

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*

松井建樹^{*1}，山下淳^{*2}，金子透^{*2}

Self-Localization and 3-D Model Construction of Pipe by Rangefinder Constructed with Omni-Directional Laser and Omni-Directional Camera

Kenki MATSUI^{*3}, Atsushi YAMASHITA, Toru KANEKO

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

A lot of plumbings such as gas pipes and water pipes exist in public utilities, factories, power plants and so on. The use of an omni-directional camera that can take images of 360 ° in surroundings at a time is effective for the pipe inspection. However, shape measurement is difficult only with the omni-directional camera. Therefore, in this paper, we propose a reconstruction method of piping shape by using an omni-directional camera and an omni-directional laser with a light section method and a structure from motion. 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 Camera, Omni-Directional Laser, Pipe Inspection

1. 序 論

本研究では、全方位レーザと全方位カメラからなるレンジファインダを用いた配管の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。更に、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⁾。

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。

一方で広範囲な視野を有する撮像センサとして、全方位カメラや魚眼カメラといった全方位視覚センサが考案されている。これらのセンサは、自律移動ロボットのナビゲーション⁽⁶⁾や遠隔地の様子を臨場感豊かに伝達する技術であるテレプレゼンス⁽⁷⁾など様々な場面での活躍が期待されている。

特に全方位カメラは、その広範囲な視野を有するという特徴が周囲環境の計測や認識に有効であることが示されている⁽⁸⁾。

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⁽⁹⁾がある。全方位視覚センサを検査ロボットに搭載することにより、配管内の映像記録を効率的に行うことが可能となる。

ここで、文献⁽⁹⁾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、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

*原稿受付 2009年10月23日

*1 学生員，静岡大学 (〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

*2 正員，静岡大学

E-mail: f0930058@ipc.shizuoka.ac.jp

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。

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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾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⁾⁽¹³⁾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⁽¹⁴⁾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⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

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を併用した配管の形状復元手法を提案した⁽¹⁸⁾。文献⁽¹⁸⁾における課題として、形状計測は実現しているものの、テクスチャ情報を取り扱っていないことが挙げられる。実際の配管検査では、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、テクスチャ付の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。

以上を踏まえて、本研究では、レーザと全方位カメラからなるレンジファインダを用い、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。

2. 処理の概要

本研究では、カメラに双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラと、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光源からなるレンジファインダ(図1)を検査ロボットに搭載したものを使用する。

処理手順を図2に示す。まず、レンジファインダ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。得ら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。

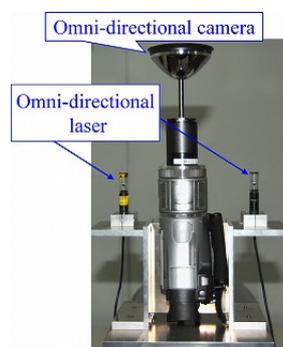


Fig. 1 Measurement device

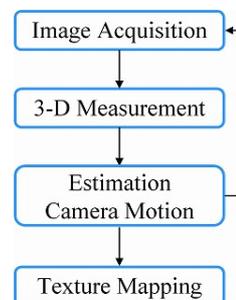


Fig. 2 Process

3. 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。

3-1 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。

まず、取得した全方位画像の中心から放射状の走査を行い、レーザ光領域を検出する(図3)。そして、検出されたレーザ光領域において、走査方向の画像座標変化に対する輝度値の分布を図4に示すガウス分布に近似する。

その後、領域内において、図4中のガウス曲線上に点で示した、ピクセル単位のピーク輝度座標 i と、その前後の画像座標の計3つに対応する輝度値を選択す

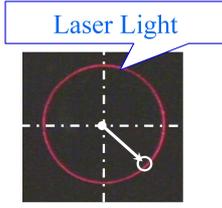


Fig. 3 Radial scanning

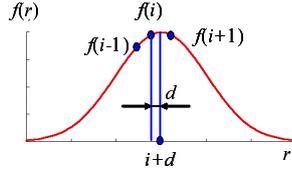


Fig. 4 Gaussian distribution

る．これを元に， $f(r)$ を画像座標 r に対応する輝度値として，以下の式より，補正值 d を算出する．

$$d = \frac{1}{2} \frac{\ln(f(i-1)) - \ln(f(i+1))}{\ln(f(i-1)) - 2\ln(f(i)) + \ln(f(i+1))} \quad (1)$$

