

配管内画像列からのカメラの運動推定と 配管 3 次元点群の構築

Camera Motion Estimation from Image Sequence in Pipe and Construction of 3D Point Cloud of Pipe

○学 入山 真伍 (中央大学) 正 Sarthak Pathak (中央大学)
正 中村 太郎 (中央大学) 正 梅田 和昇 (中央大学)

Shingo IRIYAMA, Chuo University, iriyama@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Sarthak PATHAK, Chuo University
Taro NAKAMURA, Chuo University
Kazunori UMEMA, Chuo University

In this paper, we estimate a motion of a camera and construct a 3D point cloud of a pipe from image sequences in the pipe acquired from the camera at a tip of the robot for an inspection of the inside of the pipe. The 3D point cloud is considered as a cylinder and its radius is calculated. A scale is determined by comparing an actual pipe radius with the point cloud radius. The scale is determined by comparing the actual pipe radius and the point cloud radius. The camera translation is calculated from the scale, and the 3D point clouds of multiple pipes are connected using the translation.

Key Words: Image processing, In-pipe inspection robot, SFM

1. 序論

下水管は環境や衛生を維持するための重要なインフラ設備の一つである。しかし、近年これらの下水管は耐久年 50 年を超えた老朽管が増加している。また、国内に約 45 万 km ある下水管のうち、老朽管は約 1 万 km にも上るともいわれている。この老朽管を放置していると、配管の内部で腐食やクラックなどの現象が生じ、結果的に図 1 のような地上の道路陥没を発生させる可能性もある。平成 26 年度には、全国で約 3300 件の道路陥没事故が報告されている[1]。そのため、これらの被害を減らすために、配管内の状態を検査することができる図 2 のミミズ型ロボットが開発されている[2][3]。大山ら[4]は単眼カメラを用いて、画像間の移動量を考慮し、配管の展開図を繋ぎ合わせた 3 次元地図を作成する手法を提案した。配管の形状が円柱であることを利用して、単眼カメラから得られた画像から展開図を作成する。この展開図に対して、Accelerated KAZE(AKAZE)[5]を使って特徴点を取得し、オプティカルフローを求めたうえで、カメラの運動推定を行う。最後に、複数の展開図を算出した運動量を考慮したうえで繋ぎ合わせることで、配管内部の 3 次元地図を作成している。しかし、この手法では配管の 3 次元形状までは取得できていない。本研究はミミズ型ロボットが撮像した配管内部画像と配管半径より、カメラの運動推定と配管 3 次元点群の構築を行う。



Fig.1 Sinking by cracks



Fig.2 Peristaltic Crawling Robot[2][3]

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

カメラの運動を推定するため、2 枚の配管内画像の特徴点抽出と画像間の対応付けを行う。次に配管の形状を復元するために、得られた対応点から 3 次元点群を再構築する。再構築された配管 3 次元点群の半径と実際の配管の半径を比較することでスケールを決定する。このスケールからカメラ運動の

並進量の大きさを算出し、複数の 3 次元点群の繋ぎ合わせも行う。

2.2 カメラの運動推定

本研究では、回転や照明の変化などに頑健な AKAZE 特徴量[5]を用いて特徴点抽出を行う。シミュレーション内の新聞紙を巻いた配管の特徴点抽出と対応点付けを行った例を図 3 に示す。画像間の全対応点の中から 5 組の対応点を選び、カメラの運動推定を行う 5 点アルゴリズムを用いることで、カメラの回転行列と並進ベクトルを求める。



Fig.3 Correspondence of feature points of pipe images in simulation

2.3 3 次元点群の構築

配管内部の形状を復元するためには、AKAZE によって得た特徴点よりも密な対応点であることが望ましい。点群構築の際は、DeepFlow[6]を用いて対応点探索を行う。DeepFlow によって得られた画像間の対応点と回転行列と並進ベクトルを用いて、三角測量の原理より配管 3 次元点群を再構築する。

