

遠隔操縦ロボット(ロボQ)の開発と施工効率化

田上 幸雄

我が国は、自然的条件から災害が発生しやすい国土である。災害が発生した場合は、迅速な対応が求められるが、二次災害の恐れがあるため、安全性の観点から迅速な対応が取りにくい。復旧作業を安全に行うには、遠隔操縦により安全な場所から機械を操作して作業を行うことが必要になる。

雲仙・普賢岳の災害復旧では、建設機械を無線で遠隔操縦する「無人化施工技術」が導入された。遠隔操縦専用機は、市場性がなく大型のものが多く、輸送における規制や分解・組立て等で時間を要する等の課題を持つ。こうした課題を解決し、災害復旧をより安全・迅速にかつ効率的に行うため、遠隔操縦を可能とするロボットを開発したので紹介する。

キーワード：災害，安全迅速，遠隔操作，無人化施工，ロボット，バックホウ

1. はじめに

土石流災害や土砂崩壊災害等の緊急災害復旧は、二次災害の発生する恐れがあるため、安全作業の確保・迅速な対応といった観点から遠隔操作技術の開発が強く望まれる。

遠隔操作技術を使った無人化施工は、平成2年に噴火した雲仙・普賢岳の警戒区域内にある遊砂地等において、緊急的に除石することを目的として無人による工実施の可能性を検討するため、試験フィールド制度により試験施工が行われたのが最初の事例である。

建設機械を遠隔で操縦する無人化施工は、これを契機に技術開発や技術改良が飛躍的に発展し、災害復旧現場等での導入実績も多くなってきた。しかし、これらの遠隔操縦専用の建設機械は、比較的大型のものが多く、限られた需要の中で生産されるため、現存台数が少ないのが実状である。

又、建設機械の重量、大きさによっては、輸送上の規制や機械の分解、組立てなど多大な時間とコストがかかる課題を有している。これらの課題を解決し、災害復旧をより安全・迅速にかつ効率的に行うため、災害現場で調達する汎用の建設機械に、有人にかえてロボットを運転席に装着して、遠隔操縦を可能とするシステムをこのたび開発したものである。

本報文では、遠隔操縦ロボットの開発経緯、システムの概要、さらに一般建設工事に適用するために行っ

た実証実験について紹介するものである。

2. 開発の経緯

遠隔操縦ロボットは、国土交通省九州地方整備局九州技術事務所と株式会社フジタが共同開発したものである。

遠隔操縦ロボットの開発にあたっては、過去の災害復旧作業を調査し、対象機種をバックホウとし、対象規格は、国内で最も販売されている0.7m³級を対象とすることにした。操縦方式は、開発目的及び開発装置に求められる機能を総合的に判断して操作レバー方式を採用した。

また、バックホウの操作レバーを機械的に動かすアクチュエータには、維持管理性及び作業環境における信頼性等から空圧式アクチュエータを採用することにした。

システムの開発は平成9年度に基礎調査に着手し実験機を製作して各種の機能・性能試験を実施した。その試験結果から詳細設計、更に改良設計を加えて平成11年度に実用機を製作し、耐久性に関する実証実験を行い、耐振動性、耐衝撃性を有していることを確認した。平成12年度には災害対策用機械として導入配備し、さらに平成13~14年度は一般建設工事への適用拡大を目的として施工効率の向上に向けての検討を行った。

3. 遠隔操縦ロボットの概要

(1) 概 要

遠隔操縦ロボットは写真-1に示すように必要な時、必要な場所で汎用のバックホウの運転席に取付けることにより、遠隔操縦を可能にし、安全な場所から作業できるロボット技術である。

