

大学を中心とした災害対応ロボットへの取り組み

■東北大学大学院工学研究科 准教授 ながたに 永谷 けいじ 圭司

1. はじめに

本稿は、建設ロボットに関連する大学の取り組みについて紹介することを目的としていますが、これまでの建設ロボット分野の技術開発については、主にゼネコン各社や建設会社、建機メーカーが中心となって進められており、大学のロボティクス関連の研究機関が直接参画する建設ロボット分野の研究開発事例は、あまりありません。

例えば、雲仙普賢岳に代表される遠隔施工技術の研究開発については、現在、RTK-GPSを用いた情報化施工など、非常に高度なロボット技術が採用されていますが、大学のロボティクス関連の研究機関は、これらの研究開発に直接関与していないのが現状です。

一方、1995年の阪神淡路大震災において、「ロボット技術が全く役に立たなかった」という反省から、2000年以降、複数の災害対応ロボットの研究開発プロジェクトが複数立ち上がり、被災地の被害状況等を確認するための遠隔操作型の移動ロボットや飛行ロボットの研究開発が進められました。この中でも、NEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト（2006～2011年）において開発された不整地移動ロボットQuinceは、福島第一原子力発電所で発生した炉心溶融を伴った原

子力事故において、原発建屋内の探査に利用されました。このように、災害対応ロボットに関する研究開発は、近年、複数の大学の研究機関で進められており、徐々にですが、成果が実りつつあります。

このような背景の下、2013年4月の「建設ロボット技術に関する懇談会からの提言」では、第4章「建設ロボット技術の開発・活用の必要性と目標」で、災害対応のためのロボット技術の必要性が唱えられました。これにより、大学を中心として進められてきた災害対応ロボットの研究開発の取り組みが、建設ロボット分野においても、今後は求められていくと考えられます。

そこで本稿では、建設ロボット分野に対する大学発のロボット技術の貢献について議論するためにも、筆者が関わったこれまでの災害対応ロボットへの取り組み事例を紹介したいと思います。

2. レスキューロボットの研究開発

日本で本格的に災害対応ロボットに関する研究開発が始まったのは、2002年、文部科学省からの委託事業として開始された「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」内の「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」¹⁾でした。このプロジェクトでは、田所諭教授（現 東北大学）がリー

ダーとなり、都市型震災が発生した際に被害を軽減するための、飛行ロボット、瓦礫上移動ロボット、瓦礫内移動ロボット、ロボットのための通信技術、被災情報収集技術などの研究が進められました。筆者も、瓦礫上移動ロボットによる被災環境マップの生成というテーマで、このプロジェクトに参加しましたが、レスキュー活動に対するロボット技術の導入の難しさと、このテーマの継続的な研究開発の必要性を痛感しました。

上記のプロジェクトが終了した後の、2006年から2011年にかけて、NEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」(リーダーは、同じく田所論教授)²⁾が、新たに立ち上がりました。このプロジェクトのミッションは、被災した建造物内(地下鉄、地下街、高層ビルなど)の情報収集でしたが、実質的には、地下鉄サリン事件のようなテロが地下街で発生した際に、人の立入りが困難な環境を探索するためのロボット開発が目標でした。

筆者は、このプロジェクトにも参画し、移動ロボットシステムのデザインや、ロボットの遠隔操作アシストシステムに関する研究開発を行いました。このプロジェクトが目指すロボット探査システムのイメージを図-1に示し、以下に、このプロジェクトの概要を紹介します。

目標とする探査ミッションを達成するために、移動ロボットに求められる要素技術には、不整地走行技術、遠隔操作技術、環境情報収集技術、通信技術が挙げられます。以下に、このプロジェク



