

簡易 VR を用いた「次世代無人化施工システム」の開発

建機の遠隔操作に VR を導入し、作業効率を改善したシステム

古屋 弘・清水 千春

建設分野におけるロボット化は急速に進み、数多くのシステムが実用化されてきた。その中でも特にめざましい活躍を遂げたロボット技術の代表として、無人化施工は困難な場所での施工のほか、災害復旧等において大いに活躍している。この無人化施工は、災害が多発する日本で独自に発展した技術であり、災害復旧時においては二次災害の危険が想定される範囲内を施工するために、遠隔操作により工事を実施するような場合に用いられることが多い。しかし、無線遠隔操作に基づく無人化施工では、有人操作時よりもオペレータの取得可能な情報量が少ないことによる施工効率の低下や、高度な熟練技術が必要で操作を行える技能オペレータの確保が困難であるといった問題があった。これらの課題解決の一つの手法として、筆者らは最新の無線通信技術、3D および体感型操作環境（簡易バーチャルリアリティー）の活用による「次世代無人化施工技術」を開発し、その効果を検証するために、バックホウ及びクローラキャリアを利用して、がれきの破碎・積み込み・運搬・荷下ろしの重機動作の検証と、施工効率を確認する実証実験を実施した。

実験の結果、従来型の無人化施工に対して20%の作業効率向上が確認され、長距離伝送性能の実用化に向けての無線中継技術に関する実用性も確認することができた。

キーワード：無人化施工、バーチャルリアリティー（VR）、体感型操作環境、3次元

1. はじめに

近年、特に災害復旧の初動段階において、二次災害等の恐れにより作業員が入れない場所や、人体に危険を及ぼす環境での作業の実施に対して、「無人化施工」のニーズがさらに高まりつつある。無人化施工は災害が多発する日本で独自に発展した技術であり、例えば、土石流等による二次災害の危険が想定される範囲内の復旧作業時に、安全な場所から建設機械等の遠隔操作により工事を実施する施工システムである。

無人化施工技術は年々機能や操作性も進歩し、数多くの現場で利用されてきているが、無線遠隔操作に基づく無人化施工では、有人操作時よりもオペレータの取得可能な情報量が少ないことによる施工効率の低下や、高度な熟練技術が必要で操作を行える技能オペレータの確保が困難であるといった問題があった。また、災害の種類によっては、より遠隔地からの操縦も必要となり、各種情報や制御信号を含むデータの長距離伝送に関する課題もうかびつつあり、これらの解決に向けた実験も行われている¹⁾。

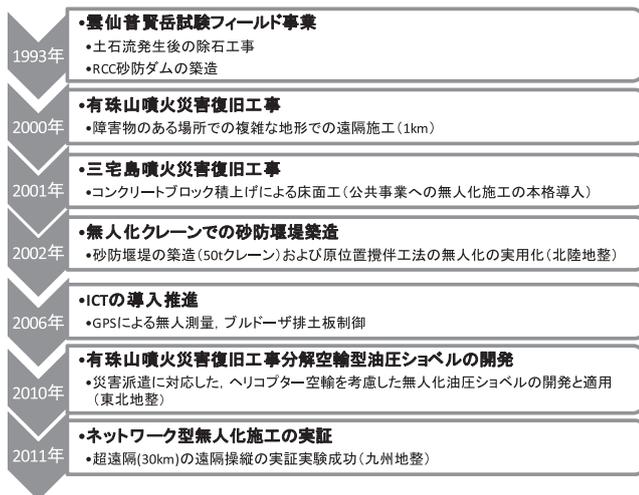
これらの課題解決のために、筆者らは最新の無線通信技術、3D および体感型操作環境（簡易バーチャルリアリティー）の活用による「次世代無人化施工技術」

を開発し、実工事への適用に向けて、新しく開発したシステムの効果に関する検証実験を行った。

2. 無人化施工の進展と建設を取り巻く状況

無人化施工技術は、ロボット技術の一つとして発展し、今日さまざまな現場で活躍するに至っている。この技術の発展には災害対策に対する、安全且つ確実な施工を実施するニーズがあった。特に近年は地震、豪雨、噴火災害など大規模災害が各地で発生し、それに対する対策に無人化施工が適用されている。

