

超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察

—雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要—

○新田恭士^{※1}、松尾修^{※1}、北原成郎^{※2}、黒田昇^{※3}、田村圭司^{※4}、下田孝徳^{※5}

**A study of the application of ultra-long-range remote-controlled construction technology
- A summary of ultra-long-range remote control experiment in Mt. Fugen in Unzen -**

○Yasushi NITTA, Osamu MATSUO, Shigeo KITAHARA, Noboru KURODA, Keiji TAMURA,
Takanori SHIMODA

大規模火山噴火では、危険区域が火口から10kmを超える広範囲に及ぶ場合がある。これまで無人化施工は、そのほとんどが1km未満の範囲からの遠隔操作であり、10kmを超える長距離からの遠隔操作については、施工実績もなく適用性についての技術的検証も事例がなかった。著者らは、広範囲に立入制限された大規模災害を想定し、光ケーブル網等の長距離通信手段を活用することで30キロメートル以上の遠隔地からの超長距離無人化施工技術について実地検証を行った。検証では、長距離通信手段として光ケーブル、長距離無線 LAN、衛星通信を適用するとともに、近距離の現場内通信手段として特定小電力無線、無線 LAN、公共ブロードバンド (BB) 無線を適用し、データの伝送能力、伝送の遅延や映像劣化が操作性に与える影響、オペレータの技量差や操作限界について検証を実施した。検証の結果、雲仙復興事務所管内の大型建設機械を30km以上離れた操作室から遠隔操作が可能であることを確認するとともに、超遠隔地からの無人化施工の工事への適用性についての課題を明らかにした。本報文は、この実地検証の内容と結果を総括し、今後の災害適用に向けた考察を報告するものである。

キーワード : 無人化施工、長距離遠隔操作、無線 LAN、光ファイバ網、データ伝送遅延

In large-scale volcanic eruption, danger zone may reach as far as 10km. There has been no experience and technical verification of long-range remote-controlled execution in the distance. Almost all the case of them have been controlled within 1km. The authors, taking advantage of long-distance communication means such as optical cable networks, was carried out on-the-spot investigation of remote control technology for more than 30 kilometers. Validation, we applied optical cable network, wireless LAN, satellite communications, a wireless broadband public, we examined influence transmission capacity, transmission delay, deterioration in the video quality, about the limit operator actions taking account of their skill. It was confirmed that as a result, remote operation is possible from more than 30km away a large construction machinery. In addition, the author made clear issues for the applicability of the ultra-long-range remote-controlled construction technologies.

Keywords : Unmanned construction, Ultra-long-range remote control, wireless LAN, optical cable network, transmission delay

※1 (財)先端建設技術センター

※2 建設無人化施工協会

※3 株式会社西松建設

※4 (財)砂防地すべり技術センター (前 国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所長)

※5 国土交通省九州地方整備局

1. はじめに

大規模火山噴火では、危険区域が火口から10 kmを超える広範囲に及ぶ場合がある。これまで無人化施工は、そのほとんどが1 km未満の範囲からの遠隔操作であり、10 kmを超える長距離からの遠隔操作については、施工実績もなく適用性についての技術的検証も事例がなかった。著者らは、広範囲に立入制限された大規模災害を想定し、光ケーブル網等の長距離通信手段を活用することで実現する数キロ～数十キロメートルからの超長距離無人化施工技術について実地検証を行った。この検証では、長距離通信手段として光ケーブル、長距離無線 LAN、衛星通信を適用し、近距離の現場内通信手段として特定小電力無線、無線 LAN、公共ブロードバンド (BB) 無線を適用し、データの伝送能力に加えて、伝送遅延や映像劣化が操作性に与える影響、オペレータの技量差や操作限界について検証を実施し、結果的に雲仙復興事務所管内の大型建設機械を30 km以上離れた操作室 (長崎河川国道事務所) から遠隔操作が可能であることを確認した。

本報文は、この実地検証の内容と結果を総括し、今後の災害適用に向けた考察について報告する。

2. 超長距離遠隔操作実証実験

2.1 実地検証の目的 実地検証は、広範囲に立入が制限された場合の緊急対策工事を想定し、遠隔地からの重機遠隔操作が迅速且つ確実に実施できるか検証することを第一義的な目的とした。同時に、通信手段等の要素技術について、災害時を想定した実工事への適用性を見極めるために各種条件を設定し検証を行った。

検証内容のポイントは大きく分けて、①システムの通信能力 (伝送速度、伝送遅延、映像品質、通信可能範囲など) の検証、②伝送品質の低下や遅延等の通信状況がオペレータの操作や施工性に及ぼす影響の検証、の二点から成る。特に本実験では、これまで無人化施工への適用実績のない光ファイバ網と無線 LAN を通信システムの基軸に設定し、衛星通信や長距離無線 LAN 等を代替通信手段として検証した。その理由は、Internet Protocol (IP) を使用した先進的な画像通信技術の導入により、これまでの無人化施工技術の弱点であった「混信」と「伝送遅延」の問題解消に期待したからである。IP を適用すれば、チャンネル数の制約を受けないため、安全な所から多数の重機を確実に遠隔操作できる。その一方、これまでこの方式が採用されなかった理由は、データを IP に変換する際に生じる伝送遅延が大きかったからである。そこで本実験で

は、伝送遅延や画質劣化がオペレータの操作や施工性に及ぼす影響についても検証した。本実験では、データ圧縮能力と伝送量変動への追従性能に優れた高性能カメラエンコーダーを使用し、無人化施工における超長距離遠隔操作技術について検証を実施した。Fig.1 に、この実験で検証した項目の概略を示す。

実地検証の内容

- I. 各種通信手段の適用性検証 (伝送能力、遅延など)
 - ① 長距離通信能力 (操作室～現場内中継局)
 - ② 現場内通信能力 (現場内中継局～重機)
- II. 操作環境および操作技能の検証 (操作限界など)
 - ③ 遠隔操作のための操作環境 (遅延、画質劣化の影響)
 - ④ オペレータの技量 (操作限界)
- III. その他の検証
 - ⑤ 建設機械の機能維持 (給油、メンテナンス)

Fig.1 Overview of the verification test

2.2 実地検証の概要

① 実験期間

平成23年3月19日 (土) ～4月13日 (火)