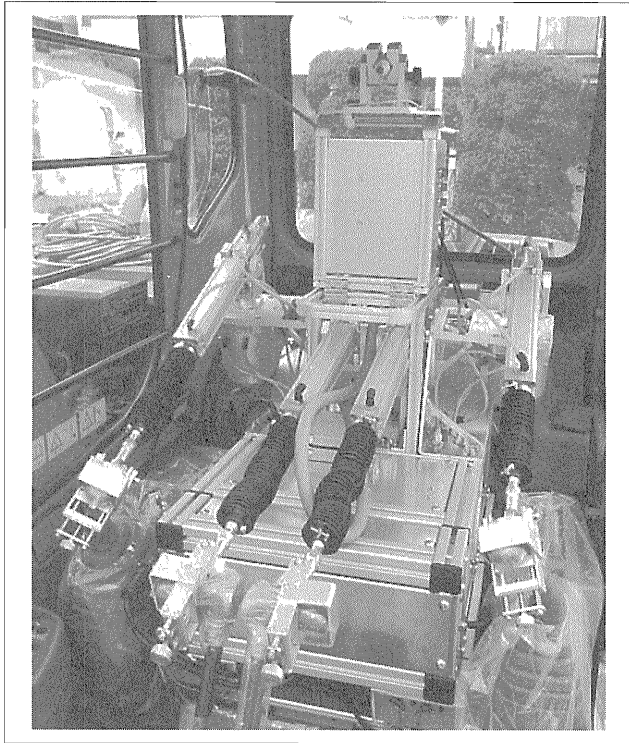


写真-1 バックホウ運転席に搭載したロボット

遠隔操縦ロボットの開発にあたり、主な開発目標としたものは次のとおりである。

- ① 遠隔操縦ロボットを汎用のバックホウの運転席に取付け短時間で遠隔操縦化が可能であること。
- ② 建設機械メーカーや機種を問わず、バックホウに装着できること。
- ③ 持ち運びが容易なサイズに分割できること。
- ④ カメラ映像により、オペレータが遠く離れた場所からも容易に操縦できること。

(2) 構 成

遠隔操縦ロボットは、図-1に示すように七つのユニットに分割され、収納ケースに収めて、簡便に被災地まで運搬可能であり、短時間で組立てができる。

各ユニットは、運転席を取外した後、順次組立て、空気圧制御によるアクチュエーションユニットがバック

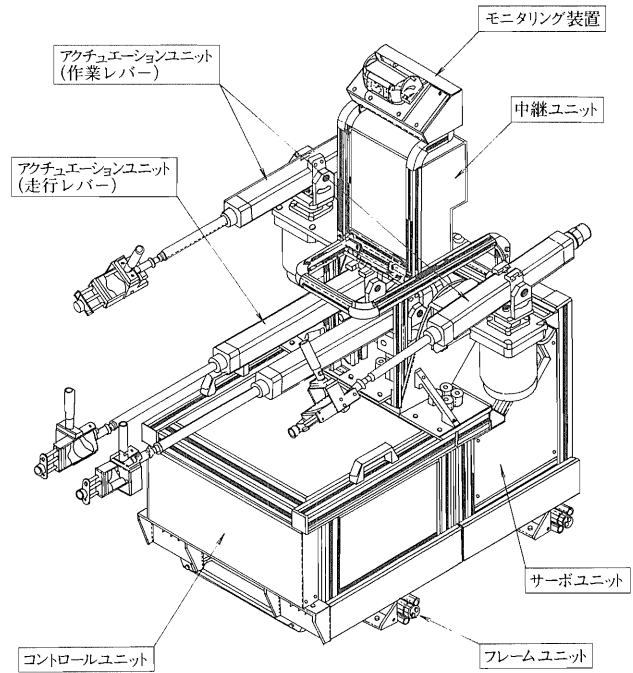


図-1 装置本体図

クホウの操作レバーを遠隔操縦で動かす。空気圧の動力源はバックホウ本体に搭載したエンジンコンプレッサとしている。カメラ映像は、映像伝送装置によりオペレータまで伝送する。

無線方式は、制御用として特定小電力無線、映像用としてSS無線を使用しており、遠隔操作距離は無線の使用環境にもよるが概ね150m程度である。また、バックホウの運転席上部の屋根に送受信装置や表示灯等を設置し、通信状態等を表示灯の色により確認する。

