

4. 点検調査ロボットシステムの実用化を目指した検証評価

奥川雅之、三浦洋靖、倉橋奨、落合鋭充

1. はじめに

市町村が管理している小規模橋梁の点検は、点検作業者が容易に近くことができない箇所が多く、国土交通省が定める点検要領に準じた目視点検が行えない場合がある¹⁾。2019年に定期点検容量の見直しがあり、基本となる近接目視に対して、それを補完代替する新技術の活用を認める改定が行われた²⁾。この改定により、ロボット技術などの利用が条件付きで認められている。一方で、農業用水路トンネル³⁾、河川堤防の排水孔⁴⁾、高速道路下排水管（カルバート）⁵⁾や下水道管^{6) 7)}など雨水の排水を目的とした配管では、腐食による劣化を要因とする道路陥没、堆積物や汚泥などによる排水機能の劣化を要因とする内水浸水など被害が発生するため、予防保全の取り組みが求められている。しかし、道路の地下に埋設されるカルバート管は、小径のものが多数存在していること、点検作業者の進入が難しいことから、それらのほとんどが点検されていないのが現状である。したがって、小径カルバート管のような狭隘閉鎖空間に対する点検手法及び各種計測手法の確立が課題となっている。このような状況から、カルバートなどの狭隘空間での点検調査に対して、地上移動ロボットの活用が期待され、研究が進められている⁸⁾。

我々は、インフラやプラント設備における点検や調査、そして、それらに対する災害対応を目的として、測域センサや各種センサを搭載可能な遠隔操縦型クローラ移動ロボットを開発している。今年度は、新型コロナウイルス感染状況の悪化による活動自粛の影響により、当初予定していた現場検証実験の多くは中止となり、本年度参加を予定していたWorld Robot Summitインフラ・災害対応カテゴリープラント災害予防チャレンジの開催も2021年に延期となった。本報告では、2020年4月と11月に実施したカルバート管内部点検に関するフィールド実験結果について述べる。

2. カルバート管内計測

2.1 カルバート点検における課題

本研究では、高速道路下部に雨水や近隣からの排水などを設備反対側へ通水することを目的として設けられているパイプカルバート（以降、カルバート管と記載）を対象としている。

カルバート点検項目は、管内壁面の変状（0.1mm程度の亀裂、水漏れや腐食など）とその場所（分解能1cm程度）、滞留（堆積）物の有無（堆積高（分解能1cm程度）、管連結部のズレや土砂流入の有無、管の歪みや沈下量（分解能1cm程度）に関するものである。排水性能や管ずれの予兆を検知し、改修要否や施工順序を決めるためカルバート管内計測の必要とされている。特に、管の歪みや沈下量を把握するために、管傾斜角度の計測が要求されている。また、亀裂の有無や場所の特定のため、管内面撮影が求められている。これまでに、高速道路付帯設備であるカルバート館内部の点検調査を実施する機会を得て、我々の開発するロボット点検システムの有効性について検証を重ねている⁹⁾。今年度は、管傾斜計測を中心に本ロボットシステムの検証を行った。

図1にモデル化したカルバート管内を示す。 D はカルバート管直径、 d はカルバート管半径、 θ はカルバート管傾斜角、 Δh は上流挿口を基準とした配管底面高さ、 x はロボットの水平移動距離、 x_c はロボットの管内水平位置座標、 θ_r はロボット姿勢のピッチ角度、 d' はロボットの重心鉛直座標位置とカルバート管天井面との距離、 h' は堆積物高さである。