図-1 建物内情報収集ロボットシステムのイメージ

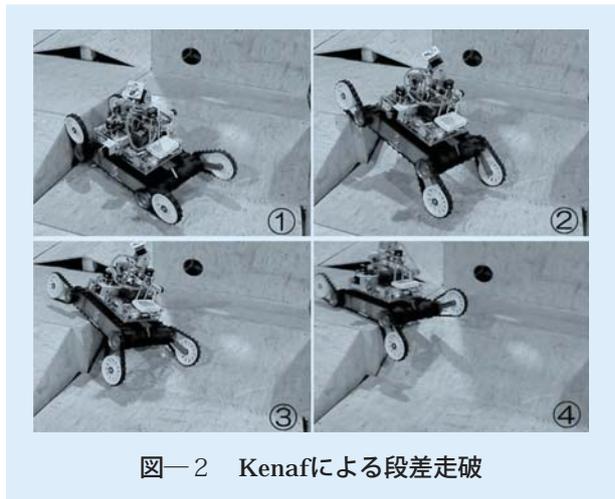


図-2 Kenafによる段差走破

トで開発した要素技術について紹介します。

まず、不整地走行技術については、この探査ミッションでは、階段や段差の走破だけでなく、駅の改札の通過を含むため、改札の幅を考慮して、ロボットの筐体を大きくすることはできませんでした。さらに、レスキュー隊員による運搬を考えると、総重量も抑える必要があります。そこで、本プロジェクトでは、小型軽量のクローラ型移動ロボット**Kenaf**、**Quince**を開発しました。

これらのロボットは、前後左右にサブクローラと呼ばれる補助クローラを有しており、これを遠隔制御することで、階段走行や、段差の走破を可能とします。**Kenaf**は、約25kgのクローラ型ロボットですが、2009年に**RoboCupRescue**と呼ばれる小型レスキューロボットの探査コンペティションの世界大会において、**Best Mobility Award**を受賞し、世界的にも、その不整地走破能力が認められました³⁾。図-2は、**RoboCupRescue**のフィールドで、**Kenaf**が20cm程度の段差踏破を行っている様子です。

また、**Quince**は、30kg程度の**Kenaf**の後継機で、プロケットサイズを若干大きくすることで走破性能を向上させるとともにモータの出力を上げ、さらに、防水・防塵に関する対策を施すことで、実用性を大きく向上させました。

次に、遠隔操作技術についてですが、探査ロボットのオペレータは、ロボットを直接目視しながら操作をすることができない



写真一 1 Quinceの不整地走行の様子

ため、ロボットに搭載したセンサを用いて、ロボットの周囲の状況をできるだけ詳細に、オペレータに伝える必要があります。そこで、Kenaf, Quinceには、前方、後方、俯瞰位置にカメラを搭載し、取得した映像をオペレータに提示することで、遠隔操作を行うことにしました。また、画像情報だけでは、ロボットの周囲の状況をオペレータに十分に伝達できない可能性があるため、ロボットに三次元距離センサを搭載し、ここで得た情報を利用した遠隔操作の研究も実施しました。

さらに、対象とするロボットには、不整地走破性能を向上させるためのサブクローラが前後左右に搭載されていますが、遠隔操作によって、このサブクローラの動作を行うためには、高い熟練を要します。そこで、ロボットの側面に地表の凹凸情報を検知するためのレーザ距離センサを搭載し、地面の地形に合わせてサブクローラを自動制御する不整地走行アシスト機能を開発しました⁴⁾。写真一1は、不整地走行アシスト機能を搭載したQuinceが、兵庫県広域防災センター内の不整地フィールドを走行する様子を示しています。このアシスト機能で、遠隔からの操作性が大きく向上しました。

次に、環境情報収集技術ですが、遠隔操作技術の項目でも述べたとおり、ロボットに搭載された三次元距離センサを利用することで、ロボットの周囲の環境情報を取得することができます。さらに、取得したロボット周囲の環境情報を重ね合わせつつ、ロボットの自己位置を推定するSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) とい

う手法を用いることで、ロボットが探査した領域の地図を精度良く構築することができます。

筆者のグループでは、先にも述べたRoboCupRescueと呼ばれる小型レスキューロボットの探査コンペティションにおいて、この手法を利用し、高精度の三次元環境地図を構築しました。図一3の上図は、2009年のRoboCupRescueフィールドの俯瞰写真であり、ロボットが、迷路のようなこの環境内を走行した後に獲得した地図情報が図一3の下図に示されています。

さらに、このような三次元環境マップと、ロボットが取得した画像情報をデータベースに蓄積し、オペレータに提示するDaRuMa (Database for Rescue Utility Management) というデータベースシステムも、本プロジェクトで開発されました⁵⁾。

