

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・倉橋奨

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ストラクチャー（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¹⁾。そのため、点検作業や補修保全作業が重要とされ、インフラに対する維持管理費予算が計上されるようになった。日本国内では、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年となり、その割合が加速度的に高くなる。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ことから、適切な維持管理の必要性が望まれている。しかし、維持管理を担当する技術者の高齢化による人材不足が指摘されている。また、維持管理に必要な技術の継承が不十分であると指摘されている。主要なインフラ構造に関しては、数年毎に定期的な点検を行っているが、その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、さらに、目視点検が困難な箇所も存在する。さらに、災害時には、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。このような背景から、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研究開発プロジェクトとして、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」が始まった²⁾。

本報告では、「次世代社会インフラ用ロボット開発」における災害調査技術（トンネル災害）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」の紹介と国土技術政策総合研究所内実大トンネル実験施設で行った検証実験結果について述べる。

2. トンネル災害調査

高速道路や一般道路トンネル内で生じる玉突き事故や自然災害によるトンネル崩落事故が発生した場合、衝突車両などの狭隘空間（車内に取り残された被災者）、トラック横転による積荷散乱（タンクローリーの場合：毒性／引火性ガスもしくは液体の漏洩）、自動車渋滞、事故車両からの引火性ガス漏洩、コンクリートや土砂などがれき散乱、付帯設備の落下（天井版、ファン、照明等）等の状況が想定される。火災や爆発の危険性があるために、初動調査として、遠隔操縦型のロボットを利用し被害状況を調査することが期待される。調査する際、以下の項目が要求される。

- (1 a) 容易で確実な被害状況の調査、被災者の所在確認および調査箇所の特定制（状況／位置把握）
- (2 a) ロボットの長距離移動（長距離通信環境、狭隘空間、複雑な経路の移動能力）
- (3 a) 崩落箇所の把握、可燃性ガスの有無及び濃度測定（危険度の判断）
- (4 a) 被災状況の調査報告

トンネル内で、大規模な災害が発生した場合（トンネル崩落、交通事故によるトンネル火災、掘削作業時の事故等）、その状況把握は迅速性が要求されることから、発生直後には、人の立ち入りが困難な環境下における高精度の状況把握技術が期待されている。その実現のため、以下のような技術課題を設定した。

- (1 b) 操縦が容易かつ高い悪路走破性を有する調査ロボットの開発
- (2 b) トンネル内における安定した長距離通信環境の構築（カーブ、閉鎖空間）
- (3 b) 防爆性の保証（爆発要因とならない）
- (4 b) 調査結果の見える化（地図へのマッピング、レポート生成）

3. システム概要

提案する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（交通機関やガス、通信設備、上下水道、発電所や石油コンビナートなどを含む）や製造業の工場やオフィス等に対して、平常時の点検調査と災害時の被害状況調査を目的としたものである。そのために、「誰でもすぐに調査可能、即座に報告」を目指し、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、遠隔操縦ロボットによる各種計測／調査／モニタリング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。ロボットによる調査システムの基盤技術として汎用的な利用展開を目指す。具体的な特徴は以下の3項目である。

- (i) 受動適応性を有するクローラ型移動ロボット
 高い悪路／狭隘空間走破性、柔軟なシステム環境開発（TPIPシステム）
- (ii) ロボット群により、遠隔から安全に通信インフラを構築
 群ロボットによる長距離通信インフラ構築（有線／無線ハイブリッド通信システム）
- (iii) 取得データの動的かつ有効的利活用
 取得データのGIS（屋内外）への動的なマッピングおよび調査レポート自動作成

本システムのベースとなる受動適応クローラ移動ロボットScott（Scouting Crawler Robot Technology）は、サブクローラが路面形状に合わせて可動する受動サブクローラを採用することで、進行方向及び移動速度のみの指示で不整地踏破が可能である³⁾。

トンネル内で災害が生じた場合、迅速に被害状況を把握することが要求される。特に、調査者の二次災害の危険性を避けるために、遠隔からの調査が有効であり、そのためには、即座に、ローカルエリアネットワークを構築する技術が要求される。既存の可搬型長距離無線LANシステムパッケージがあるが、その重量は決して軽いものではなく、その設置も人手を要する。そこで、Scottをベースとした遠隔操縦ロボット群による通信インフラ構築システムを提案する。図1にシステムの概要を示す。

