

(66) パイプライン管内形状の 連続的な三次元画像計測手法

井上 裕貴¹・安室 喜弘²・檀 寛成³・小林 晃²

¹学生 関西大学理工学研究科環境都市工学専攻都市システム工学分野

²正会員 ³非会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail:{k004627, yasumuro}@kansai-u.ac.jp

高度経済成長期に作られた社会インフラの老朽化が深刻な問題となっている。全ての異常箇所を発見し補修を行うのは困難であるため、優先順位をつけて維持管理することが求められる。本研究ではその中でもパイプラインに着目し、RGB-Dカメラを用いた調査方法を提案する。RGB-Dカメラはカラー画像だけではなく、3次元形状情報を取得できる。本研究では、複数の光マーカとRGB-Dカメラを併用することにより、従来では連続的な定量的データとして取得することが難しかった断面形状やたわみ量の分布を取得する手法を提案する。円筒型の模型を用いて実験を行い、600mmφのパイプに対して実時間計測で5%のたわみ検出能を満たしながら連続的に色情報と形状情報を計測し記録できることを確認した。

Key Words : pipeline investigation, depth image, RGB-D camera, distortion distribution

1. はじめに

現在我が国では、高度経済成長期に作られた社会インフラの老朽化が深刻な問題となっており、今後の維持管理のあり方についての関心が高まっている。昨今の財政状況下では、すべての箇所の補修や補強、交換を実施することは困難である。そこで、費用対効果を上げつつリスクを避けられるように優先順位をつけて維持管理していくことが求められている¹⁾。

本研究では、社会インフラの中でも、水や天然ガスなどの輸送に使われているパイプラインについて着目する。パイプラインの多くは地中に埋設されているため、メンテナンスにおける管内の形状調査、劣化度の診断が難し

いとされている²⁾。そのため、2011年8月に和歌山県海南市日方（城山トンネル内）で起こった水道管破裂事故によって近隣の約6500戸が断水するという事態（図-1参照）のように、パイプラインの老朽化が原因となっている事故が毎年発生している。このような事故を未然に防ぐためには計画的にパイプライン管内の調査・診断を行い、事前に問題箇所を把握する必要がある。本研究では、パイプライン管内の調査・診断において、深刻な老朽化を発見するうえでの効率化と調査記録の蓄積を容易にするためのシステム技術としての指針を提案する。

2. パイプライン管内の調査方法

(1) 従来の調査方法

パイプラインの適切な構造機能を維持するために、管内の状態を正確に把握することが重要である。現在の調査方法は、地表面を掘削して行う間接的定量調査と管内から調査を行う直接的定量調査がある³⁾。そのうち、管内の状態を直接診断する直接的定量調査方法としてデプスゲージによる入管調査や管内目視による調査、自走式ロボットを用いたビデオカメラ調査などがある。（図



図-1 城山トンネル内の漏水・修理の様子
(海南市水道部広報誌：2012年8月2日)



図-2 従来の調査方法³⁾

表-1 パイプラインの健全度評価表³⁾

健全度ランク	施設の状態	パイプラインにおける現象の例	対応する対策の目安
S-5	変状がほとんど認められない状態。	① 新設時点とほぼ同等の状態	対策不要
S-4	軽微な変状が認められる状態。	① 漏水や内面等に軽微な変状が認められるが当面の使用には支障がない	要観察
S-3	変状が顕著に認められる状態。劣化の進行を遅らせる補修工事などが適用可能な状態	① 漏水や内面腐食等の深刻でない変状が顕著に見られる状態 ② 今後、変状の進展が急速に増加すると思われる状況	補修(補強)
S-2	施設の構造的安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態。補強を伴う工事により対策が可能な状態。	① PC鋼線の部分的な腐食・破断 ② 鋼管の小規模な貫通孔 ③ 漏水による周囲への影響が顕在化した状態	補強(補修)
S-1	施設の構造的安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態。近い将来に施設機能が失われる、または著しく低下するリスクが高い状態。補強では経済的な対応が困難で、施設の改築が必要な状態。	① S-2に評価される変状が更に進行した状態 ② 補強で対応するよりも、改築した方が経済的に有利な状態	改築

