# 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

松井建樹(静岡大学)山下淳(静岡大学)金子透(静岡大学) 村上太郎(中央大学)大森隼人(中央大学)中村太郎(中央大学)

# 3-D Model Construction of Pipe by Earthworm Robot Equipped with Omni-Directional Rangefinder

\*Kenki MATSUI (Shizuoka University), Atsushi YAMASHITA (Shizuoka University), Toru KANEKO (Shizuoka University), Taro MURAKAMI (Chuo University), Hayato OMORI (Chuo University), Taro NAKAMURA (Chuo University)

**Abstract**— A lot of plumbings exist in factories and so on. Automated inspection of the plumbings by robots is desirable. Many of existing inspection robots have to rotate their cameras because conventional cameras can see only one direction while a plumbing has a cylindrical geometry. The use of an omnidirectional camera is effective for the solution of such problem. However, the shape measurement is difficult only with the omni-directional camera. Then, in this paper, we propose a reconstruction method of a piping shape by using a rangefinder constructed with an omni-directional camera and an omni-directional laser. The rangefinder is mounted on an earthworm robot. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Omni-Directional Camera, Omni-Directional Laser, Earthworm Robot, Pipe Inspection

## 1. 序論

原子力発電所や工場などには,ガス管や水道管といっ た配管設備が至る所に存在しており,火災や爆発といっ た事故を未然に防ぐためにも,状態の正確な把握が求 められている.

配管設備の点検・検査作業はロボットにより自動化 することが望ましい.文献[1]は,大口径配管用の車輪 型管内検査ロボットを提案している.文献[2]は,小口 径配管を対象にした管内検査ロボットを開発している. 更に,文献[3]は検査及び溶接を行うロボットを,文献 [4]は蛇やミミズのような柔軟性に富んだ構造を有する 生物を模倣したロボットを考案している.その他にも, 周辺ガスの分析による酸欠チェック,有毒ガスの確認機 能,ライニングの補修機能などを備えた検査ロボット なども開発されている[5].

既存の検査ロボットの多くは撮像センサとして視野 の狭い一般的なカメラを搭載しており,配管内部の映 像を記録するためにはカメラを回転させる必要がある. そのため,配管全周の映像記録に当たっては大きな手 間となる.これに対して,周囲360°の視野を有する全 方位視覚センサを用いることで,配管内の映像記録を 効率的に行うことが可能であると考えられる.

全方位視覚センサを配管検査ロボットの視覚に利用 した手法として文献[6]がある.ここで,文献[6]では SFM (Structure from Motion)と呼ばれる手法により 計測を行っている.しかし,この手法は,画像の対応 点情報のみを用いた計測手法であるため,計測結果の スケールが決定できないという問題がある.

他方で, SFM のような受動的計測法に対し, 能動的 計測法として一般的なものに, アクティブステレオ法 がある.アクティブステレオ法の代表的な手法として, 光切断法が存在する.この手法の利点として,SFMの ように画像間の対応をとる必要がないためSFMに比 べ計測精度が良いことが挙げられる.更に,実スケー ルでの計測も可能であるため,幅広い分野で利用され ている.

また,得られた3次元計測結果を元に形状復元を行うためには,各計測地点で得られたデータを位置あわせし,統合する必要がある.これには,ロボットに搭載されたカメラの位置・姿勢推定が重要となる.

文献 [7][8] では, 全方位カメラを用いた光切断法によ る計測手法が提案されている.しかし,文献 [7] では, カメラの位置・姿勢推定について述べられていない.ま た,文献 [8] では,ICP アルゴリズムを用いた位置・姿 勢推定が提案されているが,これにはロボットが水平 な床面を走行するという前提条件が存在する.そのた め,3次元の位置・姿勢推定を行うことが困難である. ここで,前述した SFM は3次元計測の精度こそ光 切断法に劣るとされるものの,周囲環境の計測のみで なく,移動前後のカメラの位置・姿勢推定を同時に行 うことが可能であるという利点を有しており,配管検 査に限らず環境の3次元計測に利用されている[9].

更に,実際の配管検査においては,配管内部の形状 に加え,色や模様といったテクスチャ情報も重要となる.そのため,形状情報に加え,テクスチャ情報を有 した3次元モデルを生成することが配管内部の状態認 識に効果的であると考えられる.

我々は,全方位カメラを用い,計測手法として光切 断法と SFM を併用した配管の3次元モデル生成手法 を提案した[10].文献[10]における課題として,提案 したレンジファインダの配管検査ロボットへの搭載が 必要であったことが挙げられる.前述したように,従 来から数多くの種類の配管検査ロボットが提案されて いる.中でも,ミミズを規範とした蠕動運動型ロボッ トは,配管との接地面積が広く,管内走行に適した機 構を有している点が注目され,近年盛んに研究が行わ れている[11][12][13].