オペレータはヘッドマウントディスプレイ（写真-2）で視覚情報を得て、携帯ユニットのジョイスティックを操作することにより遠隔操縦ロボットが作業レバーを動かし、バックホウを稼働させる。

表-1に遠隔操縦ロボットの諸元を示す。

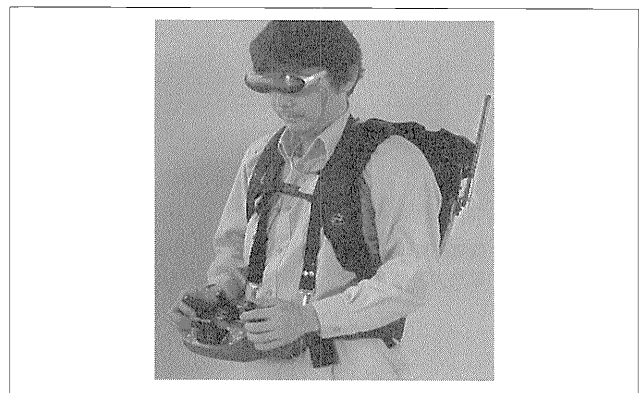


写真-2 ヘッドマウントディスプレイ装着状況

表一1 遠隔操縦ロボットの諸元

項 目		内 容
取付け調整員		2~3名
取付け時間		3時間程度
収納ケース数		大6, 小1, コンプレッサ1
総重量		約180kg
組立て外形寸法	幅	620mm
	奥行き	1,100mm
	高さ	1,040mm
主なアクチュエータ		空気圧シリンダ
無線方式		特定小電力無線(制御用) SS無線(映像用)
遠隔操作距離		150m(無線の使用環境による)

4. 災害及び実現場出動

(1) 災害出動

2000年6月に大分県別府市朝見川において、山腹斜面の土砂が崩落して河道を閉塞する災害が発生した。崩壊面が直立で天端にクラックが発見され、二次災害の恐れがある極めて危険な状態であった。

応急対策のため遠隔操縦ロボットが災害対応として初めて出動した。遠隔操縦ロボットは初め0.4m³級バックホウに装着し、その後0.7m³級に載せ替えて崩落土砂の除去作業を行った。災害復旧は実稼働48時間で無事終了し、遠隔操縦ロボットは十分その機能を発揮し、実用に供することが確認できた。



写真一3 遠隔操縦ロボットを装着したバックホウによる緊急災害復旧作業(大分県別府市朝見川)

(2) 実現場出動

国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所が管

理している野尻川は、活火山である桜島山麓の河川で、毎年降雨により土石流が頻発している。その土石流から地域住民を守るため砂防ダムやスクリーンダムが設置されているが、度重なる土石流により土石が堆積した。ダムの機能を確保するため、堆積した土石を搬出しなければならなくなった。搬出作業時に土石流が発生した場合は、非常に危険な現場であることから、有人作業にかえて遠隔操縦ロボットが使用された。

今回の現場は、スクリーンダム上に堆積した約860m³の土石を除去したものである。危険性が伴う過酷な作業現場でもロボットの特徴・機能を十分に発揮しうることが確認された。



写真一4 桜島山麓のスクリーンダムにおける土石除去作業(鹿児島県野尻川)

5. 施工の効率化

遠隔操縦ロボットは、災害復旧時の安全・迅速な施工を目的として開発し、大分県別府市朝見川の緊急災害出動等を始め、砂防ダム等の実現場においても施工実績を重ねてきた。

しかし、遠隔操縦ロボットをより普及活用させていくためには、災害復旧工事だけでなく、一般工事にも有効に活用することが望まれている。そのためには、遠隔操縦ロボットの特長を生かしつつ、有人施工と比較して施工効率や施工精度が劣るといった遠隔操縦施工特有の課題の解決、向上が必要である。

一般工事への導入を目的として、施工効率、施工精度の向上のための検討を平成13年~14年度の2か年にわたり行った。

(1) 基礎検討

遠隔操縦機械の一般建設工事へ導入するための門前点、改良点を抽出するために、バックホウに遠隔操縦ロボットを搭載して、近傍目視やロボQ搭載カメラと固定カメラの組み合わせといった様々な視覚情報パターンによる掘削、旋回、ダンプトラックへの積込みの一連の作業における基礎的な試験を行った。

