

配管内画像からの配管 3 次元地図作成

Construction of 3D map from images of interior pipes

○学 田中 宏樹 (中央大) 山野 史登 (中央大)
菱木 暁彦 (中央大) 正 梅田 和昇 (中央大)
学 石川 龍太郎 (中央大) 学 眞野 雄貴 (中央大)
正 中村 太郎 (中央大)

Hiroki TANAKA, Chuo University, h.tanaka@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Fumito YAMANO, Chuo University
Akihiko HISHIGI, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University
Ryutaro ISHIKAWA, Chuo University
Yuki MANO, Chuo University
Taro NAKAMURA, Chuo University

This paper proposes a method to construct a 3D map from images of interior pipes. The corrosions and cracks of old pipes are one of the causes of road collapsing. To prevent these accidents, it is essential to examine inside of the old pipes, and consider whether to repair or to replace them. This method consists of creating a development view, estimating motions by using optical flow, excluding outliers, and connecting development views. The effectiveness of the proposed method is verified through the experiments such as connecting the development views.

Key Words: image processing, old pipe, map construction

1. 緒言

近年耐用年数の 50 年を経過した管（老朽管）が増加している。これは漏水、道路陥没などの事故の要因となる。そこで、管の状態を知るために、下水管内の定期的な検査が必要であり、そのため図 1 のようなミミズ型ロボットの開発が行われている[1][2]。松井ら[3]は、双曲面ミラーを装着したカメラとレーザ光源からなるレーザレンジファインダをミミズ型ロボットに搭載し、光切断法と SfM により配管の三次元モデルを生成した。しかし、この手法では双曲面ミラーがロボットから突出してしまい、物理的に曲管等を通過することが出来ないため実用的ではない。

本研究では、ミミズ型ロボットに搭載された広角カメラ一台のみを用いて配管の展開画像を作成し、それらを繋げて三次元地図を作成する手法を提案する。



Fig.1 Peristaltic crawling robot[1]

2. 提案手法

配管内の時系列画像を繋げるために、画像間のオプティカルフローを求め、そこから画像間の移動量を得ることを考える。このとき、配管内画像はエッジなどが少なくオプティカルフローを求めるのは困難である。そこで、配管内画像から展開図を作成する。この処理により画像間の見えの変化が減少してオプティカルフローの抽出が容易になると同時に、フロー

の向きが一定になることで選別が単純化される。得られたフローから移動量を求め、それを用いて展開図を移動前の展開図に繋ぎ合わせる。

本手法では以下の前提条件を設ける。

- ・カメラの光軸は配管軸と一致する。
- ・ロボットは配管軸に対して平行に前進している。
- ・配管の内径は既知である。

2.1 配管軸位置決定の自動化

実際にロボットが前進する際、まっすぐに進むわけではない。そのため、配管軸から光軸がずれてしまう。そこで配管軸を自動で求め、算出した位置を光軸と一致させる。画像中の配管軸の箇所が暗くなることを利用した手法を2つ提案する。画像をグレースケールに変換し、領域を一定範囲に絞った後、以下の処理を行う。

2.1.1 重み付き平均による重心決定

グレースケール化した配管軸付近の暗い領域で画素値による重み付きを行い、重心を求める。画素値を p とし、重み w を以下の式で与える。

$$w = 90 - p \quad (1)$$

但し、 $p > 90$ のとき $w = 0$ とする。画像面左上を原点としたときの横軸、縦軸をそれぞれ u 、 v としたとき、重心の座標 u_g, v_g を以下のように求める。

$$u_g = \frac{\sum wu}{\sum w} \quad (2)$$

$$v_g = \frac{\sum wv}{\sum w} \quad (3)$$

2.1.2 回転放物面当てはめによる重心決定

画素値に対して回転放物面を当てはめてその頂点を求め、

配管軸位置とみなす。
回転放物面の式は、

$$z = a(u^2 + v^2) - cu - dv + e \quad (4)$$

$$c = 2au_g \quad (5)$$

$$d = 2av_g \quad (6)$$

$$e = a(u_g^2 + v_g^2) + b \quad (7)$$

と表される。 z は画素値、 a, b, c, d, e はパラメータである。式(4)を領域内の全ての点に対して求め、連立させる。

$$y = Ax \quad (8)$$

y は各画素の画素値を並べたベクトル、 A は式(4)の係数の行列、 $x = [a, c, d, e]^T$ である。ここで A の擬似逆行列 A^+ を求め、 x を式(9)から算出する。

