

3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」

古屋 弘 栗生 暢雄 清水 千春
(本社機械部) (東京機械工場)

Development of Next-Generation Remote-Controlled Machinery System

Hiroshi Furuya Nobuo Kuriu Chiharu Shimizu

Abstract

Unmanned construction systems using remote operation technology have been independently developed in Japan for construction in dangerous areas with the potential for secondary disasters due to debris flow. However, remote operation based on remote control radio has issues and construction difficulties because of the decrease in efficiency and the small amount of information available to the operator; these constraints mean the operator must be skilled in performing operations more advanced than those for manned operation. In order to solve these challenges, "Next-generation remote-controlled machinery system" has been developed wherein wireless communication technology, the apparatus (the cockpit which can feel the state of the remote controlled machine) and 3D images (i.e., a simple virtual reality system) are utilized; the effectiveness was verified by using backhoes and a carrier. The construction efficiency of the system was verified by operation of heavy machinery.

The results of the field test showed that work efficiency was improved 30% compared to conventional remote operation and confirmed the usefulness of radio relay technology.

概 要

建設分野におけるICTの活用は近年急速に普及し、無人化施工およびマシンコントロールが多くの現場で活用され、通常の施工のほか、災害復旧等において大いに活躍している。特に無人化施工は、災害が多発する日本で独自に発展した技術であり、遠隔操作により工事を実施するシステムであるが、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る。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)の活用による「次世代無人化施工システム」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30%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。

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、放射線量が高いなど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、土石流等による二次災害の危険が想定される範囲内を施工するために、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浮かびつつある。

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)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. 建設に関わる近年の状況

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

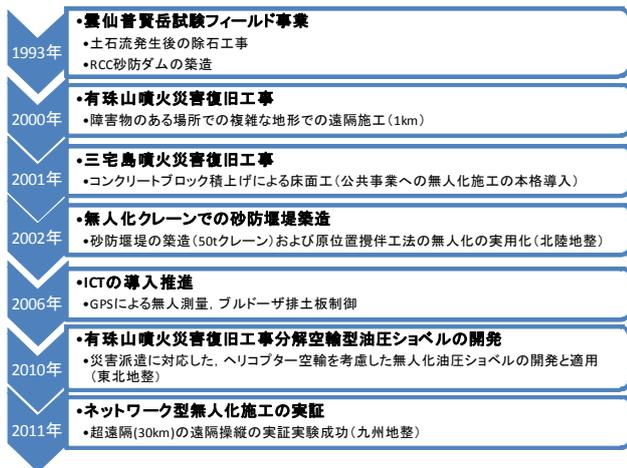


Fig. 1 無人化施工技術の変遷
Changes in construction technology for remote-controlled machinery system

Table 1 近年の災害
History of disaster in recent years

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 実用化はじまる
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、フジタ、大本組、熊谷、鹿島)
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(1兆5926億円)
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害	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、体制建設、鹿島建設、前田建設、住友建設、大日本土木) 国土地理院 国内1200点のGPSデータを配信サービス開始(7月)
2005		「オフロード法」(特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律)の公布(5月) 「改正廃棄物処分法」施行 「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(紀伊半島から関東)(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	
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)	

