

# 次世代高速通信5Gを用いた重機の遠隔操縦の高度化

古 屋 弘 岩 下 正 剛 陣 内 英 二  
(西日本ロボティクスセンター) (西日本ロボティクスセンター)

蔵 多 正 人 岡 本 邦 宏 小 林 只 和  
(西日本ロボティクスセンター) (西日本ロボティクスセンター) (安威川ダムJ V)

## Sophistication of Remote Control of Heavy Machinery With the Next-Generation High-Speed 5G Communication Technology

Hiroshi Furuya Seigo Iwashita Eiji Jinnai  
Masato Kurata Kunihiro Okamoto Tadakazu Kobayashi

### Abstract

In recent years, the technical development related to robotization in the construction field has been becoming active, and proposals for various construction robots and development of automatic and autonomous driving technologies for heavy machinery are being triggered. Among them, the remote control of heavy equipment is the core technology of construction robots arising from the requirement of disaster recovery. In this case, based on the result of a remote-control field test of a heavy equipment using 5G conducted in 2017, we performed a remote-control experiment using 5G communication assuming actual disaster recovery, such as during a landslide, and verified the construction efficiency. In this field test, utilizing the fact that 5G can communicate a large volume of data, we developed a new mechanism to realize a short delay by optimizing the code and improving the remote-control device. Thus, 30% efficiency improvement relative to that of the conventional remote control was achieved in the field test in 2018. This paper presents the outline and results of the above-mentioned experiment.

### 概 要

建設分野におけるロボット化に関連する技術開発は近年再び活発になり、各種の建設ロボットの提案や重機の自動・自律運転技術の開発が盛んになりつつある。その中で、災害復旧へのニーズから建設ロボットは主要技術となっており、その中で重機の遠隔操縦は中核技術である。今回、筆者らは2017年度に実施した5Gを用いた重機の遠隔操縦試験の結果を踏まえ、実際の災害復旧を想定したシナリオに基づいて5Gを用いた遠隔操縦試験を実施し、施工効率の検証を行った。本試験では5Gが大容量データの通信を可能とすることを生かし、映像の圧縮／伸張を行うコーデックの最適化による低遅延の実現や、遠隔操縦装置の改良などの新しい機構を開発導入し、2台の重機の遠隔操縦を行った。その結果、従来の遠隔操縦に対して30%の効率改善が試験で認められた。

### 1. はじめに

建設分野におけるロボット化は「無人化施工技術」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<sup>1),2)</sup>。建設分野におけるロボット化は、単調・苦渋作業の代替などへの適用も盛んになりつつあるが、特に近年は地震、豪雨、噴火災害など大規模災害の復旧や対策工事に無人化施工が数多く適用され、社会インフラの再構築に無人化施工技術は大いに活躍している。

さらに建設分野におけるロボット化のニーズは、単なる災害復旧時の危険作業からの安全確保のみならず、災害対応の効果・効率を格段に高めること、社会インフラの老朽化の進行と人口減少・少子高齢化に伴う労働人口の減少に対応した社会インフラの維持管理の合理化が期待されている<sup>3),4),5)</sup>。

しかし、建設ロボットは工場などで用いられる産業用ロボットと異なり、屋外での利用が前提となる。このため以下のようなロボット開発における課題があった。

- ① 毎回異なる利用環境と劣悪な条件下での作業
  - ② 使用頻度も一般的には低いことから、開発および導入費用の問題
  - ③ 現在の建設ロボットは遠隔操縦が基本であり、遠隔操縦における情報伝達の遅延による施工効率の低下
  - ④ モニタなどを利用した遠隔操縦の訓練の必要性
  - ⑤ 屋外の無線LANにおける伝送容量・速度の制約
- 特に上記⑤に関わる遠隔操縦における情報伝達の遅延は、作業効率の低下のみならずオペレータの違和感や機械制御の遅れによるトラブルの原因にもなるため、建設分野でのロボット化の重要な開発ポイントである。本試

| 機械種類 | クローラダンプ<br>(クローラキャリア)                                                             | バックホウ                                                                             |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|      | EG135R                                                                            | ZX135US                                                                           |
|      |  |  |
| 仕様   | 積載重量7 t                                                                           | バケット容量 0.5m <sup>3</sup>                                                          |

