

## 4. 社会インフラなどの点検および災害調査を想定したロボットシステム

奥川雅之・倉橋奨・落合鋭充

### 1. はじめに

阪神淡路大震災（1995年）やニューヨーク同時多発テロ（2001年）の発生を契機に、災害対応ロボットの必要性が認識され、研究開発が活発に行われるようになった。東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所事故の際、ロボットが投入され被害状況の調査が行われ、災害対応ロボットの有用性が再認識された。特に、放射線量の高いエリアのような極限環境下での遠隔操縦型移動ロボットの活用は、調査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、被災現場の様子を迅速に収集することができる。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。これら災害対応ロボットの要素技術は、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/定期点検作業に要求される要素技術と共通点が多い。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、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. トンネル災害調査ロボットシステムの概要

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（図1）。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。

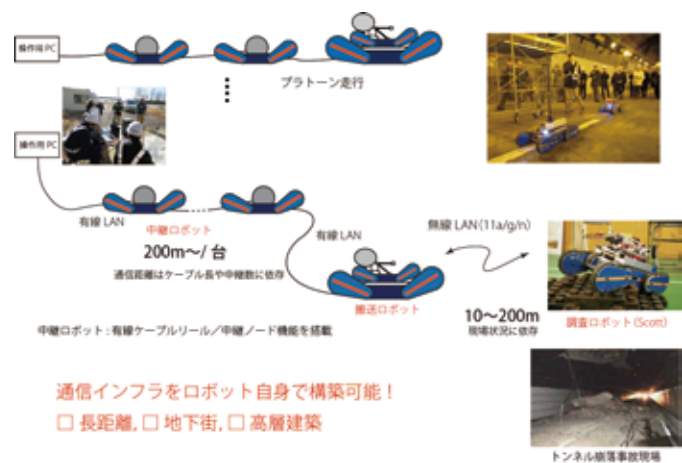


図1 トンネル災害調査ロボットシステム概要

### 3. フィールド実験

#### 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。過去に、2015年8月22日（第1回）、2016年2月23日（第2回）に実施した実績がある。今年度は、2回の連携訓練を実施した。第3回連携訓練は、2016年11月5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、ロボットを活用したレスキュー活動のガイドライン作成について検討および検証を行った。図2に当日の様子を示す。消防隊員からは、有線通信ケーブルは救助捜索活動にはガイドとなるため有効であるとの意見があった。一方で、ロボットの接触や破壊が気になったとの意見もあった。

- (i) ロボットを投入した可燃性ガス濃度測定、要救助者の有無（熱画像）および場所の特定
- (ii) 消防隊員による救助活動（1室目）。ロボットは現場の様子をカメラ映像にて本部に中継
- (iii) 消防隊員による消火および救助活動（2室目）



図2 第3回豊田消防連携訓練の様子（2016年11月5日、豊田消防本部中消防地下訓練施設）

第4回連携訓練は、2017年2月23日に豊田消防本部中消防屋内訓練場にて実施した。屋内訓練場の床下を工場床下と見立て、狭隘空間での捜索/救助を想定した訓練を行った。訓練シナリオは「工場床下清掃中の作業員1名と連絡が取れなくなり、現地作業員での救出が困難であるとの通報により、消防隊員による一般救助出動要請があった。関係者ヒアリングにより清掃用有機溶剤の使用を確認、消防隊員の安全性を確保するとともに、狭隘空間かつ暗所環境下での要救助者捜索が必要なことから災害対応ロボットの出動要請を本学に行うこととなった」を想定した。今回の課題は、「ロボット活用の判断/要請タイミング」、「投入/回収までのプロセス」、「民間人の立ち入り制限のある災害現場での連携方法」、「災害対応ロボットを活用した消防活動の実施と評価」を検証することとした。当日の訓練は以下のような手順で実施した。図3に当日の様子を示す。消防隊員からは、映像やセンサの活用により迅速な要救助者の発見につながるの、とても効果的である、ロボット搭載カメラによる現場の中継はかなり有効であるとの意見をいただいた。

- (i) 状況把握、ロボット活用判断/要請
- (ii) ロボット投入方法レクチャー
- (iii) ロボットによる捜索（有線通信、熱画像カメラの利用）、要救助者発見（およそ30m先）
- (iv) 救出活動（ロボットは搭載したカメラにて消防隊員の活動監視）
- (v) 救出完了、ロボット回収



