

(51) 三次元画像計測による パイプラインの変形量の取得

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

E-mail:k004627@kansai-u.ac.jp

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:yasumuro@kansai-u.ac.jp

近年、構造物の検査や管理において様々な局面で3次元点群計測が取り入れられているが、レーザスキャナが比較的大規模な構造物を対象としていたり、点群データを用いた検査手法が確立していない場合があり、狭隘なパイプラインの内壁検査への適用には課題がある。本研究では小型で安価なRGB-Dカメラを用いて、パイプラインの管内形状を計測しその変形量を算出する技術を提案する。通常パイプライン管内の断面形状やその変形量はゲージを当てた局所でしか計測されない。本研究では3次元計測により得られた管内形状データに対し、適切かつ自動的に断面データを抽出し、たわみ量を算出する。実験により、600mmφのパイプに対し、直ちに補修・交換が必要な5%程度のたわみを安定して即座に検出可能であることを確認した。

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

1. はじめに

近年様々な分野で3次元計測が取り入れられている。3次元計測とは、直接対象物に触れずに計測することができ、近寄ることができない場所や触ることができない物でも測定することができる。建設分野でも、3次元レーザスキャナーの導入が進んでいる。トンネルやダム等の構造物の計測に従来は単点での計測しかできなかったのが、点群データの高精度・連続取得により面的に3次元情報を取得することができ、またデータの保存・加工が容易に行えるため、構造物の出来高計算や維持管理に活用できる。また遠隔計測が可能のため、災害現場等(図-1参照)の人が立ち入ることができない箇所の正確



図-1 災害現場イメージと3Dレーザスキャナー観測画像
(3Dレーザスキャナー計測コイシin九州大分)

な3次元データを取得することができる。しかし、現在は大型の3次元レーザスキャナーが多く、大規模な構造物の調査や災害現場が計測対象になっている。そこで本研究では、小型の3次元計測機器を用いて、パイプライン管内形状の計測を提案し、大型の3次元レーザスキャナーでは調査できない場所での計測を実施する。

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¹⁾。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ブ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-2参照)前者は、断面形状やたわみ量などの劣化と相関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



図-2 従来の調査方法

表-1 パイプラインの健全度評価表²⁾

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²⁾

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分開放直後の水圧)	80%以上	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)			

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、たわみ量の調査に着目する。現在では、人が管内に入り、

デプスゲージなどの機器を用いて調査する必要があるため、局所的にしか計測できず、時間も要する。従来の画像検査技術と併せて、管内の情報を連続的に3次元形状も取得し変形量の観点で性急な対応が必要となる箇所が見つければ直ちに、その位置を記録することが有効であると考えられる。ここで、性急な対応が必要なたわみ量としては、健全度ランクS-3に相当する5%程度となる。

3. 先行研究

パイプラインの内壁計測について、Yasumuroら³⁾はNewcombeらの手法⁴⁾を適用したRGB-Dカメラを使った管内測定のプロトタイプを行い、実際にφ1,000mmの模型管内を計測し、実時間で3次元形状情報を取得する実験を行っている。1視点からの撮影によって取得したデータをPC上で3Dモデルとして可視化し、0.015mの測定分解能で、立体的な変形やたわみ量、異物の検出に有効であることを確認している。

さらに筆者らは、パイプライン内を進行するRGB-Dカメラで管内形状を連続的に計測する方法を提案している⁵⁾。複数の異なる色のレーザー光源を用いて、能動的に複数の輝点マーカをパイプの内壁に付与し、交互にカメラとともに前進させて輝点マーカが写りこんだ色情報付きの形状データを取得している。輝点マーカが一致するように座標変換を行うことで撮像データ同士が結合され、カメラの撮像位置も特定される。管内に特徴が無く、カメラに捉えた情報だけでは移動量が不明な場合にも、その位置が正しく記録され、連続的にパイプ内の形状が取得できる機能が実現可能であることが確認されている。

