

4. ロボット調査システムによるフィールド検証実験報告

奥川雅之・三浦洋靖・倉橋奨・落合鋭充

1. はじめに

老朽化が問題となっている社会インフラや危険な作業空間のある石油／製鉄／製造プラントに対する日常／定期点検作業、各種フィールド調査において災害対応ロボットに多く見られる遠隔操縦型調査ロボットの活用は、調査点検者の安全を確保するとともに、可視光／暗視／熱画像カメラや環境計測用センサを搭載することにより、現場の様子を迅速に収集することができる。その結果、防災減災に寄与するものと思われる。また、種々のデータがデジタル化されるため、調査記録のアーカイブが容易となる利点も挙げられる。特に、狭隘閉所空間に対する調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点検・メンテナンス、プラント危険箇所の調査など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。使用頻度の高い社会インフラやプラント用メンテナンスロボットに対して、災害対応ロボット技術への転用を図ることにより、災害対応ロボットの社会実装の実現につながるものと考えられる。本稿では、調査ロボットシステムの応用事例として、昨年度に引き続き、豊田市消防との連携訓練、岐阜県御嵩町亜炭廃鉱内調査、高速道路横断排水カルバート点検に関するフィールド実験結果を報告する。

2. ロボット調査システムの概要

調査ロボットScottは、全長720mm、幅390mm、高さ200mm、重量は約23kg（搭載物を除く）であり、2リンクのマニピュレータと前後左右に4本のサブクローラを有するクローラ型移動ロボットである。マニピュレータ先端には、カメラや各種環境計測用のセンサを搭載している。路面形状に合わせて可動する受動サブクローラを有しているため、進行方向および移動速度の指示のみで、高い不整地走破性と容易な操縦性を兼ね備えている。また、制御および通信部として、サンリットオートメーション社製のTPIPシステムを搭載しており、無線LAN経由によるロボットの遠隔制御やロボット搭載センサーの取得データやカメラ画像および音声の送信を行っている。図1に、フィールド実験で使用したロボットの外観を示す。



図1：左 調査ロボット（4号機）、右 ケーブル敷設ロボット（2号機）

我々が提案する調査ロボットシステムは、民間企業の利用を想定し、社会インフラ等の公共施設／設備や製造業の工場やオフィス等に対する、日常の点検調査と災害時の被害状況調査の両用を目指している。「誰でもすぐに調査可能、即座に報告」を達成するために、熟練度に依存しないロボットの操作、狭隘／閉所空間での調査、高品質通信の確保を実現し、ロボットによる各種調査結果の取得からレポート生成までをワンパッケージで提供するものである。調査活動では、現場の変状、引火性ガスの有無（濃度）など調査箇所に関する位置を特定

することが必要となる。本ロボットシステムでは、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) システムとして、ROS (Robot Operation System) 環境で利用できるHector SLAMを採用している。ローカルGIS (GIS: Geographic Information System) では地図データに温度、画像、音声などの調査情報も取得位置と共に記録することができる。また、ローカルGISと連携することで、調査結果レポートを自動作成することができる。

3. フィールド検証実験

3.1 豊田市消防連携訓練

本学と豊田市との包括連携協定にもとづいた活動の一環として、豊田市消防とレスキュー活動に対するロボット技術の活用について共同で検証を行っている。災害現場におけるロボット技術を活用した消防隊員の活動支援（ロボットとの協働による消防隊員の負担軽減）を目指し、消防機関が災害時（火災、地震、水難など）にロボットに必要とする能力の把握、他の災害対応ロボットとの差別化について、愛工大と豊田消防との連携を通じて検討しロボット (Scott) の研究開発を進めている。さらに、Scottをベースとする災害時の各種調査に活用できる調査ロボットシステムの社会実装（製品化、事業化）に向けた基盤確立を目指すものである。今年度は、第5回合同訓練として平成29年（2017年）12月9日に豊田消防本部中消防地下訓練施設にて実施した。地下災害を想定（2部屋、2名の要救助者、煙中環境下）し、第3回の際に作成したロボットを活用したレスキュー活動ガイドラインに従い同じシナリオにて訓練を実施した。調査ロボットとケーブル敷設ロボットの2台体制で実施した。ケーブル敷設ロボットにはオートリールを搭載。調査ロボットとケーブル敷設ロボット間は無線通信。コントロールボックス（操作卓をケースに収めたもの）を用意。装備としては、LRF、ガスセンサ、熱画像カメラ（バッテリー給電）、マニピュレータ（伸縮可能）、SLAMを実装した。