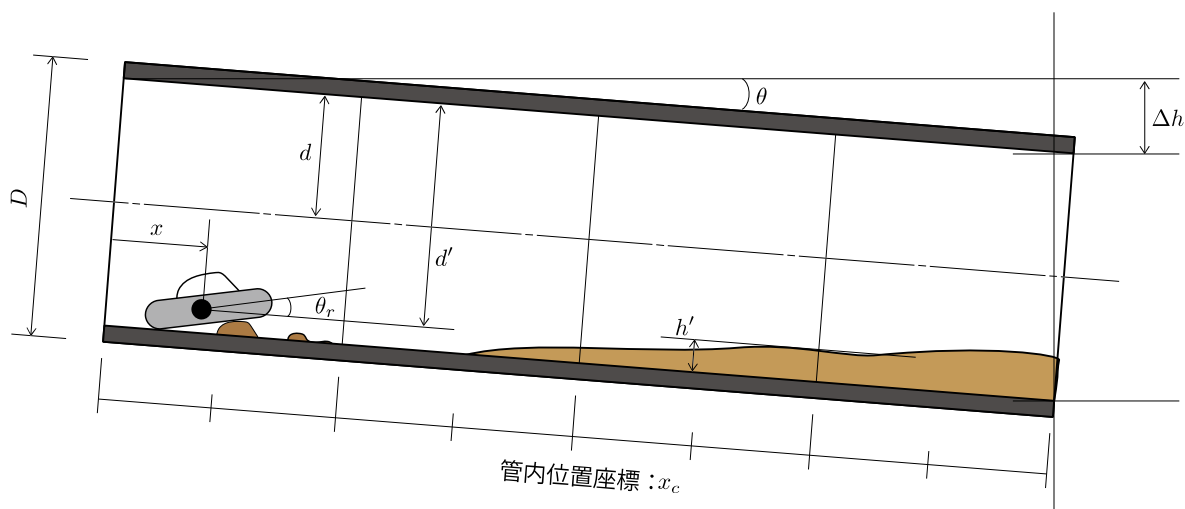


図1 カルバート管内のモデル化

カルバート管内点検に対する要求事項とし、管上方からの圧力（土砂など）による管の損傷有無（排水性能、管径歪、クラック、管ずれ、管継ぎ目からの土砂流入）や程度を把握精度は、通水性能に影響がないことが判断できる程度との要望であった。管内面が円環のため、どの面を計測して傾斜角を算出するのか。ロボットが必ずしも管と平行ではないため、取得データ補正が必須となることが技術的な課題である。解決方法として、管傾斜計測用センサの選定と計測システムのROS化を行った。



図2：カルバート管内部の様子

3. カルバート管内点検検証実験

3.1 フィールド実験1

2020年4月7日に愛知県内某所にてカルバート管（直径1,000mm、全長50m）内点検に関する検証実験を実施した。評価対象のロボット外観を図3左図に示す。検証項目は以下の3項目であった。

- (1) ロボット位置座標の推定：Intel社製RealSense Tracking Camera T265を用いたビジュアルSLAM と慣性計測装置（Inertial Measurement Unit: IMU）による姿勢角情報の統合
- (2) 計測センサシステムのROS化（取得データのログ統合）
- (3) 管内無線LAN通信

得られた成果を以下に示す。

- (1) T265を用いたビジュアルオドメトリ

ロボットの移動距離に関しては概ね正確に計測できることを確認した。図4に代表的な計測データを示す。実測値は高低差0.25+2.25m/全長50mであった。点検対象の管傾斜の真値は高低差0.25m/全長50mであった。ロボットが管内堆積物（土砂/石瓦礫/ごみ等）踏破する際に搭載IMUの限界加速度4Gを超える衝撃が生じたことが要因である



図3：2020/4/7検証評価に用いた点検ロボット（左：外観、右：金属片が混入した様子）

と考えている。

(2) 計測センサシステムのROS化

ROSのTopicをタイムスタンプ付きで保存でき、再生も可能な機能であるrosbagを導入することによりロボットに搭載したトラッキングカメラT265によるデータ（ロボット位置座標）と姿勢角センサ（IMU）との同時収録を実現した。動画形式によるオフライン再現が可能となり、効率的なデータ分析が可能になった。