2.4 配管形状の計測

実際の配管は円柱形状をしているので、構築された 3 次元点群も円柱とみなして形状計測する。円柱のモデルとパラメータを図 4 に示す。中心軸方向のベクトルを w 、3 次元点群の 1 点を p 、点 p の法線ベクトルを n と w の交点を q とする。このときの円柱の半径 R は各パラメータを用いて以下で求められる。

$$R = |p - q| \quad (1)$$

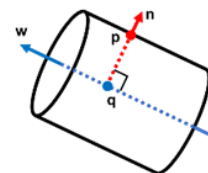


Fig.4 Cylinder model and parameters

2.4 スケールの決定

画像のみからカメラ運動の並進量の大きさを求めることはできない。そこで、構築された3次元点群の半径を実際の配管の半径に合わせることでスケールを決定する。実際の配管の半径を R_r 、3次元点群の半径を R_v とすると、スケール s は以下の式で求められる。

$$s = R_r / R_v \quad (2)$$

並進ベクトル $\mathbf{t}$ とスケール s を用いるとカメラ並進量の大きさ $\mathbf{t}'$ は以下の式で求められる。

$$\mathbf{t}' = s \cdot \mathbf{t} \quad (3)$$

構築された3次元点群 $\mathbf{X}$ とスケール s を用いると正規化された点群 $\mathbf{X}'$ は以下の式で求められる。

$$\mathbf{X}' = s \cdot \mathbf{X} \quad (4)$$

複数の3次元点群をカメラ移動量と回転を考慮したうえで繋ぎ合わせる。 n 番目の画像と $n+1$ 番目の画像のカメラ移動量を $\mathbf{t}'_n$ とすると、1番目の画像のカメラ位置から n 番目の画像のカメラ位置まで移動量 $\mathbf{T}_n$ は以下の式で求められる。

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{t}'_1 + \mathbf{t}'_2 + \dots + \mathbf{t}'_{n-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_n = \sum_{k=1}^{n-1} \mathbf{t}'_k \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{T}_1 = 0 \quad (7)$$

n 番目の画像と $n+1$ 番目の画像間のカメラ回転行列を $\mathbf{R}_n$ とし、繋ぎ合わせたい一部の点群を $\mathbf{X}'_n$ とすると、カメラの回転と並進量を考慮した3次元点群 $\mathbf{X}''_n$ は以下で求められる。

$$\mathbf{X}''_n = \mathbf{R}_n \cdot (\mathbf{X}'_n + \mathbf{T}_n) \quad (8)$$

繋ぎ合わせた複数の点群 $\mathbf{X}_{all}$ は $\mathbf{X}''_n$ の和集合とする。

3. シミュレーション実験

カメラの移動量を正確に把握したうえで点群構築とカメラの並進量計測を行うため、Blender という 3DCG 統合開発環境を用いてシミュレーション実験を行う。

3.1 シミュレーション条件

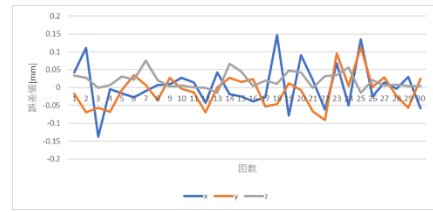
図5に示すように Blender 内で内径 100 mm、長さ 546 mm の配管を作成した。配管の内側には対応点探索と繋ぎ合わせの確認がしやすい新聞紙のテクスチャを張り付けた。配管内画像を図13に示す。カメラを配管中心軸上で 2.0 mm、5.0 mm、10 mm ずつ移動させ、31 枚の配管内画像から 30 回の 3 次元点群の構築を行った。構築された点群の一部で円柱の形状計測を行い、カメラの並進量の大きさを算出する。カメラの光軸方向を z 軸、残りの 2 軸を x 軸、y 軸とする。



Fig. 5 Pipe in Blender

3.2 シミュレーション結果

カメラ移動量ごとに計測された並進量の誤差を図5に示す。また、2枚画像から構築された配管3次元点群と複数点群を繋ぎ合わせた結果を図6~図8に示す。



(a) Translation : 2.0 mm

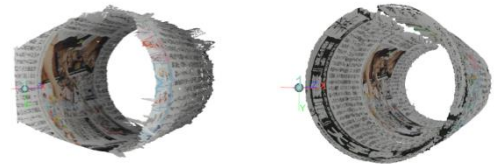


(b) Translation : 5.0 mm



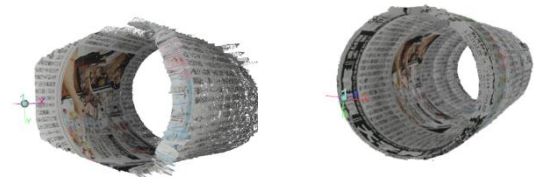
(c) Translation : 10 mm

Fig. 5 Errors in camera translation



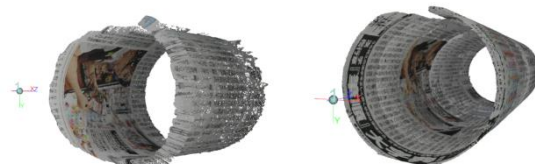
(a) Point cloud from two images (b) Point cloud from 126 images