最後に、通信技術については、電波強度の問題や障害物の問題から、対象環境である地下街において、安定した無線通信を提供することは、当初より困難であることが予想されていました。そこで、本プロジェクトでは、無線アドホックネットワークを利用した通信網を利用する方針で、研究をスタートさせました。しかしながら、既存の無線アドホックネットワーク通信には、無線帯域の不足、遠隔操縦を困難にするレイテンシー (通信遅延) の増加、移動によるハンドオーバー (通信局の切替え) 時の通信の切断などの問題がありました。そこで、本プロジェクトでは、有線通信ケーブル敷設ロボットによるケーブル敷設を前提とした、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを開発することによって、この課題を解決しました⁶⁾。

3. 原発事故対応ロボットの研究開発

NEDO戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの最終年である2010年度には、実用を目的としたQuinceがほぼ完成し、千葉消防への試験的導入が行われました。これでプロジェクトも無

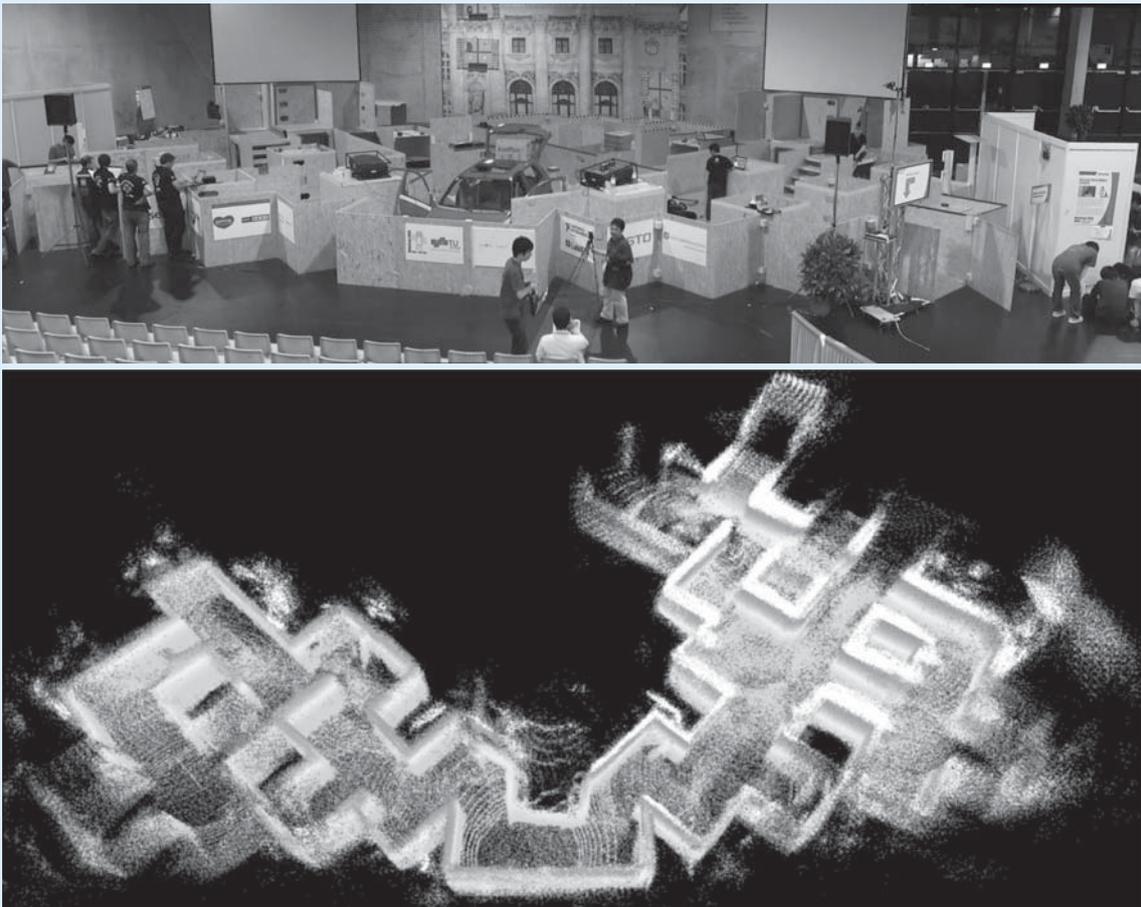


図-3 RoboCupRescueのフィールド（上）とロボットが取得した三次元環境情報（下）

事終了と考えていた矢先の2011年3月、東日本大震災が発生し、福島第一原発では、メルトダウン事故が発生しました。この状況において、遠隔操作で原子炉建屋内の被災状況や放射線量を測定するロボットが必要となり、Quinceを用いた原発事故対応ロボットの開発プロジェクトがスタートしました⁷⁾。

