

## 5. トンネル災害調査を想定した調査ロボットシステム

奥川雅之・中村栄治・山本義幸・倉橋奨・落合鋭充

### 1. はじめに

1980年頃、アメリカでは、道路や橋梁など社会インフラの老朽化に伴う事故の可能性が指摘された<sup>1)</sup>。これら社会インフラの崩壊や機能不全は人命や社会に大きな影響を及ぼすため、点検／補修保全作業の重要性が指摘され、維持管理費予算が計上されるようになった。国内でも、20年後には高度成長期以降に整備されたインフラ設備が建設後50年となるため、適切な維持管理の必要性が望まれている。しかし、維持管理技術者の高齢化による人材不足や技術の継承が不十分である点が懸念されている。また、現状の日常点検頻度は、急激な劣化進行等の異常を把握するためには十分ではなく、目視点検が困難な箇所も存在する。さらに、災害時においては、緊急点検に時間を要し、迅速な復旧が困難であるといった課題が指摘されている。2014年から国土交通省と経済産業省が連携し、社会インフラ構造物に対するロボット技術応用を推進するプロジェクト「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」が始まった<sup>2)</sup>。本報告では、昨年度に引き続き、本プロジェクトの災害調査技術（トンネル災害分野）に選定された「受動適応クローラロボットによる災害調査システム」について、平成27年11月5日に国土技術政策総合研究所内実大トンネル実験施設で実施した第2回現場検証実験の結果を中心に述べる。

### 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）。具体的には、ケーブル

オートリールを搭載した群ロボットにより有線LANケーブルの敷設を行うとともに、無線アドホックネットワーク構築を行うことを特徴としている。先頭の搬送ロボットは、調査ロボットを搭載して移動し、調査現場付近では、調査ロボットが自走で搬送ロボットから降りて調査を開始する。中継ロボットは、搭載したオートリールによりLANケーブルを敷設しながら搬送ロボットに追従（プラトーン走行）する。搬送ロボットは、無線LANアクセスポイント機能も有しているため、調査ロボットは近距離の無線LANにより搬送ロボットと通信を確立することで操作用PCとの長距離通信を行うことができる。さらに、ロボット群により、通信状況に応じて中継ノードを移動することができるため、通信環境の最適化や通信障害に対するネットワーク環境の動的かつ適応的な再

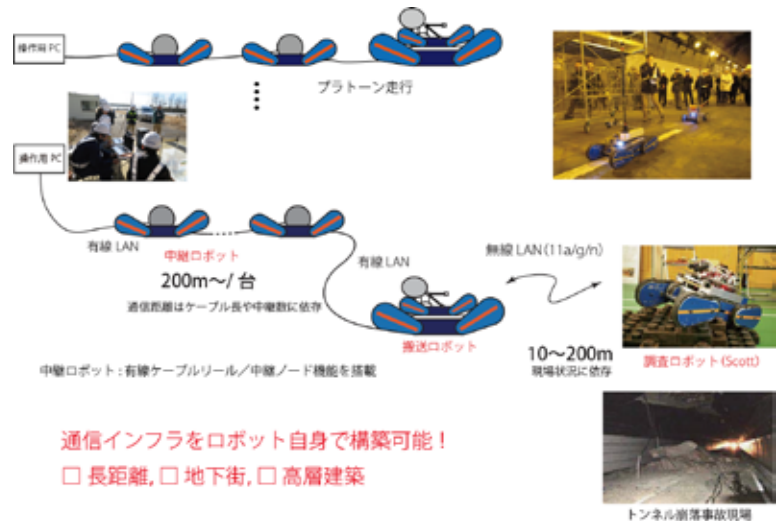


図1 トンネル災害調査ロボットシステム概要

構築を可能にし、通信品質の頑健性、耐障害性、さらには適応性を有する。一方、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。現場検証実験では、これらの機能について検証を行った。