Fig. 1 試験に使用した機械  
Machine Used for Field Test



Fig. 2 5G基地局および遠隔操縦室  
5G Base Station and Remote-Control Cabin



Fig. 3 試験の概要  
Outline of the Field Test

験テーマである通信に関しては、近年では無線LANの高度化とともに、商用通信ネットワークの充実と通信費用の低下が建設現場での仕事のやり方を一変させたが、現場でのニーズの高度化に伴い供用時の要求も高くなりつつある(携帯電話の普及が最も特徴的な例である)。すなわち通信技術は、今後建設の特に施工において生産性向上や合理化に向けての中核技術の一つである。

このような背景から、今回、2017年度の試験<sup>6)</sup>に引き続き重機の遠隔操縦に新しい次世代通信5Gを取り入れた試験を行うことになった。2018年度の試験では、5Gの大容量特性を生かしコーデックの最適化による低遅延の実現や、複数重機の遠隔操縦、その他新しい技術を盛り込んで、土砂災害復旧のシナリオの基に高度な遠隔操縦の試験を計画した。

## 2. 5Gを用いた重機の遠隔操作試験の概要

大林組は2017年度に引き続き、2018年度も総務省が主催する「5G総合実証試験」に、KDDIを実施主体とした「都市又はルーラルにおいて端末からの上り平均300Mbpsを超える超高速通信を可能とする第5世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討」の中で「建機遠隔操縦への応用を想定する検討・評価」を目的として、日本電気(NEC)とともに参加した<sup>7)</sup>。試験は予備試験等を2018年9月から開始し、重機の遠隔操縦の遠隔地面像通信に5Gを適用し、遠隔操縦におけるその効果を検証した。

### 2.1 試験の目的

2018年度の試験では、以下のシナリオのもとに試験の目的を設定した。

#### (1) 試験のシナリオ：想定する運用方法

本試験では、より具体的な利用場面を想定して、近年国内で地震や豪雨および台風等の災害で数多く発生する土砂災害の迅速な復旧場面を想定した。災害現場での復旧には迅速かつ作業性の高い重機が活躍するが、災害現場の初動時は危険要因が多く、二時災害等も予想されるため、近年では建設ロボットの代名詞ともいえる遠隔操縦機械が導入されることが多くなってきている。

本試験では、災害時の土砂の掘削とその撤去運搬を想定し、Fig. 1に示す土砂の掘削積込みを行うバックホウトと、災害発生初期の泥濘地での土砂運搬を想定したクローラダンプトラックの2台を遠隔操縦し、災害復旧を行う場面を想定した。

また、災害復旧への迅速な対応を行うことも想定し、Fig. 2に示すように、5G基地局を高所作業車を利用して設置することや、遠隔操縦室をトレーラハウス内に設置し迅速に災害現場へ派遣できる体制の確認も併せて行った。

#### (2) 5G利用の目的

無人化施工においては、操縦する対象となる重機の周辺状況をカメラから得た映像情報を頼りに遠隔操縦を行う事となる。固定されたカメラからの映像情報という制約の他に、遠隔操縦者の操作と遠隔地からの映像のレスポンスのタイムラグが操縦者の作業性を低下させてしまう。これは、操縦者が操縦システムを介して送る操縦信号のレスポンスを映像で確認するしかないため、この部分の映像の不鮮明さや遅延は操縦者のストレスとなるだけでなく、映像の遅延時間と操縦者の反応時間が累積し作業効率を低下させる。

本試験では、この遠隔操縦の遅延要因をできるだけ排除する目的で、5Gの大容量通信を生かした高精細な映像の活用と低遅延を利用し、遠隔操縦時の作業効率の改善を目指すこととした。2017年度も建設機械を対象とした遠隔操縦試験を実施したが、この基礎試験(建機からの超高速映像配信による遠隔施工)の実績を踏まえ、実環境での遠隔操縦を想定したネットワーク構成をとり、2台の建機を対象に、それぞれから送信した映像を参照してそれ