一方、カメラを使った管内検査においては、高解像度な色情報が主たる判断材料であり、さらにRGB-Dカメラを併用することで、変形量に結びつく形状情報が得られる。しかし、1視点で得られる3次元点群形状は、画角の制約から、パイプ状の形を成していない場合がある。複数視点でのデータを統合すれば包括的なパイプ形状が得られるものの、粗密が不均一な点群で形状データが構成され、特に断面形状を解析する上での断面の取り方などに、データの性状が影響することがある。

4. 提案手法

(1) 提案手法の概要

本研究では、先行研究の枠組みを踏まえ、RGB-Dカメラで取得したパイプライン管内形状を解析し、データの粗密や分布に影響されずに、断面での変形量の求める手法を提案する。基本的には、図-3(左)示すように取得し

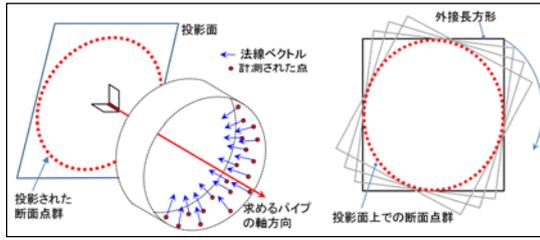


図-3 軸方向と計測点との関係 (左) と変形量の求め方 (右)

た各3次元点群の法線ベクトルを求め、それらと垂直に交わるベクトルをパイプ形状の軸方向ベクトルとするものである。軸方向上で任意に断面を取り、その各断面で変形量を算出する。以下に手順の詳細を示す。

1. RGB-Dカメラを用いて、パイプライン管内の形状情報を3次元点群およびメッシュとして取得する。
2. メッシュ情報から各点の法線ベクトルを求める。
3. 各点の法線ベクトルと垂直に交わるベクトルを、パイプラインの軸方向ベクトルとして算出する。
4. 軸方向ベクトルに沿ってパイプラインを細分割し、任意断面を取得する。
5. 各断面において、あらゆる方向について縦横比を求め、パイプライン全体の変形量を求める。
6. 求めた変形量によって色分けし、可視化する。

(3) 法線ベクトルからの軸方向の算出

以下に示す方法を用いて各点の法線ベクトルから、円筒の軸方向の方向ベクトルを求めた。各面の法線ベクトルをつぎのように表す。

$$n_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} (i = 1, 2, \dots, k)$$

行列Nを次のように定義する。

$$N = \begin{pmatrix} n_1^T \\ \vdots \\ n_k^T \end{pmatrix} (k \times 3 \text{ 行列})$$

$n_i (i = 1, 2, \dots, k)$ に直交するベクトル v を求める。

$$v = \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix}$$

理想的な状況下では $Nv=0$ となるように v を定められるが、実際は計測ノイズや変形のため、そのような v は存在しないため、次の誤差2乗和を最小化する解として求める。

$$\operatorname{argmin}_v \frac{1}{2} \|Nv\|^2 = \frac{1}{2} v^T N^T N v = \frac{1}{2} v^T M v \quad (1)$$

$$M = N^T N (3 \times 3 \text{ 行列})$$

ただし、 v について制約がないと $v=0$ となるため、 v についての制約が必要である。本稿では、 $\bar{z}=1$ という

簡単な制約を提案する。これにより、真の解において $\bar{z}=0$ である場合は最適解が得られないこととなるが、そのようなケースが厳密に起きることは考え難く、また、座標系の取り方を選ぶことにより、容易に回避も可能である。したがって、(1)式は、(2)式のように書くことができる。

$$\operatorname{argmin}_{\bar{x}, \bar{y}} f(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} m_{33} \quad (2)$$

よって、 $f(\bar{x}, \bar{y})$ の微分をとり、 $Df(\bar{x}, \bar{y})=0$ となるような $f(\bar{x}, \bar{y})$ を求めればよい。

$$Df(\bar{x}, \bar{y}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix}$$

この時 $(\bar{x}, \bar{y}, 1)^T$ が誤差2乗和を最小にし、求める軸方向の方向ベクトルとなる。

(4) 法線ベクトルからの軸方向の算出

図-3(右)示すように、前節で求めた円筒の軸方向ベクトルを法線とする平面により、パイプ形状の垂直断面を設定可能になる。軸方向ベクトル上で薄くスライスした点群をこの断面上に投影することで、任意断面形状が得られる。たわみ量は、基本的にこの縦横比である。ここでは外接長方形を各点ごとに設定することで、あらゆる方向におけるたわみを精査することができる。

