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

松井建樹(静岡大学)山下 淳(静岡大学)金子 透(静岡大学)

3-D Shape Reconstruction of Pipe by Rangefinder Constructed with Omni-Directional Laser and Omni-Directional Camera

*Kenki MATSUI (Shizuoka University), Atsushi YAMASHITA (Shizuoka University), Toru KANEKO (Shizuoka University)

Abstract— A lot of plumbings exist in factories and so on. It is difficult for humans to inspect them directly. Therefore, automated inspection by robots is desirable. However, many of existing inspection robots have to rotate the camera because a conventional camera can see only one direction while a piping has a cylindrical geometry. The use of an omni-directional 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 an omni-directional camera and an omni-directional laser Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Omni-Directional Camera, Omni-Directional Laser, 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,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 ような作業のロ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[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 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存 在している[5].

しかし,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おり,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 [6].

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 [7] 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 [7] 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,投光器から計測対象に 向けて光を投影し,これをカメラで撮影するアクティ ブステレオ法がある.そして,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[8]を含む 幅広い分野で利用されている.

ここで,文献 [8] では,撮像センサとして広角レン 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り,周囲360。 の撮影を一度に行うことができるため,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.

我々は,全方位カメラを用いた光切断法による配管 の形状復元手法を提案した[9].文献[9]における課題 として,配管内でロボット及びカメラが移動した際の 移動情報(位置・姿勢の変化)が不明である点が挙げ られる.そのため,ロボットに移動情報を与え,これ を利用することで,移動毎に得られる計測結果の統合 を行っていた.しかし,提案したレンジファインダを 配管検査ロボットに搭載する際にはロボットの移動情 報が常に既知であるとは限らず,ロボット自身が搭載 したカメラの位置・姿勢推定を行う必要がある.

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 査に限らず周囲環境認識に利用されている[10].

そこで,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 た計測手法を提案する.SFMにより得られるカメラの 位置・姿勢推定結果を用いて光切断法によって得られ る移動毎の3次元計測結果を統合することで,配管の 3次元形状を復元することを目的とする.

2. 処理の概要

実験装置は,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たものを使用する.

本研究の処理手順を述べる.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.

以上の処理を繰り返すことにより,配管の3次元形 状を復元する.



Fig.1 全方位カメラ

Fig.2 全方位レーザ

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,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[11]を用いる.

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3).



Fig.33次元座標算出

全方位画像の中心を原点とする画像座標を $[u, v]^T$ と すると, 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) 式により 表される.

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

$$s = \frac{a^2(f\sqrt{a^2+b^2}+b\sqrt{u^2+v^2+f^2})}{a^2f^2-b^2(u^2+v^2)}$$
(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, k₁, k₂, k₃, k₄のパラメータについては計測に先立って校正しておく.

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[12]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[13] 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4).



(a) 取得画像(移動前)(b) 取得画像(移動後)Fig.4 対応点取得

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[14]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 $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, $\mathbf{r}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$ 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_{ab}*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(6)を解いて求める.

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

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.

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 [15] 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 5(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,対応点取得には正規化相互相関テンプレートマッ チングを用いる.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5(b)).



(a) 光切断法による計測 (b)SFM による計測
 Fig.5 スケール合わせ

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 影響を大きく受けてしまう.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(7)よりスケール l を算出する.

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

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.

5. 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,位置・姿勢推定の精度評価を行った.

図6に示すように、マニピュレータ先端に全方位カ メラとレーザ光源を設置して、図7に示す環境で実験 を行った.配管内でマニピュレータを移動させながら 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,配管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8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9 と図10に,精度評価の結果を表1に示す. 表1は,配管内径と,計測結果から算出した最小2 乗円の直径との比較及び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である.

図 9 と図 10 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,配管内径396.4mmに対し,最小2乗円の 直径は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.ま た,マニピュレータの移動量に関しては,真値200mm に対して,計測結果は196mmと,誤差は4mmとなり, 精度の良い計測が行えていることが確認できる.



Table 1 精度評価

	計測値	真値
配管内径	$394.6\mathrm{mm}$	$396.4\mathrm{mm}$
移動量	$196 \mathrm{mm}$	200mm

6. 結論

本論文では,全方位レーザと全方位カメラを用い,光 切断法とSFMを併用した配管形状の復元手法を提案した.提案手法により配管の形状復元を行い,復元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,提案したレンジファインダを配 管検査ロボットへ搭載して計測を行うことや,テクス チャマッピングを行うことで,配管内の状態認識に有 効となるテクスチャ情報を生成した配管の3次元モデ ルへ付与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.
- 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. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, pp.999-1005, 1998.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 松井建樹,山下淳,金子透:"全方位レーザと全方位カメラ を用いた配管の3次元形状復元",日本機械学会ロボティ クス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集,1A1-E08, pp.1-4,2009.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] D. G. Lowe: "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", International Journal of Computer Vision, Vol.60, No.2, pp.91–110, 2004.
 [14] M. A. Fischler and R. C. Bolles: "Random Sample
- [14] 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.
- [15] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: "Bundle Adjustment -A Modern Synthesis", Vision Algorithms: Theory & Practice, Springer-Verlag LNCS 1883, 2000.