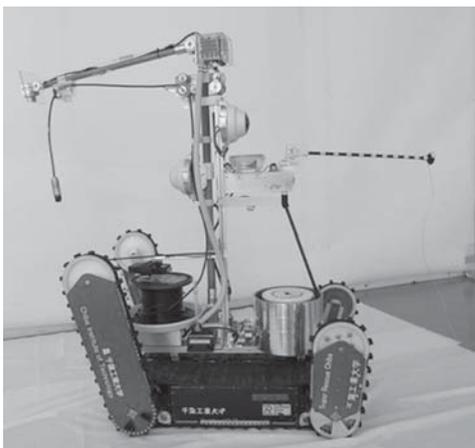
本来、Quinceは、地下街探査を目的として研究開発が行われてきたため、原発事故環境に適用するためには、「耐放射線」「通信」「信頼性」の三つの課題をクリアする必要がありました。以下に、これらの課題とその解決方法、ならびに、現場での活動状況について紹介します。

まず、耐放射線については、そもそもQuinceを構成する民生品のデバイスが、原発事故の環境下においても利用可能であるかどうかを確かめる必要がありました。そこで、独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）高崎量子応用研究所の協力の下、Quinceを構成するデバイスの耐放

射線試験を行いました。その結果、民生デバイスでも、トータルドーズで150Gyまで耐性があることが分かり、数十mGy/hの環境では、デバイスの遮蔽を行わずとも、数百時間の活動が可能であることも分かったため、Quinceの機動性を確保するためにも、デバイスの遮蔽は行わないという判断が下されました。

次に、通信については、地下街探査を目的としたQuinceは、基本的に2.4GHzの無線通信を利用する仕様でした。しかしながら、原子炉建屋は、放射線を遮蔽するために厚いコンクリートで構成されており、無線通信による遠隔操作が非常に困難な環境でした。

この開発プロジェクトでは、実際に、浜岡原子力発電所において、1W出力の通信機を用いた2.4GHzの通信試験も行いましたが、見通しのきかない原発建屋内における無線通信を行うことができませんでした。そこで、Quinceに全長500mの有線ケーブルリールを搭載し、有線通信による



写真一2 原発事故対応ロボットQuince

遠隔操作を行うことにしました。

以上の課題をクリアし、2011年6月20日、原発探査用Quince 1号機は、東京電力に引き渡されました。写真一2は、原発探査用Quince 1号機の概観を示したものです。写真一1と比較すると分かりますが、ロボット上には、有線ケーブルリールだけでなく、放射線測定器や魚眼カメラ、水位計測装置など、さまざまなデバイスが搭載され、総重量も50kg程度と大きくなりました。

このロボットによる原子炉建屋の探査ミッションは、10月20日までに6回実施されました。この中でも特に、7月26日に実施された3回目のミッションでは、三号建屋の炉心スプレープラントの健全性の確認ならびに、このプラント周辺の放射線量測定を行い、このプラントが利用可能で、かつ周囲の線量も比較的低いことを確認しました。これを受けて、東京電力は、この炉心スプレーの再稼働を行い、効率の良い原子炉冷却を行うことができるようになりました。

図一4は、このミッションにおける操作画面のスクリーンショットです。右側のカメラ映像から分かるとおり、Quinceが階段を走行中、瓦礫に阻まれて進めなくなっている状況が見取れます。このほかにも、いくつかの探査ミッションがQuinceを用いて実施されましたが、2011年10月20日、ケーブル切断による通信不能状態が発生し、Quinceは、二号建屋の三階に取り残されました。



