解 説

次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 —災害応急復旧部会における現場検証の紹介—

Introduction to On-site Demonstrations of Next-generation Robotic Technologies for Social Infrastructures, Organized by Advisory Committee on Disaster Emergency Works

建 山 和 由* *立命館大学

Kazuyoshi Tateyama* *Ritsumeikan University

1. は じ め に

災害応急復旧部会では、平成 26 年度と 27 年度の 2 カ年間にわたり、土砂災害の発生直後から本格的な復旧対策が始まるまでの応急復旧段階に活用される技術を公募し、その適用性を検証した。本稿では、応募技術をテーマごとに紹介するが、誌面に限りがあるため、一部の技術については紹介することができなかった。それらについては、Web サイトで公開されている報告書 [1] を参照されたい。

2. 災害応急復旧に資する技術の公募

図 1 に日本における土砂崩落による災害（以下、土砂災害という）の発生件数の統計データを示す [2]。年により差はあるものの、日本では、毎年 700 件以上の土砂災害が発生している。土砂災害の発生原因としては、降雨によることが多いが、地震や火山などが原因となることもあり、さらにこれらの原因が複合的に作用して発生することもある。

図 2 に土砂崩壊の状況を示す。土砂崩落は単発で終わることもあるが、一般的には引き続き複数回にわたり発生することもある。崩落地の土砂は不安定な形で保持されていることが多いためである。また、崩落した土砂が川筋をせき止めて水を貯め、それが土石流を誘発する場合も多い。このため、災害発生直後の人命救助作業やアクセス道路の確保などの応急復旧作業では、二次災害が発生する危険性が高く、人が立ち入ることなく作業を行う技術の開発が求められてきた。災害応急復旧部会では、「土砂崩落または火山災害において、人の立ち入りが困難若しくは人命に危険を及ぼす災害現場」を想定して、以下の三つのテーマについてロボット技術の公募を行い、現場実験でその有用性の検証を行った。

- (1) 「掘削、押土、盛土、土砂や資機材の運搬等の応急復旧」ができる技術・システム
- (2) 「排水作業の応急対応」ができる技術・システム

図 1 日本における土砂災害の発生件数の推移

図 2 土砂災害の事例（奈良県五條市大塔町赤谷 2011 年 9 月）

- (3) 「遠隔または自動による機械等の制御にかかわる情報の伝達」ができる技術

誌面の都合上、詳細は省くが、公募では、テーマごとに応募技術が満たすべき基本要件とともに期待する項目を設定した。また、応募技術には、従来の技術と比較しても施工性、安全性等の機能面での性能が高く、経済性が妥当であることが求められた。以下、3 種のテーマごとに応募技術を紹介する。

3. 「掘削、押土、盛土、土砂や資機材の運搬等の応急復旧」ができる技術・システム

このテーマに関しては、土砂崩壊等により道がなく、段差・障害物があり、軟弱地盤、冠水箇所等の条件下でも、現地まで資機材等の運搬ができ、かつ、掘削、押土、盛土、土砂運搬等の応急復旧にかかわる作業を行うことができることが要求された。基準となる従来の技術としては、遠隔操作に開発された専用の建設機械を用いた無人化施工技術が想定され、これとの比較で提案技術の性能が検証された。

このテーマに関する検証実験は、1993 年以降、火山災害

原稿受付 2016 年 6 月 29 日

キーワード: Disaster, Landslide, Emergency Rehabilitation, Remote Control, Field Experiment

*〒 525-8577 草津市野路東 1-1-1

*Kusatsu-shi, Shiga

図3 長崎県島原市における検証実験の状況

- (a) 空気圧によりゴム製の人工筋肉を稼働させて建設機械の操縦用のレバーを操作する方式
 (b) 重機にコンプレッサの空気圧でアクチュエーターを伸縮させてレバーを操作する方式
 (c) 多数のサーボモータを制御してロボットの手足を動かして機械の操作を行う方式

図4 検証実験で使われた遠隔操縦ロボット

の復旧工事と砂防工事が行われてきた長崎県島原市の雲仙普賢岳の麓で実施された。図3に検証実験の状況を示す。検証対象の建設機械は、離れた場所から目視、もしくは画面に映し出される現場の状況を見て操作される。このテーマに対する技術としては、以下の応募があった。

(1) 後搭載型遠隔操作ロボット技術 (3件)

遠隔操作の専用機は、保有台数が限られており、災害時に現場において迅速に調達することができるとは限らない。このため、普通の建設機械の運転席にロボットを座らせて、このロボットを遠隔操縦することにより、建設機械を操作する技術（以下、遠隔操縦ロボットと呼ぶ）が3件提案された。提案されたロボットは、18[kg]~180[kg]程度の重さであり、いずれも分解すれば運搬が容易であるため、災害時には現地で調達した建設機械に据え付けるだけで、普通の機械を遠隔操作型ロボットとして使うことができる。図4に提案された3種の遠隔操縦ロボットを示す。図に記載のとおり機械の操作方法は、それぞれ異なっている。