### 3. 現場実証実験

#### 3.1 実験概要

提案システムに対する現場検証を目的として、つくば市にある国土技術政策総合研究所内の実大トンネル実験施設にて、第1回：2015年1月7日（水）と第2回：2015年11月5日（木）の2回の機会が提供された。第2回目では、具体的なシナリオが用意された。その上で、トンネル内部の状況（車両の有無、損傷の有無、火災発生の有無、湧水の有無等）とその位置の把握、トンネル内の引火性ガス（実際は発電機の排ガス（CO）濃度）の濃度把握、覆工コンクリートの剥離部分の大きさ状況および湧水箇所の詳細情報の取得が調査事項として設定され、速やかな調査報告も検証条件に含まれていた。実験フィールドは、図2に示すような全長700mの模擬トンネル施設内に変状が設けられ、内部の詳細は非公開で実施された。障害のない区間（400m）の後に、状況調査性能確認としてポータブル発電機と水が滴下する設備が用意されていた。その後、不整地踏破性能確認として砂利と土砂の路面、損傷状況調査性能確認として天井崩落を模擬した天井と瓦礫が散乱した路面、狭隘走破性能確認としてアルミ足場5台、自動車6台が用意されており、最終箇所には通信性能確認としてアルミシートが張られた遮蔽物が設置されていた。

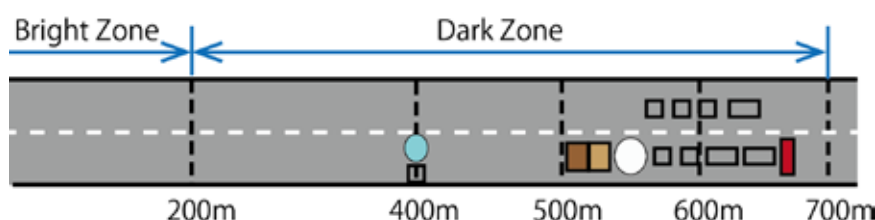


図2 実験フィールド概要：第2回現場検証実験

#### 3.2 システム構成

今回は、図3に示すように、調査ロボット1台、搬送ロボット1台、中継ロボット2台（A/B）の4台のロボットを用意した。調査ロボットは、カメラ4台、センサ3種類（CO<sub>2</sub>、温度、マイク）、照明3カ所、調査用マニピュレータ、レーザーレンジファインダ（UST-20LX：北陽電機、検出距離：20m、走査角度：270度）を搭載している。ガス濃度測定器（理研計器GX-2009）を搭載し、計器表示の画面を搭載カメラで確認できるようにしている。当日の人員配置は、全体総括1名、ロボット制御総括1名、ソフトウェア総括1名、通信システム総括1名、ロボットオペレータ4人、SLAM/GISサーバ管理に3名、調査作業補助1名の合計12名体制で実施した。図4にオペレーションルームの様子を示す。

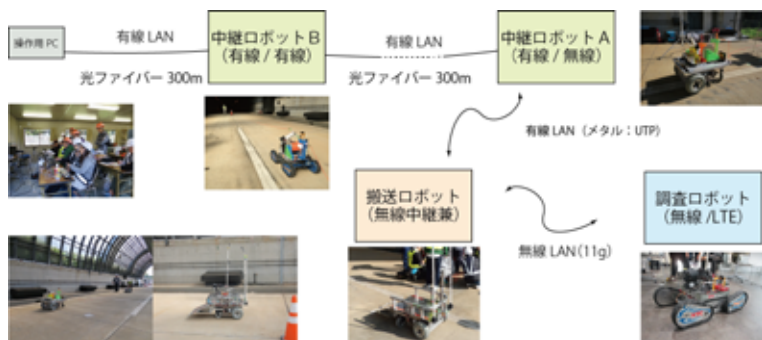


図3 ロボットシステムの構成



図4 オペレーションルームの様子

### 3.3 実験計画

要素技術検証として、無線LANのみの通信環境下で、搬送ロボットと調査ロボットを用いて、カメラおよびセンサ、SLAMシステム、GISシステムとの連携による調査結果レポートの自動作成システムの確認を行うこととした。操縦PCと搬送ロボット間は、操縦エリアに大型指向性アンテナ（WLE-HG-DYG, Buffalo）設置し、無線LAN（IEEE801.11g）による通信とした。また、併行して、2台の中継ロボットを用いて、光ファイバケーブルの敷設検証も行うこととした。システム全体の検証としては、4台のロボットを用いた群ロボットによるハイブリッド通信システムの機能および動作検証を実施することとした。