基礎試験の結果及び作業後のオペレータへのヒヤリングの結果、以下の視覚情報に関して必要としていることが分かった。

① 作業ヤードの全体的な空間の把握

掘削面となる箇所とバックホウ周辺との位置関係の把握

② バックホウと掘削面またはバケットとダンプトラックとの相対的な位置の把握

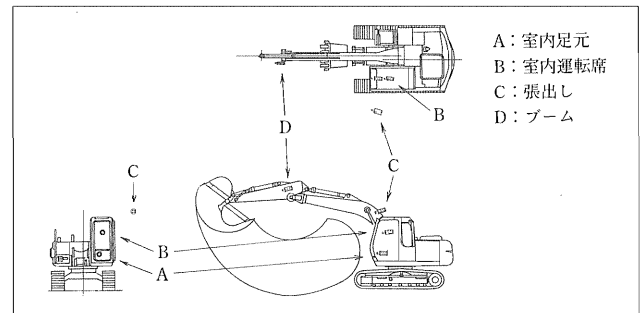
バックホウと掘削面との位置関係（距離、高低など）、バックホウとトラックとの位置関係（距離、トラックの位置と高低）

(2) 視覚情報機器の機能評価試験

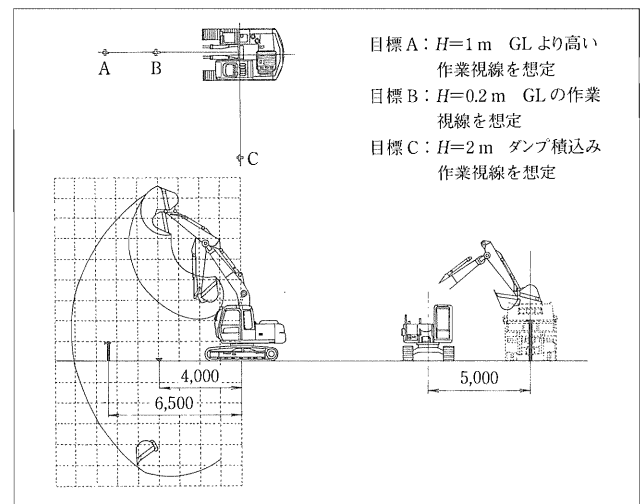
オペレータへの視覚情報が施工効率及び施工精度に大きく影響するという検討結果をもとに、作業ヤードの全体的な把握と対象物への奥行き情報に対して、有効と思われる視覚情報機器とカメラ位置について実作業を想定し評価試験を行った。