表-2 パイプラインの施設状態評価表³⁾

評価項目		評価区分			
健全度ランク		S-5	S-4	S-3	S-2
管内面調査	ひび割れ(RC、PC、ACP、FRPM)	なし	—	あり	—
	内面塗装の劣化状況(SP、DCIP)	10%未満	—	10%以上	—
	発錆状況(SP、DCIP)	0.3%未満	5.0%未満	5.0%以上	—
	たわみ量(SP、DCIP、PVC、FRPM)	3%未満	5%未満	5%以上	—
	蛇行・沈下(φ700mm未満)	無	管口径の1/2未満	管口径の1/2以上	—
	蛇行・沈下(φ700mm以上)	無	管口径の1/4未満	管口径の1/4以上	—
	継手曲げ角度(RC、PC、ACP、FRPM)	許容曲げ角度の1/2以内	許容曲げ角度以内	許容角度や芯ズレ等で漏水の懸念あり	—
	継手間隔(溶接又は接着継手は除く)	施工管理基準値内	規格値外だが止水機能問題なし	大幅・全面的に規格値外等で漏水の懸念あり	—
	テストバンド(φ900mm以上ソケットタイプ)(静水圧で5分間放置後の水圧)	80%より上	80～50%	50%未満	—
	進行性	有りの場合1ランクダウン(経年変化が見られるもの)			

-2参照) 前者は、断面形状やたわみ量などの劣化と関連の高い形状の指標を部分的にサンプルする方法である。後者は、直接人が観測できない状況でも、画像やビデオとして管内表面の性状を連続的に記録できるものである。管内形状の定量的な情報というよりは、調査員による視認と診断において有効である。

(2) パイプラインの評価基準

パイプラインの健全度の評価は、管理、埋設条件等を踏まえて、施設の性能低下に関係する要因とその評価区分を設定した施設状態評価表を用い、機能診断調査の結果により行う。施設状態評価表に用いる健全度ランクは、表-1の健全度評価表を用いる。複数の要因が影響している場合には、性能低下を進行させるより支配的な要因に

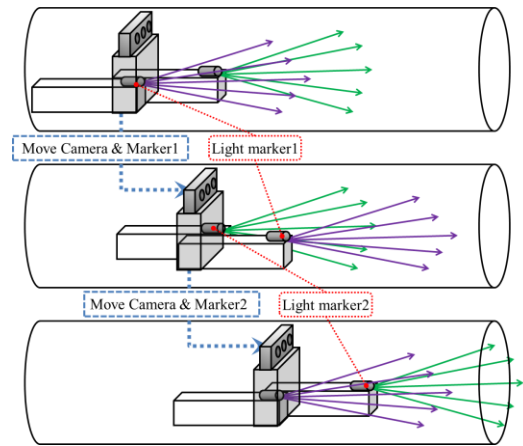


図-3 提案する検査記録手順

重点をおいて評価する。施設状態の適切な評価のためには、各施設や地域の条件等を加味することが必要となる。基本的な評価項目と評価区分を表-2に示す。本研究では、連続的に画像と3次元情報を記録しつつ、変形量としての性急な対応が必要となる可能性のある5%程度のたわみ量の検出を目的とする。

3. 提案手法

(1) 提案手法の概要

本研究では、パイプライン管内をRGB-Dカメラを用いることにより、画像情報と形状情報の効率的な記録を行う。RGB-Dカメラは距離画像を実時間で取得できる。距離画像から管内形状を再現し、たわみや表面形状の異常検知に用いる。カメラが進行しながら検査を進めるにあたり、レーザーポインタを用いて、能動的に輝点のマーカを備えてカメラを前進させながら複数の形状データの座標変換を行い結合させる。以下に計測手順の詳細を示す。

- 2個のレーザーポインタから複数の輝点を発し、パイプライン管内に2色の輝点マーカを付ける。
- 輝点マーカを含むパイプライン管内のカラー情報と形状情報をRGB-Dカメラを使い取得する。
- カメラを前進させる際に1つのレーザを一緒に移動し、他方は固定させたままにする。(図-3)
- 取得したカラー座標から輝点マーカ位置の3次元座標を取得する。
- 座標を連続する計測形状データ間で一致するように次節で説明する座標変換を行う。
- 座標変換を行い複数データを結合したものの形状を可視化する。