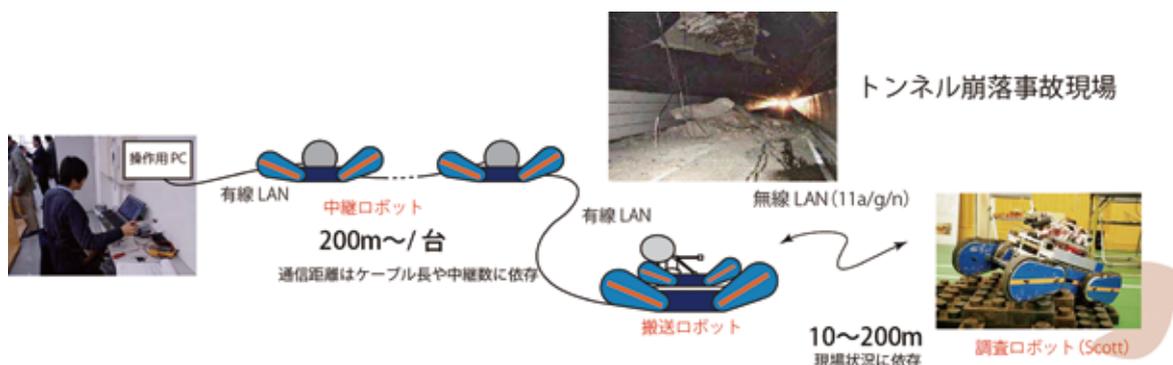


図1：システム概要

提案する遠隔制御ロボット用通信システムは、IP通信を基本としているために、有線／無線LANが混在したハイブリッドシステムを提案するものである。複数の中継ロボットにより有線LANケーブルの敷設を行うことにより、安定した高品質通信の確保及び通信距離の拡張だけでなく、無線LAN環境の動的変更（無線LANアクセスポイントの移動）による頑健性、中継地点におけるモニタリングなどを可能とするものである。

調査開始時は、調査ロボットを搭載した搬送ロボットを先頭に、中継ロボットが追従し（プラトーン走行）、操作用PC側の中継ロボットからケーブルを送出していく。搬送ロボットが調査現場付近に到着したら、調査ロボットは、搬送ロボットから発進する。各ロボットは、LANケーブルドラムを搭載し、ケーブルを排出しながら

ら移動する。先頭のロボットは無線LAN通信用のアクセスポイント機能を有するとともに、調査用ロボットを搬送する。調査ロボットは、比較的近距离の無線LAN通信を確立すれば良い。類似の技術として、国際レスキューシステム研究機構を中心に「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」が提案されている⁴⁾。調査用ロボットが牽引するトレーラーに搭載されたケーブルドラムと通信ユニットが一体となった中継モジュールを敷設していくものである。我々の提案手法と異なる点は、中継モジュール自身が自走可能な点である。その結果、中継地点の移動が可能であるだけでなく、中継地点での様子を観測することもできる点に優位性を有している。

4. 現場実証実験

2015年1月7日(水)に国土技術政策総合研究所の実大トンネル実験施設にて、2012年12月に発生した笹子トンネル天井板落下事故を想定した現場検証を行った。実験を行ったフィールドを図2に示す。今回の実験では、調査ロボットと中継ロボットを1台ずつ計2台で実験を行った。中継ロボットに200mの光ファイバケーブルを搭載している。

