

全方位レンジファインダ搭載ミミズ型ロボットの 自己位置推定と配管の3次元モデル生成*

松井建樹^{*1}, 川西亮輔^{*1}, 山下淳^{*1}, 金子透^{*1},
村上太郎^{*2}, 大森隼人^{*2}, 中村太郎^{*2}

Self-Localization and 3-D Model Construction of Pipe by Earthworm Robot Equipped with Omni-Directional Rangefinder

Kenki MATSUI^{*5}, Ryosuke KAWANISHI[5], Atsushi YAMASHITA[5], Toru KANEKO[5],
Taro MURAKAMI^{*6}, Hayato OMORI[6], Taro NAKAMURA[6]

^{*5}Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

^{*6}Department of Precision Mechanics, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

A lot of plumbings such as gas pipes and water pipes exist in public utilities, factories and so on. The use of an omni-directional camera which can take images of 360 ° in surroundings at a time is effective for pipe inspection. However, shape measurement is difficult only with the omni-directional camera. Therefore, 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. Our method calculates 3-D coordinates by the light section method. By integrating the 3-D coordinates with the information of camera motion estimated by the structure from motion technique, the shape of the pipe is reconstructed. The validity of the proposed method is shown through experiments.

Key Words : Omni-Directional Rangefinder, Earthworm Robot, Pipe Inspection

1. 序 論

本研究では、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次元モデル生成を目的とする。

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、現代において欠かせない重要な社会基盤となっている。そのため、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⁾では、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⁾では、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。文献⁽³⁾では検査及び溶接を行うロボットを、文献⁽⁴⁾では蛇や蚯蚓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⁾。

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⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

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。

ここで、画像情報のみを用いた場合でも、画像に写り込んでいる欠陥の検出は可能である。しかし、検出された欠陥が3次元空間中のどの位置に存在するかを特定することは困難となる。そのため、配管検査に当たっては、配管の3次元形状計測が重要となる。

全方位視覚センサを用いた配管の3次元計測手法として文献⁽⁹⁾がある。文献⁽⁹⁾ではSFM (Structure from Motion) と呼ばれる手法により3次元計測を行っている。しかし、この手法は、異なる画像間から対応点が正確に取得できなかった場合、計測精度の悪化を招く

*原稿受付 2010年10月22日

*1静岡大学 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

*2中央大学 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: yamashita@ieec.org

ことがある．また，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することが困難であるという課題が存在する．

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の一つとして，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，配管検査⁽¹⁰⁾を含む幅広い分野で利用されている．

ここで，文献⁽¹⁰⁾では，広角レンズを使用したカメラを用いることで，カメラを回転させることなく計測可能な配管の大口径化を図っている．しかし，この手法には，より大きな径の配管を計測する際に，カメラと計測断面間の距離を長く取らねばならないため，ロボットが大型化するという問題がある．これに対して，前述した全方位視覚センサは広角レンズを使用したカメラと比べて視野角が勝るため，カメラと計測断面間の距離を縮小でき，ロボットの小型化が可能となる．

次に，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・姿勢が，各計測地点間でどのように変化したかを推定することが重要となる．

文献⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾では，全方位カメラを用いた光切断法による3次元計測手法が提案されている．しかし，文献⁽¹¹⁾⁽¹²⁾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⁽¹³⁾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⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾．

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．

我々は既に，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による，3次元配管モデルの生成手法を提案した⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾．文献⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾においては，以下に挙げる3つの課題が存在した．

1つ目の課題は，提案したレンジファインダに照明



Fig. 1 Earthworm robot.⁽⁸⁾

機能が備わっていなかったことである．そのため，計測時には外部照明を用いる必要があった．

2つ目の課題は，計測精度に影響を及ぼす，全方位カメラとレーザ間の距離（基線長）の設定について述べられていなかったことである．より精度良く3次元計測を行うためにも，基線長を考慮したレンジファインダの設計を行う必要がある．

3つ目の課題は，SFMにおける対応点探索において，全方位画像特有の歪みや射影歪みなどが考慮されていなかったことである．各種の歪みを解消することで，計測精度を向上することが可能であると考えられる．

以上を踏まえて，本研究では，前述した3つの課題を解決したレンジファインダの開発を行う．レンジファインダ搭載ミミズ型ロボットを用い，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．

2. 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⁽⁸⁾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. 2 Omni-directional camera.