実験の結果、運搬性、現場適用性、信頼性、安全性に優れ、実現場でも十分に適用できると判定された機種もあったが、一部、映像伝送システムに不具合があるため、改良の必要性があることや運転席へのロボットの固定方法に課題があるとの結果が得られた機種もあった。3機種のうち、2機種については本号でも別途紹介されているので、詳細はそちらを参照されたい。

(2) 俯瞰映像提示および高精細映像伝送システム

この技術は、建設機械の前後左右4方向に取り付けた魚

図5 俯瞰映像用魚眼カメラ

図6 俯瞰映像提示システムによる映像例

眼レンズカメラの映像を合成し、建設機械を上から眺めた映像を擬似的に生成する俯瞰映像提示システムとハイビジョン映像を遠隔操作者に提示する映像伝送システムにより構成されている。図5に魚眼レンズを図6に俯瞰映像を示す。この技術の現場での適用性について、走行、型枠設置、バケット先端位置合わせ、白線内停止の4作業項目について検証実験を行った。その結果、俯瞰映像に不鮮明な所があり、専用機の80%未満の施工能力しか発揮することができないこと、カメラの取り付けと調整に時間を要すること等改善すべき課題のあることが明らかになったが、災害直後で現地の状況についての情報が少ない中での作業では、周辺の状況を俯瞰しながら建設機械を操作することができる利点もあり、今後の改善が期待される。

(3) 自律制御型振動ローラによる盛土転圧作業

これまで紹介した無人化施工技術では、オペレータが離れた所から遠隔操縦で建設機械を操作して作業を行うが、自立して作業を行うロボットの開発も進んでいる。今回提案された技術は、盛土の転圧作業を自立で行うことのできるシステムである。転圧は、ローラが、作業対象の地盤上を所定の回数走行し土を締め固めていく作業であるため、他の作業と比べると自立操作を導入しやすいが、オペレータ操作がないことを前提とするため、安全対策に対しより高度な機能が求められる。このため、今回の検証実験では、平坦部における走行、施工性ととともに、カント部走行や障害物検知についても検証を行った。その結果、施工性や信頼性、安全性、経済性は非常に優れており、被災現場に対応できる技術であることが確認された。詳細については、本号で別途紹介されているので、そちらを参照されたい。

4. 「排水作業の応急対応」ができる技術・システム

山間地で土砂崩落が起こると、崩落した土砂が河道を堰き止める河道閉塞を伴うことが多い。河道が土砂で閉塞されると下流に水が流れることができないため、時間とともに

図7 サイホン式排水システムの概要

に閉塞部の上流側には大量の水が溜まることになる。前述の図1の災害事例でも崩壊した土砂に河道がせき止められてできた湖が写っている。閉塞している土砂は、ダムのように強固に固められているわけではないため、そのまま放置すると溜まった水の圧力で崩壊し、土石流となって下流の集落に甚大な被害をもたらすことになる。

河道閉塞に起因する土石流の発生を防ぐには、溜まった水をポンプ等で下流に排水し、土石流の危険を低下させた上で、閉塞土砂の撤去等の処理を行わなければならない。テーマ(2)では、このような状況を想定し、災害地において現地まで設備を運搬・設置して排水作業を行うことができ、既存のポンプと同等以上の排水能力（揚程、排水量）を有する技術が求められた。

この公募に対してはH26年度、H27年度各1件ずつ、計2件の提案があった。いずれの技術も、災害現場では電力確保が難しいことを想定し、サイホンの原理を利用してシステムが構築されている。図7にH26年度に提案されたポータブルサイフォン排水システムの構成を示す。排水用のパイプは人力で運搬できる大きさに分割され、かつワンタッチ継ぎ手で簡単に接合できるようになっているため、これらを現地で繋ぎ合わせ、3箇所の制御バルブに開閉指示を行うことにより、無動力で排水作業を行うことができる。この技術の現場適用性を、神奈川県川崎市の多摩川で検証した。実験では、二ヶ領宿河原堰の上下流を使い、揚程差を変えて排水作業を行い、配水管等の設備の設置に要する時間、排水量や自動遠隔操作装置の作動状況を確認した。この結果、揚程差には限界があるものの、被災箇所でも実用的に活用することのできる技術と評価された。