図一4 Quinceによる原子炉建屋探査の操作画面

この後、本開発プロジェクトは、千葉工業大学に引き継がれ、原発探査用Quince 2号機、3号機が原子炉建屋内の探査を行っています。2012年には、千葉工業大学が中心となり、Rosemary, Sakura, Tsubakiといった後継機が開発され、今後の原子炉建屋内の探査に利用される予定です。

以上に記しましたとおり、大学におけるレスキューロボットの研究開発は、大型のプロジェクト研究を中心に進められました。そこで開発された不整地走行ロボットの一部は、原発事故対応ロボットとして現場投入されるなど、研究成果が実りつつあるといえます。

4. 火山探査ロボットの 研究開発事例

火山噴火が発生した際、大きな災害を引き起こす要因になると懸念されるものとして、噴石・降灰、火砕流、溶岩流、融雪型火山泥流、土石流、火山ガスがあります。中でも特に火砕流は、高温の溶岩の破片や火山灰とガスの混合物が、雪崩のように一丸となって山体斜面を高速で流下する現象で、1991年6月3日の雲仙普賢岳の大火砕流では、熱風によって43名が死亡しました。

また、土石流は、火山弾や火山灰が降り積もった斜面に雨が降り、火山灰や火山弾を押し流して下流に大きな被害をもたらすもので、雲仙普賢岳の噴火の後、島原市は、土石流による大きな被害

が発生しました。これらの現象そのものを止めることは困難ですが、火砕流や土石流の発生予想を行うことで、人的被害を軽減させることができます。

しかしながら、一般に火山噴火が始まると、その周囲数kmにわたり立入規制がしかれるため、火砕流や土石流の発生予想を行うために重要となる火口周辺の環境情報取得が可能な、遠隔操作機器による探査が求められてきました。

このような背景の下、これまで、立入禁止区域の探査を目的としたGPS誘導型の無人ヘリコプタの研究開発が行われてきました。この研究成果の一部は、2000年の北海道有珠山の噴火において、噴火口周辺の地形や地質状況の観察に利用されました⁸⁾。また、東北大学東北アジア研究センターは、火山観測ロボットMobile observatory for volcanic eruption (MOVE)を開発しました⁹⁾。このロボットは、無線操縦型パワーショベルを改造した遠隔操作型移動ロボットであり、現在も、伊豆大島の三原山などにおいて、運用訓練が行われています。

一方、筆者の研究グループでは、2009年より、立入禁止区域内の遠隔調査を目的とした移動ロボットシステムの研究開発プロジェクトを進めてきました^{10,11)}。このプロジェクトでは、火山噴火時の立入禁止区域内の画像情報を取得し、火山灰の性質や堆積量に関する情報を取得することを目的としています。

この調査を実現するため、視覚センサを搭載したロボットを利用し、火山の麓から立入禁止区域

内を探査するシナリオ1 (図-5左)と、無人ヘリコプタと小型移動ロボットの複合手段で立入禁止区域内の探査を行うシナリオ2 (図-5右)という二つの探査シナリオを設定し、フィールド試験を通じて、それぞれが持つ技術課題を解決するというアプローチで、研究を進めてきました。

なお、このフィールド試験は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募(地域課題分野)ならびに、国土交通省関東地方整備局の協力の下、主に浅間山にて実施しました。

まず、シナリオ1については、対象とする環境が、斜度約30度の軟弱不整地土壌であるため、不整地走行性能が高いクローラ型ロボットを利用して、走行試験を繰り返し行いました。写真-3に、レスキューロボットの項目で紹介したクローラ型移動ロボットQuinceを火山対応に改良したバージョン「Quince改」が、浅間山の斜面で直登している様子を示します。