試験は、カメラをそれぞれのパターンで設置し（図一2）、バケット刃先の位置決め（図一3）作業を行い、

評価を行った。試験の結果、良好な成果が得られたのは、室内運転席、張出しカメラのパターンであった（表一2）。これは、室内運転席カメラが人間が搭乗し



図一2 カメラ取付け位置



図一3 バケット刃先の移動による位置決め試験要領図

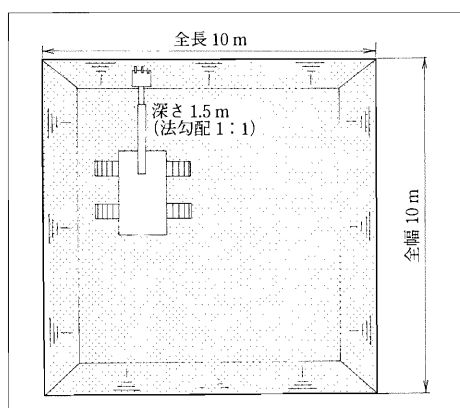
表一2 カメラの各配置による試験結果

	カメラ配置	カメラ配置				評価試験におけるオペレータの評価	本実験における判定
		室内足元	室内運転席	張出し	ブーム		
通常レンズ + 広角レンズ	パターン1	○	○			運転席カメラは、搭乗した場合と同じ視線高で感覚がつかみやすいが、足元カメラは遠近情報は得にくい。	△
	パターン2	○		○		張出しカメラで高さ、遠近感をつかみやすいが、足元カメラは遠近情報は得にくい。	○
	パターン3	○			○	ブームカメラは位置決めはしやすいが、作業時にモニタ画面がぶれる。足元カメラは遠近情報は得にくい。	△
	パターン4		○	○		張出しカメラは遠近感をつかみやすい。運転席カメラは、感覚がつかみやすい。	◎
	パターン5		○		○	運転席カメラは、感覚がつかみやすいが、ブームカメラはモニタ画面がぶれる。	△
	パターン6			○	○	張出しカメラは遠近感をつかみやすい。ブームカメラはモニタ画面がぶれる。	△
	パターン7		広角	○		張出しカメラは遠近感をつかみやすい。広角レンズは運転席の一部まで映すので作業しにくい。	○
	パターン8	○		広角		足元カメラで高さはつかみやすい。広角レンズはバケットの稼働範囲を広くとらえて、遠近感をつかみやすい。	○
通常レンズ + 広角レンズ	パターン9	○	○	広角		3画面は視覚情報が多すぎる。	△
	パターン10	○	広角	○		3画面は視覚情報が多すぎる。	△

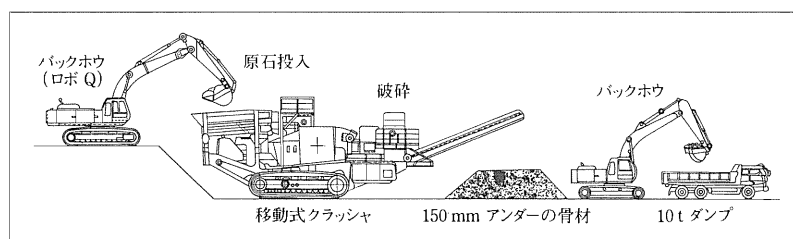
◎良好, ○普通, △不良

表—3 掘削, 法切, 整形作業試験結果

	実験条件	掘削時間	設計掘削土量 (m ³)	実掘削土量 (m ³)	設計に対する割合	掘削基準面との差		標準偏差	掘削面の状況
						掘削不足の最大値	掘削過多の最大値		
平成14年度	① 遠隔運転 (室内カメラ+張出しカメラ(通常レンズ))	6:11	110	100.8	92.0%	+180 mm	-90 mm	95.3	掘削土量はやや不足気味であり, 掘削基準面とのばらつきも大きい。また, 角部の掘削不足がある。
	② 遠隔運転 (室内カメラ+張出しカメラ(3D))	7:23	110	118.9	108.0%	+60 mm	-70 mm	51.6	掘削土量はやや過掘削気味であるが, 掘削基準面とのばらつきは少ない。また, 法面勾配はほぼ設計どおり確保されている。
平成13年度	③ 遠隔運転 (搭載カメラ+外部固定カメラ)	9:25	180	170	94.0%	+592 mm	-289 mm	280.1	掘削土量はほぼ設計土量に近いが, 全体的に掘削基準面とのばらつきが大きい。また, 法面勾配も全体的に確保されていない。
	④ 遠隔運転 (搭載カメラ+外部固定カメラ2台)	9:59	180	159.5	89.0%	+536 mm	-65 mm	254.3	掘削土量は不足している。また, 掘削基準面とのばらつきも大きい。法面勾配も全体的に確保されていない。



図—4 実証試験ヤード



図—5 原石投入試験機械配置図

た場合と同じ視覚であったことと, 張出しカメラが遠近感を認識しやすいカメラ配置であり, 作業全体のイメージがつかみやすかったためである。したがって, このカメラ配置で現場での実証試験及び3Dレンズを含めた試験について行うこととした。