4. 実験

(1) 実験概要

提案手法に従って、RGB-Dカメラを用いて形状情報を取得し変形量を求める。また変形量を求めた後、その変形量によって点群を色分けし可視化する。

管内のカラー情報と形状情報を取得するRGB-Dカメラとして、XBOX 360用Kinect(Microsoft社)を使用する。KinectはRGB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3次元形状情報を取得でき、メッシュ情報と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ポリゴンモデルを作成できる。取得したデータからの軸方向ベクトルの算出には、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、 $\Phi 600\text{mm} \times 2,000\text{mm}$ のボイド管を使用した。

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 変状のない状態 (左) と変状がある状態 (右)

(3) 実験手順

管内に異常がない状態と異常がある状態 (図-4参照) を想定して計測対象を用意し, Kinectを用いて管内形状の3次元形状情報と色情報を取得する (それぞれ, 点数270万, 320万, メッシュ数500万, 590万)。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, ノイズ除去を行い, 点群のみのデータとする (それぞれ, 点数5万, 5万)。ノイズ除去を行ったデータから方向ベクトルを求め, その方向に円筒を細かく分割し, 断面形状を取得し, たわみ量を求める。

(4) 実験結果

Kinectで撮影したデータと各点の法線を表示したデータを図-5に示す。そしてこの法線から方向ベクトルを求め, 断面を切り取り可視化したものを図-6に示す。左図が異常のない状態, 右図が異常がある状態を表している。変形量が直ちに補修が必要な5%未満の箇所は緑色, 5%以上外側にたわんでいるものが赤色, 縮んでいるものが

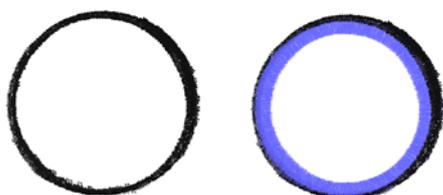


図-5 kinectで撮影したデータと法線を表示したデータ

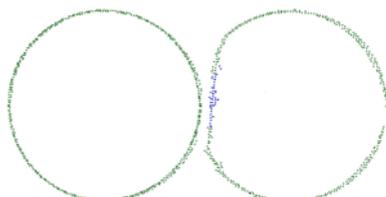


図-6 変形量の可視化結果

が青色になっている。今回の実験ではΦ600mmに対して, 実測値で約50mmの内側にたわんでいる。Kinectで撮影した結果でも50mmたわんでいる箇所では青色に表示されていることが確認できた。

(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いる。しかし取得した形状データを有効利用する方法はあまり提案されていない。そこで提案手法による方法で, 取得した形状データを分析し, 計算を行うことでそのデータから直ちに補修が必要とされる変形量を取得することが確認できた。今後の課題としては, 先行研究で行っている複数データの結合方法と合わせて, 連続的にデータを取得しながら変形量を求めていくことがあげられる。

5. おわりに

現在の3次元計測は大規模な構造物を対象としていることがほとんどであったが, 本研究では小型の3次元計測機器を用いてパイプラインの管内形状を取得し, そこから従来のパイプライン調査では難しいとされていたたわみ量や, 断面形状の測定を提案した。そして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。

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 (15H02983) の助成による。

参考文献

- 1) 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.
- 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>> (入手2014.4.9) .
- 3) Yoshihiro Yasumuro, Arata Nagakusa, Hiroshige Dan, Akira Kobayashi, : *Inner Surface Measurement with RGB-D Camera for Pipeline Assessment, Proceedings of the First International Conference on Civil and Building Engineering Informatics (ICCBIE2013)*, pp.87-89, 2013.
- 4) Richard A. Newcombe, et al : *KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking*, in *IEEE ISMAR, IEEE*, pp.1-8, 2011.
- 5) 井上 裕貴 他: パイプライン管内形状の連続的な三次元画像形状計測手法, 土木学会論文集F3, 70(2), I_243-I_248, 2014.