Fig. 4 試験実施場所  
Test Site

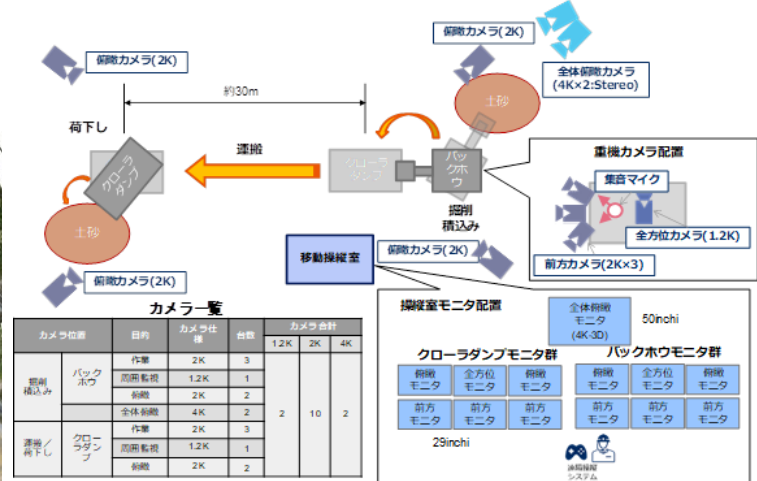


Fig. 6 遠隔操縦用カメラの配置  
Arrangement of Remote Control Camera



Fig. 5 試験の機器構成  
Test Equipment Configuration

それぞれの遠隔操縦を行える構成を試験場で構成した。試験の概念図をFig. 3に示すが、実際の工事現場を利用して、建機2台が連携した作業を行う等、実運用への適用性を検証した。また、災害時のバックホール有線回線不通状況を想定し、無線エントランスによる代替手段も確認することとした。これらを組み合わせ、遠隔操縦により作業を行う重機の作業効率の改善を確認することとした。

## 2.2 試験場所

試験は大林組が施工中の現場にて実施した。試験エリアの概要をFig. 4に示す。重機関連の初期設定や通信の初期テストは図中の試験ポイントで行い、本試験は750m離れた遠隔操縦ポイントから重機を操縦した。

## 2.3 機器構成

試験に使用した重機を中心とした機器構成をFig. 5, お

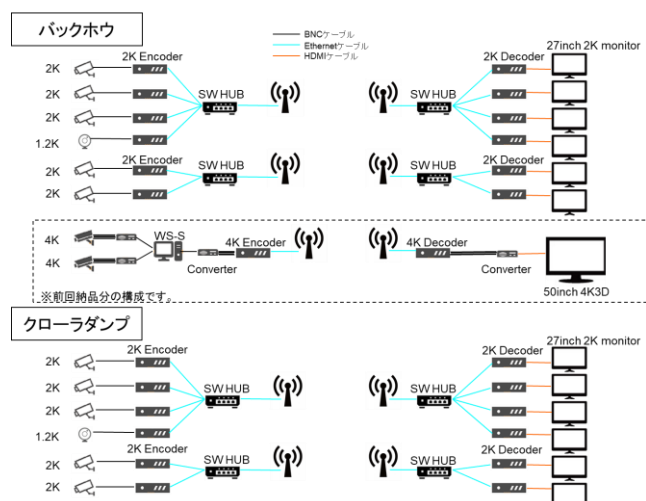


Fig. 7 カメラと通信の構成(5Gによる接続)  
Camera and Communication Configuration  
(5G communication)