我が国の土木工事に無人化施工技術の基本原則である遠隔操作型の建設機械が導入されたのは、1969年の富山大橋の復旧工事であった。この時の遠隔操作は目視操作で行われたようであるが、水中作業を安全に行った技術は、その後の無人化施工技術の基礎になったと言える。その後、この技術が大きな進歩を遂げたのは、1993年の雲仙普賢岳噴火後の復旧工事への適用を目的とした「雲仙普賢岳試験フィールド事業」であった。この時に現在の機械技術、通信技術、情報処理技術が融合したシステムとしての無人化施工技術が確立したと言える^{2), 3)}。これ以降の無人化施工の技術の発展を図-1に示す。



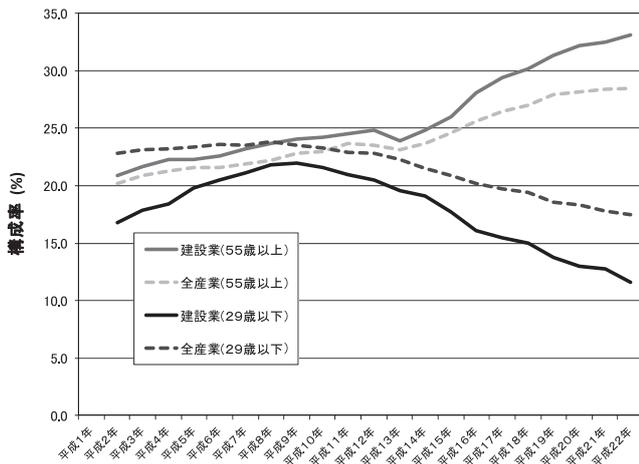
図一 無人化施工技術の変遷(1993年以降)

その後、我が国は不幸なことに、表一に示すような数多くの自然災害にさらされ(1992年から2011年まで記載)、多くの被害を受けている。これらの災害復旧や社会インフラの再構築にも無人化施工技術は大いに活躍している。

このように無人化施工は災害復旧に対する活躍も大きいですが、高度な技能や高い習熟度を有する作業員の不足に対しての技術的対応という面もある。例えば、図一に示すように建設業の就労者の高齢化と若年労働者の不足傾向は、他産業に比較して悪化しており、震災復興に関わる建設需要のほか、今後対応を迫られる国内の社会インフラの老朽化に伴う補修やリニューアルに対しての需要に答えられなくなる懸念もある。

表一 近年の国内の災害

年	大規模災害	建設関連の事項
1992		建設投資ピーク 84兆円, GPSを用いた転圧管理 実用化始まる
1993	北海道南西沖地震(7月), 平成5年8月豪雨(鹿児島県)(8月)	無人化施工技術の開発(鹿島建設, 大成建設, 西松建設, 熊谷組, フジタ), 無人化施工(試験開始: 雲仙)
1994	北海道東方沖地震(10月), 三陸はるか沖地震(12月)	大型土木工事における遠隔制御システム-雲仙普賢岳無人化施工(大成建設, フジタ, 大本組, 鹿島建設)
1995	兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)(1月)	GPSを用いた土工管理システム開発(大林組, 鹿島建設, 大成建設, 住友建設, 大日本土木)
1996		海外建設受注高史上最高(1兆5,926億円)
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害(7月)	建設業就業者数ピーク689万人
1998	高知豪雨(9月)	
1999	6.29豪雨災害(福岡・中国地方)(6月)	
2000	有珠山噴火(3月~), 三宅島噴火: 全島避難(7月~), 東海豪雨(9月), 鳥取県西部地震(10月)	
2001		雲仙・水無川の導流堤完成
2002		3次元データを用いたマシンコントロール実用化
2003	宮城県北部地震(7月), 十勝沖地震(9月)	国土交通省「TS・GPSを用いた盛土の締固め情報施工管理要領(案)」施行により, 土工における情報化施工が進展しはじめる
2004	新潟・福島豪雨/福井豪雨(7月), 新潟県中越地震(10月)	GPSを用いた締固め管理システムの開発(大林組, 大成建設, 鹿島建設, 前田建設, 住友建設, 大日本土木)
2005		国土地理院国内1,200点のGPSデータを配信サービス開始(7月), 「オフロード法」の公布(5月), 「改正廃棄物処分法」「公共工事事品質確保推進法」施行
2006	平成18年豪雪(日本海側), 平成18年7月豪雨(九州・中部)(7月)	
2007	能登半島地震(3月), 新潟県中越沖地震(7月), 福岡県西方沖地震(9月)	
2008	岩手・宮城内陸地震(6月), 平成20年8月末豪雨(紀伊半島~関東)(8月)	
2009	平成21年7月中国・九州北部豪雨(7月)	
2010	西日本豪雨災害(7月)	
2011	東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)(3月), 紀伊半島豪雨災害(9月)	