これらのフィールド試験により、対象とする火



写真-3 Quince改による軟弱不整地斜面走行

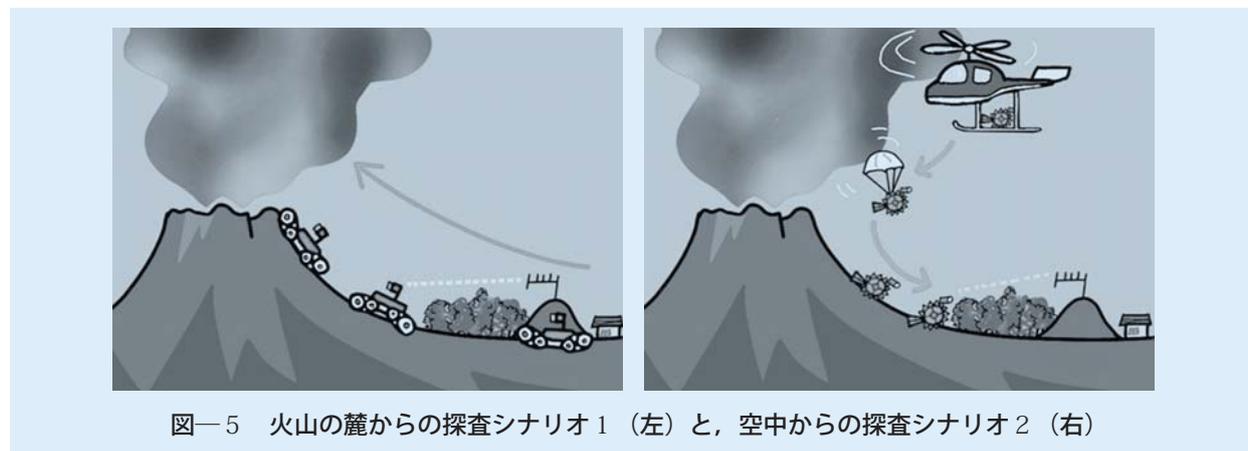


図-5 火山の麓からの探査シナリオ1 (左)と、空中からの探査シナリオ2 (右)

山環境は、軟弱不整地環境ではありますが、われわれが有するロボットの走行系により走行可能であることが確認できました。しかしながら、目的とする探査領域に到達するまでの長距離走行に必要な電源や、そのための長距離通信については、現状のところ、まだ解決されておらず、今後の課題となっています。

また、シナリオ2は、調査区域まで短時間で移動できる飛行ロボットと、遠隔操作により比較的長時間探査活動を継続することができる小型移動ロボットを組み合わせたものであり、より魅力的なアプローチといえますが、ヘリコプタの飛行高度、小型移動ロボットの移動性能と電源の問題、ロボットとの通信といった解決すべき技術課題がありました。以下に、これらの技術課題の解決策と現状のロボットシステムについて紹介します。

まず、ヘリコプタの飛行高度については、対象とする環境は2,000mを超える標高の高い環境であるため、空気の濃度低下による回転翼の推力低下が問題となります。さらに、レシプロエンジンなどの内燃機関を利用する無人ヘリコプタは、エンジンに供給する空気の密度低下により、燃焼がうまく行われなため、一般に1,000m以上の高地で運用することが困難といわれていました。

このため、シナリオ2については、当初、実現不可能と考えていましたが、回転翼をモータ駆動に代替することで、燃焼環境の制限がなくなることが分かりました。さらに、標高2,000m付近における回転翼の推力は、大気の状態にもよりますが、理論的にも実験的にも、標高0mに対する8～9割程度であることが分かったため、本シナリオでは、モータ駆動のマルチロータ機を利用して小型移動ロボットを搬送することにしました。

次に、小型移動ロボットの移動性能と電源の問題についてですが、飛行ロボットで搬送可能な小型移動ロボットの重量やサイズは、それほど大きく取ることができません。そこで、このプロジェクトでは、東北大学で開発した車輪型の小型移動ロボットの利用を想定することにしました。

このロボットでは、急斜面の直登は困難です

が、斜面下方向に対する走行性能については、問題ありませんでした。また、このロボットは、全重量が2.5kg程度であるため、電動マルチロータ機による搬送が十分可能です。さらに、このロボットは軽量であるため、搭載電池により、現状で2時間以上の運用が可能でした。

さいごに、小型移動ロボットとの通信についてですが、現在、非常時における移動ロボットの遠隔操作のための通信帯域として、200MHz帯の公共ブロードバンドの利用に大きな期待が寄せられています。しかしながら、まだ小型移動ロボットに搭載できる小型のデバイスは、開発されていません。