② 実験場所

- ・ 施工フィールド：長崎県島原市北上木場町
- ・ 操作室(1)：国土交通省長崎河川国道事務所
- ・ 操作室(2)：国土交通省雲仙復興事務所



Fig.2 Site map of experimental field

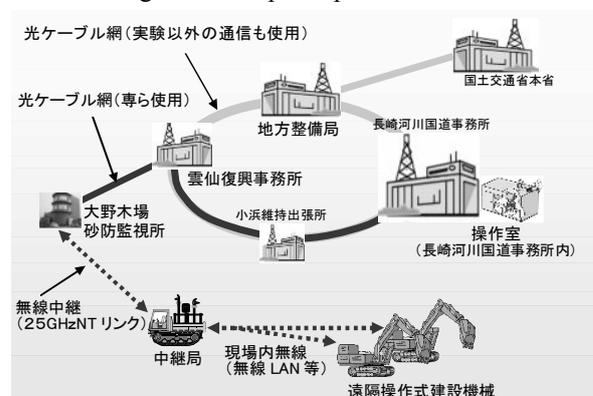


Fig.3 Optical fiber network and wireless communication

③ 使用した通信方式

- ・ 長距離通信：操作室～現場中継局 (Table 1)
- ・ 現場内局所通信：現場中継局～重機 (Table 2)

Table 1 Short-distance communication methods

No.	名称	概要	検証した理由
1	無線 LAN [IEEE802.11j]	・5GHz 帯無線 LAN、伝送速度 54Mbps ・免許必要	・高速通信が可能 ・画像送信の実績なし
2	特定小電力無線	・429MHz 帯、40ch 程度 ・免許不要	・一般に遠隔操作で使用 ・比較の評価基準
3	公共ブロードバンド (モード1)	・190MHz 帯(アナログ TV 放送)(日本無線社製) ・免許必要	・回り込みに優れる ・使用実績なし(開発中の試験機)
4	公共ブロードバンド (モード2)	・190MHz 帯(アナログ TV 放送)(日立国際電気社製) ・免許必要	・回り込みに優れる ・使用実績なし(開発中の試験機)
5	25GHz NT リンク	・25GHz 帯小電力データ通信、伝送速度 32Mbps ・免許不要	・高速通信が可能 ・局所通信と長距離通信を確実につなぐ中継手段として適用

Table 2 Long-distance communication methods

No.	名称	概要	検証した理由
1	光ファイバ網	・国交省専用光回線 ・伝送速度 10Gbps	・高速長距離通信が可能 ・使用実績あり
2	長距離無線 LAN	・2.4GHz 帯無線 LAN ・伝送速度 10Mbps(高指向性アンテナ使用) ・免許不要	・光ファイバの代替手段 ・使用実績なし
3	衛星通信	・静止衛星(インマルサット)を使用した通信 ・事業者との契約が必要	・光ファイバの代替手段 ・使用実績なし

④使用した建設機械類

使用機材を Table3 に示す。実機を用いたのは、様々な伝送条件下における操作性を検証するためである。これら遠隔操作専用機には、計測等に必要な改造を施した。油圧ショベル及び無線中継局として使用したクローラーダンプを Fig.3, Fig.4 に例示する。

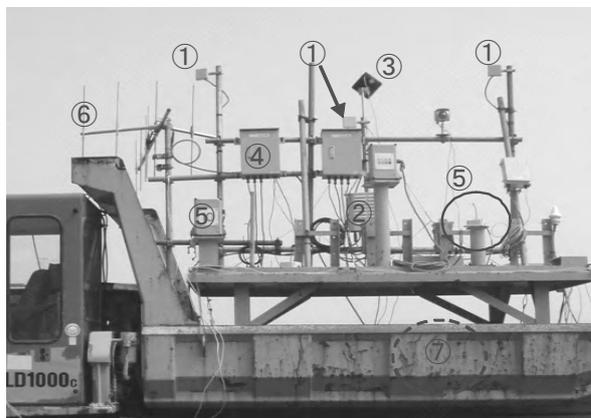
Table 3 Equipments used in the experiment

No.	名称	規格	数量	用途
1	油圧ショベル (バックホウ)	1.2m ³ 級	1 台	伝送状況確認 基本作業確認 操作限界確認 疑似給油作業確認 オペレータ技量確認
2	油圧ショベル (バックホウ)	4.0m ³ 級	1 台	疑似プレキャスト擁壁設置 大型土嚢積
3	ダンプトラック	45t 級	1 台	基本作業確認
4	カメラ車 (油圧ショベル)	1.2m ³ 級	1 台	基本作業確認 疑似プレキャスト擁壁設置
5	カメラ車 クローラーダンプ	10t 級	1 台	基本作業確認、動作確認 疑似プレキャスト擁壁設置
6	ブルドーザ	63t 級	1 台	動作確認
7	ブルドーザ	16t 級	1 台	実験準備補助
8	中継局 (クローラーダンプ)	10t 級	1 台	中継局
9	ラフレンクレーン	25t 吊	1 台	大型土嚢積込(有人施工)
10	発動発電機	60kVA	1 台	中継局
11	発動発電機	2kVA	2 台	中継局2、中継局3



- ① 加速度計
操作時間、操作遅延を計測する3D 加速度計
- ② 車載カメラ
バケット先端と足場を写すための2台のカメラ
- ③ カメラ用エンコーダ
映像を H264 形式 LAN データに変換する装置
- ④ カメラ用切替えスイッチ
車載カメラの切替用リレースイッチ
- ⑤ 無線 LAN 対応無線機
IEEE802.11j 規格の無線子機及びビハブ
- ⑥ RS232C・422-LAN コンバータ
操作/制御データ等を LAN データに変換するコンバータ
- ⑦ 無線 LAN 用アンテナ
- ⑧ 公共 BB 用アンテナ(モード1)
- ⑨ 公共 BB 用無線機(モード1)
- ⑩ 公共 BB 用無線機(モード2)
- ⑪ 衛星通信アンテナ

Fig.3 Devices equipped on the hydraulic excavator (1.2m3)