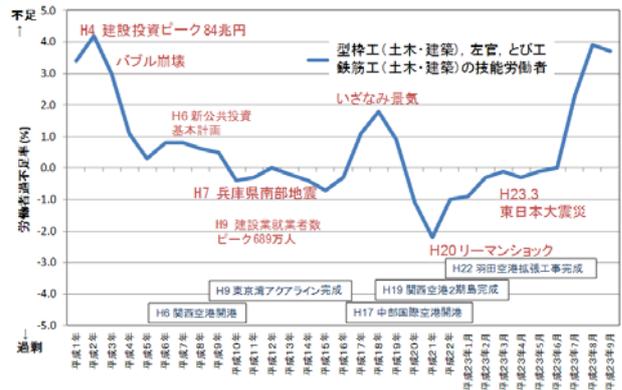


Fig. 2 建設業における熟練工の不足率
総務省「労働力調査」に加筆
Skilled labor shortage rate of construction

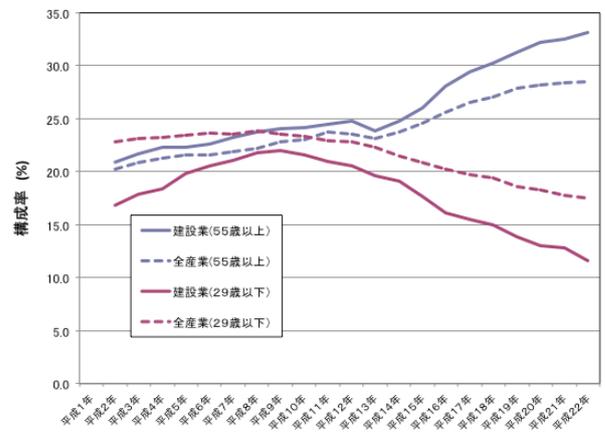


Fig. 3 建設業における就労者の年齢構成
総務省「労働力調査」に加筆
Trends in the age structure of construction workers

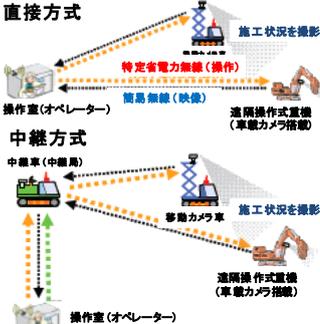
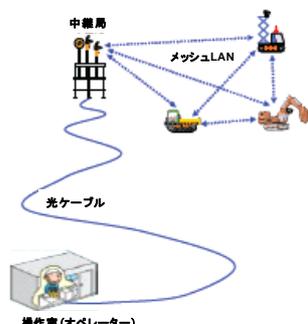
無人化施工が適用されている。無人化施工の技術の発展をFig. 1 に示す。

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^{1) 2)}。

その後、我が国は不幸なことに、Table 1 に示すような数多くの自然災害にさらされるとともに(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、無人化施工は危険区域での緊急的な施工手段として必要不可欠であるが、無人化施工のシステム導入時のインシヤルコストや、運用における経済性およ

Table 2 無人化施工システムの分類
Classification of remote-controlled machinery system

分類	直接目視による無人化施工	映像伝送システムを用いた無人化施工	
施工方式	直接操作方式	モニター操作方式	有線・ネットワーク併用操作方式
操作概要	オペレーターが機外から遠隔操作用重機を直接目視しながら操縦する。	オペレーターが重機または対象エリアに設置されたカメラから捉えられた映像をモニターで見ながら操縦を行う。	
システムのイメージ		 <p>直接方式 操作室(オペレーター) → 特定省電力無線(操作) → 遠隔操作式重機(車載カメラ搭載) → 施工状況を撮影 → 簡易無線(映像) → 操作室(オペレーター)</p> <p>中継方式 操作室(オペレーター) → 特定省電力無線(操作) → 中継車(中継局) → 移動カメラ車 → 遠隔操作式重機(車載カメラ搭載) → 施工状況を撮影 → 簡易無線(映像) → 操作室(オペレーター)</p>	
遠隔操作適用範囲の目安	目視ができる条件で50m程度	<ul style="list-style-type: none"> 直接方式 300m程度(ただし障害物がない) 中継方式 600m程度(中継局1機の場合) 	600m以上3km程度まで ※ただし実証実験の結果、数10kmでも対応可能であることが実証済み
主な操作用無線	特定省電力無線 無線局免許: 不要 無線従事者免許: 不要		5GHz帯無線(IEEE802.11j) 無線局免許: 必要(登録) 無線従事者免許: 必要 (第三級陸上特殊無線技師)
主な映像伝送無線	—		50GHz帯簡易無線 無線局免許: 必要 無線従事者免許: 不要 ※操作信号と映像信号は一つの電波で送受信する

び施工性(施工効率等)が劣るなどの問題があるとともに、通常の機械施工とは異なる運用であるために、オペレータをはじめとする運用教育も必要となる点は、技術適用にあたっての課題である。

ところで、Fig.2は1989年からの国土交通省「建設労働需給調査結果」に2011年の月次状況、および関連する社会情勢の一部を追記したものである。また、Fig.3は総務省「労働力調査」から他産業と建設業の就労者の年齢構成を示したものである³⁾。建設業の活況は、公共投資に大きく影響を受ける点で他産業との相違点であるが、Fig.2において、バブル崩壊後はいざなぎ景気の期間を除き、建設業労働者の需給は安定からやや過剰状態であったが、2011年3月の東日本大震災以降、労働者の不足傾向が顕著になりつつあることが解る。このような情勢のなか、Fig.3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するの需要に答えられなくなる懸念もある。さらに、若年層の建設産業就労者の低下は、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。