図一 建設業における就労者の年齢構成 (資料：総務省「労働力調査」)

さらに、若年層の建設産業就労者の減少は、次世代への技術継承のみならず、ICTなどの導入に向けてのリテラシーの向上といった観点からも憂慮すべき事態である⁴⁾。

このような建設業を取り巻く環境の中で、無人化施工へのニーズは増えつつある。しかし、現状では無人化施工に対応できるオペレータは少なく、新しいオペレータ育成は必要であるにもかかわらず、技能習得のチャンスが少ないといった状況である。また、無人化施工を必要とする災害復旧工事では、近年では特に難易度の高い作業が要求されることが多く、図一に示すような建設業の若年就労者不足に伴い、無人化施工に対応したオペレータを確保できないことも考えられる。

3. 無人化施工が抱える課題

無人化施工は、これまで述べたように災害復旧やそれに伴うインフラの構築において、人間が立ち入ることが困難な場所での施工に活躍してきたわけであるが、遠隔操作を行う手法として「直接目視」と「映像システム」を用いる方法がある。

直接目視操作は重機の近傍からの操作を前提としており、設備がシンプルで導入しやすい反面、建設機械の死角により操作効率が低い。しかし、オペレータが通常の操縦席から見えないような場所を作業ターゲットとする場合は威力を発揮する。

一方で映像システムは、設備が複雑になるが施工効率は直接目視方式より向上する。もちろん遠隔からの操作を前提としており、災害復旧を本格化するような場合はこのようなシステム化を用い施工を行うこととなる。近年では、この無人化施工は30 km以上離れた場所から施工が可能となっているが¹⁾、災害対応に

適用する場合には近年では無人化施工対応の機械の不足や、これに対応したオペレータの不足といった課題もでてきている。

4. VRを用いた次世代無人化施工技術の開発目的

3章で述べた幾つかの課題解決のために、筆者らは最新の無線通信技術、3Dおよび体感型操作環境(簡易バーチャルリアリティー)の活用による「次世代無人化施工技術」を開発し、その効果に関する検証実験を行った。

従来の無人化施工技術は、オペレータ席からの映像を映す車載カメラと、作業エリアを俯瞰して映し出す2系統のカメラの両者の映像情報を用いて遠隔操縦を行うものであるが、今回開発したシステムは操縦性の向上およびそれに伴う作業効率の向上を目指し、さらに以下の技術を盛り込み、実用化に向けての実験を実施することとした。

- ① 3Dカメラ等の活用：通常の遠隔操作に活用されているモニタリングカメラのほか、3Dカメラ、全方位カメラを利用し、視覚情報を増大させることにより操作性を向上させる。
- ② VR(バーチャルリアリティー)の導入：視覚情報のみならず現場での作業音、重機の振動・傾斜をセンサーで取得し遠隔操作席で再現することにより、オペレータに現場からの情報を実感的に与えることで、操作環境を通常の運転席に近づける。
- ③ 大きな情報伝送量の試験：最新のデジタル無線システムを活用し、画像や動作環境など多くの情報を活用できる環境を実現する。また、長距離遠隔操作を視野に入れ、中継局を利用した遠隔操作も実施する。
- ④ 遅延対策：映像システムと操作システムを分離し、各システムのデータ処理の遅延を最適化することにより、スムーズな操作を実現する。特に3Dカメラを搭載した1.4 m³バックホウ(後述表一2参照)では、通常カメラと3Dカメラのシステムを分離し、トラフィックを分散することにより遅延を防止することとした。
- ⑤ フェイルセーフ：通信障害などの無線の一時的な不通においても、重機同士の接触が起こらないように、スタンドアロンで動作する衝突防止(接近)センサーを装着し、安全対策を実現することとした。

