

4. プラント点検および災害調査ロボットシステムの検証評価

奥川雅之・三浦洋靖・倉橋奨・落合鋭充

1. はじめに

インフラ構造物や設備の中には、高所や閉鎖狭隘空間など人が容易に近づけない場所や交通規制を必要とする場所があり、定期点検の実施が困難もしくは実施されていないものも少なくない。これら課題の解決策として、安全な遠隔地から操縦することができる各種センサやカメラなどを搭載した遠隔操縦ロボットの導入が積極的に検討されている。欧米では、2018年に国際非営利団体 SPRINT Robotics からプラント点検ロボットに関するロードマップ¹⁾が公開されており、ロボット技術の導入により(1) Safety Improvement (点検作業者の安全性改善)、(2) Environmental Performance Improvement (環境性能の改善：有毒物の漏洩や汚染の回避、爆発事故の回避)、(3) Cost Avoidance and Reduction (コスト増大の回避と削減：洗浄作業や足場作りなど無駄な作業の削減)、(4) Performance Improvement (性能向上：ダウンタイムの短縮、点検頻度の増加、点検品質(客観性)の向上)の効果が期待されると述べている。特に、狭隘閉鎖空間に対する探査ロボットによるモニタリング技術は、社会インフラやプラントにおける狭隘・閉鎖空間の点検・メンテナンス、危険箇所の内部調査に要求されるものであり、それらは、災害時の崩落箇所や可燃性・有毒ガス雰囲気中等の調査への転用が期待される。インフラ設備では、道路や橋梁などの主要構造物や設備の他に、道路の地下に埋設されるカルバート管などが設けられており、これらの損傷は構造物全体の機能や健全性に影響を及ぼす。しかし、小径のカルバート管は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。以前から、路面下に設けられたカルバートに対しては、地上より空洞探査車を用いて地下に生じた空間を調査する方法が行われているが、その検出精度は地下空洞の有無および概略の大きさを把握する程度に留まっている²⁾。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^{3) 4)}。

我々の研究室では、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、トンネル内や亜炭廃坑内の調査に応用してきた^{5) 6)}。今回、道路の付帯設備であるカルバート管の内部を点検する機会を得たことから、カルバート管内部点検における我々のロボット点検システムの有効性を確認するとともに、カルバート管点検特有のロボット技術課題を把握するために、検証実験を実施した。また、当該システムの機能や性能を客観的に評価する機会として、2019年9月に福島ロボットテストフィールドにて開催された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トライアルに参加した。

本報告では、調査ロボットシステムの応用事例として、WRSトライアルにおけるプラント災害予防チャレンジ参加報告と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. 活動報告

3.2 カルバート内点検

カルバートは、地中に埋設される暗渠あるいは地下水路という意味をもち、近年では、一般的に水路や人の通路を目的とし、道路を横断して設置されている土かぶりのある構造物と定義されることが多い。本研究では、内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。以下に、道路用カルバート管の特徴を建設メーカーにヒアリングした結果を記載する。

- ・管内をスムーズに通水するために、1/50程度の傾斜を有している
- ・カルバート管は、2.5m/本のコンクリートまたは樹脂製の管を連結して構成されている
- ・全体長さ：数mから50m程度、管径：数十cmから数m、断面形状：矩形もしくは円形
- ・管内には水が滞留し、その量は周囲の状況や天候などによって変化する
- ・管内には様々な種類の堆積物があり、その量は下流に向かうほど増加する
- ・主要設備ではないことから、アクセスしにくい場所に管入口（出口）が設けられていることが多い
- ・管の全体形状は、基本的に直線的であるが、場所によっては屈曲している
- ・管途中には出入り口はなく、内部進入後は、出口まで走破するか、入口まで引き返すことになる
- ・点検（概査）は、1～2時間/カルバート（3カルバート以上/日）程度で実施したい
- ・変状調査（精査）は、変状程度に依存するため時間がかかっても良いが、できるだけ迅速に実施したい

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)に関する目視点検である。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⁷⁾。図1に検証対象ロボットの外観を示す。