Fig. 3 Omni-directional laser camera.

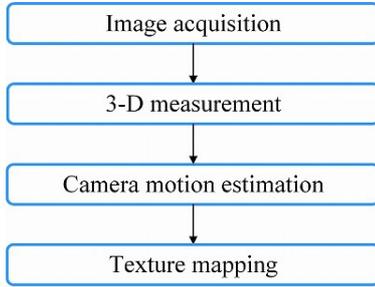


Fig. 4 Procedure.

3. 処理の概要

処理手順を図4に示す．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を用いて，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．以上の手順により，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

3次元計測には光切断法を用いる．まず，取得した動画像中のレーザ光画像座標を抽出する．そして，抽出されたレーザ光画像座標を元に得られた全方位カメラの光線ベクトルと，レーザ光の交点を計測点として3次元座標を算出する．

4.1 レーザ光抽出 計測対象に向けて照射されたレーザ光は，全方位カメラによって画像上で幅を持った領域として撮影される．そのため計測を行うには，画像上でレーザ光と判定できる領域から代表となる中心線（輝度が最も高い線）を抽出する必要がある．本研究では，このレーザ光の中心線抽出にガウス近似法と呼ばれる手法⁽¹⁹⁾を用いる．

4.2 3次元座標算出 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 \mathbf{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 \mathbf{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5）．

全方位画像の中心を原点とする画像座標を $[u, v]$ とすると， \mathbf{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 λ を媒介変数として，(1)，(2)式

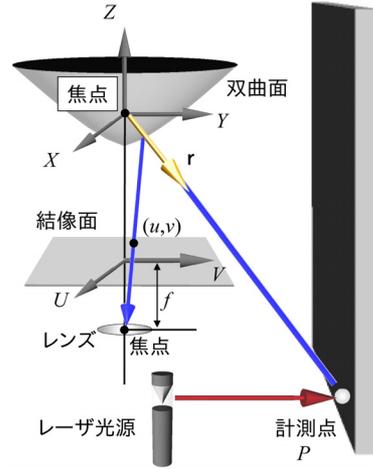


Fig. 5 Calculation of 3-D coordinates.

により表される．

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

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

次に， $[x, y, z]$ のパラメータで表される3次元空間へのレーザ光の広がりを次式で定義する．尚， k_1, k_2, k_3, k_4 のパラメータについては計測に先立って較正しておく．

$$k_1x + k_2y + k_3z + k_4 = 0 \quad (3)$$

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 $[x_p, y_p, z_p]$ は次式で与えられる．

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \frac{-k_4}{k_1su + k_2sv + k_3(sf - 2c)} \begin{pmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{pmatrix} \quad (4)$$

以上の手順によって，配管内のある断面の形状が計測される．次章では，基線長の最適化を行い，3次元座標算出の誤差を最小化する手法について説明する．

5. 基線長の最適化

計測精度向上のためには，全方位カメラと全方位レーザ間の距離（基線長）が重要となる．そこで，計測に先立って，基線長の最適化を行うことで，計測誤差が最小となる基線長を決定する．

結像位置の違いによる，全方位画像の解像度変化を図6に示す．図6から分かるように，画像中心部は，少ない画素数で環境を表現しているため，解像度は低い．そのため，解像度の観点から見た場合，計測に用いるには不向きな領域である．以上を踏まえた上で，全方位カメラと全方位レーザ間の基線長を最適化する手法について述べる．

一般的にステレオ計測において、計測精度は基線長に比例して向上するとされる。ここで、本研究における装置構成では、基線長の拡大に伴って、結像位置が画像中央部へと遷移する(図7)。そのため、基線長の拡大と解像度の間にトレード・オフの関係が存在しており、これを踏まえた上で最適な基線長を決定する必要がある。