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にもかかわらず、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、前述の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出来ないことも考えられる。

3. 現在の無人化施工技術

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、無人化施工の適用に際しては、立入禁止区域の大きさ等の現場条件に応じて、遠隔操作を「直接目視」あるいは「映像システム」を使い分ける必要がある。

直接目視操作は、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が向上する。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行い、施工を行う事となる。現場条件と実施方式の関係についてTable 2に示す。

Table 3 無人化施工で用いられる無線の種類
Type of radio used in remote-controlled machinery system

	無線の種類	免許の 要否	出力	到達距離
操作 用無線	429MHz特定小電力無線		10mW以下	300m
	1.2GHz特定小電力		10mW以下	300m
	5GHz無線LAN	要	250mW以下	800m
	2.4GHz小電力データ通信システム		10mW/MHz以下	1,000m
	2.4GHz無線LAN		10mW/MHz以下	1,000m
	小エリア無線局(簡易無線局)(384MHz)	要	1W	1,000m
	400MHz実験局(建設無線)※	要	1W	5,000m
映像 用無線	2.4GHz小電力データ通信システム(OFDM無線)		10mW/MHz以下	500m
	5GHz無線LAN	要	250mW以下	800m
	2.4GHz小電力データ通信システム		10mW/MHz以下	1,000m
	2.4GHz実験局(建設無線)※	要	1W	2,000m
	2.4GHz実験局(デジタル建設無線)※	要	500mW	2,000m
情報 用無線	50GHz簡易無線	要	30mW	10km
	422MHz特定小電力		10mW以下	500m
	2.4GHz小電力データ通信		10mW/MHz以下	1,000m

※実験での利用

3.1 無人化施工の対象となる重機

無人化施工は、対象とする工事に対して適切な重機を選択し、現場の必要条件を満たす形で使用機械や通信システムを選定する。Fig. 1 に示すように、無人化施工技術は火山対策から発展したため、遠隔操作機械は土工機械が多く、現状では機種・規格は限られている。バックホウは、比較的、規格がそろっているが、それ以外の機種は台数が限られているのが現状である。現在利用されている無人化施工に利用されている建設機械としては、ブルドーザ(湿地タイプ、水陸両用含む)、バックホウ(各種アタッチメントに対応)、重ダンプトラック(アーキュレート型含む)、不整地運搬車(クローラキャリア)、振動ローラであり、付随する作業車として、移動カメラ車、無線中継車がある。

近年、無人化施工を適用するにあたって課題となっている点は、遠隔操作機械は、国内保有台数が限られていることから、重機の入手(リース)が困難になりつつあり、入手した場合でも長距離輸送が必要となる場合が多い。また、適用現場への搬入にあたっては、大きさ・最大重量などの輸送制限を考慮する必要がある点である。これらの解決策として、Fig. 1 に示すように分解空輸可能なバックホウも開発され、実用化されている(東北地整)。

3.2 無人化施工に必要な設備

無人化施工(直接目視タイプは除く)では、以下の設備が必要となる。

- ① 映像設備(移動カメラ, 車載カメラ, 固定カメラ等)

- ② 無線設備(操作, データ伝送)
- ③ 移動カメラ車, 移動中継車
- ④ 遠隔操作室
- ⑤ 施工支援設備(情報化施工関連機器含む)

上記のほか遠隔操縦を行うことから、3.1に示した遠隔操縦対応重機(油圧等の各種制を行う重機のシステムを搭載したものは必須であるとは言うまでもない。

ところで、映像の伝送は、施工の安全確保や作業効率を向上させる点からも遅延が少なく高品質であることが要求され、50GHz帯簡易無線局や2.4GHz帯小電力データ通信システム無線局(OFDM方式)が一般的に採用されている。

直進性の高い50GHz帯簡易無線局は、電送出来る情報量が多くなる反面、アンテナ同士を常時対向させる必要から、ジャイロと角度計により対向を維持する自動旋回台などを用いたシステムが用いられている。

3.3 無人化施工に用いられる無線通信技術

無人化施工では、機械遠隔操作や映像伝送等に様々な無線通信が使われている。無線の選定は、通信の内容、必要距離、現場条件(見通し等)を考慮する必要がある。Table 3には、現在の無人化施工で使用される無線の種類を示す。Table 3に示した(※)は、建設無人化施工協会が公益目的での使用認可を受けており、2008年の岩手宮城内陸地震において東北地方整備局実施の緊急工事で使用された。また同協会は、2000年の有珠山噴火では、郵政省から出力2W(到達距離:10km)の緊急措置として

