

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

3-D Shape Reconstruction of Pipe with Omnidirectional Laser and Omnidirectional Camera

○ 松井 建樹（静岡大） 正 山下 淳（静岡大） 金子 透（静岡大）

Kenki MATSUI, Shizuoka University,
Atsushi YAMASHITA, Shizuoka University, tayamas@ipc.shizuoka.ac.jp
Toru KANEKO, Shizuoka University, tmtkane@ipc.shizuoka.ac.jp

A lot of plumbings such as gas pipes and water pipes exist in factories and so on. However, it is difficult for humans to inspect them directly because they are laid underground. Therefore, automated inspection by robots is desirable, and many efforts have been done to solve this problem. However, many of existing inspection robots have to rotate the camera to record images in piping because a conventional camera with narrow view can see only one direction while piping has a cylindrical geometry. The use of an omnidirectional camera that can take images of 360° in surroundings at a time is effective for the solution of such problem. However, the shape measurement is difficult only with the omnidirectional camera. Then, in this paper, we propose a reconstruction method of piping shape by using an omnidirectional camera and an omnidirectional laser.

Key Words: Omnidirectional Camera, Omnidirectional 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、現代にとっ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。こういった損傷をそのまま放置した場合、火災や爆発といった大規模な事故に繋がってしまう可能性がある。

そのため、このような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]では、150mm以上の大口径用の車輪型管内検査ロボットが提案されている。また、1インチ程度の小口径配管を対象にした管内検査ロボットとしては、管内の目視検査と同時に、異物の回収が可能なロボットが開発されている[2]。更に、ロボット本体の外側に搭載した上下2対のクローラにより移動する検査及び溶接ロボット[3]や、蛇や蚯蚓のように、多様な動作が実現可能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[4]が考案されている。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や、埋設管を内部から拡大して、管壁の垂れ込みを復元する機能、溶接部の内面研磨、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が考案されており、その用途として、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]。

全方位カメラを配管検査に利用した手法として文献[9]がある。周囲360°が一度に撮影可能である全方位カメラ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[9]ではモーションステレオと呼ばれる手法により計測を行っている。しかし、モーションステレオによる計測における問題として、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り、この対応点が正確に抽出できなかった場合、計測精度の悪化を招くことが挙げられる。

他方で、モーションステレオ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が、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であり、その中でも代表的な手法として、光切断法（スリット光投影法）と呼ばれる手法が存在する。

この手法の利点として、計測に用いる画像が1枚で済むためモーションステレオのように画像間の対応をとる必要がないこと、そのため同じ三角測量の原理を用いていてもモーションステレオに比べ計測精度が良いことが挙げられ、溶接部品の欠陥検査[10]や水中計測[11]など、幅広い分野で利用されており、配管検査においても応用されている[12]。

ここで、文献[12]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、前述した全方位カメラ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。

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て光切断法を応用した配管形状の復元手法を提案する。

2. 処理の概要

実験装置としては、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、リング状のレーザ照射が可能な光源 (図 1) とカメラに双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラ (図 2) 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図 3 に示す。まず、検査ロボットを配管内で移動させながら、光源から全方位にリングレーザを照射して、全方位カメラによる撮影を行う。

その後、取得した動画像を用いて、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三角測量の原理より 3 次元座標を算出する。

以上の処理を繰り返すことにより得られた 3 次元座標点群を元に配管形状を復元する。



Fig.1 Omnidirectional camera

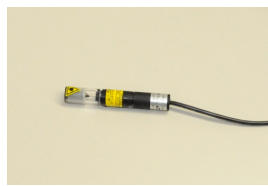


Fig.2 Omnidirectional laser

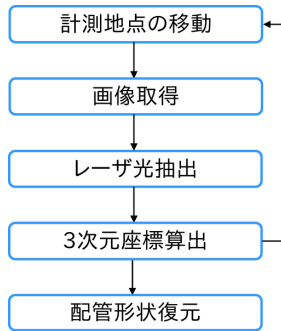


Fig.3 Process

3. 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 [13] を用いる。

まず、取得した全方位画像の中心から放射状に走査し、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、半径方向の画像座標変化に対する輝度値の分布を図 5 に示すようなガウス分布に近似する。

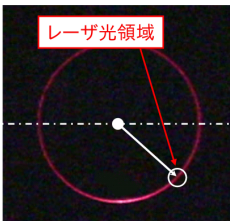


Fig.4 Radial scanning

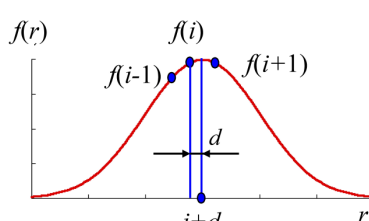


Fig.5 Gaussian distribution

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、 i に対する補正值 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、これを抽出する。

4. 3次元座標算出

まず、全方位カメラの光線ベクトルの算出について述べる。

カメラから 3 次元空間上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、この光線ベクトル $\mathbf{r}$ は、双曲面ミラー側の焦点から、計測点の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 6)。