以上を踏まえて,本研究では,全方位カメラとレーザ からなるレンジファインダを搭載したミミズ型ロボット を用い,光切断法とSFMを併用した計測を行う.SFM による位置・姿勢の推定結果に基づいて,光切断法に よる3次元計測結果を統合する.統合された計測結果 に対して,テクスチャマッピングを行うことで,テク スチャ付の3次元配管モデルを生成することを目的と する.

#### 計測装置

本研究では,全方位カメラとレーザ光源からなるレンジファインダを,ロボットに搭載したものを用いる.

ロボットは , ミミズ型のものを用いる .

ミミズの体は約150の体節からなり,その1つ1つ の体節を順に伸縮させることで蠕動運動を行っている. 具体的には以下の順序に従って前進する.

- ① 頭部の体節を収縮させる.
- ② 体節の収縮で地面との摩擦を発生させる.
- ③後方の体節へ収縮を伝播させる.
- ④ 収縮させた体節を伸長させる.

前述したミミズの動きを規範として,文献[13]で開 発されたロボットを図1に示す.ロボットは,ミミズ の体節1つをロボットの1ユニットと見立てて,複数 の同一ユニットから構成される.ロボット全体で蠕動 運動を行うことで管内を移動する.また,ユニット間 の角度を制御することで,ロボットの進行方向を変え ることができる.

カメラは,ビデオカメラ先端に双曲面ミラーを取り 付けたもの(図2)を用いる.

レーザ光源は,一般の光切断法で用いられる通常の スリット光の代わりにリング状のレーザ光を照射する ことが可能なもの(図3)を用いる.



Fig.1 ミミズ型ロボット(文献 [13])





**Fig.**3 全方位レーザ

Fig.2 全方位カメラ 3. 処理の概要

本研究の処理手順を述べる.まず,ロボットを配管内 で移動させながら,光源から全方位にレーザを照射し て,全方位カメラによる撮影を行う.次に,取得した動 画像を用いて,光切断法による3次元計測を行う.そ の後,SFMによるカメラ間の位置・姿勢推定を行い, 推定結果に基づいて計測結果の統合を行う.統合され た計測結果に対して,テクスチャマッピングを行うこ とで,テクスチャ付の3次元配管モデルを生成する.

## 4. 3次元計測

カメラから3次元空間中の計測点へ向かう光線ベク トルをrとする.本研究で用いる全方位カメラは,カ メラの前方に双曲面ミラーを装着したものであり,光 線ベクトルrは,双曲面ミラー側の焦点から計測点へ 向かう光線が双曲面上で反射する点へのベクトルで表 される(図4).



**Fig.**4 3 次元座標算出

本研究では,レーザ光の画像座標  $[u, v]^T$ を光線ベクトルrに変換する.rはカメラの焦点距離 f及び双曲面のパラメータa,b,cから $\lambda$ を媒介変数として,式(1), (2)により表される.ここで,レーザ光の画像座標抽出には,ガウス近似法 [14] を用いる.

$$\mathbf{r} = \lambda \begin{pmatrix} su\\ sv\\ sf - 2c \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$s = \frac{a^2(f\sqrt{a^2 + b^2} + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2})}{a^2f^2 - b^2(u^2 + v^2)}$$
(2)

光線ベクトルとレーザ光の交点として表される計測 点 Pの3次元座標  $[x_p, y_p, z_p]^T$ は次式で与えられる.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \frac{-k_4}{k_1 s u + k_2 s v + k_3 (sf - 2c)} \begin{pmatrix} s u \\ s v \\ sf - 2c \end{pmatrix}$$
(3)

尚, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub>のパラメータについては計測に先立って校正しておく.

#### カメラ間の位置・姿勢推定

5.1 特徴点抽出・対応付け

特徴点抽出・対応付けには SIFT[15] を用いる.この 手法により,カメラの移動前後で取得した画像から,周 囲と比べて色合い変化の大きな点(特徴点)を抽出し, 両画像間で特徴点の対応付けを行うことで,環境中の 同一点を示す点(対応点)を取得する(図5).