図1：検証ロボット

(1) 2019年10月9日（場所：岐阜県内某所、カルバート管概要：直径800mm、全長50m）

図2に今回検証実験を行なったカルバートの下流側入口を示す。管内アプローチ方法の検証と管内壁面変状撮影用カメラの性能評価を主な実験項目とした。カルバート管の上流から下流に向けて進入した場合、進行するに従い、管内には堆積土砂によって路面の傾斜が急激に変化する箇所が存在し、踏破に困難を有するとともに、非常に流動性の高い泥が堆積しているため走行が困難なることが多かった。一方で、ダムの下流側には流動性が低く比較的硬度が高い泥が堆積しているため、走破に必要な推進力を確保しやすいことから、下流から上流に向けて進入することとした。その結果、当該カルバート管内を走破することができた。一方、管内壁面変状の撮影画像として、管内面展開図が要求されていることから、単眼カメラ4台を管内面に正対するように配置し、約270度の視野角を4分割で撮影することとした。その結果、精査可能な精度の画像を取得することができたが、カメラ毎にカメラ本体と管内壁面との距離が異なっていたため撮影範囲に差異が生じ画像の結合ができない問題が生じた。



図2：検証カルバート入口

(2) 2019年11月27日（場所：愛知県内某所、カルバート管概要：直径1,000mm、全長30m）

瓦礫堆積路面における走行性能評価と引き続き管内壁面変状撮影用カメラの性能評価を主な実験項目とした。これまでに問題となっていたロボット底面に大きな瓦礫が入るとスタックしてしまう問題に対して、ロボット底面にソリ形状パーツ追加することによって、堆積瓦礫を乗り越え、30mを通り抜け走破できた。

管内壁面変状の撮影に関しては、管中央を走行できず、左右のどちらかに片寄って走行した場合、撮影死角が生じるとともに、泥が堆積した後の壁面のようにコンクリート壁面と色調が異なる箇所を撮影した場合、画像の結合ができない問題が生じた。

2.1 World Robot Summit トライアルへの参加

2020年に開催予定のWorld Robot Summit (WRS) は(執筆時点では、COVIT-19の影響で、2021年に開催が延期されることとなった)は4カテゴリーに分かれており、そのひとつとしてインフラ・災害対応分野が設けられている。具体的には、トンネル事故災害対応・復旧、プラント災害予防、災害対応標準性能評価に関する競技が実施される。プラント災害予防チャレンジでは、稼働中プラントにおける日常点検・検査および異常発生時の緊急対応を競技テーマとし、様々なプラントに対応できるような競技ミッションおよびタスクを設定されていた。昨年度はプレ大会(WRS2018)⁸⁾が開催され、チーム「AiSaFu」(愛知工業大学、サンリツオートメーション、フカデン)として本研究プロジェクトで開発している調査ロボットシステムにてプラント災害予防チャレンジに参加した。その結果については文献を参考にさせていただきたい⁹⁾。

本年度はトライアル競技が2019年9月20日から9月23日にわたって福島ロボットテストフィールドにて開催された。プレ大会と同様に、クローラ型移動ロボットScottと小型飛行ロボット(ドローン:DJI製MAVIC AIR)の移動形態が異なるロボット2台で連携し、各競技タスクに対して、それぞれの特徴を活かした対策をとることとした。我々は、次のような評価項目を設定し、本ロボットシステムの性能評価を行なった。トライアル競技の様子を図3に示す。



図3：競技会の様子
(左からオペレーションエリア、配管群エリア、ポンプエリア、ボイラーエリア)

(1) プラント設備フィールドへの適応評価

Scottの走破性に関しては、マニピュレータ操作を併用しロボットの重心を制御することで、鉄製階段を昇降可能であった。駆動部防水により、フィールド内の水溜りも走行可能であった。小型ドローンの活用により、目視であれば、バルブゲージの数値を視認することが可能であった。しかし、雨水など水分が付着した鉄製階段に対しては、Scottのメインクローラが空転し走行できなかった。また、プラント内ではGPS情報が取得できずキャリブレーションができずドローンを離陸させることができなかったが、キャリブレーションをプラント建屋外で行うことで離陸させることができた。タンク近傍では、屋外プラント設備ということで、プラント内部に吹き込む横風の影響で飛行が不安定になることがあった。

