# 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

非会員 松井 建樹\* 正員山下 淳\*\* 非会員 金子 透\*\*

Self-Localization and 3-D Model Construction of Pipe by Rangefnder Constructed with Omni-Directional Laser and Omni-Directional Camera Kenki Matsui<sup>\*</sup>, Non-member, Atsushi Yamashita<sup>\*\*</sup>, Member, Toru Kaneko<sup>\*\*</sup>, Non-member

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. The individual measurement data is integrated with the information of camera motion estimated by the structure from motion technique. We construct a triangular mesh by using 3-D Delaunay triangulation. By texture-mapping, a 3-D Pipe model is generated. The validity of the proposed method is shown through experiments.

キーワード:全方位カメラ,全方位レーザ,配管検査 Keywords: 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.これら配管は経年劣化と 共に老朽化が進み,割れや腐食,減肉といった損傷が発生 する.これらの損傷をそのまま放置した場合,火災や爆発 などの大規模な事故に繋がる可能性がある.そのため,こ のような配管の損傷を早期に発見し,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.

しかし,配管設備は地中に埋設されていたり,逆に高所 に存在したり,内部が放射能などによって汚染されていた りと敷設状況は様々であり,人間が直接点検・検査するこ とが困難である場合も多い.そこで,このような作業の口

 \* 静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻 〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1
 Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University 3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatu-shi, Shizuoka, 432-8561
 \*\* 静岡大学工学部機械工学科

〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

ボットによる自動化が望まれ,様々な環境や作業目的に応 じた配管検査ロボットが開発されてきた.

文献<sup>(1)</sup>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<sup>(2)</sup>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<sup>(3)</sup>は検査及び溶接を行 うロボットを,文献<sup>(4)</sup>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<sup>(5)</sup>.

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.これにはロ ボットが映像を記録する箇所において,その都度一旦停止 しなければならないため,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,双曲面 ミラーや放物面ミラーなどの曲面ミラーを利用した全方位 カメラや魚眼レンズを用いた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<sup>(1)</sup> 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<sup>(1)</sup> など様々な場面で の活躍が期待されている.

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

<sup>3-5-1,</sup> Johoku, Naka-ku, Hamamatu-shi, Shizuoka, 432-8561

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<sup>(8)</sup>.

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<sup>(\*)</sup> がある.周囲 360 °が一度に撮影可能で 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,カメラの回転が不要となり,配管内の映像記録が容易 になって,計測システムの効率化が期待できる.

ここで,文献<sup>(9)</sup> 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, 異なる画像間から環境中の同一点を対応点として選ぶ必要 があるため,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同じ三角測量の原理を用いていて も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<sup>(10)</sup>を含む幅 広い分野で利用されている.

ここで, 文献<sup>(10)</sup> 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合わせし,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<sup>(11)(12)(13)(14)</sup>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<sup>(11)(12)(13)</sup>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<sup>(14)</sup>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<sup>(15)(16)(17)</sup>

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.しかし,従来研究では形状計測は実現されて いても,テクスチャ情報まで取り扱っているものは少ない.

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(図1)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(図2)からなるレンジファインダを検査ロボッ トに搭載し,これを用いて計測を行う.尚,レンジファイ ンダを構成する全方位カメラとレーザ光源の位置関係は常 に固定された状態とする.

処理手順を図3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.

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





Fig. 1. Omni-directional camera

Fig. 2. Omni-directional laser



Fig. 3. Procedure



Fig. 4. Radial scanning Fig. 5. Gaussian distribution

# 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<sup>(18)</sup>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4).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5に示すガウス分布に近似する.

その後,領域内において,図5中のガウス曲線上に青点 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,補正値 d を算出する。

$$d = \frac{1}{2} \frac{\ln(f(i-1)) - \ln(f(i+1))}{\ln(f(i-1)) - 2\ln(f(i)) + \ln(f(i+1))}$$
(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,これを抽出する.

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,式(2),式(3)により表される.

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

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

次に, [x, y, z] のパラメータで表される 3 次元空間への レーザ光の広がりを次式で定義する.尚, k1, k2, k3, k4の パラメータについては計測に先立って較正しておく.

$$k_1 x + k_2 y + k_3 z + k_4 = 0 \tag{4}$$

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



Fig. 6. Calculation of 3-D coordinates



Fig. 7. Procedure

の 3 次元座標 
$$[x_p, y_p, z_p]$$
 は次式で与えられる

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

#### 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<sup>(19)</sup>に基づく SFM を用いる.処理手順を図7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.

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 (Scale Invarioant Feature Transform )<sup>(20)</sup> 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



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

Fig. 8. Corresponding point acquisition

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8).

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(RANdom SAmple Consensus)<sup>(21)</sup> 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 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  $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ,  $\mathbf{r}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$ (図9)から求める. E は式(6)で表され,式(6)を変形すると式(7)が得られる.

$$\mathbf{r}'_{i}^{T}\mathbf{E}\mathbf{r}_{i}=0$$
(6)

$$\mathbf{u}_i^T \mathbf{e}_i = 0 \tag{7}$$

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に対応する連立 方程式, すなわち式(8)を解いて求める.

$$\min \|\mathbf{U}\mathbf{e}\|^2 \tag{8}$$

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.