これらの目標を実現するために、新しい技術を搭載した「次世代無人化施工システム」を構築し、その効果を検証するために、バックホウ及びクローラキャリアを利用して、コンクリート製のがれきの破碎・積み

込み・運搬・荷下ろしの重機動作の検証と施工効率を確認する実証実験を実施した。実験においては、施工効率の比較を行うために、通常の有人操作および有視界での無線操作による作業も行った。

5. 実証実験の内容

前章の目標の実現に向けて、新しい遠隔操作のシステムを開発し、2012年1月に埼玉県川越市のテストヤードにて施工試験を実施した。この実験では、コンクリート製のブロック（がれきに相当）を破碎、運搬車に積み込み、運搬、荷下ろしの一連の作業を行うことを想定し、以下の重機に遠隔操作のシステムを搭載した。

- ①バックホウ 1.4 m³ 級
- ②バックホウ 0.8 m³ 級
- ③クローラダンプ 10 t 級

上記の重機に搭載された遠隔操作システムの他、試験エリアの監視カメラ、長距離中継無線装置を配置した。実験の状況を図一3に示す。

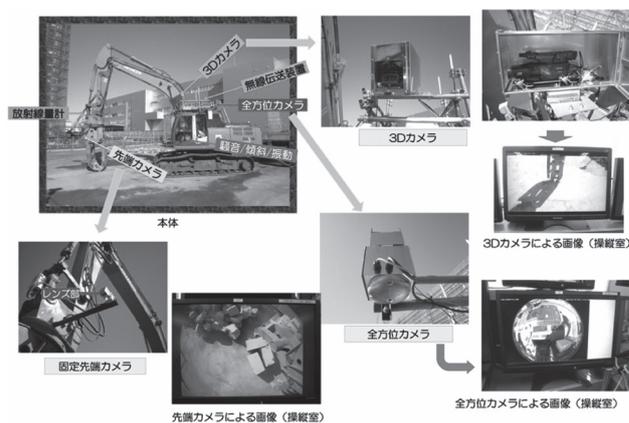


図一3 実験概要（実験に使用した機械と配置）

(1) 3D画像等による情報量の増大

今回の実験における検証の最も重要なポイントである、遠隔操縦を行うオペレータに対する視覚情報の増大を目的として、3Dカメラ、全方位カメラを1.4 m³級バックホウに図一4に示すようにそれぞれ配置し、実用検証を行った。キャビン上部の通常の作業時のオペレータの視線に近い場所に3Dハイビジョンカメラを設置するとともに、キャビン上部前方に全方位カメラ、ブーム先端に通常のカメラを配置した。なお、後述するバーチャル体感型操縦を実現するために、傾斜計、振動計、マイクを設置したほか、騒音計、放射線量計、衝突防止用の超音波センサも搭載した。

ここで特出すべき点は、全方位カメラの出力は通常はマルチモニターにて行うことが多いが、遠隔操縦オペレータは魚眼の画像を選択した点である。マルチモニ



図一4 無人化施工用バックホウにおける要素機器の配置

タによる視線移動よりも、魚眼形の画像に慣れ、一面面の中から情報を取得する方法を選択したわけである。通常重機による作業により近づけるために、後述する3D画像を提供することとしたが、遠隔操縦室ではモニターを介しての情報提供となることはシステム上仕方の無いことである。この時にあまり多くのモニターを配しても、逆にオペレータの情報取得を妨げる恐れがあることを示している。

(2) 遠隔操縦室へのVRの導入

重機に設置した様々なカメラから取得した視覚情報のみならず、現場での作業音、重機の振動・傾斜をセンサで取得した重機の情報を遠隔操作席で再現し、オペレータに現場からの情報を実感的に与えることで、操作環境を通常の運転席に極力近づけることを目的に、図一5に示すような操縦室を構成した。遠隔操縦オペレータに対して多くの情報を与えるために、以下のような機器（装置）を導入した。