平成27年度には、電動ポンプとサイホンを組み合わせたハイブリッド型排水システムが提案され、奈良県吉野郡十津川村栗平地区の実際の災害現場に設置し、その適用性を検証した。この実験の結果、最小限のエネルギーで効率的に、かつ長期にわたり排水作業を行い得ることが確認された。この技術に関しては、本号でも別途紹介がされているので、参照されたい。

今回提案された2種の技術は、排水機能としては、十分な現場適用性を有しているが、いずれも現地における制御装置や配水管などの設備の設置を人力や他の機械に頼らざるを得ず、排水機能の自動制御の部分のみがロボットと言

える段階である。将来的にはヘリコプタやUAVを使い、危険でアクセスが困難な現地に人が立ち入ることなく、設備設置を行うようになれば、本格的なロボット技術として災害時の適用性はさらに向上することが期待できる。

5. 「遠隔または自動による機械等の制御にかかわる情報の伝達」ができる技術

ある調査では、遠隔操作による無人化施工と実車作業とを比較したところ作業効率が45%~75%にまで落ちると言う結果が得られている[3]。このことは、一般的にもよく知られており、その原因としては、画面上の情報では、視野が狭く、足下の画像が得られ難いこと、遠近感が得られ難いため距離感がつかみにくく、また被写体の輪郭が明瞭でないため慎重な操作にならざるを得ないこと、実車搭乗と遠隔操作の操作上の感覚の差があること等があげられてきた。

これらの課題の解決を目指し、「低容量型デジタル高精細画像伝送システム」と「CAN制御車両の遠隔操作システム」の二つの技術が提案され、その実用性が調べられた。

(1) 低容量型デジタル高精細画像伝送システム

今回提案された技術は、従来のアナログ伝送のSD画像動画(720×480)に対して、同じフレーム数30[fps]のフルハイビジョン動画(1,920×1,080)を3.0[Mbps]の低容量、低遅延(70[ms]以内)でデジタル伝送するシステムで、伝送容量と伝送遅延を極力抑え、LAN方式によりフルハイビジョンの画像伝送を実現することができるシステムである。この技術を使い、土の敷き均し、型枠設置、バケットの先端位置合わせ、走行の4項目に関し、作業効率の検証を行い、技術的に完成していることを確認した。

(2) CAN制御車両の遠隔操作システム

従来の遠隔操作式建設機械では、新たに無線送受信機と電磁弁等の追加設備を建設機械に取り付けて遠隔操作制御システムを構築する必要があるため、改造に時間と費用を要するという問題があった。一方、最近の建設機械にはCAN(Controller Area Network)が標準装備されている。このシステムでは、オペレータがレバーやハンドルを動かすと、その動作が一端、電気信号に変換されて機械のネットワークに流され、これが同じネットワークに接続されている電磁弁等を制御して、アクチュエータ等を動かしオペレータが意図する作業を実現することができる。このため、このCAN制御システムに無線LAN等を通じて直接制御信号を送ることができる、追加の設備を取り付けることなく機械を遠隔操作することが可能となる。今回の実験では、ドーザショベルを使い、このシステムの適用性を調査した。検証実験の結果、技術として確立しており、無人化施工において試行的導入の検討を推奨するという評価となったが、建設機械メーカーがCANの利用を認める機種のみにはしか適用できないため、適用可能なメーカー・機種が限

られることになる。遠隔操作による無人化施工技術の普及促進の観点からは、建設機械メーカーと連携して、この状況の改善に努めることが求められる。

6. お わ り に

2年間の検証実験を通じて、実際の災害時に有効に活用し得る技術の抽出を行うことができた。これらの技術については、今後、施設管理者等による実機の配備や災害協定の締結などを通じて、災害への迅速な対応での活用を図ることが重要である。また、災害時に活用を推奨するところまでの完成度は確認できなかったものの、課題が明確になり、それらが解決されれば災害時の応急復旧で力を発揮してくれることが期待される技術も見いだすことができた。これらの技術については今後、災害時に安定的に作業を行うこ

とのできる技術に改善されることを期待している。

参 考 文 献

- [1] 国土交通省：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進災害応急復旧技術の現場検証・評価の結果報告書，2016.
- [2] 国土交通省砂防部 統計データより作成，2016.
- [3] 西山，茂木，藤野：“操作方式の違いによる油圧ショベル無人化施工の作業動作解析”，第15回建設用ロボットシンポジウム論文集，2015.

建山和由 (Kazuyoshi Tateyama)

1985年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了，同年京都大学工学部助手，1990年同講師，1996年同助教授を経て2004年より立命館大学理工学部教授，2013年学校法人立命館常務理事。建設施工学，建設機械学，建設ICT，建設ロボット，地盤工学などを研究。工学博士。土木学会，地盤工学会，地盤・車両系国際学会等に所属。