次に,基本行列 E から,カメラ間の相対的な位置・姿勢 を表す,回転行列 R と並進ベクトル t =  $[t_x, t_y, t_z]^T$  を算出 する.基本行列 E は回転行列 R と並進移動ベクトル t を用 いて式 (9) で表される.

$$\mathbf{E} = \mathbf{R}\mathbf{T} \tag{9}$$

ただし,



Fig. 9. Estimation of camera motion

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix}$$
(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 |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,|t|=1と なるように |E|を変更する.そして,変更した E に特異値 分解を行うことで,Rと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<sup>(22)</sup>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.

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 |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10(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,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,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 10(b)).尚,テンプレートマッチングにより対応づけを行う 際には,レーザによる計測に用いた画像座標におけるレー ザを照射していない状態での輝度値をテンプレートに記録 する.

次に,両計測結果の誤差を最小化することで,SFMによ

電学論 C, 130 巻 9 号, 2010 年



Fig. 10. Scale matching

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 / 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 化するスケールを選択すると,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,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/を算出する.

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

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.

 I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.

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,3次元のドロネー分割を用いて点群から凸形状 の三角網を生成する(図11).ただし,カメラ(観測点) から観測される計測点(可視点)は三角錐の内部に存在し, 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,ドロネー分割によって得られる三角錐群は計測 対象の形状を考慮していないため,物理的な辺に矛盾する 三角網が生成されることがある.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物理的な形状 に適合するように最適化する手法<sup>(23)</sup>を適用する.これに よって,実際の環境と矛盾しない三角網が生成できる.

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.



Fig. 11. Delaunay triangulation

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.

# 6. 実 験

本手法の有効性を確認するため,計測対象として精度評価の行いやすい平面形状を有する容器と配管を模した円筒の2種類を用意し,実験を行った.

2種類の実験共に入力画像のサイズは 1920 × 1080pixels である. 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.

6・1 精度評価実験1 3次元計測の精度評価を目的 として,全方位カメラとレーザ光源を治具に固定し(図12), 図13に示す環境で実験を行った.そして,計測対象である 容器内で,冶具を上昇させながらレーザ光を照射し,全方 位カメラによる撮影を行うことで,容器の複数断面を計測 した.また,計測後に標準偏差や角点間の距離及び法線の なす角度によって精度評価を行った.計測結果の統合には, 治具の移動情報を用いた.

取得画像及びその計測結果を図 14 及び図 15 に,精度評価の結果を表1,表2,表3 に示す.





Fig. 12. Measurement device 1

Fig. 13. Experimental environment 1



(a)Image with ambient illumination 2



(b)Image without ambient illumination 2

Fig. 14. Aquired image1



Fig. 15. Reconstruction of container

| Table 1 | 1. Sta | andard | devi | ations | from | the | least |
|---------|--------|--------|------|--------|------|-----|-------|
| square  | error  | plane  |      |        |      |     |       |

|               | Standard deviation |
|---------------|--------------------|
| Rear surface  | 1.08mm             |
| Front surface | 0.88mm             |
| Left surface  | 0.85mm             |
| Right surface | 0.69mm             |

Table 2.Angles between two least squareerror planes

|                         | Measurement value | Ground truth |
|-------------------------|-------------------|--------------|
| Between rear and left   | 90.4deg           | 90.0deg      |
| Between front and left  | 89.6deg           | 90.0deg      |
| Between rear and right  | 90.6deg           | 90.0deg      |
| Between front and right | 89.4deg           | 90.0deg      |

Table 3. Distances between corner points

|               | Measurement value | Ground truth |
|---------------|-------------------|--------------|
| Rear surface  | 282mm             | 285mm        |
| Front surface | 283mm             | 285mm        |
| Left surface  | 567mm             | 570mm        |
| Right surface | 568mm             | 570mm        |

表1は計測した容器の左側面と中央面(上部),中央面 (下部)及び右側面の最小2乗平面を求め,そこからの標 準偏差を求めたものである.表2はそれぞれの最小2乗平 面の法線のなす角度を用いて精度評価を行った結果を示し たものである.表3は計測を行ったそれぞれの面の全ての 断面における角点間の距離の平均値を求めたものである.

図 15 から,容器の複数断面形状が表現できていること が確認できる.

表1から,どの面についても標準偏差が1mm前後とな り,表2から,中央面(上部)と左側面・右側面とのなす角 度の誤差及び中央面(下部)と左側面・右側面とのなす角 度の誤差がそれぞれ順に0.4deg,0.4deg,0.6deg,0.6deg となった.以上から,提案手法が容器形状を精度良く復元で きていることが分かる.

また表3から,中央面(上部),中央面(下部),左側面,



Fig. 16. Projection



Fig. 17. Experimental environment



Fig. 18. Experimental trajectory of manipulator

右側面における角点間の距離の誤差がそれぞれ順に 3mm, 2mm, 3mm, 2mm と,本手法の理論誤差値 2mm に対し てどの面も誤差 3mm内となり,理論値に近い精度での計 測が確認された.