- ①3Dモニター（ハイビジョン映像）
- ②体感装置付運転席
- ③作業重機キャビン内の音情報の再生装置

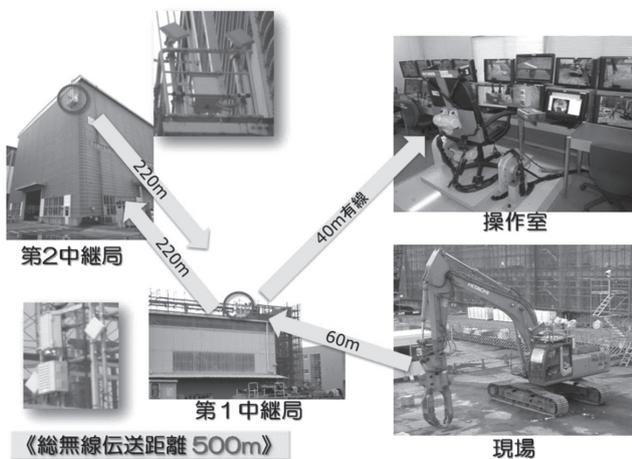


図一5 無線操作室における機器等の配置

上記の3つの装置は、三者を同時に使用することにより、より実際の重機に近い状況を遠隔操縦室に再現し、オペレータの操作支援を目的としたものである。体感装置付運転席は、重機に設置したセンサからの情報を、運転席の前後左右動で再現するものであるが、実際の重機では作業状況により、かなり運転席が急傾斜となる状況も発生しうる。このような状況を忠実に再現すると、平面場におかれたモニタとの乖離が生じて操縦に支障を来す恐れがあるため、座席傾斜の調整機能を設け、体感状況が損なわれない範囲で適切な運転姿勢が保たれるようにした。

(3) 情報伝送量の試験

無人化施工のシステムの要である遠隔操縦を実現する無線、および伝送システムに関しては、図一6に示すような伝送試験を実施した。これは、超遠隔操縦を行う場合、既存の通信網も利用することは充分考慮すべきではあるが⁴⁾、現場と既存インフラまでの所謂「ラストワンマイル」の部分では、無線中継等を利用する必要があり、この中継による問題点を明らかにすることを目的とした。



図一6 遠隔操作用無線システムと伝送実験概要

特に今回の実験では、重機に搭載した3Dハイビジョン画像のほか、様々なカメラ（全方位カメラ、現場固定カメラなど）の情報と、センサ類からの情報、操縦信号など非常に多くの情報を送受信する必要があった。このため、映像系統と操作系統を分離し、各系統のデータ処理の遅延を最適化することにより、スムーズな操作を実現することとした。今回利用した無線を表一2に示す。

ただし、このように操作系と画像系の無線を分離することは、現場導入の際の問題となる場合もある点に注意する必要がある。大規模な災害が発生した場合には、無人化施工に対応した機械が大量に投入されることも考えられ、この場合に無人化施工に利用できる周波数帯域が限られていることから、それらを効率よく利用することに配慮しなければならない場合がある。無線に関してのこのような問題解決に関しては、これからも継続した技術動向の監視と、必要に応じたシステム改良が必要である。

6. 実験結果

このように、新しい3Dおよび体感装置を装備した「次世代無人化施工技术」に関して、その操作性および作業効率の検証を行った。以下に検証委結果をまとめる。

(1) オペレータへのヒアリング結果

今回のシステムでは図一7に示すように、3Dモニタを中心に6つのモニタからの情報を視覚で捉えながら、体感型操縦席に座り、重機の姿勢や周囲の音などを遠隔操縦室で体感しながら重機をコントロールすることとなる。この際の3Dメガネ装着や体感装置の動きなどに対するオペレータの感想をヒアリングし、システムの成熟に役立てることとした。