### 3.4 実験結果

〔調査ロボット／搬送ロボット（無線通信）〕トンネル入口から、搬送ロボットに調査ロボットを搭載し、移動を開始した。350m地点で無線LANが不安定になったため、入口に設置した指向性アンテナの調整しながら調査を続行し、395m地点で湧水設備を発見した。同一地点にて発電機も発見し、調査ロボット搭載のガス濃度測定器にてCO値157ppmを確認した。

〔中継ロボットA／B（有線通信）〕トンネル入口から、中継ロボットAとBによる有線ケーブル敷設を行った。開始から5m地点で、中継ロボットBのケーブルドラムにケーブルのたるみが発生した。ケーブル送出／巻取機構のドラム回転をロボットの移動速度により制御していたが、始動と停止の指令を繰り返すことで互いの制御量の差異が累積したことが要因であった。ロボットを連続走行させることで、ケーブルの送出は順調に行えることを確認した。その後、200m地点で中継ロボットBの駆動モータに異常が生じたため、中継ロボットBをその場に待機させ、中継ロボットAのみでケーブル送出を開始した。400m付近の湧水設備へ到着したが、送出したケーブルの張りが強すぎるため、ロボットの移動速度とケーブルドラム送出量の調整を行い、445m地点まで移動後に実験を中断した。要素技術検証に要した実質時間は1時間であった。

〔システム検証（有線／無線ハイブリッド通信）〕システム検証は、要素技術検証の後に引き続き実施したため、調査ロボット単独で454m地点から調査を開始した。調査ロボットとの通信は、要素技術検証で敷設した有線／無線ハイブリッド通信を用いた。開始直後から無線電波状況の悪化により調査ロボットとの通信が不調となったが、調査を続行し505m地点で砂利エリア、525m地点で砂エリアを発見した（システム検証を優先したため、踏破は未実施）。525m地点で再度LRFとの通信の不調が発生したため、以降のLRF使用を断念した。565m地点で天井崩落箇所を発見し、調査ロボットで崩落瓦礫を踏破した。その後、調査ロボットが駆動機構の不調から走行不能となったが、システム性能の検証を続けるために調査ロボットを台車に乗せて調査を継続した。調査ロボットからの通信に遅延が発生したが、600m～630m付近でアルミ足場と自動車の車列を発見、自動車のナンバープレートを確認した。650m地点で遮蔽物に到達できたが、通信の不調から700m地点までは到達できなかった。システム検証に要した実質時間は、1時間30分であった。