## 5·2 位置·姿勢推定

カメラ間の相対的な位置・姿勢を表す回転行列 R と 並進移動ベクトル t を推定する手順について述べる.こ れには,カメラ間の位置・姿勢情報からなる行列である 基本行列 E を,対応点の光線ベクトル  $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ,



(a) 取得画像(移動前)(b) 取得画像(移動後)Fig.5 対応点取得

 $\mathbf{r'}_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$ から求める. E は式 (4) で表され,式 (4) を変形すると式 (5) が得られる.

$$\mathbf{r}'_{i}^{T}\mathbf{E}\mathbf{r}_{i} = 0 \tag{4}$$

$$\mathbf{u}_i^T \mathbf{e}_i = 0 \tag{5}$$

ただし,

 $\mathbf{u}_{i} = [x_{i}x'_{i}, y_{i}x'_{i}, z_{i}x'_{i}, x_{i}y'_{i}, y_{i}y'_{i}, z_{i}y'_{i}, x_{i}z'_{i}, y_{i}z'_{i}, z_{i}z'_{i}]^{T}$  $\mathbf{e} = [e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{31}, e_{32}, e_{33}]^{T}$ 

(*e<sub>ab</sub>*はEの*a*行*b*列成分)

Eは8点以上の対応する光線ベクトル対より求まる. すなわち式(6)を解くことで算出する.

$$\min \|\mathbf{U}\mathbf{e}\|^2 \tag{6}$$

ただし,  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots \mathbf{u}_n]^T$ であり, *n* は特徴点数を 表す.e は  $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$ の最小の固有値に対応する固有ベク トルとして求められ, E が求まる.E に特異値分解を 行うことで, R とt を求める.

5.3 スケール合わせ

SFM による推定結果のスケール合わせ手法について 述べる.まず,光切断法によって計測を行う(図6(a)). その後,計測を行った点の3次元座標をSFMによって 再度計測する.これには,光切断法による計測点を対 応点として,移動前後のカメラ位置から対応点へと向 かう光線ベクトルを算出する必要がある.

そこで,対応点取得には,レーザによって計測を行っ た箇所のみを探索の範囲とするため,正規化相互相関 テンプレートマッチングを用いる.これによって,レー ザによる全計測点の対応付けを行い,相関値がある閾 値以上のものを対応点として取得する.得られた対応 点を元に算出した光線ベクトルの交点を計測点として 3次元座標を算出する(図6(b)).

そして,式(7)より,スケール lを決定する.

$$\min\sum_{k=1}^{m} \|\log \mathbf{p}_k - \log l \mathbf{p}'_k\| \tag{7}$$

ここで, $\mathbf{p} = [x_k, y_k, z_k]^T$ は光切断法による計測結果 を, $\mathbf{p}' = [x'_k, y'_k, z'_k]^T$ はSFMによる計測結果を表す.

しが求まることで,実スケールでの位置・姿勢推定結 果が得られる.これによって,断面間のデータの統合 が可能となり,配管全体の形状復元が可能となる.

## 6. テクスチャマッピング

得られた計測点群を用い,3次元ドロネー分割によっ て三角メッシュモデルを生成する.各三角メッシュに, 全方位画像から生成したテクスチャを貼り付ける.

以上の処理で,テクスチャ情報を有する3次元配管 モデルが生成できる.



## 7. 実験

本手法の有効性を確認するため,計測対象として配管 を模した円筒を用意し,モデル生成の精度評価を行った.

凹凸の存在する配管を想定して,円筒内に図7に示 す凸部(高さ5mm,幅5mm,奥行き100mm)を設け, 図8に示す環境で実験を行った.

レンジファインダをロボットに搭載した様子を図 9 に示す.全長は約 620mm で,全方位カメラと全方位 レーザ間の間隔(基線長)は約 80mm に設定した.ま た,ロボットは全長が約 520mm で,4 つのユニット(ユ ニットの仕様:内径約 100mm,外径約 150mm,長さ 約 130mm)が連結することで構成される.

上述したロボットを配管内で約 10mm 間隔で移動さ せながらレーザ光を照射して全方位カメラによる撮影 を行うことで,40 断面を計測した.

位置・姿勢推定には照明をつけた状態で撮影した画像 を使用した.3次元計測には実際の配管内の状態に近く, レーザ光の抽出が容易な照明を消した状態で撮影した 画像を用いた.入力画像のサイズは1920 × 1080pixels である.

取得画像を図 10 に示す.提案手法による3次元計測 結果結果を図 11 に,精度評価の結果を表1 に示す.

表1は,円筒内径と,計測結果から算出した円筒モ デルの直径との比較及び図7に示した凸部の各寸法に ついて,真値と計測結果との比較を行ったものである.

図 11 より,提案手法が,内部に設けた凸部を含め, 円筒の3次元形状を復元できている様子が確認できる.