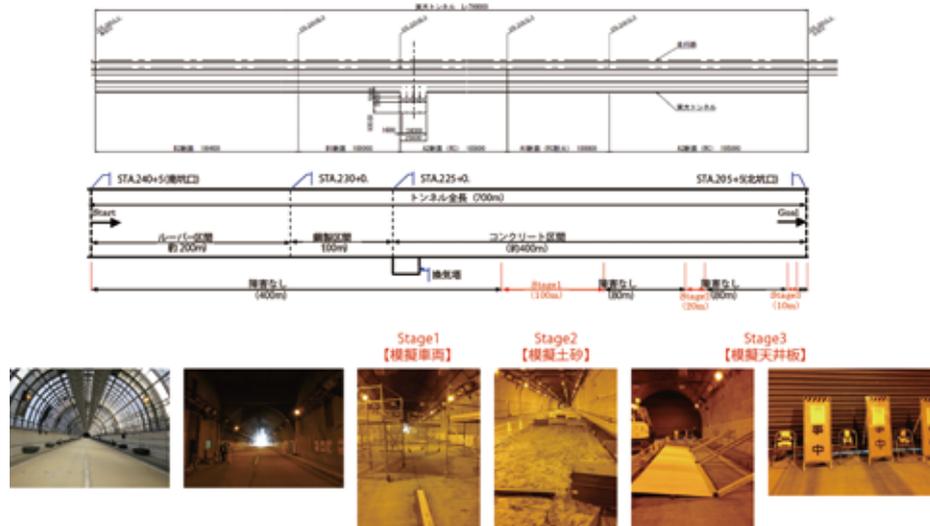


図2：実験フィールド（国総研模擬トンネル実験施設）

図3～5に各ステージにおける実験の様子を示す。表1には、各ステージにおける結果の概略を示す。



図3：左／中 プラトーン走行および調査ロボットの無線通信走行の様子、右：障害箇所と一部裂けたケーブル



図4：ステージ1およびステージ2区間走行時の様子

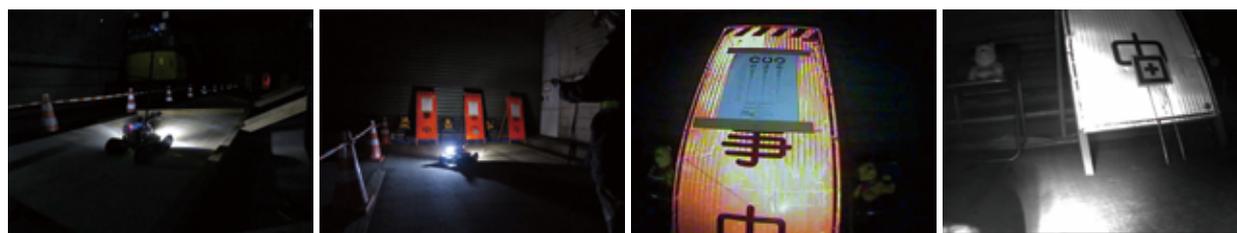


図5：ステージ3区間の様子、左から、障害走行、ターゲット撮影中、カラーカメラ（LED照明）、赤外カメラ（対象前）

表1：各ステージにおける実験結果概略

区間	検証項目／結果	トラブル
0～400m 群R	有線/無線ハイブリッド通信システムの確認	ケーブル表面が一部裂けた 巻取に時間を要した(30分)
	有線200m、無線200m合計400m走破	
ステージ1 暗所、群R	無線LAN通信品質の確認	バッテリー交換 ケーブル送出に障害 光ファイバ断線：通信障害
	特に影響無し	
ステージ2：土砂 暗所、群R	走破性能（調査ロボット）の確認	メンテナンスに時間を要した (1時間45分) 通信障害があった
	砂がクローラ部に入り込みリタイヤ 通信断絶を確認。中継ロボットを移動し復帰	
ステージ2：砂利 暗所、単独R	走破性能（調査ロボット）の確認	メンテナンスに時間を要した (45分)
	砂利がクローラ部に入り込みリタイヤ	
ステージ3 暗所、単独R	走破性能、調査機能、稼動時間、暗所映像撮影の確認	左メインクローラが不調(整備不良が原因)
	障害を走破、ターゲットの撮影成功	
ステージ2 照明有、単独R	走破性能（中継ロボット）の確認	サブクローラプーリのフランジが外れた
	土砂／砂利ともに走破	
その他 ローカルGIS	基本システムの動作、自己位置推定精度、SLAM 構築精度の確認	一部データに不具合(SLAM)、 ネットワーク設定不具合(GIS)
	ローカルGISおよびSLAMシステムの動作確認。 地図生成に成功。自己位置推定未実装	

5. まとめ

今年度は、各要素技術の検証が目的であった。しかし、システムが完成していない状態で、現場検証計画書で提示された実験を優先的に実施したため、本来の目的である個々の要素技術の検証を行う時間がほとんど取れなかった点が大きな反省点であった。基本システムの動作は概ね良好であった。実用化に向けて、それぞれの要素で顕在化した課題を整理し、適した対策を行う予定である。一方で、ロボットの走破性の検証やトンネル災害時に想定される無線電波の干渉及び劣化の検証は、今回の実験条件では確認することができなかった。実用化に向けて、これらの検証も重要な項目であると考えている。

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) 羽田靖史, 滝沢修: 情報収集用災害対応ロボットのための通信技術開発, 情報通信研究機構季報, Vol. 57, No. 1, pp. 109-127, 2011