

配管内画像からの配管 3 次元地図作成 ーオプティカルフローを用いた配管中心の決定ー

大山暁[†], 飯田浩貴[‡], 池勇勲[†], 梅田和昇[†], 眞野雄貴[‡], 保井拓巳[†], 中村太郎[†]

[†]: 中央大学理工学部精密機械工学科

[‡]: 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻

概要: 本論文では配管内部の画像から配管内の 3 次元地図を生成する方法およびオプティカルフローを用いた配管中心の決定方法を提案する. 耐用年数を経過した管は漏水や道路の陥没の原因となるため, 配管内部の検査が必要となる. そこで, 配管内部の検査をするため, 提案手法では, 配管内画像を展開図に変換し, オプティカルフローを用いて運動推定を行い, 展開図をつなぎ合わせることで 3 次元地図を生成する.

1. 緒言

下水管は, 環境保全・衛生維持のための重要なインフラであるが, 近年, 耐用年数である 50 年を経過した配管(老朽管)が増加している. このような管は, 漏水や道路陥没の原因となるため, 下水管内の定期的な検査が必要となっている. そのため, 図 1 のような配管検査のためのミズ型ロボットの開発が行われている[1][2]. 松井らは, 双曲面ミラーを取り付け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ズ型ロボットに搭載し, 光切断法と SfM により配管の 3 次元モデルを生成した[3]. 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ることができないため実用的ではない. また, 田中らは, ミズ型ロボットに搭載された広角カメラ 1 台のみを用いて配管内を撮影した画像から展開図を生成し, それらを繋げることで 3 次元地図を生成する方法を提案した[4]. しかし, 繋ぎ合わせた展開図は, 繋ぎ目が目立ってしまい, また, 繋ぎ合わせにおいてずれが生じてしまう.

そこで, 本研究では, 配管の 3 次元地図を生成するにあたって, より精度の高い繋ぎ合わせのための手法を提案する.

2. 展開図による手法

配管内の連続した画像を繋げるために, 画像間でオプティカルフローを求め, 画像間の移動量を得る. このとき, 元の配管内画像では移動の前後で特徴点の見えが違ってしまうため, 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し, その画像間でオプティカルフローを取得する. この処理によって 1 枚の画像内での特徴点の見えの変化が減少し, 容易にオプティカルフローが取得できる. 展開図で得られたオプティカルフローから移動量を求めて移動前と移動後の展開図の繋ぎ合わせを行う.



Fig. 1 Peristaltic crawling robot[1][2]

2.1. 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, 配管中心位置からの距離を r とすると,

$$x = r \cos \theta \quad (1)$$

$$y = -r \sin \theta \quad (2)$$

が成り立ち, また図 3 の透視投影モデルから以下の式が成り立つ.

$$x = \frac{fX}{\sigma Z} \quad (3)$$

$$y = \frac{fY}{\sigma Z} \quad (4)$$

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (5)$$

ここで, f は焦点距離, σ は画素の物理的な間隔, である. 図 4(a)のように配管内画像の奥行きを Z とすると, 展開図の高さ Z は以下のように決まる.

$$Z = \frac{fR}{\sigma r} \quad (6)$$

以上から, 図 4(b)のように, 上式で求めた Z を縦軸に, 配管の角度 θ を横軸に設定した展開図を作成する.