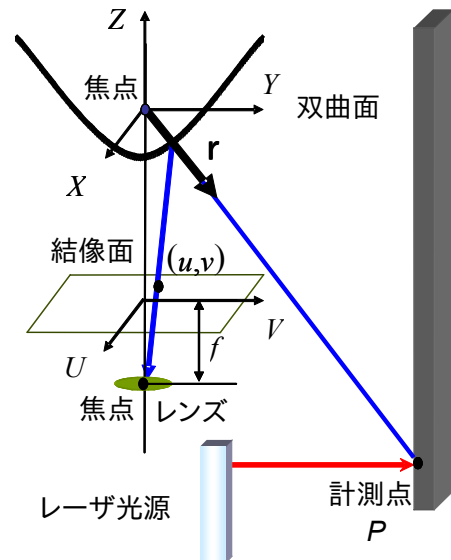


Fig.6 Calculation of 3-D coordinates

全方位カメラにより得られる全方位画像はドーナツ形状であり、ドーナツ形状の中心にカメラ自身が写っている。このドーナツ形状の中心を全方位画像の中心とし、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 から λ を媒介変数として、(2), (3), (4) 式により表される。

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

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

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4)$$

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予め校正しておく。

$$k_1x + k_2y + k_3z + k_4 = 0 \quad (5)$$

以上の(2), (3), (4), (5)式を連立することにより, 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.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \frac{-k_4}{k_1su + k_2sv + k_3(sf - 2c)} \begin{bmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{bmatrix} \quad (6)$$

5. 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.

尚, より配管内部に近い環境を想定して, 処理には室内の照明を消した状態で撮影した画像を用いた.

5.1 精度評価実験

実験は図 7 に示す環境で行った. まず, 全方位カメラとレーザ光源を治具に固定する (図 8) .

そして, 計測対象である容器内に設置して, 治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.

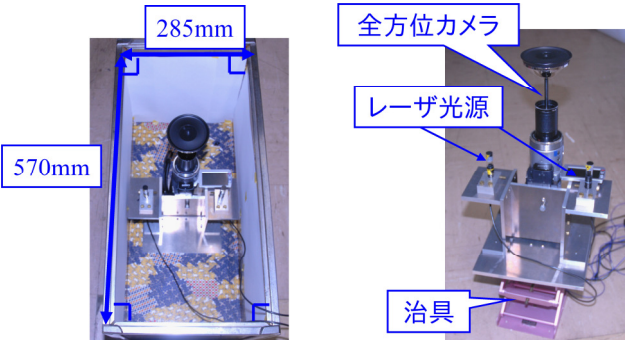


Fig.7 Experimental environment 1 Fig.8 Measurement device 1

取得画像及びその計測結果を図 9, 図 10 及び図 11 に, 精度評価の結果を表 1, 表 2, 表 3 に示す.

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, 表 2 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. また, 表 3 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.

図 11 から, 容器の複数断面形状が復元され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. また表 3 から, 中央面 (上部), 中央面 (下部), 左側面, 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.

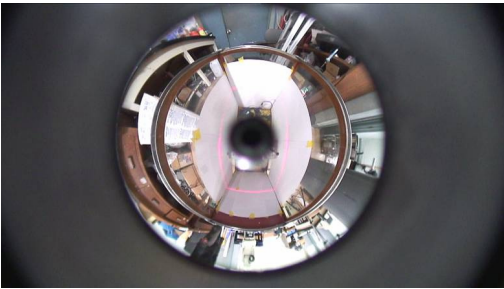


Fig.9 Image with ambient illumination 1

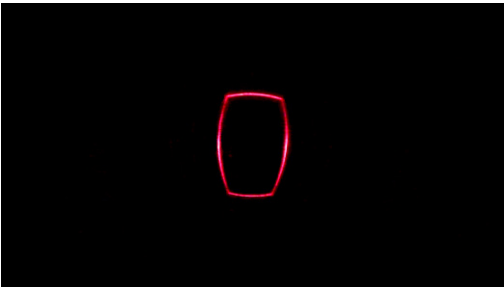


Fig.10 Image without ambient illumination 1

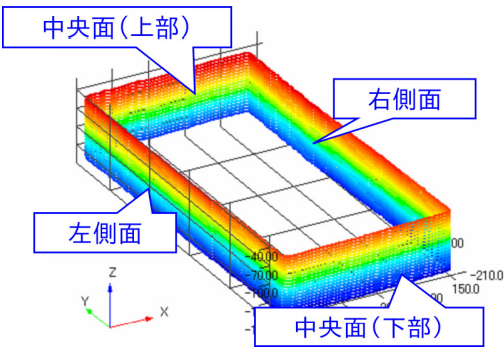


Fig.11 Measurement data 1

Table 1 Standard deviation from the least square error plane

	標準偏差
中央面 (上部)	1.08mm
中央面 (下部)	0.88mm
左側面	0.85mm
右側面	0.69mm

Table 2 Angle between two least square planes

	法線のなす角度	真値
中央面 (上部)・左側面	90.4deg	90.0deg
中央面 (下部)・左側面	89.6deg	90.0deg
中央面 (上部)・右側面	90.6deg	90.0deg
中央面 (下部)・右側面	89.4deg	90.0deg