こうして得られた $(i+d)$ をサブピクセル単位のレーザ光画像座標として抽出する．

3.2 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，(2)，(3)式により表される．

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

$$s = \frac{a^2(f\sqrt{a^2+b^2} + b\sqrt{u^2+v^2+f^2})}{a^2f^2 - b^2(u^2+v^2)} \quad (3)$$

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方を次式で定義する．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．

$$k_1x + k_2y + k_3z + k_4 = 0 \quad (4)$$

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．

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \frac{-k_4}{k_1su + k_2sv + k_3(sf - 2c)} \begin{pmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{pmatrix} \quad (5)$$

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，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．

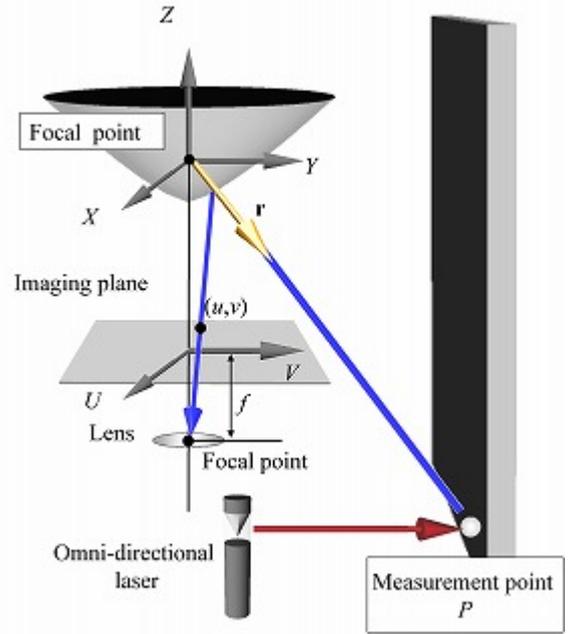


Fig. 5 Calculation of 3-D coordinates

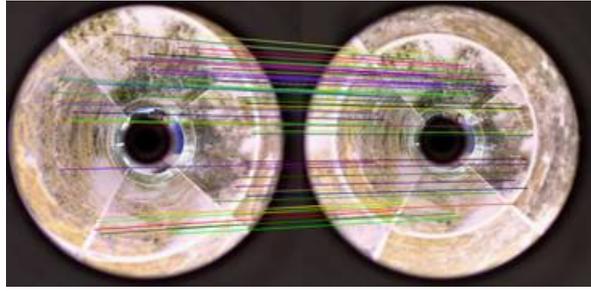
4. カメラ間の位置・姿勢推定

カメラ間の位置・姿勢推定には，文献⁽²⁰⁾に基づくSFMを用いる．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．

4.1 特徴点抽出・対応付け 特徴点抽出・対応付けには画像の回転・スケール変化・照明変化などにロバストな特徴を抽出することが可能なSIFT⁽²¹⁾と呼ばれる手法を用いる．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6）．

ここで，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⁽²²⁾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．

4.2 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 \mathbf{R} と並進移動ベクトル \mathbf{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 \mathbf{E} を，対応点の光線ベクトル $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ， $\mathbf{r}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$ から求める． \mathbf{E} は式(6)で表され，式(6)を変形すると



(a) Image acquired before robot movement (b) Image acquired after robot movement

Fig. 6 Corresponding point acquisition

式(7)が得られる。

$$\mathbf{r}'_i^T \mathbf{E} \mathbf{r}_i = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_i^T \mathbf{e}_i = 0 \quad (7)$$

ただし、

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

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

(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に対応する連立方程式、すなわち式(8)を解いて求める。

$$\min_e \|\mathbf{Ue}\|^2 \quad (8)$$

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(9)で表される。

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (9)$$

ただし、

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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。