表一2 実験で用いた無線システム

機械名	使用機械	規格	周波数	送信電力	通信プロトコル	通信速度
遠距離操作 バックホウ1 1.4 m ³ 級	遠隔操作無線	新簡易無線	348 MHz	1 W 以下	独自	2,400 bps
	映像伝送無線 1	包括無線 (アクセス無線)	4.9/5 G 帯	250 mW 以下	IEEE802.11j	54 Mbps
	映像・音声伝送無線 2	包括無線 (アクセス無線)	4.9/5 G 帯	250 mW 以下	IEEE802.11j	54 Mbps
遠距離操作 バックホウ2 0.8 m ³ 級	遠隔操作無線	包括無線 (アクセス無線)	4.9/5 G 帯	250 mW 以下	IEEE802.11j	54 Mbps
	映像伝送無線	包括無線 (アクセス無線)	4.9/5 G 帯	250 mW 以下	IEEE802.11j	54 Mbps
	カメラ切替制御無線	包括無線 (アクセス無線)	4.9/5 G 帯	250 mW 以下	IEEE802.11j	54 Mbps
遠隔操作 クローラダンプ 11 t 級	遠隔操作無線	新簡易無線	348 MHz	1 W 以下	独自	2,400 bps
	エリアセンサ	特定小電力無線	429 MHz	10 mW 以下	独自	1,200 bps
長距離中継無線	中継用無線	小電力データ通信システム	25 G 帯	2 mW 以下	独自	150 Mbps



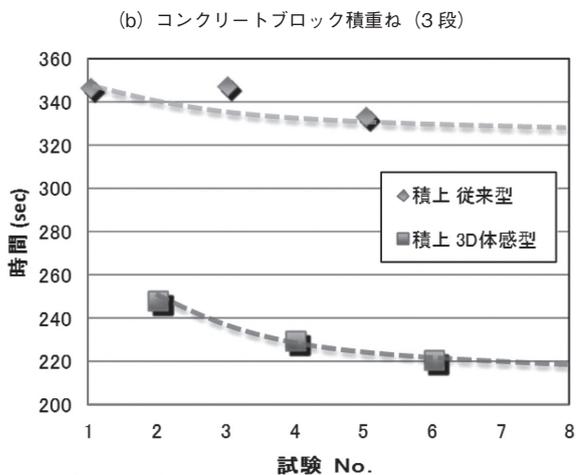
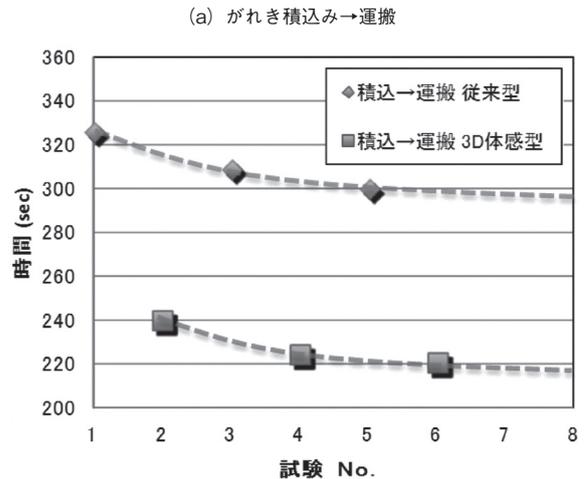
図一七 操作室における遠隔操作の状況

体感装置および3Dのハイビジョン画像はオペレータに非常に好評で、今回の実験では次に述べるコンクリートブロックの積上げ（サイクルタイム計測のための遠隔操縦による積上げ）試験では、従来型の遠隔操縦に対しての情報量の多さと、臨場感に関してよい印象を述べる事が多く、ヒアリングの結果からは操作性に関して、従来のシステムに対して改善されたと思われる。ただし、より良い作業性の実現にはさらに多くのオペレータのサンプルの意見・感想が必要である。

(2) 作業効率の比較

従来型の無人化施工技術と、今回の3Dおよび体感装置を用いたシステムとの作業効率の比較を行うために、①3個のコンクリートブロックを積み込み→運搬→荷下ろしする作業と(図一八の(a)), ②3個のブロックを積み重ねる作業(図一八の(b)), の2つに関してサイクルタイムの比較試験を実施した。この際、それぞれのシステムに対してオペレータの慣れが生じるため、各3回の作業を交互に実施(図一八に示す試験No.に対応: 1. 従来型→2. 3D体感型→3. 従来型→4→5→6) することとした。試験の結果を同図に示す。

それぞれのシステムで、①, ②の作業とも、オペレータの慣れにより、作業回数が進むにつれ作業時間は短



図一八 サイクルタイムの比較 (従来型と今回開発した3D体感型)