Table 3 Distance between corner points

	角点間の距離	真値
中央面 (上部)	282mm	285mm
中央面 (下部)	283mm	285mm
左側面	567mm	570mm
右側面	568mm	570mm

5.2 計測実験

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用意し、図 12 に示す環境において実験を行った。

予め、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（図 13）、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。

また、計測後に配管内径によって精度評価を行った。

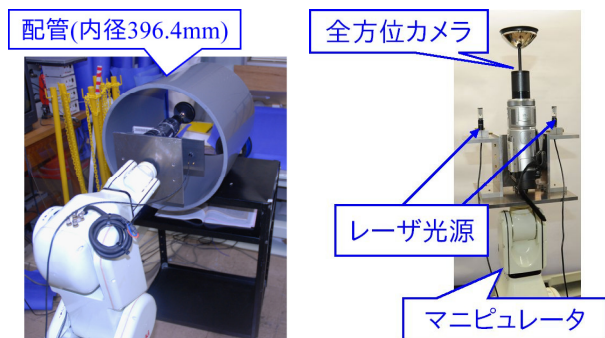


Fig.12 Experimental environment 2 Fig.13 Measurement device 2

取得画像及び実験結果を図 14、図 15 及び図 16 に、精度評価の結果を表 4 に示す。

表 4 は、計測結果から最小 2 乗円を算出し、その直径と配管内径との比較による精度評価を行ったものである。

図 16 より、配管の複数断面形状が復元されていることが確認できる。

表 4 から、配管内径 396.4mm に対し、最小 2 乗円の直径は 394.8mm と、計測結果の誤差は 1.6mm 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。

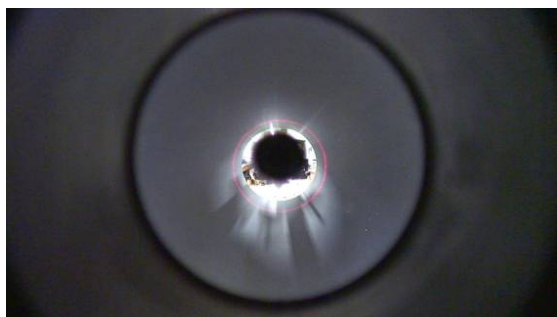


Fig.14 Image with ambient illumination 2

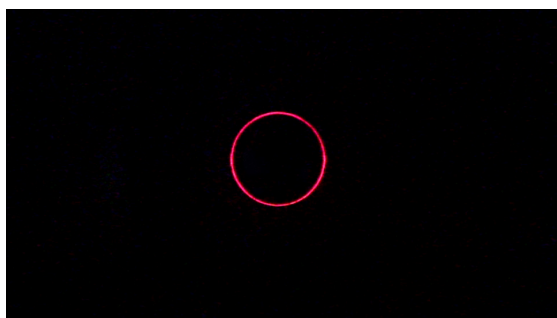


Fig.15 Image without ambient illumination 2

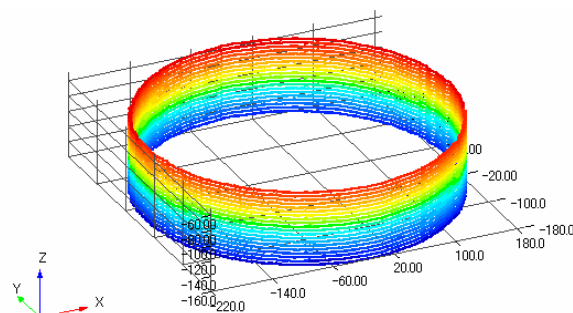


Fig.16 Measurement data 2

Table 4 Inside diameter

	計測結果	真値
配管内径	394.8mm	396.4mm

6. 結論

レーザと全方位カメラを併用した配管形状の復元手法を構築した。また、提案手法により容器と配管の両計測対象の形状復元を行い、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の配管検査ロボットへの搭載において、計測結果の統合に必要なとなるロボットの自己位置推定手法の構築や内部に割れなどの損傷を有する配管を対象にした計測が挙げられる。

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", ロボティクス・メカトロニクス講演会 '02 予稿集, IPI-M9, pp.1-2, 2002.
- [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一壁面ロボット, 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] N. Winters J. Gaspar 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] Yasushi 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] A.Basu and D.Southwell, "Omni-directional Sensors for Pipe Inspection," Proceedings of the 1995 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol.4, pp.3107-3112, 1995.
- [10] 菅泰雄, 川手隆義, 渡辺賢, "溶接ビードの自動外観検査システムの開発", 第 9 回外観検査の自動化ワークショップ論文集, Vol.12, pp.55-60, 1997.
- [11] 山下淳, 樋口裕和, 金子透, "光切断法による水中物体の 3 次元計測", 精密工学会誌, Vol.73, No.2, pp.265-269, 2007.
- [12] 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.
- [13] R.B.Fisher and D.K.Naidu, "A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection," Proceedings of the 1991 British Machine Vision Association Conference, Vol.19-4, pp.217-225, 1991.