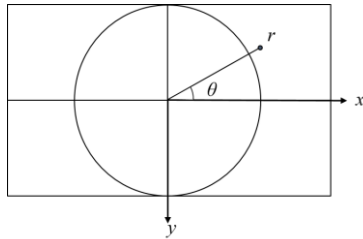


Fig. 2 Image plane

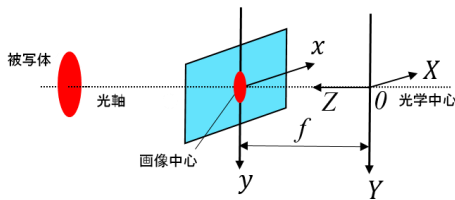
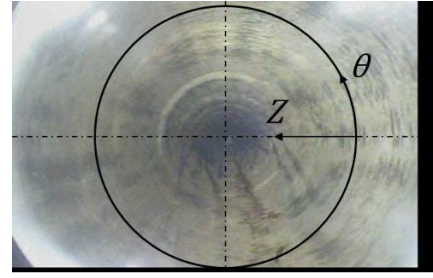
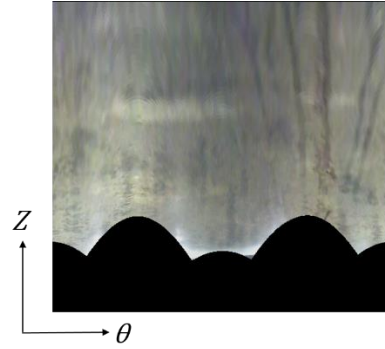


Fig. 3 Perspective projection model



(a)



(b)

Fig. 4 Image transformation: (a) raw pipe image and (b) development image

2.2. 運動推定

2 枚の連続した展開図間で特徴点を取得し, オプティカルフローを求め, はずれ値を除去する. 対応点の取得には AKAZE を用いる. 以下の条件をすべて満たすオプティカルフロー以外をはずれ値とみなして除去する.

- ・展開図の垂直方向とのなす角 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ロボットの進行方向と逆: 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

2.3. 展開図の繋ぎ合わせ

図 5 のように移動前の展開図の下 1/3 に移動中の展開図のオプティカルフローの平均長さ分をずらし, 移動後の展開図の上 2/3 を繋ぎ合わせる.

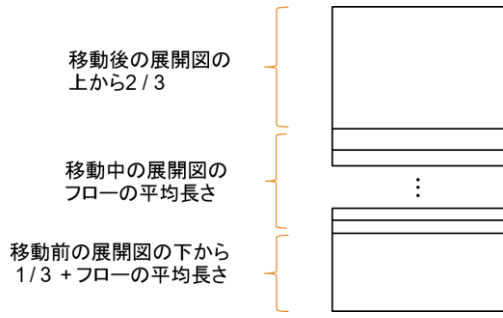


Fig.5 Connection of development images

3. 配管中心位置の自動決定

実際にロボットが前進する際、カメラの位置・姿勢は毎フレーム異なる。そのため、配管中心は画像中心からずれてしまう。そこで、配管中心を自動で求めて算出した位置を画像中心と一致させる。展開図で求めたオプティカルフローは配管内画像では放射状にある1点(運動の無限遠点)に向かうことを利用した手法を提案する。

すべての画像において同じ点を展開中心とした展開図を作成し、各フレーム間で図 6(a)のようにオプティカルフローを取得する。次に、展開図で得たオプティカルフローを図 6(b)のように元の配管内画像に変換する。このとき、オプティカルフローの式は、

$$a_i x + b_i y = c_i \quad (7)$$

と表される。ただし、 a_i , b_i , c_i は直線の係数であり、 $i = 1, 2, \dots, M$, M はオプティカルフローの本数である。この式を行列ベクトルの形で表現すると次式のようになる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ \vdots & \vdots \\ a_M & b_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = [x \quad y]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{c} = [c_1 \quad \dots \quad c_M]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{c} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ の擬似逆行列 $\mathbf{A}^+$ を求め、以下の式(12)から配管中心の推定値 $\mathbf{x}^* = (x, y)$ を算出する。

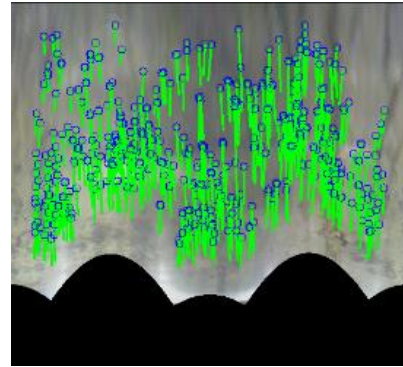
$$\mathbf{x}^* = \mathbf{A}^+ \mathbf{c} \quad (12)$$