- ① 無線 LAN(IEEE802.11j)機用アンテナ
パッチタイプ指向性あり。
- ② 無線 LAN(IEEE802.11j)親機
5GHz 帯の 3 周波数を使用可能。
- ③ 25GHz 帯小電力データ通信装置
- ④ RS232C・422-LAN コンバータ盤
- ⑤ 特定小電力無線受信機(429MHz、ボックス型/アンテナ型)
- ⑥ 公共 BB 用アンテナ(モード1)
- ⑦ 公共 BB 用無線機(モード1)
架台の下に公共 BB 用無線機(モード1)の親機がある。

Fig.4 Devices equipped on the career (10t)

2.3 実地検証項目の設定 この実地検証では、火山災害における緊急工事を想定し、30 km以上離れた遠隔地から重機の遠隔操作が可能であることを実証するために必要な検証項目を設定した。先ず、遠隔操作通信ネットワークの伝送状況、遠隔操作の操作性につ

いての確認を実施した。次に、施工ヤード内で使用する各種無線の性能（到達距離や回り込み特性等）について検証した。特に、回折性に優れた新たな通信方式として期待される公共ブロードバンドについても検証した。

最後に、長距離通信に伴う伝送遅延や伝送能力低下に伴う画像劣化を想定したオペレータの操作性・操作可能限界について確認し、長距離遠隔操作技術の実工事への適用性を見極めるための基礎的な実地検証を行った。Table4 に実地検証した項目を列挙する。

Table 4 Contents of the experiment

検証事項	実験の内容
1 ネットワーク伝送状況 (操作系伝送遅延 100msec 以下)	1. 映像と操作系の操作検証実験 ① 遠隔操作通信ネットワークの伝送状況確認実験 ② 基本作業の確認実験(バックホウとダンプによる掘削・積込み・運搬・排土作業) ③ 擬似フレキャスト擁壁(鋼製スリット)設置実証実験(バックホウによる吊込、移動、設置) ④ 大型土嚢積の実証実験(ダンプによる大型土嚢運搬とバックホウによる吊込、設置) ⑤ 確認実験(ブルドーザ、クローラダンプの動作確認)
2 操作性の確認	
3 無線到達距離	2. 局所通信の伝送状況確認実験(無線到達距離確認実験、ならびに無線回り込み評価実験)
4 無線の回り込み評価(指向性確認)	
5 画像伝送条件による操作限界	3. 画像遅延、劣化における操作限界確認実験
6 画像伝送能力	4. 画像系システムにおける伝送能力確認実験
7 オペレータ技量能力	5. 無人化施工オペレータ技量検証実験
8 遠隔操作による給油の可能性	6. 擬似給油作業確認実験

2.4 各種通信手段の伝送状況確認実験 超長距離遠隔操作で使用する通信システムは、局所通信・中継通信(Table1)、及び長距離通信(Table2)から成る。検証は、これらの通信方式を組み合わせた 13 パターンのネット

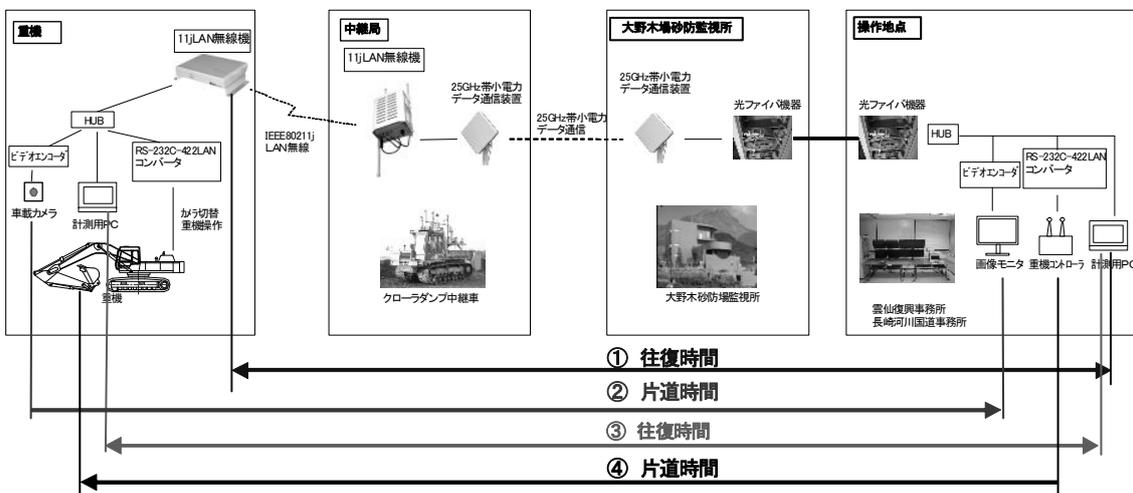


Fig.6 Measuring ranges of the communication delay time

ワークについて、伝送状況と操作性の確認を行った。以下に検証内容を述べる。

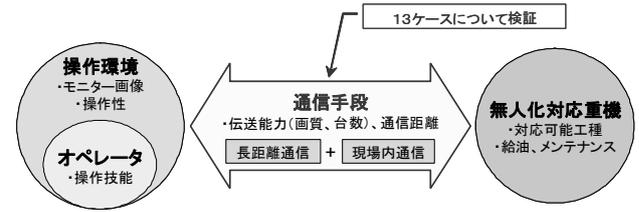


Fig.5 Verification of wireless communication

一般に通信距離が長くなるに伴いデータ伝送の遅延が大きくなり、遠隔制御に支障をきたすと想定されることから、各通信ネットワークについて以下の方法で画像データ及び操作データの伝送状況（伝送時間）の検証を行った。

①通信ネットワークの疎通確認

操作地点から使用機械（重機搭載カメラ）間の接続状況について、MS-DOS コマンドツールを用いて信号の往復に要する疎通時間を計測した。

②画像データの伝送時間計測

現場のカメラが撮影した映像が操作室モニターに表示されるまでの時間を測定した。予め同期した2台の時計を現場ヤードと操作室に置き、モニターに表示された現場ヤードの時計時刻と操作室側の時計時刻の差を測定した。