4.3 位置・姿勢再推定 4.2 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⁽²³⁾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。

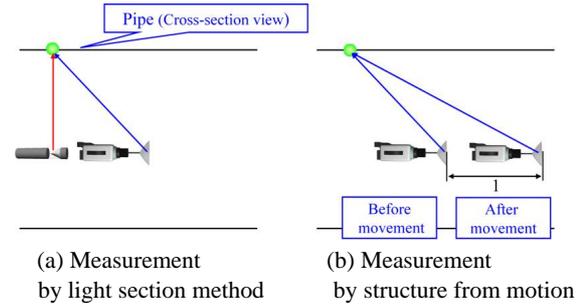


Fig. 7 Scale matching

4.4 スケール合わせ 前述したように、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、3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7(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、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。正規化相互相関テンプレートマッチングによって、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7(b))。

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(11)よりスケール l を算出する。

$$\min \sum_{k=1}^m \|\log \mathbf{p}_k - \log l \mathbf{p}'_k\| \quad (11)$$

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。

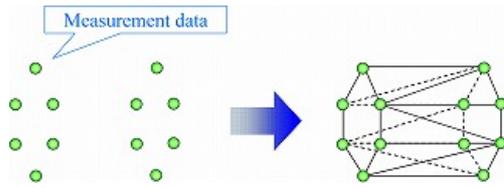


Fig. 8 Delaunay triangulation

5. テクスチャマッピング

位置・姿勢推定結果に基づいて統合された3次元計測結果に対して、テクスチャマッピングを行う。

5.1 三角網の生成 テクスチャを貼り付ける前処理として、各計測点を結ぶことで、三角錐群（三角網）を生成する（図8）。一般的に、離れた位置に存在する計測点同士を線で結ぶと、三角錐が細長くなり、精度良く環境を表すことができない。そこで、細長い三角錐を排除し、近い点同士を結んだ三角錐を生成するため、3次元のドロネー分割法を用いる。

しかし、得られた三角錐の表面は、窪みなどの凹形状を表現していない。そのため、カメラによって観測された計測点が三角錐の内部に埋没し、表面に現れない可能性がある。そこで、観測点と可視点を結ぶ線分の間には物体が存在しないことを利用し、観測点と可視点を結ぶ線分が三角錐と交差する場合、線分が交差した面を削除する。

ここで、ドロネー分割を用い、単純に計測点を繋ぎ合わせた場合、生成された三角網の形状が実際の環境と矛盾する場合がある。これは、三角網を構成する線分が実際の環境に反する形で結ばれてしまうためである。この問題は計測精度の良し悪しに関わらず発生する。そのため、生成された三角網と実際の環境を比べた際に三角網と実際に環境において、計測点の位置関係が正しいにも関わらず視覚的な整合性が取れないという問題が発生する。

このような問題を解決するためには、実際の環境に矛盾しない三角網を生成する必要がある。そこで本手法では、矛盾を検出するテンプレートを導入して、三角網を実際の環境と適合するように最適化する手法⁽²⁴⁾を適用する。

5.2 テクスチャの貼り付け 生成された三角網に対して、テクスチャを貼り付ける。ここで、詳細な色情報をモデルに与えるためには、より解像度の高い画像をテクスチャとして選択することが望ましい。そこで、各観測点で撮影した画像の中でテクスチャの解像度が最大となる画像を選び、これを三角網の各面に貼り付ける。