Fig. 6 3D point cloud with 2.0 mm camera translation



(a) Point cloud from two images (b) Point cloud from 61 images

Fig. 7 3D point cloud with 5.0 mm camera translation



(a) Point cloud from two images (b) Point cloud from 31 images

Fig. 8 3D point cloud with 10 mm camera translation

3.3 考察

図5より、いずれのカメラ移動量でも並進量の誤差が小さく収まっている。また、図6~図8より、複数の3次元点群の繋ぎ合わせがおおむね正しくできており、提案手法の有効性が確認できた。しかし、3次元点群がない箇所もみられる。新聞紙の余白などの模様のないテクスチャ部分は対応点探索

が困難であるとわかる。

実カメラを用いた実験ロボットの先端部に取り付けた単眼カメラを用いて、シミュレーション実験と同様に配管 3 次元点群の再構築とカメラの並進量を算出する実験を行った。

4.1 実験条件

外径 114.02 mm の透明な配管に新聞紙を巻き付けた。図 9 は配管の内部画像である。ロボットの移動量を測るために、新聞紙の余白に目盛りを書き、配管内部を撮影した動画を 2 mm, 5 mm, 10 mm ごとにフレームを切り出す。6 枚の配管内画像から 5 回の点群構築をし、一部の点群で形状計測を行い、カメラ並進量を計測する。カメラの光軸方向を z 軸、残りの 2 軸を x 軸, y 軸とする。



Fig. 9 Internal image of a transparent tube wrapped with newspaper.

4.2 実験結果

カメラ移動量ごとに計測された並進量を表 1 に、2 枚の画像から構築された配管 3 次元点群を図 10~図 12 に示す。また、カメラ移動量が 10mm の 11 枚画像からの点群を繋ぎ合わせた結果を図 13 に示す。

Table 1 Camera translation

	1	2	3	4	5
2.0[mm]	3.62	1.95	1.04	1.29	2.07
5.0[mm]	5.27	4.65	5.08	5.07	5.26
10[mm]	9.73	9.35	9.86	10.67	9.41



Fig. 10 3D point cloud with 2.0 mm camera translation

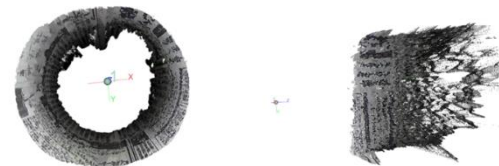


Fig. 11 3D point cloud with 5.0 mm camera translation



Fig. 12 3D point cloud with 10 mm camera translation

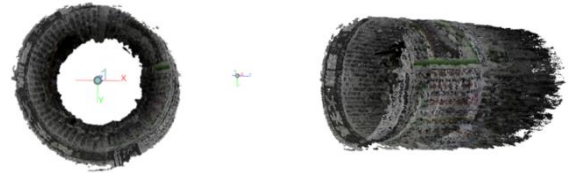


Fig. 13 3D point cloud with 10 mm camera translation

4.3 考察

4.2 節の結果より、カメラ移動量が大きいほど、正確な配管 3 次元点群の構築と並進量計測ができていることがわかる。画像の間隔が大きいと、対応点の視差も大きくなり、三角測量の原理による点群構築が容易になるからだと考えられる。

同じカメラ移動量であっても、3.2 節の点群図より 4.2 節の点群図の方が、形の崩れた円柱形状になっていることがわかる。シミュレーション実験の画像に比べて、実カメラで撮影された画像は粗く、対応点探索における対応付けの誤差が大きくなるからだと考えられる。

4. 結論

本論文では、単眼カメラから取得された配管内画像と配管半径を用いて、カメラの運動推定と配管 3 次元点群の構築をする手法を提案した。シミュレーション結果より、提案手法の有効性が確認できた。実カメラを用いた実験結果では、精度低下がみられたが、3 次元点群の構築が可能であることが示された。

今後は、曲がった配管にも本手法を適用できるようにする予定である。

参考文献

- [1] 高島英二郎, 下水管ストックマネジメントの最新動向, 国土技術政策総合研究所講演会講演集, 第 759 号, pp.45-64, 2013.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, "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", ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2018, IS1-D10, 2018.12.
- [5] P. F. Alcantarilla et al., "Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces", Proc. of BMVC, 2013.
- [6] Philippe Weinzaepfel, Jerome Revaud, Zaid Harchaoui, and Cordelia Schmid. DeepFlow: Large displacement optical flow with deep matching. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pages 1385 – 1392, December 2013.