そこで、基線長の変化に対する誤差率の変化を観察することで、基線長の最適化を行う。

画像中心からレーザー光までの距離を r 、半画素分の長さを Δr とする。計測対象までの距離 d において、レーザー光の結像位置が半画素ずれた場合の、基線長 l と計測誤差 Δd の関係は、式(5)で表される⁽¹¹⁾。

$$\Delta d = \frac{(c^2 - b^2)((b^2 + c^2)\sqrt{f^2 + r^2}f - 2bcf^2)\Delta r}{\sqrt{f^2 + r^2}(b^2 + c^2)f - 2bc\sqrt{f^2 + r^2}} l \quad (5)$$

$$r = fa \frac{\frac{cl}{d} + b\sqrt{1 + (\frac{l}{d})^2}}{b\sqrt{\frac{cl}{d} + b\sqrt{1 + (\frac{l}{d})^2} + a^2\kappa^2 + ack}} \quad (6)$$

$$\kappa = \left(\frac{b}{a} + \frac{l}{d}\right)\left(\frac{b}{a} - \frac{l}{d}\right) \quad (7)$$

$$\Delta r = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{p_H s_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{p_V s_V}{V}\right)^2} \quad (8)$$

ただし、 p_H 、 p_V は有効画素数を、 s_H 、 s_V は1ピクセルを表す四角形の縦および横の辺の長さを示す。 H は画像の水平方向画素数を、 V は垂直方向画素数を表す。

基線長を変化させた場合の、誤差率 $\Delta d/d$ (距離 d を計測した場合に含まれる誤差の割合) の変化を図8に示す。誤差率が小さいほど、設定した基線長における計測誤差は小さくなる。図8から、計測対象までの距離 d それぞれに対して、誤差率が極値となる基線長 l が存在することが確認できる。

このため、想定される計測対象までの距離 d を元に、式(5)~式(8)から最適な基線長を算出する。最適化された基線長の下で、各断面の3次元計測を行う。

次章では、各計測地点で得られる断面間のデータの位置合わせを行って、配管全体の形状を求める方法について説明する。

6. カメラ間の位置・姿勢推定

カメラ間の位置・姿勢推定には、SFMを用いる。処理手順を図9に示す。まず、カメラの移動前後で環境の撮影を行って画像を取得する。次に、取得した画像から、特徴点を抽出し、画像間で対応付けを行う。得られた対応点の幾何学的な関係を基にカメラ間の位置姿勢推定を行い、非線形推定によって位置・姿勢の推定結果を修正した後、推定結果のスケール合わせを行う。

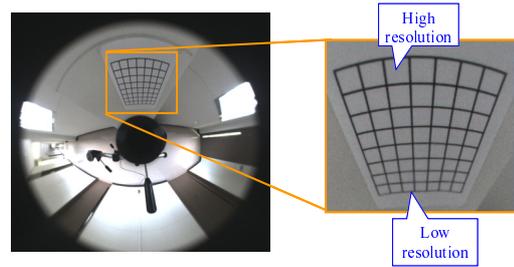


Fig. 6 Resolution of omni-directional image.

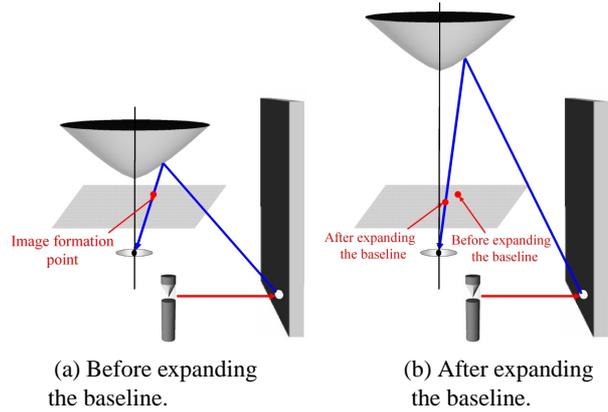


Fig. 7 Change of image formation position.

6-1 対応点取得 対応点取得には、SIFT (Scale Invariant Feature Transform)²⁰⁾を用いる。SIFTにより、カメラの移動前後で取得した画像間で特徴点の対応付けを行うことで、対応点を取得する。

しかし、単純なSIFTでは、全方位画像特有の歪みや射影歪みなどの影響により、精度良く対応点が取得できるとは限らない。ここで、双曲面ミラーを用いた全方位カメラは、環境からカメラに向かう光線が、双曲面の焦点のみで交わるという特性がある。そのため、双曲面の焦点を中心として、全方位画像の透視投影変換を行うことが出来る(図10)。そこで、全方位画像を3次元空間中の仮想的な平面(仮想平面)に投影した透視投影画像を用いて、SIFTを用いた対応付けを行う。これによって、全方位画像の歪みや射影歪みなどの影響を低減する。