③操作データの伝送時間計測

データ伝送計測システムを用いて、操作室から発信したデータが現場の重機に接続したパソコンに届くまでの時間及び再度操作室に戻ってくるまでの時間を測定した。

④操作系システム全体の応答時間計測

オペレータのレバー操作開始から重機が駆動するまでの時間を測定した。測定はバックホウ 1.2m3 級を用いてアームの基本動作における遅延時間を測定した。

2.5 局所通信の伝送状況確認実験 本実験は、建設工事特有の劣悪な条件への局所通信の適用性を検証するため、施工ヤード内で使用される局所通信について、無線の伝送距離、回り込み性能について検証した。実験は、操作データと映像データについて5つの組合せを設定した(Table7)。特に混信対策として、無線 LAN による操作データと映像データの同時伝送能力の確認に加え、見通せない場所での作業能力を確保するため、従前アナログ TV 放送で使われていた電波帯域を活用した公共ブロードバンドの回り込み性能を検証した。

Table 6 Radio transmission method

No	名称	概要	検証した理由
1	無線 LAN (IEEE802.11j)	・5GHz 帯無線 LAN、伝送速度 54Mbps ・要免許	・高速通信が可能 ・画像送信の実績なし
2	特定小電力無線	・429MHz帯、40ch程度、免許不要	・操作データ送信用として一般的な技術
3	公共ブロードバンド(モード1)	・190MHz帯、要免許 ・日本無線株式会社製	・回り込みに優れる ・実績なし(開発中)
4	公共ブロードバンド(モード2)	・190MHz帯、要免許 ・株式会社日立国際電機製	・回り込みに優れる ・実績なし(開発中)
5	2.4GHz デジタル OFDM 無線	・画像データ送信用無線、免許不要	・画像データ送信用として一般的な技術

Table7 Combination of radio transmission method

ケース	通信方式の組み合わせ	
	操作データ通信	映像データ通信
ケース A	無線 LAN	無線 LAN
ケース B	特定小電力	無線 LAN
ケース C	無線 LAN	2.4GHz デジタル OFDM 無線
ケース D(モード1)	公共ブロードバンド(モード1)	公共ブロードバンド(モード1)
ケース D(モード2)	公共ブロードバンド(モード2)	公共ブロードバンド(モード2)

ケース A～D までの組み合わせについて、以下の実験を行った。実験は、油圧ショベルに無線機を搭載して実施したが、公共ブロードバンド無線については、開発中のため耐久性に配慮し乗用車に搭載して検証した。

① 無線到達距離確認実験

基地局から遠ざかるように走行させ、通信が途絶える距離(限界距離)を搭載し GPS にて計測した。

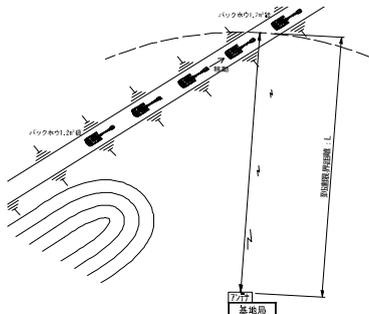


Fig.8 Verification test of wireless reaching distance

② 無線の回り込み評価実験(指向性確認)

遮蔽物(土堤)の陰に徐々に走行させ、電波の回り

込みによる通信が途絶える距離を計測した。



Fig.9 Verification test of radio diffraction

2.6 画像遅延・劣化における操作限界確認実験

本実験は、長距離通信に際して懸念される画像の伝送遅延や画質劣化、外部カメラ車の有無が作業性に及ぼす影響を確認するため、熟練オペレータを被験者として実際に重機を遠隔操作することにより行った。

実験方法として、モニターの画像条件を人為的に変化させた際の作業時間の変化を計測した (Table5)。

Table 5 Conditions in the operating limits test

条件設定項目	設定範囲	備考
画像遅延時間	0、1、2秒	A/D 変換に伴う遅延時間は含まず
画像品質	A 通常 1.5Mbps/30fps B 劣化 1.5Mbps/25fps C 限界 512kbps/15fps D 最低限 384kbps/10fps	画像信号伝送量を変化させた
外部カメラ	あり/なし	車載カメラを補完する外部映像

※フレーム数:1秒で表示する画像数(単位fps)

なお、本実験では、以下の2つの作業を実施した。

- ①油圧ショベルの走行・転石把持・旋回・転石設置
- ②ブレーカによる転石破碎



Fig7 Operational limits in remote operation (breaker)

2.7 画像系システムにおける伝送能力実験

本実験は、災害時など限られた通信電波数のなかで複数重機の投入が求められる場合を想定し、1チャンネルの電波で伝送可能な最大カメラ画像数について検証した。実験は、局所通信方式に「無線 LAN (11j)」長距離通信方式に「光ファイバ」を組合せた通信ネットワーク

について、1台のカメラ画像から映像分配器を使用し複数生成したカメラ10基分の映像を同時伝送することにより通信能力を検証した。画像条件は、フレームレートが30枚/秒、伝送レートが1.5Mbpsとした。

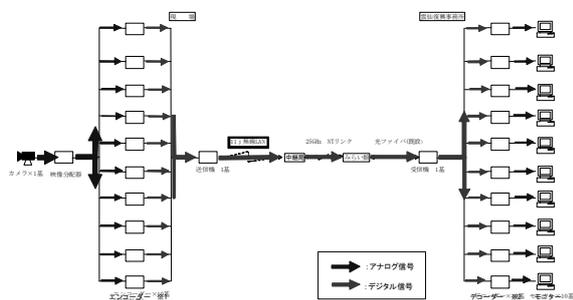


Fig.10 Video transmission capacity test

2.8 無人化施工オペレータ技量検証実験 無人化施工では、斜面上での掘削や坂路造成時において、重機の傾斜や掘削目標をモニター画面のみを頼りに把握し確実に操作することが要求される。特に斜面上での操作は重機が転倒し操作不能になる危険もあることから極めて難易度が高く、有人施工に比べ作業効率低下のみならず、重機の接触による故障の危険も高いことから、非熟練オペレータが遠隔操作を断念するケースも多い。超長距離無人化施工では、画像信号等の伝送遅延によって、より操作が困難となることが想定されるため、無人化施工オペレータの技量確認方法（作業効率や作業限界の確認方法）を提案し習熟度の異なるオペレータを被験者として比較検証を行った。

①登坂走行実験 バックホウ 1.2m³ 級により高さ2m勾配1割の盛土を切り崩し、走路を造成し盛土を乗り越え反対側へ移動する操作を1サイクルとして所要時間を比較した。盛土高を2mとしたのは、この高さ以上で、坂道を造成する必要が生じるからである。