使用認可を受け遠距離からの無人化施工を実施したものである。

多くの無人化施工では、遠隔操作に特定小電力無線(429MHz帯)、映像伝送に簡易無線(50GHz帯)が使用されている。しかし通信距離や伝送能力に制約があるため、一部の先駆的企業により、携帯電話網等を用いた効率的な長距離遠隔操作技術の研究開発も行われている。

また、Table 2 に示したように、国土交通省は、10台以上の高精度映像を用いた重機遠隔操作について光ケーブルと無線LAN(IEEE802.11j メッシュLAN)の有効性を確認するとともに、光ケーブルと回折効果のある公共ブロードバンド無線を組み合わせた長距離遠隔操作技術(ネットワーク型操作方式)の適用性を検証している。

4. 無人化施工が抱える課題

Fig.1 , Table 3で示したように、無人化施工は30km以上離れた場所から施工が可能となっているが、災害対応に適用する場合には課題も多い。

4.1 オペレータの減少

斜面等の悪条件下で無人化施工に対応できるオペレータは、国内でも僅か減少傾向にあるとのことである。技能習得機会としての無人化施工の工事件数が少ないことに加え、公共工事の競争が激しく、定期的かつ継続的に工事受注出来ない場合がほとんどで、Fig.3 の労働者の減少も相まって、民間企業が技術者を確保しておくことが困難な状況にある。

4.2 無人化施工適用の判断の難しさ

無人化施工は、後述するように、着手までに時間がかかることに加え、工事内容や規模が制約される。危険な工事すべてに対して無人化施工が適用出来るわけではなく、実施が困難な場合も多い。以下、無人化施工が適用出来ない場合を示す。

(1) 時間的制約がある場合 無人化施工は、対応可能工種であっても現場条件によっては作業効率が低くなるため、有人作業で実施するケースも考えられる。災害による緊急工事において、危険箇所での作業を無人化施工で行う事は望ましいことであるが、2次災害の防止など緊急性が高い場合には、危険性が伴う工事であっても、時間的制約および確実な対策工の施工という観点から、無人化施工の採用を見送るケースもある。

(2) オペレータが確保できない場合 災害復旧工事などで、斜面のように足場条件が悪いところでの遠隔操作は、重機が転倒し損壊するリスクを伴う。奥行き感のないカメラ映像のみを頼りに操作を行うオペレータには、空間把握と高度な操作技能が要求される。このような高度な操作技術を有したオペレータは前述の通り少なく、無人化施工を数多く手がけている施工業者の系列なども絡み、オペレータの確保が困難な場合が多い。

4.3 作業着手までの準備時間

無人化施工を実施するにあたっては、特有の機材調達が必要であり、無人化施工の実施を決めてから着工まで、機材の調達、設定や特殊車両通行許可申請等を含めて、これまでの実績から最短で10日程度を要する。有珠山の噴火当時は、当局の判断は迅速だったものの、機材の調達も含めて着手に1ヶ月を要した。これらは機材調達以外に数々の申請手続きが複雑であるためだが、関係者の意識が高まり、着工までの短縮化が図られているようである。

5. 次世代無人化施工技術の開発目的

3章で述べたように、既存の無人化施工技術は実用化され、災害復旧等で活用されているが、4章で示し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能を向上させる。
- (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。特に3Dカメラを搭載した1.4m³バックホウ(後述Table 4参照)では、通常カメラと3Dカメラの系統を分離し、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)センサを装着し、安全対策を実現した。



Fig. 4 実験概要(実験に使用した機械と配置)
Overview of test site

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。

6. 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(株)大林組東京機械工場内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 1.4m³ 級
- (2) バックホウ 0.8m³ 級
- (3) クローラダンプ 10t 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Fig.4 に示す。

6.1 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1.4m³級バックホウにFig.5 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ーも搭載した。

ここで特出すべき点は、全方位カメラの出力を通常はマルチモニターで行うことが多いが、遠隔操縦オペレータは魚眼の画像を選択した点である。マルチモニターによる視線移動よりも、魚眼形の画像に慣れ、一画面の中から情報を取得する方法を選択したわけである。通常为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に妨げと恐れがあることを示している。