各種の歪みを低減するためには、仮想面の算出が重要となる。仮想面が物体に対して傾いていた場合、生成した透視投影画像に射影歪みが現れてしまうことが考えられる(図11)。そこで、本手法では、物体に対して最適な仮想面の中心位置 \mathbf{d} と、仮想面の傾きを表す軸ベクトル \mathbf{s}_x 、 \mathbf{s}_y を探索する。

中心位置 \mathbf{d} は、エピポーラ線に沿った1自由度探索によって求める。まず、カメラの位置・姿勢関係と、光線ベクトル \mathbf{r}_1 を元に、エピポーラ線を算出する(図12)。そして、エピポーラ線上の各点を通る光線

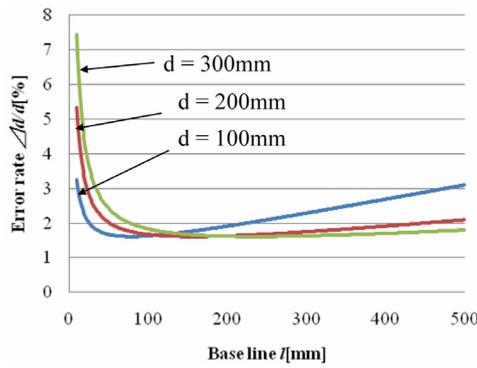


Fig. 8 Relation between base line and measurement error.

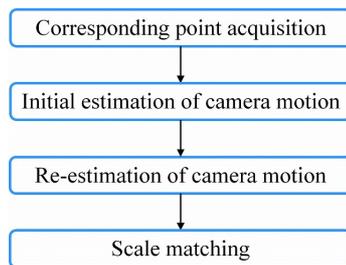


Fig. 9 Procedure of SFM.

ベクトル r_2 (移動前のカメラ位置から、対応点に向かう光線ベクトル) を算出し、 r_1 との交点 d を算出する。各交点を中心とした仮想面を作成し、仮想面の投影を行う仮想面の軸ベクトルの初期値は、 r_1 と r_2 の2等分線の傾きに対して、 s_y が垂直になるように与える。これによって、透視投影変換されたテンプレート画像 (移動後に取得した画像においてテンプレートとなる領域) と、探索画像 (移動前に取得した画像において探索を行う領域) を得る。両画像間で SIFT 特徴量の比較を行うことで、特徴量の誤差を算出し、誤差が最小となるときの d を算出する。

次に、得られた d の位置において、仮想面の傾きを変化させる。即ち、前述した初期値を基準として、軸ベクトル s_x, s_y を回転させることで、軸ベクトルの2自由度探索を行う。軸ベクトルを回転させながら、先程と同様にして SIFT による対応付けを行う。これによって、相違度が最小となる対応点を探索する。

尚、対応点探索を行う際には、画像の解像度を段階的に変化させることで、処理の高速化を図る。

また、特徴点の対応付けによって得られた対応点は全てが正しく対応しているとは限らない。誤った対応付けの為にされた点が計測に含まれると位置・姿勢の推定に悪影響を及ぼす。そこで、RANSAC (RANdom SAmple Consensus)⁽²¹⁾ を用いて位置・姿勢の推定に悪影響を及ぼす点を外れ値として除去する。

ここで、エピポーラ線を算出するためには、位置・

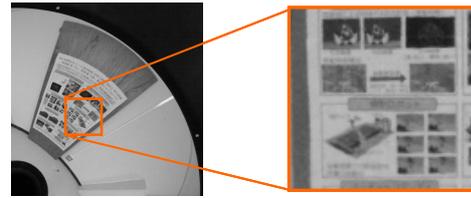


Fig. 10 Perspective image.

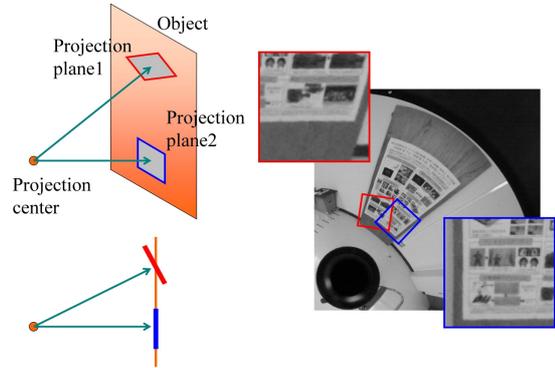


Fig. 11 Projective distortion.