そこで、本プロジェクトでは、遅延が大きく、通信容量も限られますが、広範囲で通信が可能なDocomoのFOMAを用いた通信モデムを利用することとしました。また、見通しがきく環境では、2.4GHz帯の無線通信についても利用可能であるため、長距離通信に実績のあるContec社製の長距離通信モデム(2.4GHz)を利用した試験も行いました。写真-4は、浅間山の北側斜面における、小型軽量ロボットGeoStar(重量2.5kg)を用いた、下り斜面における遠隔走行試験の様子です。このロボットの操作は、ロボットからおおよそ3km離れた鬼押ハイウェイ六里ヶ原休憩所(駐車場)から行いました。

以上の検討やフィールド試験を経て、2013年3月、宮崎県霧島連峰にて、飛行ロボットによる、小型移動ロボットの運搬、投下、遠隔操作の試験を実施しました。写真-5(左)は、霧島連峰の高千穂峰をバックに、飛行ロボットが小型移動ロ



写真-4 小型移動ロボットの遠隔操作試験



写真一5 飛行ロボットによる小型移動ロボットの運搬（左），投下（中），遠隔走行試験（右）

ボットを運搬している様子，写真一5（中）は，飛行ロボットが小型移動ロボットを中岳斜面に投下した瞬間，写真一5（右）は，遠隔操作により，小型移動ロボットが中岳を下っている様子を示しています。このフィールド試験により，シナリオ2として提案したアプローチ方法が実現可能であることが実証できました。

5. おわりに

本稿では，建設ロボットに関連する大学の取り組みについて紹介することを目的とし，レスキューロボット，火山探査ロボットといった，災害対応ロボットの研究開発に対する大学の取り組み事例を紹介しました。今後，特に災害対応ロボットに関する研究開発を中心に，これまで大学を中心に研究されてきたロボット技術を，建設ロボット分野にも積極的に活用していきたいと考えています。

【参考文献】

- 1) 田所諭：“特集 大都市大震災軽減化特別プロジェクト—レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発—”，日本ロボット学会誌，Vol. 22，No. 5，pp. 1-44（2004）
- 2) 田所諭：“閉鎖空間内高速走行探査群ロボット”，日本ロボット学会誌，Vol. 27，No. 10，pp. 1107-1110（2009）
- 3) Keiji Nagatani, Yoshito Okada, et. al., “Multi-robot Exploration for Search and Rescue Missions : A Report on Map Building in RoboCupRescue 2009”,

Journal of Field Robotics, Vol. 28, Issue 3, pp. 373-387(2011)

- 4) Yoshito Okada, Keiji Nagatani, et. al., “Shared Autonomy System for Traversing and Turning Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning”, Journal of Field Robotics, Vol. 28, Issue 6, pp.875-893(2011)
- 5) 秋山英久，下羅弘樹，野田五十樹：“地理情報データベースシステムDaRuMaを用いた環境地図構築システム”，Proceedings of SIG-Challenge, JSAI(2010)
- 6) 羽田，海藻，松山，行田，滝澤：“アドホックメッシュネットワークを用いた移動ロボット群の長距離遠隔操縦”，第14回ロボティクスシンポジウム予稿集（2009）
- 7) Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, et. al., “Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots”, Journal of Field Robotics, Vol. 30, Issue 1, pp. 44-63(2013)
- 8) 中西弘明，井上紘一，佐藤彰：“被災地における空からの情報収集技術の確立”，日本ロボット学会誌，Vol. 22，No. 5，pp. 546-549(2004)
- 9) 後藤章夫，谷口宏充，市原美恵：“無人火山探査車MOVEの開発とその運用課題”，日本惑星科学会誌「遊・星・人」，Vol. 21，No. 2，pp. 103-110(2012)
- 10) 永谷圭司，桐林星河，西村健志，吉田智章，小柳栄次，羽田靖史，油田信一，中里邦子，久武経夫，森山裕二：“小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—高出力の無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験—”，第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 論文集，pp. 54-57(2011)
- 11) 永谷圭司，西村健志，吉田智章，小柳栄次，羽田靖史，油田信一，多田隈建二郎：“小型移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—浅間山における2012年フィールド試験—”，第13回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会 論文集，pp. 648-651(2012)