6.2 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・傾斜をセンサー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、Fig.6 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。

- (1) 3D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



先端カメラによる画像 (操縦室)
Fig. 5 無人化施工用バックホウにおける機器配置
Equipment layout to the backhoe



Fig. 6 無線操作室における機器等の配置
Equipment layout of the remote control cockpit

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だが、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。

6.3 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、Fig.7 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る、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。

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Table 4 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、実用上のネック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出来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。

7. 実験結果

前節で示したような技術を盛り込んだ「次世代無人化施工技術」に関して、その操作性および作業効率の検証

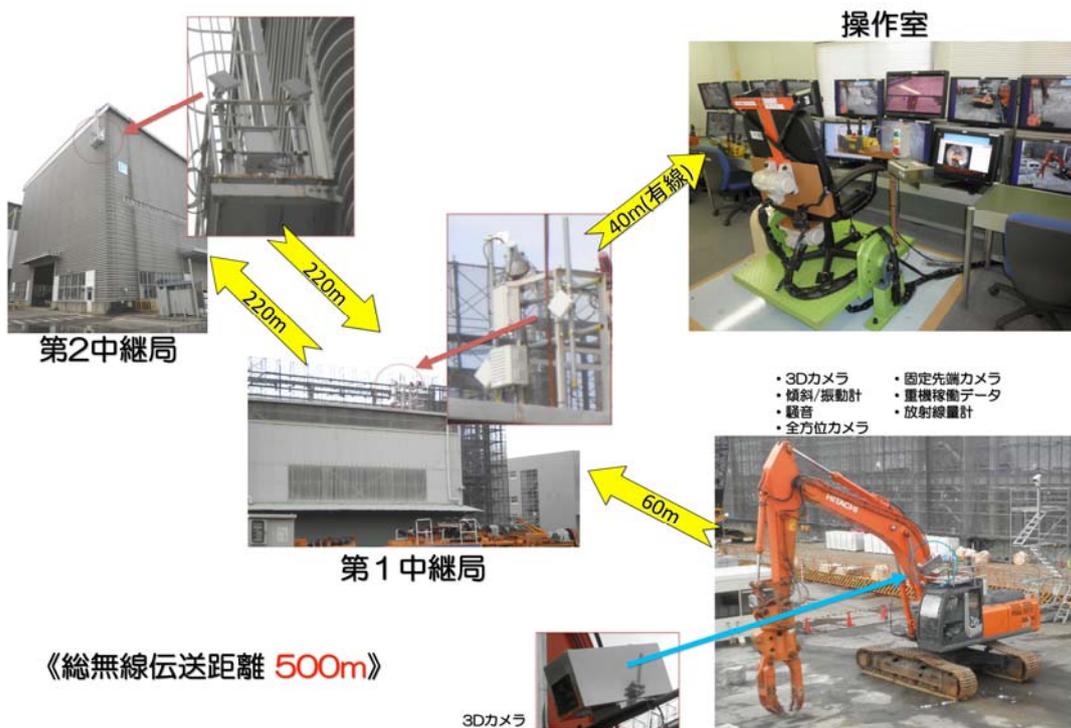


Fig. 7 遠隔操作用無線システムと伝送実験概要
Wireless transmission system diagram

Table 4 実験で用いた無線システム
Wireless standards in the system

機械名	使用無線	規格	デジタル	アナログ	周波数	送信電力	通信プロトコル	通信速度
遠隔操作/バックホウ1 1.4㎡級	遠隔操作無線	新簡易無線		○	348MHz	1w以下	独自	2400bps
	映像伝送無線1	包括無線(アクセス無線)	○		4.9/5G帯	250mW以下	IEEE 802.11j	54Mbps
	映像・音声伝送無線2	包括無線(アクセス無線)	○		4.9/5G帯	250mW以下	IEEE 802.11j	54Mbps
遠隔操作/バックホウ2 0.8㎡級	遠隔操作無線	包括無線(アクセス無線)	○		4.9/5G帯	250mW以下	IEEE 802.11j	54Mbps
	映像伝送無線	包括無線(アクセス無線)	○		4.9/5G帯	250mW以下	IEEE 802.11j	54Mbps
	カメラ切換制御無線	包括無線(アクセス無線)	○		4.9/5G帯	250mW以下	IEEE 802.11j	54Mbps
遠隔操作クローラダンプ 11級	遠隔操作無線	新簡易無線		○	348MHz	1w以下	独自	2400bps
	エリアセンサー	特定小電力無線	○		429MHz	10mW以下	独自	1200bps
長距離中継無線	中継用無線	小電力データ通信システム	○		25G帯	2mW以下	独自	150Mbps