以上の処理で、テクスチャ情報を有する3次元配管

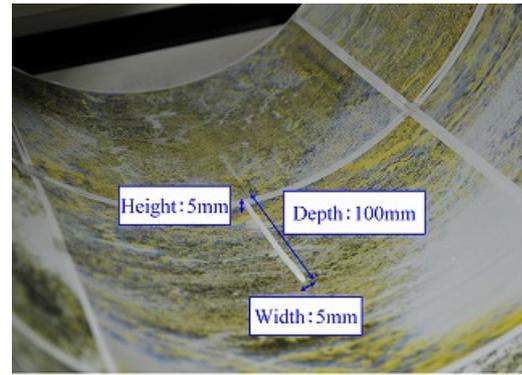


Fig. 9 Convex part

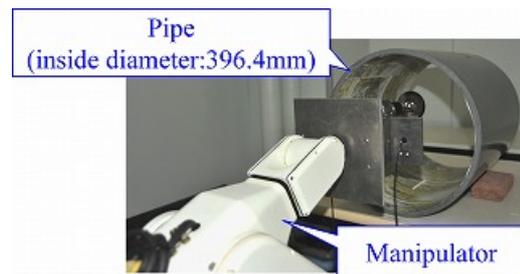


Fig. 10 Experimental environment

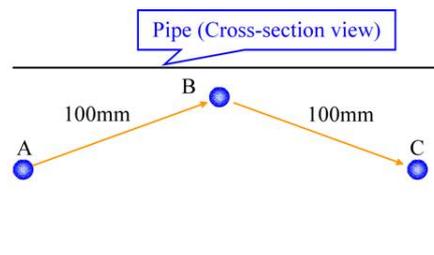


Fig. 11 Movement locus of manipulator

モデルが生成できる

6. 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、形状復元の精度評価を行った。また、マニピュレータを用い、その移動情報をカメラ運動の真値として、提案手法によるカメラ運動の計測値と比較することで、位置・姿勢推定結果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9に示す凸部（高さ5mm、幅5mm、奥行き100mm）を設け、図10に示す環境で実験を行った。更に、カメラの進行方向が、円筒の中心軸からずれた場合を想定して、マニピュレータを図11に示すように、A点からC点まで移動させながら、円筒の複数断面を計測した。

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。形状復元には実際の配管内の状態に近

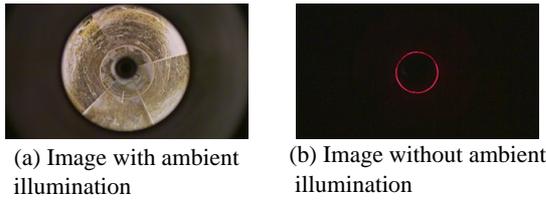


Fig. 12 Acquired image

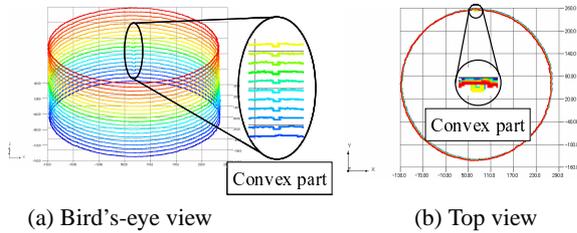


Fig. 13 Reconstruction of pipe shape with the proposed method

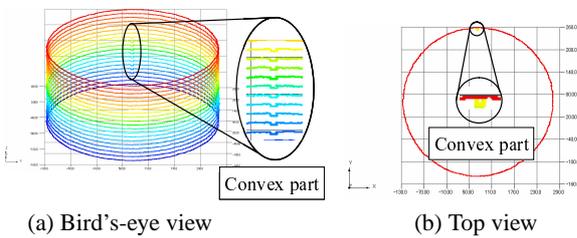


Fig. 14 Reconstruction of pipe shape with movement information of manipulator

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 1920×1080 pixels である。

取得画像を図 12 に示す。提案手法による復元結果及びマニピュレータの移動情報を用いた復元結果を図 13 と図 14 に、精度評価の結果を表 1、表 2 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 9 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。表 2 は、マニピュレータの移動情報をカメラ運動の真値とし、提案手法により算出したカメラ移動量との比較を行ったものを表す。

図 13 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。図 14 より、マニピュレータの移動情報を用いない提案手法による復元結果が、移動情報を用いた場合と比較して、遜色の無いものであることが確認できる。

表 1 から、円筒内径 396.4mm に対し、計測結果は 394.6mm と、誤差は 1.8mm 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は、高さ、幅、奥行きそれぞれについて順に 3mm 、 2mm 、 3mm となり、理論値に近い精度