Fig.11 Operator action test in slope construction

②障害物路面走行実験 バックホウ 1.2m³ 級を用い40m間に設置した3箇所のカラーコーンを左右交互に回り込んで走行し、途中の3箇所に設置した対象物（コンクリートブロック）をバケットですくい取り、

180° 旋回して所定の枠内に移動させる作業を行った。作業の所要時間、対象物の移動精度及び走行精度を比較検討した。

2.9 擬似給油作業確認実験 超長距離の遠隔操作では、重機を有人のメンテナンスヤードに戻すことが困難になるため、重機の修理やメンテナンス作業を極力最小化する必要がある。特に、これまで人に依存していた給油作業やメンテナンスの無人化に向けて、バックホウの遠隔操作による給油動作の適用性を確認した。

実験では、擬似給油ホース（φ40mmとφ150mmの2種類）、擬似給油口（φ200mm）は重機高さを考慮して、H=1.0m、H=1.5m、H=2.0mの3種類にて検証した。使用したカメラは、車載カメラ、給油ホース用カメラ、および外部カメラの3台とし、そのうちの2台のカメラを組み合わせて3パターンについて実施した。

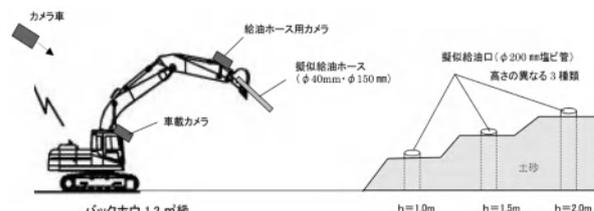


Fig.12 Refueling nozzle insert experiment

3. 実験結果

本実験の実施により30kmを超える長距離の遠隔操作であっても、一定の通信品質（画像伝送能力、伝送遅延や通信品質）を確保すれば、従前の無人化施工の操作室と同等の操作環境を構築することが可能であることが検証できた。

以下に、各実験結果の概要をまとめる。

3.1 各種通信手段の伝送状況

①通信距離の影響 光ファイバ通信方式で通信距離が異なる実験ケースNo.1～No.6について、通信距離と画像データの伝送遅延時間の関係をTable8に整理した。光ファイバと無線LANを組合せた6ケースでは、通信距離の違いによる遅延時間に優位な差は見られなかった。

Table8 Communication delay time of video transmission

実験ケース (操作室位置)	局所通信方式 (※操作系データ通信方式)	中継 局数	通信距離	遅延時間
No.1 雲仙	無線LAN	1	4.5km	548 msec
No.2 雲仙	無線LAN (特定小電力※)	1	4.5km	576 msec
No.3 長崎	無線LAN	1	82.5 km	418 msec
No.4 長崎	無線LAN (特定小電力※)	1	82.5 km	652 msec
No.5 長崎	無線LAN	3	82.8 km	802 msec
No.6 長崎	無線LAN (特定小電力※)	3	82.8 km	504 msec

(注)ケース5及び6の中継局数は、障害物による迂回ルートを想定した。

このことから、長距離通信区間に光ファイバを、現場内通信に無線 LAN (IEEE802.11j) を使用した通信方式であれば、通信距離をさらに伸ばしても遅延時間は変わらず、無人化施工に適用可能なネットワークが構築可能であると考えられる。

②中継局数による遅延時間 中継局 1 基を経由した場合の遅延時間の平均値は、530msec であり、中継局 3 基を経由した場合の遅延時間 653msec と比べ、中継局が増えると遅延時間が増加する傾向が見られた。

③長距離通信方式の違いによる遅延 操作室から中継局までの通信方式による遅延時間の違いを Table9 に示す。その他、通信距離以外の条件は同一である。

Table9 Delay time of long-distance communication lines

長距離通信方式	実験ケース	遅延時間(平均値)
光ファイバ	No.1~6	583 msec
長距離無線 LAN	No.7, 8	276 msec
衛星通信	No.9	2000 msec

※光ファイバ方式は、国交省 LAN 使用の影響を含む可能性がある。

④局所通信方式の違いによる遅延 中継局から重機までの通信方式による遅延時間の違いを Table10 に示す。その他の条件は同一である。

Table10 Delay time of short-distance communication lines

局所通信方式	実験ケース	遅延時間(平均値)
11j 無線 LAN	No. 1~6	583 msec
公共 BB	No. 10~12	891 msec

⑤まとめ 画像信号の伝送に遅延を生じる可能性のある 4 つの要因と遅延時間との関係を分析したが、その結果をまとめると以下のとおりである。

- 光ファイバ通信の距離が 4.5km から 82km になっても遅延時間の違いは無視できる程度である。
- 中継局の基地数が 1 基から 3 基に増えると遅延時間の平均値は 530msec から 653msec に延びた。ただし、データのばらつきが大きく有意な差と言えない。
- 長距離通信(操作室~中継点)区間の通信方式では、長距離無線 LAN を用いた場合の遅延時間が最も小さく、次いで光ファイバ、衛星通信の順であった。衛星通信を用いた場合の遅延時間 2000msec は遠隔操作が困難なレベルである。
- 局所通信に 11j 無線 LAN を用いた場合と公共 BB を用いた場合の遅延時間はそれぞれ 583msec、891 msec であった。

3.2 局所通信の伝送状況

①伝送距離

実験結果を Table11 に示す。一般的に周波数が高いほど直進性が強く、伝送できる情報量が多いとされる

が、2.4GHz デジタル OFDM 無線の到達限界距離が特定小電力無線のそれより小さい要因は、操作データ(約 3kbps) に比べて情報量大きい画像データ(約 1.5Mbps) を伝送したためと考えられる。

公共ブロードバンドについては総務省の電波使用許可を受けた 750m の範囲内で計測したため、能力的な限界距離を検証するためには、別途確認実験が必要である。

Table11 Feasible distance of the wireless communication

No.	名称	周波数	出力	伝送データ	到達限界距離
1	無線 LAN [IEEE802.11j]	5GHz	250mW	操作・画像	400m
2	2.4GHz デジタル OFDM 無線	2.4GHz	10mW	画像のみ	270m
3	特定小電力無線	429MHz	10mW	操作のみ	400m
4	公共ブロードバンド (モード1)	190MHz	5W	操作・画像	640m
5	公共ブロードバンド (モード2)	190MHz	5W	操作・画像	680m