(3) 管内無線LAN通信

直線的なカルバート管であれば、無線LAN通信利用可能であった。また、4Kカメラによるストリーミング撮影における遅延等の発生は確認されなかった。

(4) その他

管内堆積土砂内に埋没していた金属片が駆動機構部に混入（図3右図）したため、モータ配線が損傷し走行不能となった。

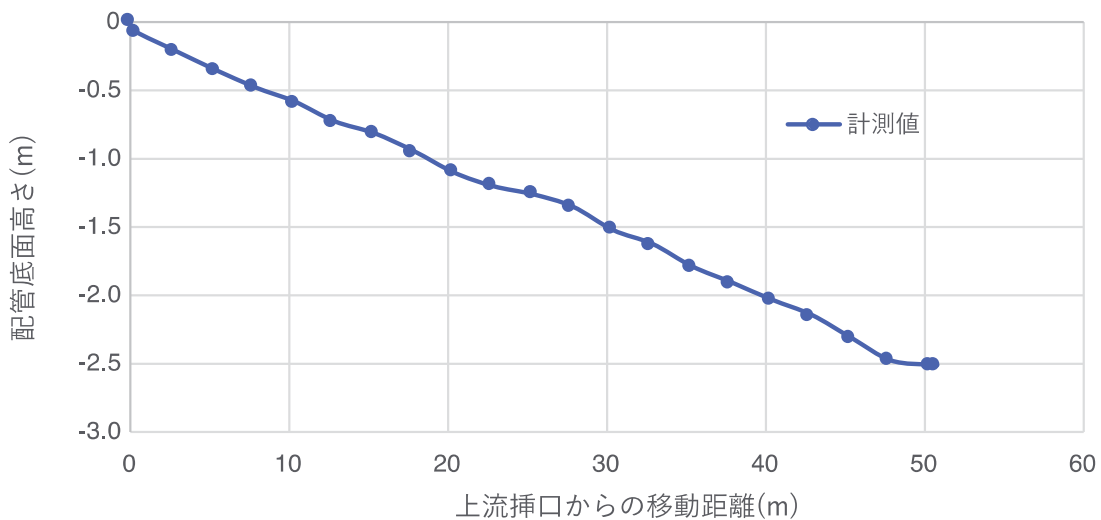


図4：カルバート管傾斜計測結果

3.2 フィールド実験2

2020年11月27日に愛知県内某所にてカルバート管（直径1,000mm、全長50m）内点検に関する検証実験を実施した。Intel社製RealSense LiDAR Camera L515を用いた計測システム実装検証として、深度（Depth：物体までの距離）画像によるロボット（センサ）-壁面間3D距離計測について検証を行った。得られた成果を以下に示す。

管の入口および出口の位置関係の推定は可能であった。しかし、計測精度は、0.25m + 0.02m/全長50m（2.5m/管あたりの精度から20本分として算出）であった。目標としている数mm/管に対して誤差が多い結果となった。管内堆積物によるロボット姿勢（センサ位置）の不確かさ、撮影画角が狭角（計測対象とセンサ間距離に対して）であったこと、IMUの計測/補正誤差などの累積が要因であると考えている。

その他に、堆積土砂対策である駆動機構部内サスペンション機構のバネ硬さ調整ナットが緩み、クローラベルトが外れ走行不能となった。管内走行時の進行方向修正のために行った旋回動作の繰り返し操作が要因であった。



図5：2020/11/27検証評価に用いた点検ロボット
(左：外観, 右：走行中の様子)

4. まとめ

災害対応及び社会インフラ/プラント調査点検を目的とした遠隔操縦型ロボットを中心とする点検調査ロボットシステムに関するフィールド実験を行った。本年度は、新型コロナウイルス感染拡大の影響により、活動が限定的なものとなった。管傾斜計測を目的とし、トラッキングカメラと3DLiDARカメラの評価を行い管傾斜計測精度の検証を行った。十分な計測精度が得られなかったため、センサの再選定あるいは計測方法の再検討が必要である。本研究で試作を行っていた点検調査ロボットは、本年度サンリツオートメーション株式会社によって製品化された¹⁰⁾。

参考文献

- 1) 関和彦他5名, 小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の研究開発, 土木学会論文集F 3 (土木情報学), Vol.75, No.2, pp.II_8-II_16, 2019.
- 2) 大場慎治, 定期点検要領の改定について, 建設マネジメント技術, No.8, pp.17-21, 2019.
- 3) 藤原鉄朗他4名, 通水状態での農業用水路トンネル点検手法の開発, 農業農村工学会誌, Vol.77, No.4, pp.275-278, 2009
- 4) 佐古俊介, 延常浩次, 河川堤防の雨水排水による被災と対応, JICE report, Vol. 31, pp.8-11, 2017.
- 5) L. Liu, A Smart Tunnel Inspection Robot for the Detection of Pipe Culverts, Applied Mechanics and Materials, Vol.614, pp.184-187, 2014.
- 6) 福田康雄, 松宮洋介, 深谷渉, 西尾称英, 下水管に起因する道路陥没の特性と予防保全に向けた取り組み, 土木技術資料 Vol.50, NO.9, pp.36-39, 2008.
- 7) 池田富士雄, 外山茂浩, 雲田俊夫, 柳澤敬, 複合センサシステムを搭載した下水道管路の不陸測定車両ロボットの開発, 日本機械学会機械力学計測制御部門講演会論文集 (D&D2012), Paper No.360, 2012.
- 8) H. A. Kadir, et al., Monocular Visual Odometry for In-pipe Inspection Robot, Journal Teknologi (Sciences & Engineering), Vol.74, No.9, pp.35-40, 2015.
- 9) H. Miura, et al., Verification and Evaluation of Robotic Inspection of the Inside of Culvert Pipes, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.31 No.6, pp.794-802, 2019.12.
- 10) サンリツオートメーション株式会社, 監視点検用遠隔操作クローラロボット
https://www.sanritz.co.jp/products/crawler/crawler_r034/ (最終閲覧日: 2021年4月23日)