図3 第4回豊田消防連携訓練の様子（2017年2月23日に豊田消防本部中消防屋内訓練場）

### 3.2 亜炭廃鉱内調査

岐阜県御嵩町では、近年、陥没事故が発生している。亜炭鉱は、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。地表の崩落により発見された亜炭廃鉱は、内部に充填材を注入して埋め戻す作業を行うが、この作業には、注入する充填材の量を予め推測することが必要であるため、地下空間の容積の把握が求められる。しかし、発見された亜炭鉱では、新たな崩落の危険があることから、人が内部に侵入して調査することができない問題がある<sup>1) 2)</sup>。このため、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て、地下空間全体の容積を把握する作業が行われている。亜炭空洞の浅所陥没が発生した場合、引き続き周辺へ陥没が拡大するかの危険性評価は、空洞内の観察を実施することによる判定結果が大きなウェイトを占める。浅所陥没発生時、陥没孔が空洞内部まで連続していても直ちに立ち入り内部観察を行うことはきわめて大きな危険を伴う。そこで、遠隔操作型ロボットによる陥没箇所内部の状況確認が期待されている。岐阜県御嵩町の協力のもと、実際の亜炭廃鉱内部調査に対するロボットシステムの検証機会を得ることができた。2回（2016年11月21日、2017年1月16日）の模擬フィールド実験を行い、2017年3月6日に現地（岐阜県御嵩町比衣地区亜炭廃鉱）にて検証実験を実施した。当該環境の特殊状況として、「狭い浅所陥没口」、「高湿度の雰囲気」、「狭隘／暗所環境」、「湧き水と炭粉の泥」、「入り組んだ坑道」、「崩落瓦礫による急な不整地傾斜路」「無線通信が困難な環境」などが事前調査により確認された。必要とされる技術要件と課題は、（1）狭い陥没口および走行侵入できない場所へのロボット投入、（2）高湿度や湧き水のある環境への適応、（3）滑りやすく、急傾斜路面への適応、（4）地下空間地図の生成、（5）遠隔通信方法の確立、（6）地上からの地下位置特定方法の確立などが挙げられる。

図4に投入口からのロボット投入をイメージした実験の様子を示す。ロボットの投入に要した人員は、7人であった。用意したエントリ機材を用いることで、概ね目的を達成することができた。一方で、ロボット重量に対して、足場とした脚立が軽量であったため、人手で押さえる必要があった。また、2人で2本のロープを操作する必要があったため、昇降時に双方のバランス調整が難しく、昇降に時間を要する結果となった。さらに、転落の危険を伴う可能性があることが確認された。

図5および6に亜炭廃鉱内部での実験風景を示す。見通しの良い廃鉱内では、50mの無線通信が可能であることを確認することができた。



図4 ロボットの投入

ロボットにより取得されたカメラ画像情報を情報管理システムに送信可能であることを確認した。空洞内部では泥質な路面状況もあったがロボットの移動等の基本性能を確認することができた。暗所では、熱画像や赤外線カメラが調査結果の取得だけでなく、遠隔操作にも有効であった。空洞内部のレーザ測位により環境地図の作成ができたが、路面の凹凸が大きい場所では生成された地図にズレが生じることが確認された。

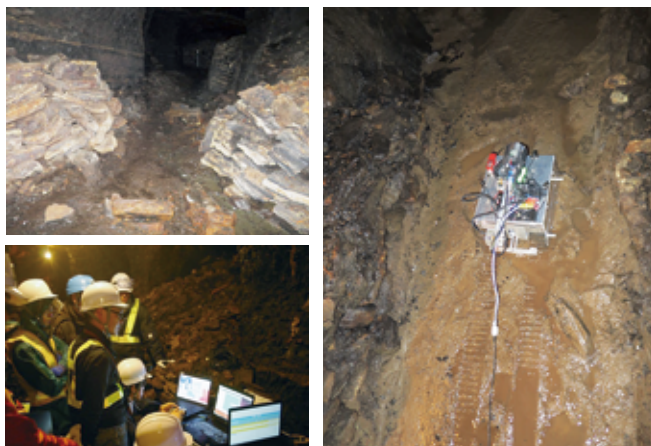


図5 亜炭廃鉱内実験風景（2017年3月6日）

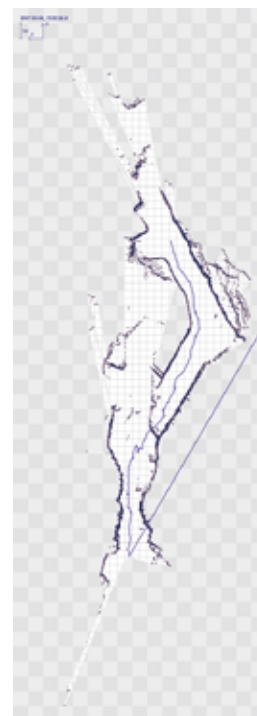


図6 SLAMによる地図作成

### 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をイメージしたフィールド実験を2017年3月1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15度で、下手側に堆積物がある状態であった。図7に当日の様子を示す。堆積物の確認および内壁の点検はロボットに搭載されたカメラ映像にて目視することができた。しかし、点検者側から要望のあった勾配の計測は、センサの不具合のため、実施することはできなかった。



図7 カルバート内点検検証実験の様子（2017年3月1日）

## 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実施し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その主旨や実施概要、得られた成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、整理し、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。

### 参考文献

- 1) 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.
- 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.