②電波の回り込み 無線 LAN、特定小電力無線、2.4GHz デジタル OFDM 無線については、有意な電波の回り込みが確認できなかった。一方、公共ブロードバンド無線については、砂防堰堤及び鉄筋コンクリート製の建物の周辺において約 70 度程度の高い回り込み性能を有していることが確認できた。

3.3 伝送遅延・画像劣化による操作限界

画像の伝送遅延や画質劣化、外部カメラ有無の操作条件を人為的に変えて操作実験した結果を Table12,13 に示す。

操作限界については熟練オペレータにヒアリングにより検証した。この結果、伝送遅延と画質劣化による作業限界について以下の傾向が確認できた。

- 熟練者が許容できる遅延時間は、大雑把な作業では 1.5 秒未満、比較的細かな作業では 1 秒未満である。
- 画像の伝送速度が 0.5Mbps 程度を下回ると作業性に支障が生じ始める。

①油圧ショベルの走行・転石把持・旋回・転石設置

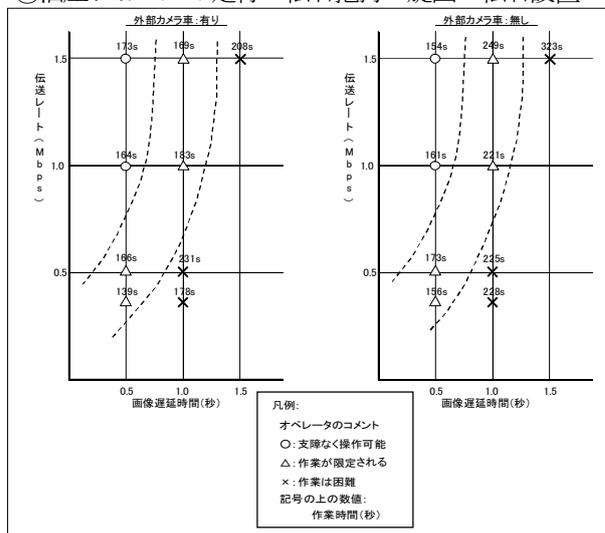


Table12 Result in the operating limit test (Excavator)

②油圧ブレーカによる転石破碎

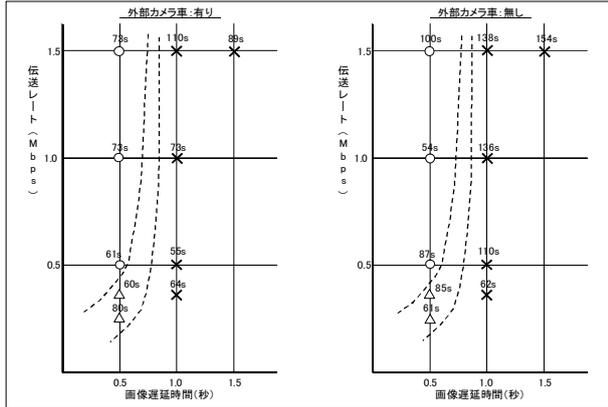


Table13 Result in the operating limit test (Breaker)

3.4 画像系システムの伝送能力 画像伝送能力は、コーデックの性能に依るが、実験ではフレーム数 30 枚/秒を維持しながら、画質に応じ 3Mbps~1Mbps の範囲で伝送量を自動調整する機能を持つ市販品を使用した。低輝度や重機旋回時など変化の小さい画像を送信すると 10 画像 (15Mbps 程度) の送信が可能であったが、高輝度や変化の激しい画像を送信すると伝送レートが 40%程度の幅で大きく変動し画質がコマ落ちした状態になった。この結果から無線 LAN 方式における 1 チャンネルの伝送能力上限としては、比較的变化の激しい画像 (3Mbps/画像) の場合でも、6 画像程度までを安定して同時送信できることが確認できた。

3.5 無人化施工オペレータ技量検証結果

①登坂走行実験

1 割勾配の法面を持つ高さ 2m の盛土に坂路を造成し乗越える作業における熟練者と非熟練者の作業時間を計測した結果を Table14 に示す。実験結果から以下のことが確認できた。

- ・熟練者と非熟練者のサイクルタイムには 1.9 倍程度の差が見られた。
- ・搭乗操作における作業時間の差は、1.8 倍程度あり無人化施工においても、ほぼ同じ傾向であった。
- ・カメラ車がない場合には、作業時間の差が 2.3 倍と広がった。
- ・搭乗操作での作業時間を 1 とした場合、無人化施工の作業時間は、2.0~3.6 倍であった。

Table14 Comparison of the time of skilled and non-skilled work

No.	施工方法	画像遅延	カメラ車	オペレータ	作業時間				有人を1とした時の作業時間比率
					スタート 盛土切崩し	盛土切崩し 登坂完了	登坂完了 ゴール	合計	
1	有人			熟練者	15 sec	54 sec	8 sec	77 sec	1.0
				非熟練者	22 sec	102 sec	11 sec	135 sec	1.0
2	無人化	通常	有	熟練者	26 sec	157 sec	16 sec	199 sec	2.6
				非熟練者	34 sec	250 sec	25 sec	309 sec	2.3
3	無人化	通常+1秒	有	熟練者	29 sec	221 sec	26 sec	276 sec	3.6
				非熟練者	58 sec	391 sec	19 sec	468 sec	3.5
4	無人化	通常	無	熟練者	24 sec	113 sec	14 sec	151 sec	2.0
				非熟練者	42 sec	293 sec	18 sec	353 sec	2.6

②障害物路面走行実験

障害物路面走行における熟練者と非熟練者の作業時間を計測した結果を Table15 に示す。以下のとおり登坂走行実験と同様の傾向が見られた。

- ・熟練者と非熟練者のサイクルタイムには 1.5 倍程度の差が確認された。特に遠近感を使う作業における差が顕著であった。
- ・搭乗操作における作業時間の差は 1.7 倍程度あり無人化施工においてもほぼ同じ傾向であった。
- ・画像遅延を発生させた実験では、熟練者と非熟練者の差が小さくなった。