6・2 精度評価実験2 次に,より現実的な環境を想 定して,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 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.更に,カメラの進行方向が,配 管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18 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.

取得画像を図 19 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 20 と図 21





illumination

(a) Image with ambient illumination

# Fig. 19. Aquired image



Fig. 20. Reconstruction of pipe shape with the proposed method



Fig. 21. Reconstruction of pipe shape with movement information of manipulator



Fig. 22. Estimation of camera motion

Table 4. Accuracy evaluations of 3-D measurement

|                      | Measument value | Ground truth |
|----------------------|-----------------|--------------|
| Inside diameter      | 394.6mm         | 396.4mm      |
| Height of projection | 8mm             | 5mm          |
| Width of projection  | 7mm             | 5mm          |
| Depth of projection  | 103mm           | 100mm        |

に示す.カメラ位置・姿勢推定結果を図 22(a) に示す.マ ニピュレータの移動情報を元に出力した実際のカメラ運動 を図 22(b) に示す.精度評価の結果を表4,表5に示す.

表4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16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5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

Table 5. Accuracy evaluations of estimatied camera motion

|                    | Measument value | Ground truth |
|--------------------|-----------------|--------------|
| Between A and B    | 102mm           | 100mm        |
| Between B and C    | 103mm           | 100mm        |
| Standard deviation | 0.91mm          |              |



Fig. 23. Actual Image



(a) Frontal view (b) Inside view Fig. 24. Result of texture mapping with our proposed method



Fig. 25. Result of texture mapping with movement information of manipulator

# す.更に,提案手法によって算出したカメラ移動軌跡の標 準偏差を表5中に掲載する.

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.図21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.以上から,円筒内でカメ ラが任意に移動した場合においても,高精度な位置・姿勢 推定を行えていることが分かる.

表 4 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



Fig. 26. Reconstruction of pipe shape

しては,高さ,幅,奥行きのそれぞれについて順に3mm, 2mm,3mmとなり,理論値に近い精度での計測が行えている.

図 22(a),図 22(b)及び表 5 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23,図24及 び図25に示す.図23は通常のカメラで円筒を撮影した結 果,図24,図25はそれぞれ提案手法及びマニピュレータ 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.

6.3 計測実験 6.2 節における実験では,マニピュ レータの可動範囲による制限のため,円筒の一部分の計測 しか行えなかった.そこで,カメラが長距離を移動した場 合の計測を想定して,マニピュレータ先端にレンジファイ ンダを固定し,円筒を移動させることで,円筒全体の形状 計測を行った.ここで,実験時には,(1)照明点灯,(2)画 像撮影,(3)照明消灯,(4)画像撮影,(5)円筒移動の動作を 繰り返し行なったが,(1)から(4)の動作の間で円筒は固定 した.

計測対象となる円筒は,6.2 節と同様のもの(内径 396.4mm, 奥行き400mm)である.

実験結果を図 26 に示す.図 26 より,カメラが長距離を 移動した場合であっても,提案手法が精度良く配管形状を 復元ていることが確認できる.

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.

また,全方位画像特有の歪みやそれによる誤対応の影響 を考慮するために,SIFT 特徴量,RANSAC などを用い, より精度の高いスケール合わせ手法を構築する必要がある. 他にも,テクスチャマッピングに関して,ブレンディング 処理などを導入することで面ごとに貼り付ける画像が変わ る場合でも,見た目の不連続を生じさせない手法の構築な どが考えられる.

(平成 21 年 12 月 25 日受付,平成 22 年 04 月 12 日再受付)

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. 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 Omni-directional 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) 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.
- (19) R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko : "Construction of 3D Environment Model from an Omni-Directional Image Sequence", Proceedings of the 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, TP1-3(2), pp.1–6, 2008.
- (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.
- (23) 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.

松井建樹(非会員) 1986年生.2009年3月静岡大学工学



部機械工学科卒業.現在,同大大学院工学研究科 修士課程在学中,全方位カメラと全方位レーザを 用いた配管検査に関する研究に従事.



淳(正員)1996年3月東京大学工学部卒業,1998年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了,2001年3月同博士課程修了.2001年4月静岡大学工学部機械工学科助手,2006年11月~2007年12月カリフォルニア工科大学客員研究員,2008年4月静岡大学工学部機械工学科准教授,現在に至る.1996年日本機械学会畠山賞,2004年映像情報メディア学会研究奨励賞,2006年電気学会優

秀論文発表賞,日本ロボット学会研究奨励賞受賞,2010年第15回ロボティクスシンポジア最優秀論文賞など受賞.画像処理,コンピュータビジョン,ロボットの知能化などの研究に従事.博士(工学).

金子 透



透(非会員) 1974年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了.1974年4月日本電信電話公社(現NTT)入社.1997年4月静岡大学工学部機械工学科教授,現在に至る.画像処理,ロボットビジョンの研究に従事.工学博士.