

(36) 管内画像検査のAR表示のための デプス情報を用いた検査カメラの姿勢補正

頼光 拓真¹・檀 寛成²・安室 喜弘³

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:k945280@kansai-u.ac.jp

²非会員 ³正会員 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

農業水利施設は、簡便なパイプライン構造をとるものが多く、1箇所での漏水や破損事故により広範囲への被害を引き起こす可能性が高いインフラである。そのため計画的な管内の調査・診断と迅速な対応が必要である。従来のテレビカメラ調査では、地上と管内との位置関係を把握することが容易でないことに注目し、我々は、テレビカメラの調査画像をマッピングした3次元拡張現実感表示を行い、作業プロセス間での、調査・診断情報の共有を図るシステムを提案している。本稿では、デプスカメラを用いて検査カメラの姿勢によるAR表示の歪みを補正する手法を実現し、実験により有効性を示す。

Key Words : Augmented Reality, Pipeline inspection, Depth camera, Industrial Endoscopy

1. はじめに

現在我が国では社会インフラの老朽化が深刻な問題となっており、維持管理のあり方についての関心が高まっている。しかし、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。このような状況において国土交通省がCIM（Construction Information modeling）を提唱し、計画から調査、設計、施工、維持管理に至る一連のプロセスにおいて、3次元モデルを用いて情報を一元管理することにより、建設生産の合理化を目指している¹⁾。また、タブレット等のモバイル機器の技術の進歩が進んでおり、社会インフラの維持管理の現場においてモバイル機器による直感的で分かりやすい操作を用いた作業効率化が求められている。本研究では3次元モデルを現場で活用する場面として農業水利施設のパイプラインに着目する。パイプラインの耐用年数は約50年と言われており、図-1のように今後耐用年数を超えたパイプラインが急増することが問題視されている。農業水利施設は簡便なパイプライン構造をとり、1箇所の漏水や破損事故により広範囲に及ぶ被害を容易に引き起こす可能性が高い。そのため、計画的かつ広範囲に渡り、パイプライン管内の調査・診断を行い、

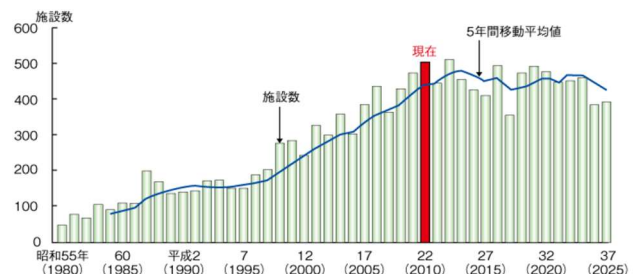


図-1 新設管路延長 (km) の経過年数²⁾

事前に問題箇所を把握する必要がある。本研究では、従来のテレビカメラ調査において、地上と管内の関係を把握することは容易でないことに注目し、テレビカメラの調査画像をマッピングした3次元モデルによる拡張現実感表示を行い、作業プロセス間での、調査・診断情報の共有と、コミュニケーションの円滑化を図るシステムを提案する。

2. 関連技術および研究

(1) 従来のパイプラインの調査方法

パイプラインの適切な構造機能を維持するために、管



図-2 従来の調査方法

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-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) AR技術を用いた埋設管の維持管理の研究

CIM（Construction information modeling）はコンピュータ上に作成した3次元モデルに属性情報を追加し、計画から調査・設計、施工、維持管理、更新に至る一連の過程において、情報を一元管理することにより、建設生産システムの効率化を図るものであり、拡張現実感技術（AR）とともに地下のパイプラインの維持管理業務において活用されている。例えば、オーストラリアのサウス・イースト・ウォーター社はタブレットを用いて図-3のように現場の地下の都市ガスや水のパイプラインを地上からARで可視化し、調査・診断と施工間の意思決定を迅速にしている。しかし、これは予めコンピュータ内に用意した3次元モデルを重畳するものである。これに対し、調査・検査の実施現場で逐次結果をAR表示出来れば、周辺状況を踏まえた損傷原因の究明の支援ができ、補修等の施工プロセスとの情報共有が円滑化できると考える。

(3) 先行研究①

埋設されたパイプラインのAR表示について、筆者らは図-4のように管内検査カメラの画像をマッピングしたパイプラインモデルを現実世界に重畳する手法を提案している⁴⁾。実験では、管内に変状を模擬した用紙を貼り付け、管内検査カメラの画像を用いたAR表示から変状を視認し、AR表示の可能性を示している。しかし、管内検査カメラの位置と方向がパイプラインの中心である必要があり、カメラが中心から14.1pixelずれた場合、テクスチャが3.0cm歪み、管内の状態を把握することが困難