Table15 Comparison of skilled and non-skilled work

No.	施工方法	画像遅延	カメラ車	パターン	オペレータ	作業時間								合計	有人を1とした時の作業時間比率
						スタート ブロックをすくい戻 開始	旋回開始 ブロック設置後、走行 開始	走行開始 ブロックをすくい戻 開始	旋回開始 ブロック設置後、走行 開始	走行開始 ブロックをすくい戻 開始	旋回開始 ブロック設置後、走行 開始	走行開始 ブロックをすくい戻 開始	旋回開始 ブロック設置後、走行 開始		
1	有人			A	熟練者	40 sec	9 sec	32 sec	14 sec	29 sec	13 sec	23 sec	160 sec	1.0	
					非熟練者	112 sec	10 sec	44 sec	11 sec	45 sec	16 sec	27 sec	265 sec	1.0	
2	無人化	通常	無	B	熟練者	93 sec	48 sec	81 sec	54 sec	69 sec	62 sec	71 sec	478 sec	3.0	
					非熟練者	323 sec	61 sec	106 sec	40 sec	226 sec	55 sec	69 sec	880 sec	3.3	
3	無人化	通常+1秒	無	B	熟練者	128 sec	57 sec	144 sec	66 sec	153 sec	73 sec	113 sec	734 sec	4.6	
					非熟練者	206 sec	52 sec	135 sec	53 sec	305 sec	72 sec	95 sec	918 sec	3.5	

3.6 擬似給油作業確認実験

擬似給油実験の結果、重機の給油口等の改良は必要であるが、遠隔操作における操作精度面からは十分に実現可能であることが判った。擬似給油口への給油ホース挿入に係る所要時間と操作性について実験結果を Table16 に示す。

実験結果から精度 50mm 程度の作業が十分可能であることが確認された。特に車載カメラと外部カメラを使用したパターン B における所要時間が圧倒的に短かった。車載カメラと外部カメラの視線が直交しているため、位置決めが迅速に出来たためと考えられる。また、給油用カメラは給油ホースの高さ方向の微調整に有効であった。

Table16 Result of refueling nozzle insert experiment

カメラ パターン	1回目			2回目			3回目		
	実験番号	所要時間 (min:sec)	操作性	実験番号	所要時間 (min:sec)	操作性	実験番号	所要時間 (min:sec)	操作性
パターンA	①	11:46	○	④	6:42	○	⑦	6:02	○
パターンB	②	6:45	◎	⑤	4:49	◎	⑧	4:53	◎
パターンC	③	7:44	△	⑥	6:53	△	⑨	6:52	△

※操作性 (◎、○、△) はオペレータの見解による評価

4. 考察

今回の実証試験を通じて、30km を超える超長距離からの重機遠隔操作が技術的には、可能であることが確認できた (Table17)。

Table 17 Verification result of experiment

検証事項		検証結果
1	ネットワーク伝送状況 (操作系伝送遅延 100msec 以下)	・各通信ネットワークにおいて伝送遅延 100msec 以下となった。(衛星通信を除く)
2	操作性の確認	・操作性に差異はあるが、各通信ネットワークにおいて超長距離の遠隔操作が可能であることが確認できた。 ・長距離無線 LAN、及び公共ブロードバンドは機器設定により伝送量を調整することで操作性に改善が期待できる。 ・衛星通信は遅延が大きいため通常操作には不向きだが、緊急時の遠隔操作には有効な手段となり得る。
3	無線到達距離	・各通信方式の特徴を生かした遠隔操作の可能性が確認できた。 ①無線 LAN (IEEE802.11j) : 伝送量は大きい が、回り込みに劣る ②公共ブロードバンド: 伝送量は小さいが、到達距離が長く回り込みに優れる
4	無線の回り込み評価(指向性確認)	
5	画像伝送条件による操作限界	・画像の遅延 ⇒ 遅延時間 1.5 秒(通常+1 秒)が限界 ・画像の劣化 ⇒ 伝送レート 384kbps、フレーム数 15fps が限界(通常: 1.5Mbps/30fps) ※どちらの値も作業内容により異なる。 ※連続数時間の操作可否については未検証。
6	画像伝送能力	無線 LAN (IEEE802.11j) ・変化の激しい画像の場合、6画像/chまでの安定送信が可能 (1画像:1.5~3.0Mbps/30fps) ・変化の少ない画像の場合、10画像/chまでの送信が可能(1画像:1.0~1.5Mbps/30fps)
7	オペレータ技量能力	熟練者と非熟練者のサイクルタイムには2倍近い差があった。
8	遠隔操作による給油の可能性	給油機械や重機の給油口等の技術開発が不可欠であるが、遠隔操作的には十分可能であることが確認できた。

4.1 実証実験で確認できたポイントについて 今回の実証実験を通じて確認できたポイントについて以下に列挙する。

(無線 LAN 方式の有効性)

- ・光ファイバ網と無線 LAN による映像通信では、通信距離 80km 超であっても、操作データ・画像データの同時伝送時における遅延が 1 秒未満に収まった。
- ・無線 LAN1ch あたり、高品質な映像 6 画像を同時且つ安定的に通信できることを確認した (同一箇所でも最大 24 台の映像を通信することが可能)。

(公共ブロードバンドの可能性)

- ・建物等の見通せない場所において開発中機材ではあるが、公共ブロードバンド無線において約 70 度の優れた回り込み性能を有することが確認できた。

(伝送遅延に対するオペレータの許容限界)

- ・遠隔操作における伝送遅延については、最大 2 秒程

度が許容限界であることが確認された。

- ・無人化施工における熟練技能を見極める基本的な手法を提案し、これにより技量差を確認することができた。

4.2 各種通信手段の適用性

4.2.1 長距離通信手段

①光ケーブル 今回の実験では、30km を超える長距離通信において、伝送遅延が 0.8 秒程度以内に収まったことから、光ファイバの適用性を確認できた。ただし、提供された回線が、独占的利用環境であったことから、極めて良好な通信条件であったと言える。実運用においては通信条件が変動するので、通信距離による伝送遅延が、ある程度増加する可能性は排除できない。適用に際しては利用環境・条件等に関して十分考慮する必要がある。

②長距離無線 LAN 長距離無線 LAN は、伝送遅延は概ね 1 秒以内に収まったものの、データ伝送量 (1.5Mbps) が多い条件下では、画像データがコマ落ちすることにより通信が断続する状況が発生した。カメラ等の台数が少ない場合など、データ伝送量が少ない条件下においては有効性が確認できた。