くなっていくことが解る。また試験回数が各3回と少ないが、図一八の実験結果から計算した外挿結果(図中の破線)から、作業にかかるサイクルタイムは収斂していくようである。

この結果に加え、さらにブロック1個の運搬、破碎後の細かいブロックの積み込み作業を、遠隔操作によらない機上作業のサイクルタイムも含めてまとめたものを表一三に示す。遠隔操縦による無人化施工の効率が通常の機上操作に比べ低いことは仕方ないことであるが、例えば表一三に示した作業のうち、単純なブロック運搬では、今回開発した3D体感型のシステムでは、機上操作に比べてもサイクルタイムの低下

表一三 作業サイクルタイムと施工効率の比較

作業	①機上操作 (sec)	無線操作 (sec)		効率 (%)		
		②3D体感型	③従来型	A: ①/②	B: ①/③	A-B
ブロックの運搬	76	80	118	95	64	30
破碎後のブロック積込	87	111	165	78	52	25
3ブロックの運搬	149	229	361	65	41	23
3ブロックの運搬・積上	154	236	387	65	39	25

はほとんどなく、他の作業に関しても従来型よりも優位である結果が得られた。

作業効率を、遠隔操作による作業時間を機上作業による作業時間で除して求めると（表-3のA、Bの項目）、従来型の遠隔操作では40～65%程度の作業効率であるのに対し、今回開発した3D体感型では65～95%の効率となった。このように、無人化施工の作業効率は、一般的に言われているように、従来の施工に比べ50～60%程度であるということが実験結果からも示されたとともに、今回開発したシステムの有効性が示された。

以上の結果から、作業効率は従来型の無人化施工に対して20%以上の向上を達成できたものと考ええる。

7. おわりに

今回の3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人施工システム」の開発と、その検証実験で以下の知見を得た。

- ① 3D映像及び体感装置を用いた遠隔操作システムは、オペレータにとって操作性を向上させる。
- ② 機上作業に対しての作業効率の低下は否めないが、従来型の遠隔操作技術に対して、その低下の割合は少ない。
- ③ 従来型の遠隔操作技術に対して、効率は20%以上向上する。

今回紹介した無人化施工のシステムは、まだ実験段階で実用化には至っていない。過酷な現場での実用化には当然障壁が予想されるが、新しい試みとして体感型操縦装置、および3Dハイビジョンシステムを導入してオペレータ支援を行うシステムは、今後の無人化施工に寄与する技術となるものと考ええる。実験の期間や場所の制約から、多くのケースの実験を行うことができず、必ずしも精度の高い検証が行えたとはいえないが、現場施工への適用（実用化）の可能性を強く示

すことができたと考える。また、今回の実験では比較的安定した環境で無線通信を行うことができたが、実際の現場では前述のように、無線の混信や周波数の取合い等の問題も懸念される。この部分に関しては、これからも引き続き検討する必要がある。

無人化施工技術は、災害復旧に多用されているが、国内の災害発生がなくなり、この技術の効率が上がり、通常の施工方法に変わって一般的なものに適用され、建設環境の向上に寄与できるようになる技術まで昇華することを切に望むところである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 建設無人化施工協会 技術委員会：雲仙普賢岳火山砂防事業における無人化施工の最新技術，2011.10
- 2) 建設無人化施工協会 技術委員会：無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，2006.11
- 3) 猪原幸司他：災害復旧における遠隔操作式建設機械の現状と最新の工事例，建設機械，2005.5
- 4) 古屋 弘：（総説）建設事業における情報化施工（ICT）の活用，基礎工 Vol.40, No.5, pp.2-7, 2012.5
- 5) 土木学会建設用ロボット委員会：建設用ロボット技術による災害対応および復旧・復興支援に向けた提言，2012.2
- 6) 猪原幸司他：災害復旧における遠隔操作式建設機械の現状と最新の工事例，建設機械，2005.5
- 7) 建設無人化施工協会 技術委員会：無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，2006.11
- 8) 第24回建設用ロボットに関する技術講習会テキスト，土木学会，平成19年5月

【筆者紹介】

古屋 弘（ふるや ひろし）
 ㈱大林組
 技術研究所 生産技術研究部
 主任技師



清水 千春（しみず ちはる）
 ㈱大林組
 東京機械工場 技術開発支援課
 課長