(3) 視覚情報機器での実証試験

実証試験は, 視覚情報機器の機能評価試験に基づき実現場を想定した実験ヤードにて, 掘削, 法切, 整形作業の土工作业を行った。

また, 土工作业以外でも遠隔操縦ロボットの適用性を確認するため, 原石投入作業の試験を併せて行った。使用した機械及び試験要領については次のとおりである。

(a) 使用機械

① 掘削, 法切, 整形作業

- バックホウ: 0.5 m³ (遠隔操縦ロボット搭載)
- ダンプトラック: 4 t 車 (有人)

② 原石投入作業

- 原石投入バックホウ: 0.5 m³ (遠隔操縦ロボット搭

載)

- 移動式クラッシャー (有人)
- 碎石積み込み用バックホウ: 2~3 m³ (有人又は遠隔操縦ロボット搭載)
- 碎石搬出用ダンプトラック: 10 t 車 (有人)

(b) 掘削, 法切, 整形作業

0.5 m³ 級のバックホウを用いて, 実証試験ヤードを図—4 のとおり設定し, 掘削から積み込みまでの一連の作業における試験を行った。

表—3 に作業時間, 掘削土量等の項目についてまとめた。また表—3 には, 平成13年度に基礎検討のなかで行った実験データとの比較もしてみた。その結果, 作業ヤードの全体イメージと遠近感が認識できたため, 外部カメラ無しでの施工が可能となった。

3D レンズは, 精度を要する作業には有効であることが分かり, 掘削誤差については平成13年度と比較して大幅に向上した。したがって, 2台のカメラの適切な配置とレンズにより, 施工精度の向上及び画像システムの有効性が認識された。

(c) 原石投入作業による試験及び結果

掘削作業による試験と同様のカメラ配置により, 移動式クラッシャーへの投入作業の試験を行った。試験状況を図—5 に示す。試験結果は, 有人施工と比較して約80%の作業効率が得られ, 掘削以外の作業でも有

効性が確認できた。

6. さらなる普及への課題

遠隔操縦ロボットは、災害対策用途を主眼に開発し、その後更なる普及を図るため、一般工事への導入拡大を視野に入れて施工の効率化向上を図ってきた。ロボQは多くの関係者から高い技術的評価を得ているが現実的にはあまり使われていないという不本意な実態がある。その技術的要因としては次のような点が考えられ、課題の解決が急務となっている。

- ① 対象機種は最多販売されている0.7m³級バックホウを対象に開発したが、全てのメーカー、全ての機種に対応できていないため使用が限定されている。また最新機種は、盗難防止や省エネルギー運転など機械管理や制御技術の高度化、複雑化が著しく、これらへの技術的対応の困難さもある。運用上は適用機種の拡大が最重要課題といえる。
- ② 一般工事への適用拡大を拒む要因としては、有人作業に比べ作業効率や施工精度が劣ることが最大の要因である。現状技術での対応は困難なことから、新たに画像伝送の遅延量の改善や広視野、立体画像システムの技術開発・導入が必要不可欠

である。

- ③ ロボット技術は、危険作業や苦渋・過酷作業が伴う工程にも展望があるが、そのためには耐振性や耐衝撃性をさらに高める必要がある。

7. おわりに

今回紹介したバックホウ用遠隔操縦ロボットは開発導入後4年を経過しているが、運用面からは前述した大きな課題をまだ残している。「いつでも、どこでも、どの機種にも」実現場で安心して使ってもらえるよう課題の解決に向け最大限に取り組んでいく所存である。

最後に、「遠隔操縦による施工の効率化検討委員会」の皆様には的確なご指導、ご助言を賜り厚く御礼申し上げます。

J C M A



【筆者紹介】

田上 幸雄（たがみ ゆきお）
国土交通省
九州地方整備局
九州技術事務所

建設機械図鑑

本書は、日本建設機械要覧のダイジェスト版として、写真・図版を主体に最近の建設機械をわかりやすく解説したものです。建設事業に携わる方々、建設施工法を学ばれる方々、そして建設事業に関心のある一般の方々のための参考書です。

A4判 102頁 オールカラー 本体価格2,500円 送料600円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289