表 1 から,円筒内径 202mm に対し,計測結果は 200mm と,誤差は 2mm となり,本手法の理論誤差値 2mm の範囲内での計測が確認された.凸部の計測誤差 に関しても,高さ,幅,奥行きのそれぞれについて順 に 2mm,4mm,4mm となり,精度の良い計測が行え ている.尚,理論値の算出にあたっては,文献[7]を参 考にした.

図 12 に提案手法を用いた計測結果に対するテクス チャマッピングの結果を示す.

テクスチャマッピングの結果と通常のカメラで撮影した画像(図7)とを比較すると,円筒内の環境を表す3次元モデルが適切に生成できていると考えられる. 更に,テクスチャ情報が加わることで,凸部の認識が容易となったことが見て取れる.

## 8. 結論

本論文では,全方位レンジファイダ搭載ミミズ型ロ ボットを用いた配管の3次元モデル生成手法を提案した.提案手法によるモデル生成の精度評価を行うこと



Fig.9 全方位レンジファインダ搭載ミミズ型ロボット





(a) 照明をつけた状態(b) 照明を消した状態Fig.10 取得画像

で提案手法の有効性が示された.

今後の課題として,レンジファイダへ照明機能を付 与することや,欠陥の自動検出手法を構築することな どが挙げられる.

## 参考文献

- [1] 藤原茂,金原了二,岡田徳次,実森毅:"文節型主要配管内 検査点検ロボットの開発",日本ロボット学会誌,Vol.12, No.8, pp.318-327, 1994.
- [2] 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久: "1 インチ用 配管作業ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp. 389–395, 1999.
- [3] 村松正浩,小山律夫,坪内新子,菅泰雄:"管内検査のための管内移動ロボットの開発",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 予稿集, IPI-M9, pp.1-2,2001.
- [4] M.Horodinca, I.Doroftei and E.Mignon: "A Simple Architecture for In-Pipe Inspection Robots", Proceedings of the 2002 International Colloquium on Mobile and Autonomous Systems, pp.1–4, 2002.
- [5] 佐藤多秀: "実用ロボット技術に必要なもの 壁面ロボット,管内ロボットを例に",日本ロボット学会誌,Vol.12, No.8, pp.1132–1136, 1994.
- [6] J. Kannala and S. S. Brandt and J. Heikkilä: "Measuring and Modelling Sewer Pipes from Video", Machine Vision and Applications, Vol.19, No.2, pp.73– 83, 2008.
- [7] 栗栖正充,塩川祐介,鮫島崇之 横小路泰義,吉川恒夫: "瓦礫内3次元マップ構築のためのレーザレンジファインダの開発",第4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,2J2-3,pp.698-699,2003.
- [8] R. Orghidan, E. Mouaddib, J. Salvi: "Omnidirectional Depth Computation from a Single Image", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1234– 1239, 2005.



#### **Fig.**11 3 次元形状計測結果

#### Table 1 精度評価

	計測結果	真値
円筒内径	200mm	$202 \mathrm{mm}$
凸部高さ	7mm	$5 \mathrm{mm}$
凸部幅	9mm	$5 \mathrm{mm}$
凸部奥行き	104mm	100mm





(a) 正面図

(b) 凸部拡大

Fig.12 テクスチャマッピング結果

- [9] M. Tomono: "3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection ", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3353–3358, 2005.
- [10] 松井建樹、山下淳、金子透:"全方位レーザ・全方位カメ ラからなるレンジファインダの自己位置推定と配管の3 次元モデル生成"、第15回ロボティクスシンポジア講演 予稿集, pp.534-540, 2010.
- [11] 高橋昌樹,林巖,岩附信行,鈴森康一,黄木昇:"みみ ずの運動を応用した細管内移動マイクロボットの研究", 精密工学会誌, Vol.61, No.1, pp.90-94, 1995.
- [12] N. Saga and T. Nakamura: "Elucidation of Propulsive Force of Micro-Robot Using Magnetic Fluid", Journal of Applied Physics, Vol.91, No.10, pp.7003–7005, 2002.
- [13] T. Nakamura and T. Iwanaga: "Locomotion Strategy for a Peristaltic Crawling Robot in a 2-Dimensional Space", Proceedings the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4361– 4366, 2008.
- [14] R.B.Fisher and D.K.Naidu: "A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection", Proceedings of the 1991 British Machine Vision Association Conference, pp.217–225, 1991.
- [15] D. G. Lowe: "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", International Journal of Computer Vision, Vol.60, No.2, pp.91–110, 2004.