(2) 新型ハンドユニット性能評価

WRS2018の課題(パワー不足でバルブハンドルとレバー操作ができなかった)から、グリップ力をアップさせたハンドユニットを新たに製作した。しかし、グリップ力を増加させたことにより樹脂パーツの強度不足のため各部に撓みが生じ、配管群のハンドルとレバーを操作できなかった。また、ハンドユニットの大型化により、外部環境との接触の可能性が増加し、樹脂部品の破損が頻発した。

(3) タンク壁面変状画像認識性能評価

図4にタンク壁面および変状を再現したテストピースボードを示す。Scottおよび小型ドローンが取得した画像からタンク壁面の錆およびフィールド各所のQRコード判読する画像処理プログラムを制作した。ロボットと画像解析用PC間でのデータ転送が手動であったため、操作に時間を要し解析時間を確保することができなかった。一方、小型ドローンの操作画面のスクリーンキャプチャー



図4：タンクエリア

画像を用いて画像解析を試みたが操作用アイコンなどを誤検知してしまい解析することができなかった。

(4) ダクト内進入および走行評価

図5にダクト内部の様子を示す。ダクト内部の点検には、Scottを用いることにしたが、ダクトの点検口から進入するために、Scottのサブクローラを外し全長を短くした。狭隘空間であるダクト内部でも十分に直進および旋回走行が可能であった。ダクト内部では、撮影対象物に対してロボット搭載カメラを正対できず、画像処理に適した画像を撮影することができなかった。



図5：ダクトエリア

4. まとめ

本報告では、本研究プロジェクトで研究開発を進めている点検調査ロボットScottの応用事例として、World Robot Summitトライアル参加およびカルバート管内点検について述べた。今後は、引き続き、World Robot Summitプラント災害予防チャレンジへの参加、フィールド実験で顕在化した問題点を改善し、ロボットシステムの事業化に向けて活動していく予定である。

参考文献

- 1) SPRINT Robotics Strategic Roadmap, <https://www.sprintrobotics.org/> (最終閲覧日：2020年4月25日)
- 2) 池田浩康, 高橋守人, 小松正則, 路面下空洞探査車による調査結果について, 開発土木研究所月報, No.552, pp.61-64, 1999.
- 3) J. N. Meegoda, et al., Monocular Visual Odometry for In-pipe Inspection Robot, Journal Teknology (Sciences & Engineering) , Vol.74, No.9, pp.35-40, 2015.
- 4) L. Liu, A Smart Tunnel Inspection Robot for the Detection of Pipe Culverts, Applied Mechanics and Materials, Vol.614, pp.184-187, 2014.
- H. Miura, et al., Field experiment report for tunnel disaster by investigation system with multiple robots, Proc. the 14th IEEE Int. Symp. on Safety Security and Rescue Robotics, pp.276-277, 2016.
- 5) H. Miura, A. Watanabe, M. Okugawa, S. Kurahashi, M. Kurisu, and T. Miura, Field Experiment Report for Verification of Abandoned Lignite Mines by Robotic Exploration System, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30, No.6, pp.1004-1013, 2018.12
- 6) H. Miura, A. Watanabe, M. Okugawa and T. Miura, 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.
- 7) 田所諭, 木村哲也, 奥川雅之, 他12名, WRSインフラ・災害対応カテゴリーの概要と成果, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.3, pp.224-234, 2019.
- 8) H. Miura, A. Watanabe, M. Okugawa, T. Miura and T. Koganeya, Plant Inspection by Using a Ground Vehicle and an Aerial Robot: Lessons Learned from Plant Disaster Prevention Challenge in World Robot Summit 2018, Advanced Robotics, Vol.34, Issue 2, pp.104-118, 2020.