図-3 Visual City（サウス・イースト・ウォーター社）

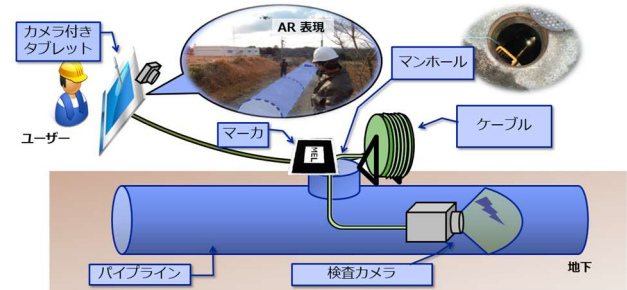


図-4 埋設管のAR表示

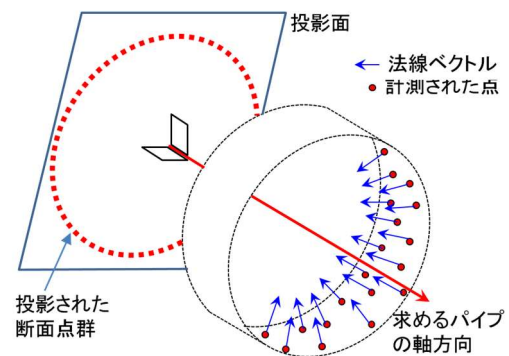


図-5 軸ベクトルと計測点の管径

になることを確認している。

(4) 先行研究②

パイプラインの内壁計測について、YasumuroらはRGB-Dカメラで取得したパイプライン管内形状を解析し、断面での変形量を求める手法を提案している⁵⁾。図-5のように取得した各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し、軸方向上で任意に断面を取り、各断面で変形量を算出している。実験ではKinectを用いた実装により、円筒形モデルを計測し、取得した形状データから直ちに補修が必要とされる変形量を取得し、有効性を確認している。

3. 提案手法

(1) 提案手法の概要

本研究では、先行研究①の枠組みを踏まえ、デプスカ

メラを用いた管内検査カメラの姿勢によるテクスチャの歪み補正を行い、管内検査カメラの位置と姿勢が中心ではなくても、正確にパイプラインモデルにテクスチャマッピングする手法を提案する。本研究ではデプスカメラと管内検査カメラを一体化して併用する。デプスカメラから取得した3次元点群の各点で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ベクトルとする。軸ベクトルに沿って、デプスカメラにより形成したパイプ形状を提示する。以下に手順の詳細を示す。

1. 管内検査カメラを用いて、パイプライン管内の画像を取得する。
2. デプスカメラを用いて、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。
3. メッシュ情報から各点の法線ベクトルを求める。
4. 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。
5. パイプラインの軸ベクトルとARマーカのy軸を合成するための座標変換を実行する。

(2) 法線ベクトルからのパイプ形状の軸ベクトルの算出

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る。各点におけるパイプ内壁の法線ベクトルをつぎのように表す。

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

行列Nを次のように定義する。

$$N = \begin{pmatrix} n_1^T \\ \vdots \\ n_k^T \end{pmatrix} (k \times 3 \text{ 行列}) \quad (2)$$

$n_i (i = 1, 2, \dots, k)$ のいずれにも直交するベクトル v を求める軸方向とする。

$$v = \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix} \quad (3)$$

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物理的な変形などにより、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。

$$\operatorname{argmin}_v \frac{1}{2} \|Nv\|^2 = \frac{1}{2} v^T N^T N v \quad (4)$$

ただし、 $v \neq 0$ の解を得るための v についての制約として要素のひとつを $\bar{z} = 1$ （非ゼロ）の制約を用いることにより、(4)式は、(5)式のように書くことができる。

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

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} m_{33} \quad (5)$$

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

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

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix} \quad (6)$$

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 v となる。

(3) カメラ座標とARマーカ座標との変換

パイプラインの進行方向をマーカ座標系のひとつの座標軸方向と一致させる場合、その基底ベクトル e とし、前節で求めたパイプの方向ベクトル $v = (l_x, l_y, l_z)$ とすると、ベクトル $e \times v$ の周りに e と v のなす角 θ だけ回転させることで、座標変換が行える。

4. 実験

(1) 実験概要

デプスカメラを用いて管内形状を取得し、管内検査カメラの姿勢を行い、パイプラインモデルを実際のパイプラインの進行方向の姿勢に補正する。管内の形状情報を取得するデプスカメラとして、Intel RealSense SR300を使用する。RealSenseは3つのカメラ(1080p HD カメラ、赤外線カメラ、赤外線レーザーカメラ)を使用して奥行きと色情報を計測する。その仕様を表-1に示す。ARを表示するカメラにLogicool Qcamを使用し、解像度は640×480で表示した。管内形状のAR表示を行う対象として、直径20cmのアルミ管を用意した。また、パイプラインモデルの描画処理には、標準的なCGライブラリのOpenGLを使用した。ARマーカの認識と表示にはARToolKitのライブラリを用いた⁶⁾。また、プログラムの開発環境としてMicrosoft VisualStudio2010によるC/C++言語を用いた。

(2) 実験手順

RealSenseを用いて管内形状の3次元形状情報とカラー情報を取得する(点数: 34569, メッシュ数: 66759)。取得した各点群の法線ベクトルを求め、それらと垂直に交