Table 1 Accuracy evaluation of 3-D measurement

	計測値	真値
円筒内径	394.6mm	396.4mm
凸部(高さ)	8mm	5mm
凸部(幅)	7mm	5mm
凸部(奥行き)	103mm	100mm

Table 2 Accuracy evaluation of estimated camera motion

	計測値	真値
A-B 間	102mm	100mm
B-C 間	97mm	100mm



Fig. 15 Actual Image

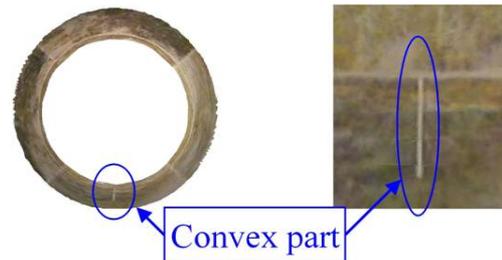


Fig. 16 Result of texture mapping with our proposed method

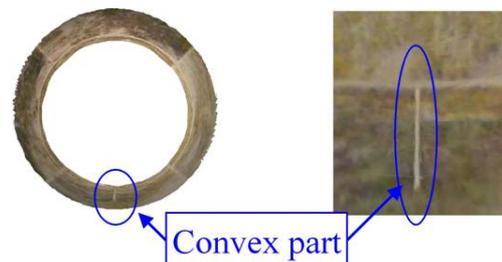


Fig. 17 Result of texture mapping with movement information of manipulator

での計測が行えている。尚、理論値の算出にあたっては、文献⁽¹¹⁾を参考にした。

表 2 から、マニピュレータの移動量に関して、A-B 間、B-C 間の計測誤差は真値に対してそれぞれ 2mm 、 3mm となり、精度の良い計測が行えていることが確

認できる。

テクスチャマッピングを施した結果を、図 15、図 16 及び図 17 に示す。図 15 は通常のカメラで円筒を撮影した結果、図 16、図 17 はそれぞれ提案手法及びミニピュレータの移動情報を用いた計測結果に対する結果である。

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。

7. 結 論

本論文では、全方位レーザと全方位カメラからなるレンジファインダを用いた配管内部の計測手法を提案した。

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、テクスチャ情報を用いて欠陥検出を行うことが考えられる。また、提案したレンジファインダへ照明機能を付与することや、配管検査ロボットへ搭載して計測を行うことが挙げられる。

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”, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会'01 予稿集, IPI-M9, pp.1-2, 2001.
- (4) M.Horodincă, 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. Gaspar, N. Winters and J. S. Victor: “Vision-Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.16, No.6, pp.890-898, 2000.
- (7) Y. Yagi: “Omnidirectional Sensing and Its Applications”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E82-D, No.3, pp.568-579, 1999.
- (8) J. Gluckman and S. K. Nayar: “Ego-motion and Omnidirectional Cameras”, Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, pp.999-1005, 1998.
- (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) 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.
- (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) S. Yi, B. Choi, and N. Ahuja: “Real-time Omnidirectional Distance Measurement with Active Panoramic Vision”, International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.5, No.2, pp.184-191, 2007.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 松井建樹, 山下淳, 金子透: “全方位レーザと全方位カメラからなるレンジファインダを用いた配管の 3 次元形状復元”, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2009AC111-01, pp.1-4, 2009.
- (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) R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: “Construction of 3D Environment Model from an Omnidirectional Image Sequence”, Proceedings of the 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, TP1-3(2), pp.1-6, 2008.
- (21) D. G. Lowe: “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, International Journal of Computer Vision, Vol.60, No.2, pp.91-110, 2004.
- (22) 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.
- (23) B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: “Bundle Adjustment -A Modern Synthesis”, Vision Algorithms: Theory & Practice, Springer-Verlag LNCS 1883, 2000.
- (24) A. Nakatsuji, Y. Sugaya, and K. Kanatani: “Optimizing a Triangular Mesh for Shape Reconstruction from Images”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E88-D, No. 10, pp. 2269-2276, 2005.