このとき、元の配管中心から一定以上の距離がある直線は除外する。

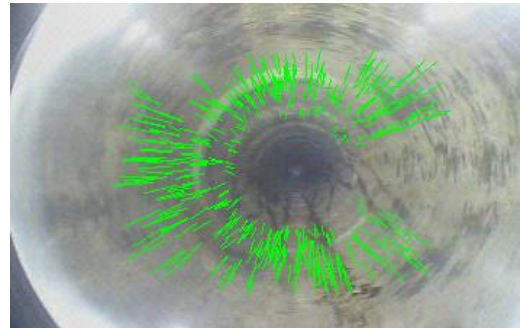
4. 配管中心位置決定の実験

4.1. 実験条件

2.2節で述べた配管中心位置の決定手法の評価実験を行った。実験に用いた配管内画像は、画像サイズが352[pixel]×224[pixel]、枚数は9枚である。オプティカルフローは連続する2フレーム間において取得した。そのため、配管中心位置は8枚に対して得られた。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]以内のものは除去した。また、オプティカルフローを算出する際には点(193,116)を展開中心とした。また、その中心から5[pixel]以上離れたオプティカルフローは交点算出の際に除外するものとする。



(a)



(b)

Fig. 6 Transformation of optical flow: (a) development image and (b) raw pipe image

4.2. 実験結果

8 枚の画像に対して 2.2 節で述べた手法で求めた配管中心座標(x, y)をそれぞれ表 1 に示す. また, 比較のために手動で取得した座標もあわせて表 1 に示す.

Table 1 Positions of center of pipe

画像 番号	手動 [pixel]	提案手法 [pixel]	誤差 [pixel]
1	(193,116)	(193,116)	(0,0)
2	(193,116)	(193,114)	(0,-2)
3	(193,118)	(195,116)	(2,-2)
4	(195,115)	(195,115)	(0,0)
5	(193,115)	(193,118)	(0,3)
6	(193,115)	(192,116)	(-1,1)
7	(195,115)	(194,117)	(1,-2)
8	(195,119)	(194,116)	(1,3)

4.3. 考察

表 1 の値をそれぞれ比較してみると, ほとんどの画像において座標が 1 から 3[pixel]ずれる結果となった. 点(193,116)から 5[pixel]以上離れたオプティカルフローは除外しているため, 手動の場合と比べて比較的近い値が得られている.

5. 展開図の繋ぎ合わせの比較実験

5.1. 実験条件

4 章で行った配管中心位置決定の実験結果をもとに, 手動で展開中心を指定した場合の繋ぎ合わせとオプティカルフローから展開中心位置を得た場合の繋ぎ合わせ, さらに従来手法である展開中心を固定点(193,116)とした場合の繋ぎ合わせをそれぞれ行い, 繋ぎ目の滑らかさを評価した. 画像は 4 節と同じものを使い, 繋ぎ合わせる枚数は 8 枚である.

5.2. 実験結果

手動の場合と従来手法, 提案手法の場合とでそれぞれ展開図の繋ぎ合わせをした結果は図 7 のようになった.