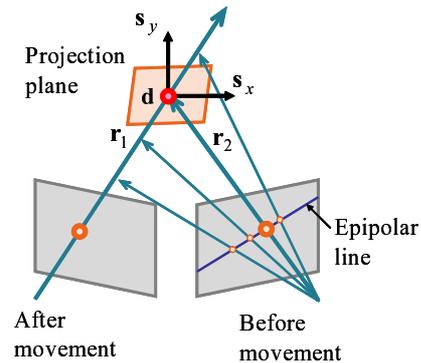


Fig. 12 Detecting of corresponding point.

姿勢関係の初期値が必要になる。そこで、まず歪みの影響を考慮しない状態で SIFT を用いて対応点を取得し、次節で述べる手法によって、位置・姿勢関係の初期値を得る。得られた初期値を利用して、本節で述べる手法により、再度対応点の取得を行い、位置・姿勢関係の推定を行う。

6.2 位置・姿勢初期推定 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 $r_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, $r'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$ (図 13) から求める。 E は式 (9) で表され、式 (9) を変形すると式 (10) が得られる。

$$r_i^T E r_i = 0 \quad (9)$$

$$u_i^T e_i = 0 \quad (10)$$

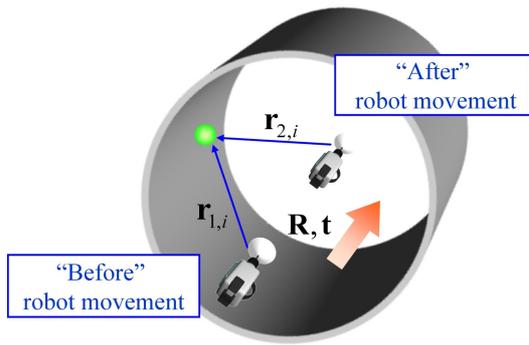


Fig. 13 Estimation of camera motion.

ただし,

$$\mathbf{u}_i = [x_i x'_i, y_i y'_i, z_i z'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, z_i y'_i, x_i z'_i, y_i z'_i, z_i z'_i]^T$$

$$\mathbf{e} = [e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{31}, e_{32}, e_{33}]^T$$

(e_{ab} は \mathbf{E} の a 行 b 列成分)

\mathbf{E} は 8 点以上の対応する光線ベクトル対を元に, 式 (11) より算出する.

$$\min_{\mathbf{e}} \|\mathbf{Ue}\|^2 \quad (11)$$

ただし, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n]^T$ であり, n は特徴点数を表す. \mathbf{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, \mathbf{E} が求まる.

次に, 基本行列 \mathbf{E} からカメラ間の相対的な位置・姿勢を表す, 回転行列 \mathbf{R} と並進移動ベクトル $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ を算出する. 基本行列 \mathbf{E} は回転行列 \mathbf{R} と並進移動ベクトル \mathbf{t} を用いて式 (12) で表される.

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (12)$$

ただし,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで, SFM では画像情報のみを入力とし, スケール情報を得ずに計測を行うため, カメラ間の距離 $|\mathbf{t}|$ が決定できない. そのため, カメラ間の距離を 1 と仮定し, $|\mathbf{t}| = 1$ となるように $|\mathbf{E}|$ を変更する. そして, 変更した \mathbf{E} に特異値分解を行うことで, \mathbf{R} と \mathbf{t} を求める.

6.3 位置・姿勢再推定 6.2 節で推定した位置・姿勢は特徴点に含まれる誤差を考慮していないため, 必ずしも良い推定結果とは限らない. そこでバンドル調整法⁽²²⁾を用いて, 各特徴点の計測誤差を考慮した位置・姿勢の再推定を行う.

