより、対象物と内視鏡との距離が 30mm となり、内視鏡の最低焦点距離となる。先端のヘッドが回転し、直角方向の観察が可能となる。画像はモニタに映し出され、撮影が可能である。また、ヘッド部の拡大写真を Fig. 9 に示す。治具を壁面に押し当てて使用する。



Fig. 8 駆動実験の様子

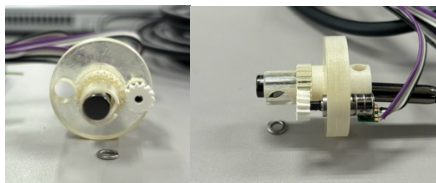


Fig. 9 ヘッド部の拡大画像

8. 画像処理

8.1 手法

本研究では、取得した画像内の損傷を検出し、おおよその大きさが推定可能となるシステムを構築する。オープンソースライブラリである OpenCV を使い、プログラミング言語は Python を使用する。損傷部の大きさの推定方法として、画像のピクセル数を利用する。ピクセル数は内視鏡固有の値であるため、損傷部のピクセル数から距離を算出する方法を採用する。

はじめに、内視鏡から取得した画像は歪みが生じているため、キャリブレーション処理を行う必要がある。方法として、チェッカーボードを異なる角度から複数枚撮影し、交点の座標を算出する。焦点距離、光学中心を内部パラメータとして、撮影した画像に適用し、歪みの補正を行う。

大きさを推定する手順として、取得した画像に対して 2 値化処理を行い、グレースケール化を施す。その上で、輪郭検出を行い、画像内における損傷部を検出する。その後、指定した高さにおける 2 値化処理後の対象物の幅をピクセル数より測定する。画像処理のフローチャートを Fig. 10 に示す。尚、内視鏡と損傷との距離が常に一定となる必要があるため、モータ治具を壁面に接触させ、撮影を行う必要がある。

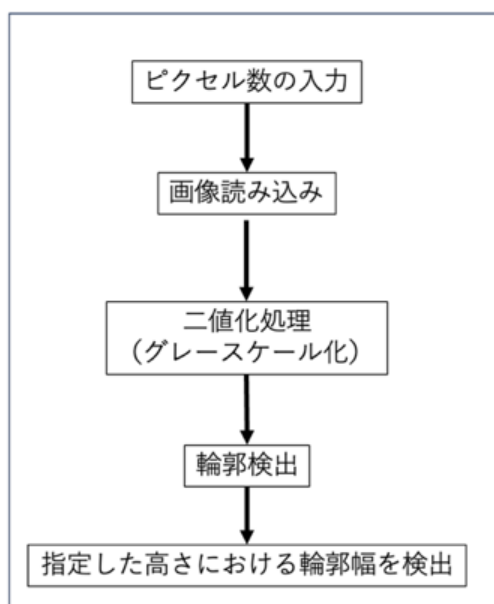


Fig. 10 フローチャート

8.2 撮影実験

損傷を模した撮影対象として、一辺が5mmの正方形が印刷された用紙を用いる。用紙を円筒状に丸め、内部に装置を挿入し、撮影を行う。撮影対象を Fig. 11、撮影の様子を Fig. 12 に示す。また、撮影画像を Fig. 13、撮影画像に対して2値化処理、輪郭検出を行った画像を Fig. 14 に示す。真値との誤差を比較した結果を Table 2 に示す。測定を行った結果、平均して7.0%の相対誤差が生じた。

一点目の誤差要因として、画像の歪みの影響であると考えられる。内視鏡は単眼であることから樽型歪みが生じるため、キャリブレーションの際のサンプル数を増やすことが改善策として考えられる。また、内視鏡と対象物との距離はヘッドの半径分の14mmであり、ズーム機能の付加や近接レンズの利用が検討される。

二点目の要因として、今回、測定方法として、画像上端からの距離を指定して位

置を定めたが、対象物の最大部分を測定できていないことが誤差要因として考えられる。そのため、対象物の最大幅部分を検出し、測定が可能となるようなプログラムの開発が検討される。

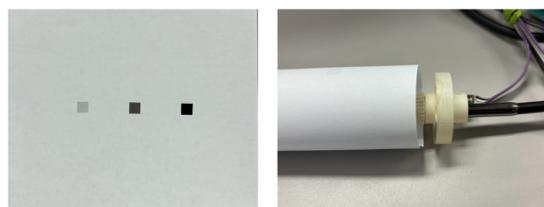


Fig. 11 撮影対象 Fig. 12 撮影の様子

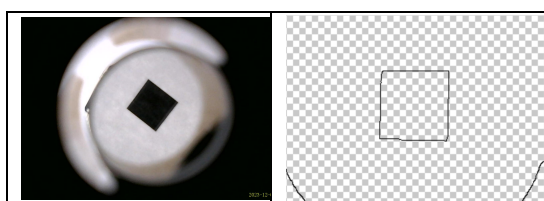


Fig. 13 撮影画像 Fig. 14 画像処理後

Table 2 測定結果

真値:5.0[mm]	1回目	2回目
測定値[mm]	5.43	5.27
誤差[mm]	+0.43	+0.27
相対誤差[%]	8.6	5.4

9. 結言

本研究では、内視鏡と組み合わせて使用する内視鏡カメラヘッドの開発を行った。カメラヘッドは、二重円筒構造を採用しており、任意の回転角で、円筒を回転させることが可能である。また、取得した画像内の対象物の大きさを推定するシステムを構築し、おおよその損傷の大きさの推定を可能とした。

今後の展望として、構造の見直しを行うとともに、画像処理の精度を高めることを検討する。

参考文献

- [1] Tomonari Yamamoto, High-speedsliding-inchworm motion mechanism with expansion-type pneumatic hollow-shaft actuators for in-pipe inspections, Mechatronics, pp.102-107, 2018.
- [2] Mamiko Ito, Akihiro Naganawa, Kiyoshi Oka and Katsuaki 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] 林則行, 富坂兼嗣, 平賀英資:機械設計法, 森北出版株式会社, 1988.
- [4] 大木 創 :ステップモータの理論と応用, 実教出版株式会社, 1979.