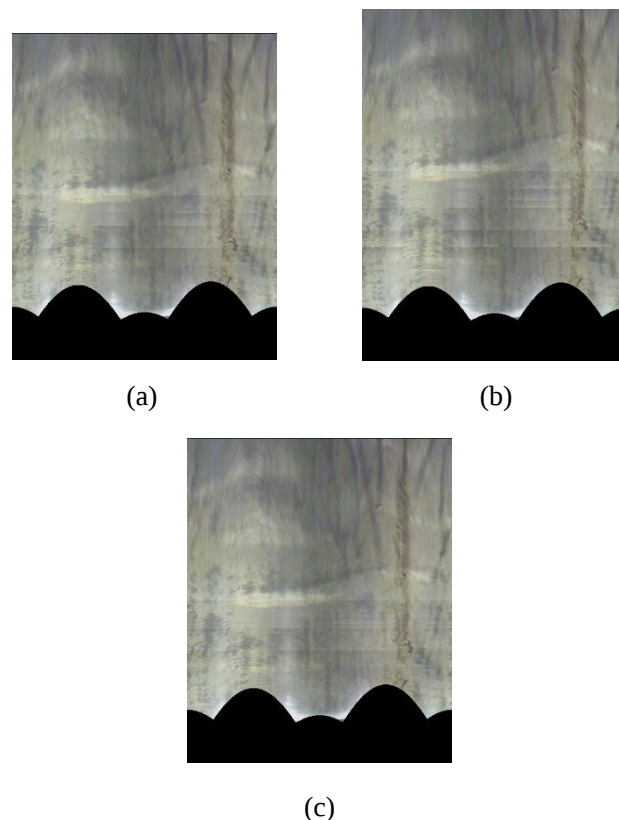


Fig. 7 Development images using eight successive images : (a) conventional method (b) proposed method (c) manual

5.3. 考察

図 7 の(a), (b), (c)を比較すると, (c)の手動の展開図が最も繋ぎ目が目立たない. また, (a), (b)を比較してみると繋ぎ目はほぼ同じように目立ってしまうが, (b)の提案手法を用いたものは(c)の従来手法のものよりも模様の重なりが目立ってしまい, また, 長さも長くなってしまっている. この原因としては, 模様が重なっている部分ではオプティカルフローが長くなってしまっているためであると考えられる. 算出した配管中

心位置が真値からずれてしまうと展開図が歪んでしまうためオプティカルフローがうまく算出できないためである。

また, (a), (b), (c)のいずれの展開図も繋ぎ目が目立ってしまうのが大きな問題点と言えるが, この原因は, ミミズ型ロボットの運動によってカメラの位置・姿勢が毎フレーム異なってしまうためであると考えられる。

6. 結言

本研究では, 配管内画像から配管 3 次元地図を作るために, 配管内画像の展開図を高精度に繋ぎ合わせる手法を提案した。配管中心の位置をオプティカルフローを用いて算出することで展開図の歪みを削減し, 連続する展開図間の移動量を高精度に推定した。今後の展望としては, ミミズ型ロボットの運動情報を取得し, 3 次元地図を補正することである。

参考文献

- [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,” in Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1275-1279, 2017.
- [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.
- [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] 田中宏樹, 山野史登, 菱木暁彦, 梅田和昇, 石川龍太郎, 眞野雄貴, 中村太郎, “配管内画像からの配管 3 次元地図作成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 講演論文集, 1A1-I05, 2018.

大山暁: 中央大学理工学部精密機械工学科 4 年在学中。

飯田浩貴: 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻修士 1 年在学中。

池勇勲: 2010 韓国慶熙大学機械工学科・コンピュータ工学科卒業, 2012 年韓国高麗大学大学院メカトロニクス専攻修士課程修了, 2016 年東京大学大学院精密工学専攻博士課程修了。同年東京大学日本学術振興会特別研究員, 2018 年中央大学理工学部精密機械工学科助教, 現在に至る。移動ロボットによる環境センシングに関する研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE 等の会員。

梅田和昇: 1989 年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 1994 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了, 同年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師, 2006 年同教授, 現在に至る。ロボットビジョン, 画像処理の研究に従事。博士(工学)。日本ロボット学会, 精密機械工学会, 日本機械学会, 電子通信情報通信学会, IEEE 等の会員。

眞野雄貴: 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻修士 1 年在学中。

保井拓巳: 中央大学理工学部精密機械工学科 4 年在学中。

中村太郎: 2003 年信州大学大学院工学系研究科生物機能工学専攻博士後期課程修了, 2004 年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師, 2013 年同教授, 現在に至る。バイオロボティクス, アクチュエータ制御工学, 人間協調型ロボットの研究に従事。博士(工学)。日本機械学会, 日本ロボット学会, フルードパワーシステム学会, IEEE 等の会員。