表-1 デプスカメラ Intel RealSense SR300の仕様

Device	Intel® RealSense™ SR300	
Device Size	150mm x 30mm x 58mm	
Depth FoV (D*W*H)	80°68°54°	
Depth FPS	30, 60	
Depth Method	Coded light IR	
Indoor Range	0.2m -1.5 m	

わるパイプラインの軸ベクトルを算出する。軸ベクトルとARマーカのy軸を座標変換で合わせる。ARマーカをWebカメラで撮影し、管内形状がパイプラインの進行方向に沿ってAR表示されることを確認する（図-6）。

(3) 実験結果

検査カメラが実際のパイプラインに沿った方向を向いていると仮定して、姿勢の補正を実行していないケースを図-7 に示す。実際は、カメラの向きがパイプラインとは平行でないことから、表示されたパイプラインモデルも実物とは違った方向に沿って表示されている。次にパイプラインの軸ベクトルとARマーカのy軸方向を合わせる補正を実行したケースを図-8 に示す。パイプラインモデルが実際のパイプラインと平行に表示されることが確認できる。デプスカメラが正確にパイプの中心方向に向けられていないケースでも管内形状情報からパイプラインモデルを実際のパイプラインの進行方向に沿わせられていることが確認できた。

(4) 考察

今回用いたパイプ形状のサンプルは、蛇腹状の起伏と金属状の光沢をもつものであったが、デプスカメラで得られる表面形状から、約 3,000 の頂点における法線ベクトルを用いた最小二乗法により、円筒の軸方向を安定して求められることが確認できた。計算コストも低く、ARとしての実時間処理にも有効であると考えられる。

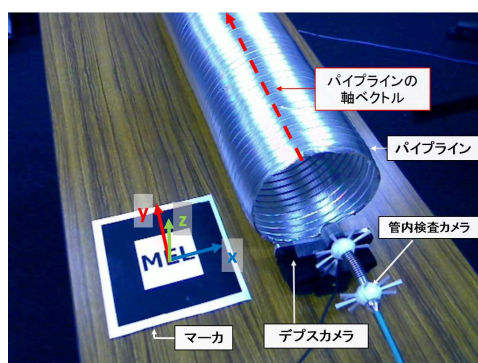


図-6 実験風景

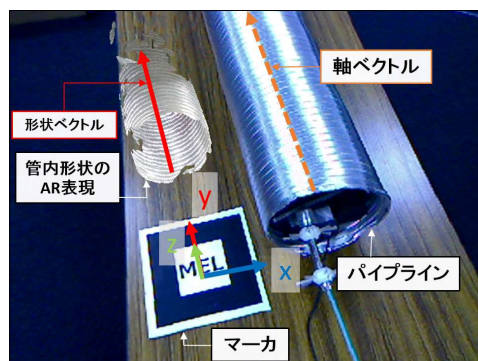


図-7 補正前

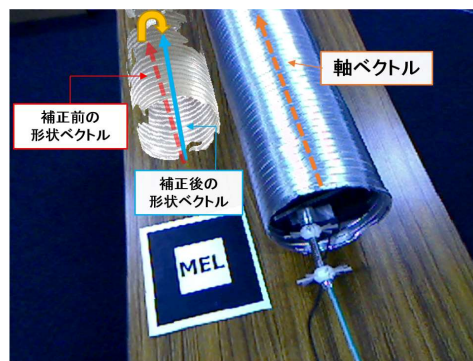


図-8 補正後

5. おわりに

本研究では、小型のデプスカメラを用いてパイプラインの方向を計測し、管内検査カメラの姿勢を補正する方法を提案し、RealSenseを用いた実装と実験により有効性を示した。このカメラ姿勢の補正手法によりAR表現された検査画像に対する精度検証が今後の課題である。

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, 16H05000）の助成による。

参考文献

- 1) CIM 技術検討会：CIM 技術検討会 平成 25 年度報告、
<http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/Contents/H25report_0519.pdf>,
(入手2016.3.9)。
- 2) 農林水産省：農業生産を支える農地、資金、研究・技術開発、関連団体をめぐる状況、
<http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h22_h/trend/part1/chap2/c7_01_06.html>,(入手2016.6.17)。
- 3) 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)。
- 4) 頼光 拓真ほか：パイプライン検査のためのテレビカメラ調査画像のAR表現，情報処理学会 第78回全国大会講演論文集(4)，pp.355-356，2016。
- 5) 井上 裕貴ほか：三次元画像計測によるパイプラインの変形量の取得，土木学会論文集F3，71(2),I_72-I_78，2015。
- 6) 橋本直：ARToolKit拡張現実感プログラミング入門，pp.8-84，アスキー・メディアワークス，2008。
- 7) Hirokazu Kato and Mark Billinghurst：Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality(IWAR 99), pp.85-94, 1999。
- 8) 池田匡隆：デジタル化したミラー方式テレビカメラによる発生対応型から予防保全型の下水道管の維持管理，日本非開削技術協会誌（No-Dig-Today）No77，pp.12-16，2011。