今回は、ロボットを利用したケーブル敷設、隊員との連携、特にロボット取得情報の提示内容の確認などを目的とした。2台体制によるロボットの投入は成功し、環境地図を作成することができ、要救助者の位置を特定することができた。しかし、オートリールを搭載したためロボットの重心位置が異なり、階段昇降に調整が必要であった。また、オートリールの制御がまだ不完全であったため、現地での調整が必要であった。そのため、メンテナンス時間を要し、訓練開始時間が遅くなった。また、隊員からは地下空間のより具体的な空間（部屋の広さや要救助者までの位置など）情報の提示を要求されたが、迅速に提示することはできなかった。一方、コントロールボックスの導入など、必要な装備をまとめた結果、セッティング時間は大幅に短縮することができた。



図2：第5回豊田消防連携訓練の様子（2017年12月29日に豊田消防本部中消防地下訓練施設）

3.2 岐阜県御嵩町亜炭廃鉱内調査

岐阜県御嵩町では、2010年10月20日に陥没事故が発生している。亜炭鉱は、その位置や規模を把握することが難しく、また比較的地表から浅い地下に掘られているため、地表が浅所陥没することで発見されることが多い^{1) 2) 3)}。

亜炭廃坑の埋戻しは、陥没事故を未然に防ぐとともに、陥没発生後は、被害拡大を防ぐために、地下空間内部に土、砂やモルタルなどの充填材を注入する。充填材の注入コストを見積もるために、地下空間の容積把握が求められている。しかし、このような特殊地下壕は、地下空間の地図だけでなく地下空間と地上との関係を示す地理空間情報が存在しない。現在は、崩落箇所から近傍の地下空間の状況を推測し、地表からボーリングにより地下空間まで穴を明け、そこからファイバースコープ調査により、内部状況を調査する作業を繰り返し、地下空間全体の容積調査作業が行われている。しかし、ボーリング手法では、その調査範囲に限界がある。一方で、特殊地下壕は、その特殊事情から、産業炭鉱と異なり柔らかい地盤に作られていることが多く、天井や壁面が崩れやすいことから、地下空間内部の調査には危険を伴うという問題がある。これらのことから、遠隔地から安全に地下空間内部を調査できる遠隔操作ロボット調査システムの活用が期待されている^{4) 5)}。

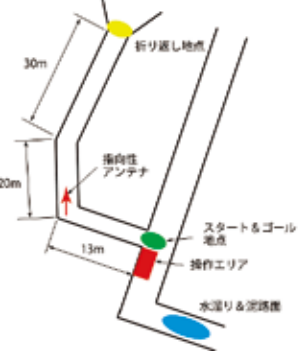


図3：亜炭廃鉱概要

岐阜県御嵩町の協力のもと2回（2017年9月8日、2017年9月25日）の検証実験を実施した。亜炭廃坑の概要を図3に示す。なお、今回の検証実験では、安全に配慮し、入口が整備されている亜炭廃坑にて検証実験を実施したため、陥没口からのエントリ検証は実施していない。今回は、廃坑内の環境地図作成の結果を中心に報告する。亜炭廃坑では、坑道については高精度な地形の環境地図の生成ができた。これは、壁面形状が一様ではなく、特徴点が明確であるため、地図更新時のマップマッチングが精度良く行えることが要因であると考えられる。一方で、レーザレンジファインダ（LRF）をロボットに固定すると、路面の凹凸によりロボットの姿勢が変動することで、レーザの照射角度が変わるため、路面の障害物が正確に捉えられない問題や、路面の凹凸が大きい場合には路面を障害物として認識してしまう問題が顕在化した。この問題に対して、ピッチ角およびロール角を制御し、常にレーザレンジファインダを水平に維持する用スタビライザを製作し、再実験を実施した。改善した結果、生成地図のマッチングがずれてしまう現象が解消できることを確認することができた。一方で、傾斜路の登りでは、路面を障害物として認識してしまうため、自己位置推定精度が劣化し、正確な距離が得られなくなることが判明した。傾斜路の下りでは、自己位置