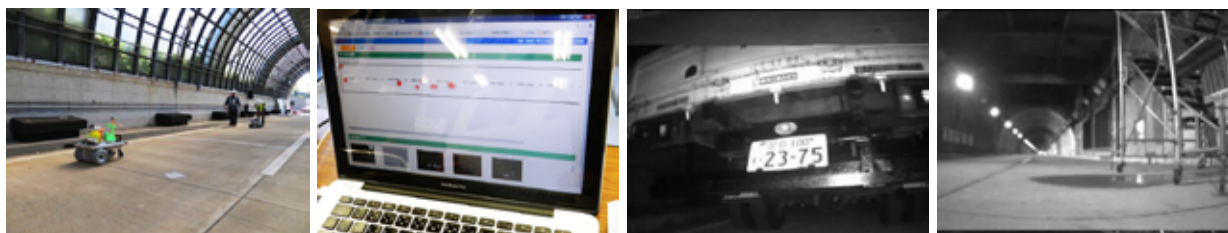


図5 検証実験の様子（左から、ケーブル敷設、ローカルGIS画面、取得画像：ナンバー、取得画像：湧水箇所）

### [知見と教訓]

2回のトンネル実験の実施によって得られた知見と教訓をあげる。

- ・トンネル壁面付近などの無線電波強度の不安定な環境では、無線中継ノード機能を有した中継ロボットを移動が、電波強度や通信の安定化に有効であることを確認した。
- ・災害調査を想定した場合、調査現場において結果を即座にレポートとして出力できることは、迅速な対応計画の策定に有効であることが確認できた。この機能は、通常点検にも応用可能である
- ・遠隔操縦による未知な環境の調査では、視覚的に変状の有無を把握できることが重要であることが分かった。このため、調査ロボットには、広範囲を明るくできる照明が必要である。また、水漏れなどの把握は、カメラ映像による視覚では認識が難しいため、音によるセンシングが必要であることも分かった。
- ・群ロボットによる調査システムで効率的な調査を行うには、各ロボットおよび群ロボットシステムの状態（通信、バッテリー、センサ、カメラなど）を容易に確認できる手段を講じるのが肝要である。
- ・ロボット調査には、技術の専門知識を有したスペシャリストの存在が重要であることが分かった。今回は、ロボット制御と通信のスペシャリストを技術総括スタッフとし、さらに全体総括スタッフも配置した。このため、ロボットに生じた機械や通信の不具合に対して迅速に対応することができ、トラブルによる時間ロスを少なくすることができた。また、インフラ関係者のオブザーバ参加により適切な調査活動を行うことができた。

今回の現場検証実験で得られた教訓は、実験計画立案の重要性であった。フィールド実験は、時間的な制約下で実施するため、トラブルを考慮した無理のない検証項目および時間配分について検討することが肝要であった。

## 4. まとめ

本報告では、トンネル災害調査における技術要件をもとに我々が提案する調査ロボットシステムの基本コンセプトおよびシステム構成を紹介し、現場検証実験の結果について述べた。今回のフィールド実験実施により、ロボット駆動機構の頑健性、ケーブル送出/巻取時の張力調整の必要性、ロボットの状況把握の重要性、トラブル発生時の整備性、群ロボットの追従手法の確立など新たな課題が顕在化した。一方で、群ロボットによるハイブリッド通信インフラの構築、無線中継ノード移動による通信品質向上、SLAMおよびGISを用いた情報収集と調査結果の自動レポート作成といった提案するロボットシステムの有効性を確認することができた。しかし、ロボットの走破性、群ロボットの追従性やケーブル敷設の操作性、トンネル災害時に想定される無線電波の干渉及び劣化については、今回の実験条件では十分に検証することができなかった。また、運用面ではスタッフ構成の重要性も判明した。今回の実験では、4台のロボットをすべて別々のスタッフが操縦したために、総括担当やトラブル対応の担当を含めると多くの人員が必要であった。必要最小限の人員で運用できるように自動化を進めることが重要な課題であることを再認識した。国交省からは、「課題が解決されれば、活用を推奨する」との評価結果を得た。今後は、今回の実験で顕在化した課題について解決策を検討し、ロボットによる調査システムの精度向上を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) America in Ruins: The Decaying Infrastructure, Duke University Press, 1983.
  - 2) 次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム ～現場実証ポータルサイト～, <http://www.c-robotech.info/>
  - 3) S. Suzuki, S. Hasegawa, and M. Okugawa, Remote Control System of Disaster Response Robot with Passive Sub-Crawlers Considering Falling Down Avoidance, Robomech Journal, Vol. 1, No. 20, 2014.
  - 4) 羽田他 4 名, 災害対応探索ロボット群の長距離遠隔操縦のための有線・無線統合型アドホックネットワーク, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 4, pp. 1204-1214, 2010.
- 鈴木他 4 名, 受動適応クローラロボットによる 災害調査システム: トンネル災害調査現場検証実験報告, 第33回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2015) 講演概要集, Paper No. 3K1-02, 2015.