を行った。以下に検証委結果をまとめる。

7.1 オペレータへのヒアリング結果

今回のシステムではFig.8 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。

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ものが多く、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。

7.2 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(Fig.9 の(a)), ②3個のブロックを積み重ねる作業(Fig.9 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(Fig.9 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Fig.9 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、Fig.9 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。

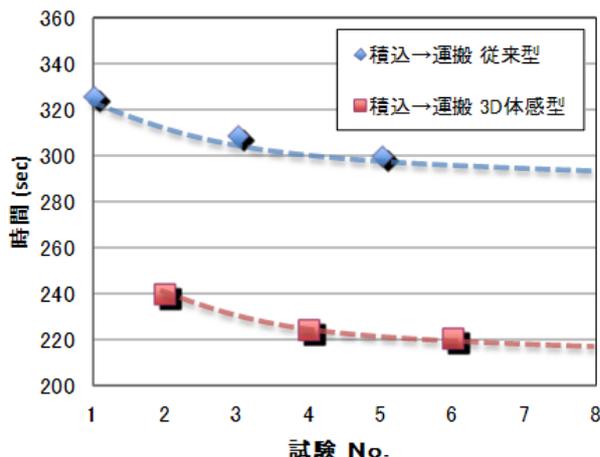
この結果に加え、さらにブロック1個の運搬、破碎後の細かいブロックの積み込み作業を、遠隔操作によらない機上作業のサイクルタイムも含めてまとめたものをTable 5 に示す。遠隔操縦による無人化施工の効率が通常の機上操作に比べ低いことは仕方のないことであるが、例えばTable 5 に示した作業のうち、単純なブロック運搬では、今回開発した3D体感型のシステムでは、機上操作に比べてもサイクルタイムの低下はほとんどなく、他の作業に関しても従来型よりも優位である結果が得られた。

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(Table 5 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



Fig. 8 遠隔操作の状況
Remote control situation

(a) がれき積み込み→運搬



(b) コンクリートブロック積重ね(3段)

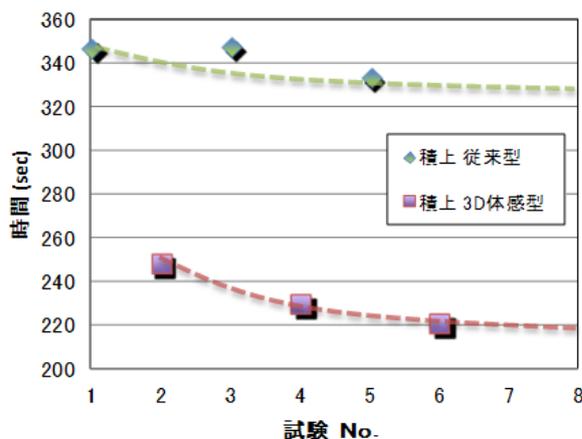


Fig. 9 サイクルタイムの比較
(従来型と今回開発した3D体感型)
Comparison of cycle time
(Conventional remote control system vs. 3D system)

Table 5 作業サイクルタイムと施工効率の比較
Comparison of cycle time and work efficiency

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	C:②/③
ブロックの運搬	76	80	118	95.00	64.41	67.80
破碎後のブロック積込	87	111	165	78.38	52.73	67.27
3ブロックの運搬	149	229	361	65.07	41.27	63.43
3ブロックの運搬・積上	154	236	387	65.25	39.79	60.98

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。

作業効率は、従来型の無人化施工に対してFig.9 およびTable 5(Cの項目)から、従来の無人化施工に対して30%以上の向上を達成出来たものとする。

8. まとめ

今回の3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」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) 機上作業に対する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。

本論文にまとめ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する。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、必ずしも統計的に精度の高いデータが取得出来ていないことは否めないが、現場施工への適用(実用化)の可能性を強く示すことが出来たと考える。

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事ができたが、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、通常の施工方法が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出来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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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事例，建設機械，2005.5
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 新田恭士：災害復旧に貢献する無人化施工技術，土木技術 Vol.67, No.4, pp. 2012.4.