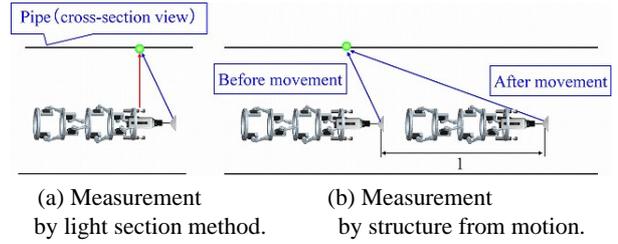


Fig. 14 Scale matching.

6.4 スケール合わせ SFM では画像情報のみを入力として扱うため, スケール情報が不明であり, カメラ間の距離 $|\mathbf{t}|$ のスケールが実スケールと一致しない.

ここで, 4 章の手順に従って光切断法により計測を行った点に関しては, 実スケールでの 3 次元座標算出が可能である. そこで, 光切断法による計測結果をスケールの指標に用いたスケール合わせを行う.

具体的にはまず, 光切断法によって計測を行う (図 14(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. ここで, SIFT によって対応付けを行おうとした場合, 光切断法によって計測を行った箇所には, 必ずしも特徴点が得られるとは限らない. 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, テンプレートマッチングを用いる.

テンプレートマッチングによって得られた対応点に向かう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 14(b)). 尚, テンプレートマッチングを行う際には, 予め, 6.1 節で述べた手法を用い, 画像の歪みを低減する. 更に, 対応付けの際に生じる外れ値の除去に関しても, 6.1 節と同様に RANSAC を用いる.

そして, 両計測結果の誤差を最小化することで, SFM による計測結果が光切断法の計測結果と一致するようなスケール l を決定する. ここで, 単純に両計測結果の 3 次元座標間の誤差を最小にするようなスケールとすると, 観測点からの距離が遠く計測精度の低い点の影響を大きく受ける可能性がある. そこで, 観測点からの距離が異なる場合にも同じ重みで計算できるように, 両計測結果の各成分に対数をとったものの誤差を最小化することで, 式 (14) よりスケール l を算出する.

$$\min \sum_{k=1}^m \|\log \mathbf{p}_k - \log l \mathbf{p}'_k\| \quad (14)$$

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.

l 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.

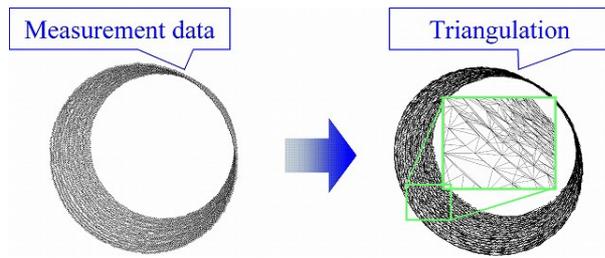


Fig. 15 Delaunay triangulation.

7. 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(図15)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。

8. 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(内径202mm,肉厚8mm)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16に示す凸部(高さ5mm,幅5mm,奥行き100mm)を設け、図17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18に示す。照明光源には、白色LED照明を用いた。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。また、全方位カメラと全方位レーザ間の距離(基線長)に関しては、5章で述べた手法に基づき、82mmに設定した。

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となるように、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1600×1200pixelsである。

取得画像を図19に示す。提案手法による3次元計測結果結果を図20に示す。

精度評価の結果を表1に示す。評価を行ったのは、円筒内径及び図16に示した凸部の各寸法についてである。円筒内径に関しては、計測結果から算出した円筒モデルの直径と真値との比較を行った。

図20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。

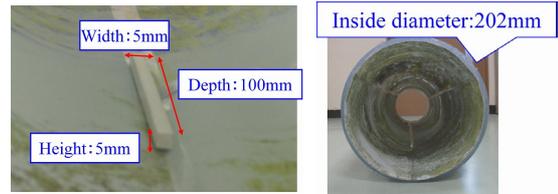


Fig. 16 Projection.

Fig. 17 Experimental environment.

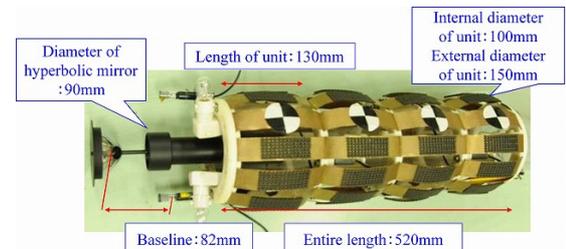


Fig. 18 Earthworm robot equipped with omni-directional rangefinder.