(2) 座標変換

2つの形状データにおけるマーカの3次元点の集合 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$, $Y = \{y_i\}_{i=1}^n$ の対応する2点は、ある未知の剛体変換パラメータ (R , t) で以下のように関連付けられているとする。

$$y_i = Rx_i + t \quad (1)$$

与えられたデータ X , Y から以下の目的関数を最小化するパラメータとして回転 R , 平行移動 t を推定する。

$$\min_{(R,t) \in SE(3)} \sum_{i=1}^n \|y_i - (Rx_i + t)\|^2 \quad (2)$$

まず t を消すために、点集合 X , Y の平均 $\bar{x}$, $\bar{y}$ について $\bar{y} = R\bar{x} + t$ の関係が成り立つ。それぞれの点集合から平均の差分だけ並進移動して、目的関数を変形すると、回転行列 R を推定する問題になる。

$$\min_{(R,t) \in SO(3)} \sum_{i=1}^n \|Y' - (RX')\|_F^2 \quad (3)$$

以下の関係から、問題 (3) は、(4) 式の最大化問題に置き換えることができる。

$$\begin{aligned} \|Y' - RX'\|_F^2 &= \text{tr}((Y' - RX')^T(Y' - RX')) \\ &= \max_R \text{tr}(Y'^T RX') \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $X'Y'^T$ の特異値分解を $X'Y'^T = U\Sigma V^T$ とすると $V^T R U = I_3$ のとき目的関数 (4) は最大となり、そのときの解の $R = VU^T$ が求める回転行列となる⁴⁾。

4. 実験

(1) 実験目的

提案手法に従って、2色のレーザーポインタを使った光の輝点マーカを用いたRGB-Dカメラのカラー情報と形状情報の位置合わせの効果を検証し、複数データの結合ができることを確認する。またデータの結合後、結合させたデータの形状を可視化する。

(2) 実験環境

管内形状の点群データ化を行うRGB-Dカメラとして、XBOX 360用Kinect(Microsoft社)を使用する。KinectはRGB

表-3 RGB-DカメラKinect(Microsoft社)の仕様

Device	Kinect™ for Xbox360	
Field of view	57 ° (H) x 43 ° (V)	
Depth image size	640 pix (W) x 480 pix (H)	
Depth range	0.8 ~ 4.0 m	
Frame rate	30 fps	

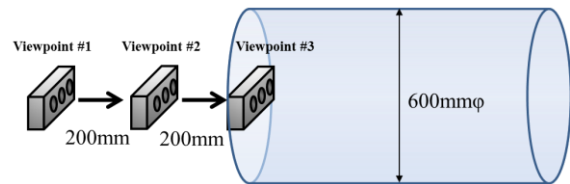


図-4 撮影場所

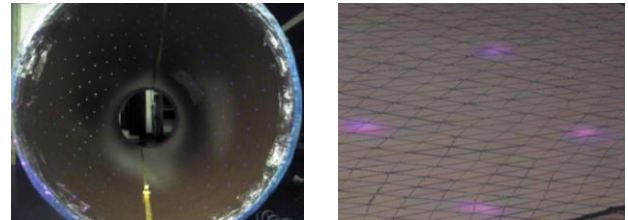


図-5 ボイド管内部（左）取得した色と形状情報（右）

カラー・カメラに加え、物体の三次元画像を画素単位に測定できる赤外線投影方式の奥行きカメラが搭載されている。その仕様を表-3に示す。形状情報取得ソフトウェアはArtec Studio（データ・デザイン社）を使用する。Artec Studioはリアルタイムで三次元形状情報を取得でき、色情報も取得しているためテクスチャマッピングされた色情報付きの3Dデータを作成できる。輝度マーカ用のレーザーポインタには50[mW]出力で、緑色（波長532[nm]）と紫色（波長: 407[nm]）.のものを各1本使用する。取得したデータを結合する座標変換の実行には、数値解析用フリーソフトウェアOctaveを使用した。測定対象物としては、Φ600mm×2,000mmのボイド管を使用した。

(3) 実験手順

図-4に示すようにレーザーポインタの光を照射しながら Kinectを用いて3ヶ所から管内形状の三次元形状情報と色情報を取得する。取得したデータは3次元モデル編集ソフトウェア（Meshlab）を使用して、ノイズ除去と輝点マーカ座標値の読み取りを行った。マーカ座標はテクスチャ画像として記録されており、3次元形状メッシュよりも密な情報となっている（図-5）。輝点情報が記録されている頂点座標の重心としてマーカ座標を算出した。

(4) 実験結果

Kinectで撮影したデータを図-6、図-7に示す。図-6は1ヶ所目と2ヶ所目から撮影したデータとなっている。そのデータを結合させるために、使用した輝点マーカは図-6に示す14点となっている。図-7は2ヶ所目と3ヶ所目から撮影したデータとなっている。2ヶ所目と3ヶ所目では、図-7に示す9点の輝点マーカを使用した。マーカ位置合わせの平均誤差は、それぞれ、5.14 [mm]（標準偏差