③衛星通信 使用したインマルサット衛星通信システムは、伝送能力が 64kbps であり、5fps の画像でも 8 秒の遅延が発生した。データ量の少ない制御系データならば、緊急的用途に限定すれば通信は可能である。

4.2.2 現場内通信手段

①無線 LAN、特定小電力無線 特定小電力無線は、混信を防ぐため、使用可能な重機は 10 台程度に制約される。この実験では、画像系と操作系信号の両方を無線 LAN で支障なく運用できた。無線 LAN 方式は、低遅延型コーデックの適用により今後の活用が期待される。到達距離では、特定小電力無線、無線 LAN(11j) 共に 230m 程度であった。

③公共ブロードバンド (公共 BB) 帯域の狭さから画像系も併用して使用するには、画像劣化や遅延、コマ落ちが生じ十分に使用できる水準ではなかった。

また、重機のアームで電波が遮断される現象は発生したが、建物裏側等への回り込み性能は確認され見通しが確保できない箇所での通信手段として期待できる。

4.2.3 データの伝送能力について

長距離通信における伝送遅延については、通信方式毎の伝送能力の違いによって、通信可能な画像数・画質・1 秒間のコマ数・伝送遅延が異なったことから、現場条件に適した通信手段の選択が必要である。

今回の実験では、伝送能力が最大であったのは、無線 LAN(1ch/11j)と光ファイバを組み合わせることで

15Mbps 程度の伝送レートを確保でき、重機搭載カメラ 10 台分の画像通信が可能であることが実証された。実験では全体で 9Mbps 程度まで制限された結果も観測されたため、安定送信できるのは、カメラ 6 台分程度とした。また公共 BB は伝送レートが 1.1Mbps 程度と少なかったため、画質を 500kbps 程度に低下させることでカメラ 2 台分の通信を行った。公共 BB はまだ試験装置段階であり、今後の性能向上が期待される。

4.3 長距離遠隔操作における操作環境と操作性

4.3.1 画像・制御データの伝送遅延が操作に与える影響

遠隔操作において許容し得る画像データの伝送遅延は、1.5 秒が限界である。計測された作業時間データを見ても、伝送遅延がない場合に比べ 150% の作業時間を費やした結果になっていることから、これ以上の遅延は難しいと思われる。

過去、制御系データについては 2 秒程度の伝送遅延があったものの、映像系データに遅延がない条件下で施工した事例がある。画像遅延は極力抑える必要がある。オペレータからは、「画質の劣化は作業次第である程度許容できるが、画像の遅延は作業に対する影響が大きく厳しい。」との意見も出された。

4.3.2 画像の劣化が操作に与える影響

画像伝送に十分な伝送容量 (1.5Mbps/画像) が確保できない場合、伝送レートを低下 (画質を劣化) させることで、コマ落ち等を回避することができる。画質が劣化 (不鮮明) した状態での操作に関しては、512kbps、15fps 程度であれば作業は可能とのオペレータの見解であった。更に条件の悪い 384kbps、256kbps でも作業によっては十分可能である。

4.4 システム立上げ(通信環境・重機環境)に要する時間

実際の工程と各社意見を総合すると操作室、中継局、重機の機器設置、機材の手配納入で 4 日かかり、設定に 1 日、試運転に 1 日であった。この間に IP アドレスの設定や機器への書込等はできるものから併行して行っている。今回は各業者のまとまりもよく昼夜問わず準備作業をしていたことから 6 日で終わったが、新規技術による検証を入れると普通に作業すれば最低でも 10 日は必要であったと思われる。

各業者が事前の機器開発、基本実験を実施していたので短期間で終了させることが出来た。

4.5 実用化に向けて解決すべき事項 実際の災害対応への適用に向けては、解決すべき課題がいくつか残る。以下に、この実験に携わった関係者の意見を踏まえて、実用化に向けた課題を考察する。

(燃料給油の完全無人化、重機のメンテナンス)

・超長距離の無人化施工における最大の課題は、重機

のメンテナンスや給油である。重機を立入禁止区域外に退避する必要の少ない手法の開発が必要となる。

・燃料給油の無人化については、基本的な操作性の確認を実施したが、建設機械メーカー等との協力により給油無人化システムの開発を行う必要がある。

・機材点検やメンテナンスについては、実施項目が多様であるため、予備機と常時ローテーションする等の予防保全的手法の検討が必要である。

(重機搭載に向けた通信機器の耐久性確保)

・試作機を用いた公共ブロードバンドの試験では、耐久性が不十分だったことから実験が度々中断した。原因特定に膨大な時間と労力を費やしたことから耐久性確保が重要である。

(システム調整の無人化)

・実験では、小規模ながら多くの機器設定・設定変更・調整に時間を費やした。実施工向けのシステム構築に際しては、膨大な調整作業が発生する。

・IP アドレスの設定等にミスがあると遠隔調整による修復は困難であり、システムの信頼性を確保するため無人化施工の経験者による計画・運営が必要不可欠であった。

(人材の育成)

・今回の結果の大半は、熟練オペレータにより導かれたものである。また、熟練者と非熟練者には 2 倍近い効率の差も確認できた。確実かつ迅速な作業の実現に向けてオペレータ育成が必要である。

(現場に適した通信システムの構築)

・今回の実験では超長距離通信に国土交通省の光回線を専用的に使用したが、通常の共有回線や商用光回線 (NTT 等) を使用する場合の通信の安定性には十分な検討が必要である。

(無人化施工対応機械・機器の調達性確保)

・遠隔操作式建設機械や通信機器への設備投資や開発を積極的に行うには、費用対効果の観点、技術開発の実験フィールドの観点等、複数の観点からも継続的な無人化施工工事の実施が必要である。

5. おわりに

この実験は、国土交通省が大規模災害への対応における無人化施工技術の有効性を検証するために実施したものである。これまで無人化施工の技術開発を推進してこられた雲仙関係者、並びに今回の実証実験を支えた国土交通省、土木研究所他、関係各位のご尽力に深く謝意を表します。今後は、高度技能者の人材育成や災害対応能力強化に向けて、技術研究開発、標準化活動等に本成果が活きるよう力を尽くして参りたい。