$$x = A^+y \quad (9)$$

得られた x を用いて式(5), (6)から重心の座標 (u_g, v_g) を求め、

2.2 展開図の作成

図2のように、横軸を x 、縦軸を y とし、 x 軸方向から反時計回りに角度 θ を定める。また、配管軸位置からの距離を r とする。このとき、

$$x = r \cos \theta \quad (10)$$

$$y = -r \sin \theta \quad (11)$$

が成り立つ。また図3から以下の式が成り立つ。

$$x = \frac{fX}{\Delta Z} \quad (12)$$

$$y = \frac{fY}{\Delta Z} \quad (13)$$

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (14)$$

f は焦点距離、 Δ は画素の物理的な間隔である。光学中心を原点として、 Z 軸をカメラの光軸方向に一致させ、 X 軸と Y 軸は画像の横方向と縦方向に平行にとったものを用いる。

以上の式から高さ Z が以下のように求まる。

$$Z = \frac{fR}{\Delta r} \quad (15)$$

上式で求めた Z を縦軸に、配管の角度を横軸に設定し、図4のように展開図を作成する。

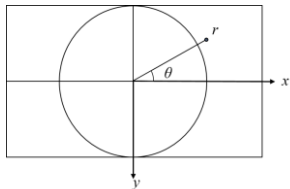


Fig.2 Image plane

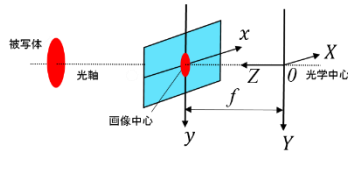


Fig.3 Perspective projection model

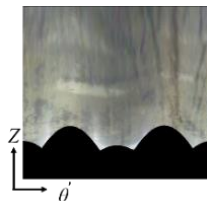
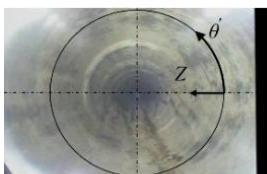


Fig.4 Correspondence between pipe image and development view
2.3 運動推定

2枚の連続した配管内画像間で対応点を取得し、図5のようにオプティカルフローを求め、はずれ値を除去する。特徴点の取得にはAKAZEを用いる。条件は以下の通りである。

- ・画像の垂直方向となす角度 α がしきい値以内：ロボットは直進するため
- ・オプティカルフローの向きが進行方向と逆：特徴点は進行方向と逆向きのため
- ・境界部から遠い：境界部の影響を避けるため

2.4 展開図の繋ぎ合わせ

図6のように移動前の展開図に移動後の展開図の上部2/3をフローの平均長さ分をずらして繋げる。

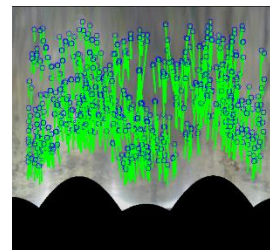


Fig.5 Optical flow

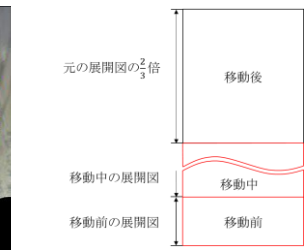


Fig.6 Connection of a development view

3. 配管軸位置決定の比較実験

3.1 実験条件

2.1節で述べた2つの配管軸位置決定手法の比較実験を行った。配管内画像は画像サイズが352×224[pixel]、図4の配管を用いた。配管内画像のグレースケール化し、配管軸付近の対象領域は $172 \leq u \leq 224$ [pixel], $96 \leq v \leq 132$ [pixel]とした。

3.2 実験結果

2つの手法で求めた重心座標 (u_g, v_g) を表1に示す。2つの手法でほぼ同じ結果が得られたが、手動で求めた値から横方向に6, 7[pixel]ずれる結果となった。原因として、グレースケール化して求まった暗い領域内の白い画素が影響したと考えられる。

Table1 Position of pipe axis calculated by each method

配管軸位置の算出方法	配管軸位置[pixel]
重み付き重心	(191, 114)
回転放物面の頂点	(190, 113)
手動	(197, 113)

4. 展開図を繋げる実験

4.1 実験条件

配管内画像からの展開図作成と、展開図を繋ぎ合わせる実験を行った。図7のようなカメラの移動前後の2枚の配管内画像を用いた。画像サイズは352×224[pixel]、配管軸の座標は手動で求めたものを用いた。繋ぎ合わせる際のオプティカルフローのしきい値は $\alpha = 5^\circ$ 、境界部から40[pixel]以内のものを除外した。展開図の繋ぎ目の滑らかさから定性的に評価を行った。また複数枚の開図を繋ぎ合わせるため9枚の画像を用いて実験を行った。