2.38[mm]と4.89[mm]（1.47[mm]）であった。

(5) 考察

RGB-Dカメラを使った形状計測による形状モデリング手法は多く提案されており、形状特徴を用いてカメラの移動量や姿勢変化を推定し、自由なカメラ移動により対象物の3次元モデル化を実現している。しかし、パイプ管内形状は異差がない限りにおいて形状特徴も画像の特徴に乏しく、RGB-Dカメラによるデータだけではカメラ自身の移動量を検出することが難しい場合が多い。そこ

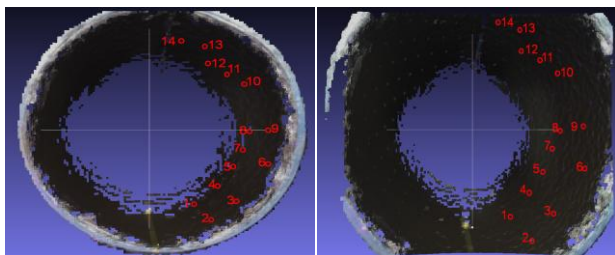


図-6 1ヶ所目（左）と2ヶ所目（右）からの撮影結果

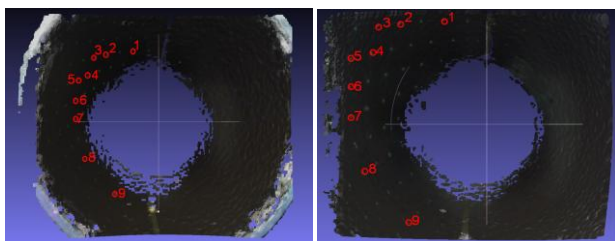


図-7 2ヶ所目（左）と3ヶ所目（右）からの撮影結果

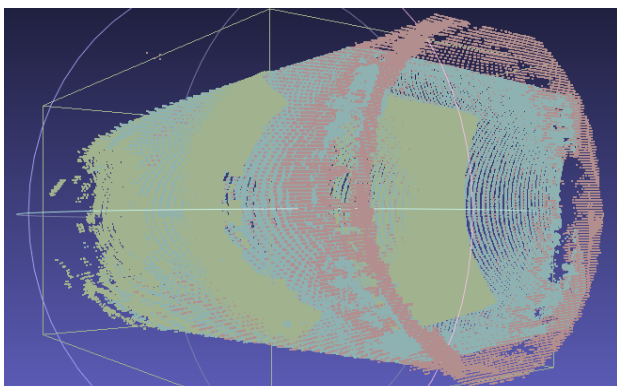


図-8 3ヶ所から撮影したデータの結合結果

で、提案手法によるレーザポイントの光を輝点マーカとして、ステップごとに、レーザポイントを移動する方式により連続的なカラー情報と形状情報を取得できることが確認できた。テクスチャ情報は3次元メッシュより密度が高いため、マーカ座標の取得はサブメッシュオーダでの位置精度が期待できる。今後の課題としては、現在手動で行っているマーカの抽出から座標変換までの作業を自動化するためのシステム開発が挙げられる。

5. おわりに

従来のパイプライン管内形状の調査方法では、管内における連続的なたわみ量や、断面形状を測定することが難しかった。そこで本研究では、3次元画像計測法を用いた調査・診断技術を提案し、Kinectを用いた実装と、円筒形模型を使用した実験によりその有効性を示した。

またパイプライン管内を複数箇所から撮影し、そのデータを結合することで、より広範囲のパイプライン管内形状データを取得できることも示した。

謝辞：本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会 科学研究費補助金（24510239, 24380133）の助成による。

参考文献

- 1) 農村振興局, 農業水利施設の機能保全の手引きーパイプライン編ーの策定について, pp.1-62, 2008
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 下水道施設のストックマネジメント手法に関する手引き（案）, 2011 <http://www.mlit.go.jp/common/000167671.pdf> (参照 2014.4.9)
- 3) No-Dig-Today 管路内部からの調査・探査・診技術, 日本非開削技術協会誌No67, pp.5-9, 2009.
- 4) 姿勢推定と回転行列, 玉木 徹, 社団法人 電子情報通信学会, pp.59-64, 2009.