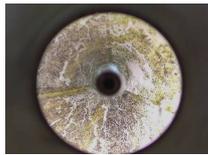
表1から、円筒内径202mmに対し計測結果は203mmと、誤差は1mmとなった。設定した基線長における理論誤差値は1mmであり、理論誤差の範囲内での計測が確認された。凸部の計測誤差に関して、高さ、幅、奥行きそれぞれについて順に1mm, 1mm, 2mmとなり、精度の良い計測が行えている。ここで、本手法の理論誤差値は1mmであるため、1mm以下の大きさの欠陥を検出することは困難である。しかし、日本機械学会が策定した、配管維持規格に依れば、肉厚8mmの配管において、許容される欠陥の大きさは6mm以下となっている。そのため、配管の健全性に影響を及ぼす6mm以上の大きさの欠陥は、本手法で検出可能である。

図21にテクスチャマッピングを施した結果を示す。密な3次元計測結果が得られたことにより、円筒内の環境を表す3次元モデルが精度良く生成できていることが確認できる。更に、テクスチャ情報が加わることで、図20と比較して、凸部の認識が容易となったことが見て取れる。

9. 結論

本論文では、全方位レンジファインダ搭載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。提案手法によって得られた計測結果に対し、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した。また、生成結果の精度評価を行うことで提案手法の有効性が示された。

今後の課題として、欠陥の自動検出手法を構築することなどが挙げられる。

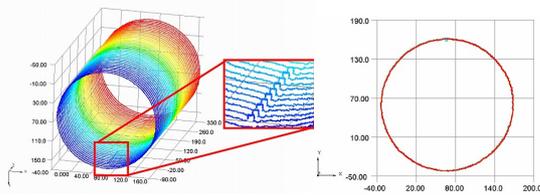


(a) Image with LED illumination.



(b) Image without LED illumination.

Fig. 19 Acquired image.



(a) Bird's-eye view.

(b) Top view.

Fig. 20 Result of 3D shape measurement.



(a) Frontal view.



(b) Inside view.

Fig. 21 Result of texture mapping.

Table 1 Accuracy evaluation.

	Measurement value	Ground truth
Inside diameter	203mm	202mm
Height of projection	6mm	5mm
Width of projection	6mm	5mm
Depth of projection	102mm	100mm

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.Horodincu, 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) 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ロボットの研究”, 精密工学会誌, Vol.61, No.1, pp.90-94, 1995.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 川末紀功仁, 酒井将司, 脇山輝史, 大山茂樹, 千田尚: “2 平行レーザーシートの投光による下水管形状計測ロボット”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.737, pp.90-97, 2008.
- (11) M. Kurisu, Y. Yokokohji, Y. Shiokawa and T. Samejima: “Development of a Laser Range Finder for 3D Map-Building in Rubble”, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.443-448, 2004.
- (12) M. Senoh, F. Kozawa and M. Yamada: “Development of Shape Measurement System Using an Omnidirectional Sensor and Light Sectioning Method with Laser Beam Scanning for Hume Pipes”, Optical Engineering, Vol.45, No.6, pp.064301.1-064301.11, 2006.
- (13) R. Orghidan, E. Mouaddib, J. Salvi: “Omni-directional Depth Computation from a Single Image”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1234-1239, 2005.
- (14) 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.
- (15) B. Micusik and T. Pajdla: “Structure from Motion with Wide Circular Field of View Cameras”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.28, No.7, pp.1135-1149, 2006.
- (16) M. Lhuillier: “Automatic Scene Structure and Camera Motion using a Catadioptric System”, Computer Vision and Image Understanding, Vol.109, No.2, pp.186-203, 2008.
- (17) 松井建樹, 山下淳, 金子透: “全方位レーザー・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”, 電気学会論文誌 C, Vol.130-C, No.9, pp.1504-1512, 2010.
- (18) 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ニ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.
- (19) 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.
- (20) D. G. Lowe: “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, International Journal of Computer Vision, Vol.60, No.2, pp.91-110, 2004.
- (21) M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, 1981.
- (22) B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: “Bundle Adjustment -A Modern Synthesis”, Vision Algorithms: Theory & Practice, Springer-Verlag LNCS 1883, 2000.