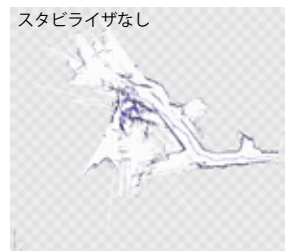


図4：作成した環境地図
(2017年9月8日、9月25日)

推定の精度が向上し、正確な距離の環境地図が生成できた。また、SLAMシステムにより作成した廃坑内の環境地図を図4に示す。亜炭廃坑のように、壁面が一様ではなく、特徴点が明確な場所では、SLAMにより高精度な地形の環境地図が生成できるため、暗所や未知の環境における路面障害物や内部構造の把握には、非常に有効であることを再認識した。

3.3 高速道路横断排水カルバート点検

社会インフラ設備の一例として、中日本ハイウェイエンジニアリング名古屋の協力のもと、名神高速道路養老ジャンクション付近の高速道路横断排水カルバート内の点検に関するフィールド実験を昨年度に引き続き2018年2月16日に行なった。点検対象のカルバートは、直径800mm、長さ60m、勾配が約5度で、下手側に堆積物がある状態であった。今回の目的は、パイプカルバートの歪み及び傾斜角の計測であった。図5に当日の様子を示す。計測値は概ね新地に近い値を得ることができた。図6には、カメラ映像をもとにした3D SLAMによる環境地図を示す。



図5：カルバート内点検検証実験の様子（2018年2月16日）

ロボットは遠隔操作により47m地点まで到達した。走行中のトラブルはなかったが、カルバート内壁の状態や歪みを計測するため停止している際、ロボットが沈下浸水し、走行不能状態となった。また、今回、有線通信ケーブルとしてモジュラーケーブルを使用した。ケーブルが水面に断続的な接触を繰り返す場合、通信帯域が不安定となることが確認された（完全にケーブルが浸水してしまえば問題はない）。

4. まとめ

本報告では、調査ロボットシステムの応用事例として昨年度に引き続き行った豊田市消防との連携訓練、岐阜県御嵩町亜炭廃鉱内調査、高速道路横断排水カルバート点検に関するフィールド実験結果について報告した。今回の検証実験を通じて顕在化した技術課題について、改善策の検討を行う予定である。改めて、検証実験の機会を設け、提案システムの有効性を検証していく予定である。

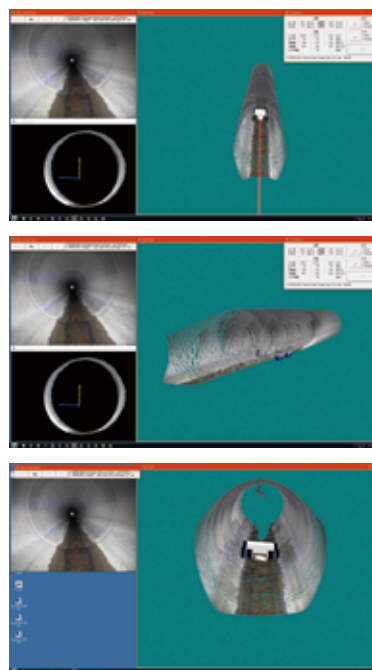


図6：3D SLAMによる環境地図

参考文献

- 1) O. Aydan, H. Tano, Sinkhole and Subsidence Above Abandoned Mines and Quarries Caused by the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011 and Their Implications, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.12, No.4, pp.229-248, 2012.

- 2) 川本, オメル, 負の遺産としての亜炭採掘跡空洞, 地盤工学会誌, Vol.57, No.6, pp.28-31, 2009.
- 3) A. Sakamoto, N. Yamada, K. Sugiura, T. Kawamoto, Some Examples of Cavity Filling Along Transportation Routes Above Abandoned Room and Pillar Lignite Mines in Tokai Region, Post-Mining, 2005.
- 4) 久間ほか, 遠隔操作型ロボットを用いた佐渡金銀山坑道探査: 鶴子銀山編, 技術史教育学会誌, Vol.14, No.2, pp.43-48, 2013.
- 5) D. N. Ray, R. Dalui, A. Maity, S. Majumder, Sub-Terranean Robot: A Challenge for the Indian Coal Mines, The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering, Vol.2, No.2, pp.217-222, 2014.