(a) Previous frame



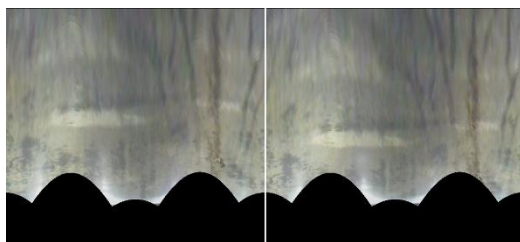
(b) New frame

Fig.7 Images of interior pipe

4.2 実験結果

図 8 に移動前後の 2 枚の配管内画像の展開図を、図 9 に図 8 の展開図を用いて繋ぎ合わせた画像を示す。図 10 に定性的に評価するための繋ぎ目の拡大図を示す。赤い矩形内が繋ぎ目の部分である。図 11 に 9 枚の画像を繋ぎ合わせた結果を示す。図 10 より展開図の繋ぎ目に目立っている箇所がある。光軸が配管軸に一致していることを前提条件に実験を行ったが実際にはこの条件が満たされていないことが考えられる。またもう一つ的前提条件にロボットは配管軸に対して平行に進んでいることをあげた。この条件を基にフローは展開図の縦軸と平行であると選別条件を設けた。そのためフローの長さは全て一定となる。しかし、ロボットは斜めに動いていることもあるためフローは一定とはならず結果展開図の繋ぎ目でずれが生じていると考えられる。

展開図を複数枚繋げる実験も同様に図 11 のように 9 枚繋げることが出来た。しかし、繋ぎ目が目立っている箇所がある。これは移動していない画像間や移動量が微小な画像間では誤対応でフローの平均長さが大きくなってしまったためだと考えられる。



(a) Previous frame (b) New frame

Fig.8 Development view

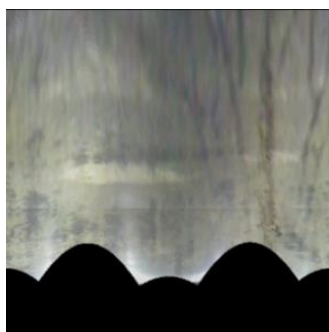


Fig.9 Development view by connecting 2 images

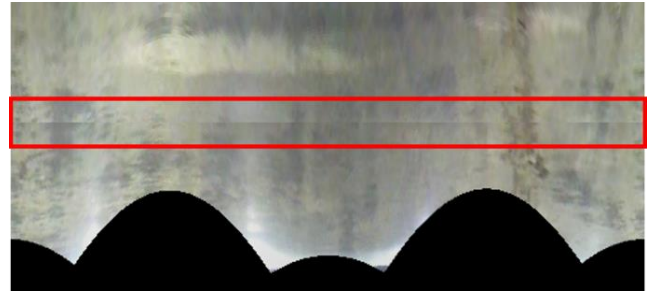


Fig.10 Magnified image of the connected part



Fig.11 Development view by connecting 9 images

5. 結論

本研究では、配管内画像から配管三次元地図を作成する手法を提案した。配管内画像から展開図を作成し、オプティカルフローを求めて運動推定を行い、展開図を繋いだ。今後の展望として、前提条件の光軸が配管軸に一致していることを緩和することを目指す。

文 献

- [1] Ryutaro Ishikawa, Takeru Tomita, Yasuyuki Yamada, Taro Nakamura, "Investigation of Odometry Method of Pipe Line Shape by Peristaltic Crawling Robot Combined with Inner Sensor," 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp1275-1279, 2017.7.
- [2] 眞野雄貴, 石川龍太郎, 谷瀬友基, 河口貴彦, 山田泰之, 中村太郎, "圧送管内検査用蠕動運動型ロボットの速度向上ユニットの提案", 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 講演論文集 pp.24-27, 2017.12.
- [3] 松井建樹, 山下淳, 金子透, 村上太郎, 大森隼人, 中村太郎, "全方位レンジファインダ搭載ミズ型ロボットによる配管の 3 次元モデル生成", 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2010AC313-5, pp.1-4, 2010.
- [4] 奥富正敏他, "デジタル画像処理[改訂新版]", CG-RTS 協会, 2015.