Fig. 8 音響および振動伝達機構(バックホウの例)  
Sound and Vibration Transmission Mechanism



Photo 1 遠隔操縦席  
(6面モニタ, ステレオ音響再生, 座席振動機構)  
Remote Cockpit

およびFig. 6に示す。重機側の遠隔操縦システムには2017年度に引き続き大林組が開発した「サロゲート®」<sup>8)</sup>を用いている。

今回の実証試験において今年度は低遅延を実現するために、高速な映像伝送を送受信可能なカメラおよびコーデックを利用することとした。また、操縦システムも遠隔操縦オペレータに対して負荷がかからずより実機に近い環境で操縦が行えるように、重機のシミュレータを改造し、重機の作業現場の音響および振動を遠隔操縦室で体感させることとした。

5Gは高速で大容量のデータを低遅延で送ることを目標として開発が進んでいるが、現在開発された無線システムはuplink(移動局から基地局への通信である上り側の送信)は300Mbpsが最大値である<sup>7)</sup>。これは現在のLTE(4G)に比べれば15倍以上の帯域速度であるが、高精細な映像を複数、圧縮なしで送ることは難しい。このため2018年度の試験では2Kカメラと圧縮伸張機構(コーデック)を用い低遅延を目指すこととした。ただし、各重機のカメラ数は2K×3台+1.2Kの計4台を使用することから、重機毎に4K相当の伝送量が必要となる。このため、コーデックは国内で入手可能なものの中からカタログ値で遅延の少ないものを3種類試験に採用する候補として選定した。さらにそれらとカメラとの相性を確認するために3種類のカメラを選定し、9通りの室内試験を行った。室内試験はカメラで撮影した映像をモニタに写し、その遅延を計測し最速の組み合わせを採用することとした。その結果、フレームレート60fpsにおいて、遅延は80msであった。

この構成でFig. 7に示すようなカメラと通信を遠隔操縦用にシステム化し、遠隔操縦の試験前に実際の機器構成での遅延を計測した。実際の現場での計測では平均で120msの遅延が発生した。これはFig. 7のカメラとエンコーダの間にリピータを追加したためであると考えられるが、一般に遅延のストレスなく遠隔操縦できる閾値とされる遅延の200msを大幅に下回ることができた。

### 3. 新たに開発した機構

本実験では、5Gの重機遠隔操縦への適用において、新たに4つの技術を導入し実験を行った。

#### 3.1 体感型操縦席

本試験では、より具体的な利用場面を想定して、遠隔操縦者に映像以外の情報を与え、より臨場感をもった状態で操縦を行ってもらうために、各重機にFig. 8に示すように外部ステレオ集音マイクと振動センサ(ピックアップ)を取り付け、それらも5Gに乗せて遠隔操縦室に送り、操縦室でステレオスピーカーおよび操縦席に取り付けた重低音スピーカー(振動を操縦席に伝達する)で再生した。操縦席の状況はPhoto 1に示す。

#### 3.2 アンテナ回転制御機構

アンテナ回転制御機構：  
スカイジャスターFig. 9 アンテナ回転制御機構  
Antenna Rotation Control Mechanism遠隔操縦室：  
リアルな操縦感覚／音  
声制御システムFig. 10 音声制御(オペレータ1名で2種類の重機を操縦)  
Voice Control System  
(One operator controls two types of heavy equipment)Fig. 11 建機ヤードと遠隔操作室の間を  
無線エントランスで接続Between Construction Machine Yard and Remote-Control  
Room Connect at the Wireless Entrance

本試験でも2017年度と同様に28GHz帯を用いた。周波数が高いと大容量のデータが伝送できる反面、指向性が

強いいため、動作範囲が広く旋回などを行う重機では基地局との通信が問題となる。これを解決するために、大林組の技術である「スカイジャスター<sup>®9)</sup>」を改良し、Fig. 9に示すように無線機下部に搭載した。この機構はジャイロによる方向制御とGNSSの方位角制御を組み合わせ、重機がどの位置でどのように旋回しても重機の5Gアンテナが基地局と相対するようにするものである。

### 3.3 音声による重機の遠隔操縦機構

試験は2.1で示したように、土砂災害の復旧を想定したシナリオで試験を行った。この試験では土砂掘削にバックホウ、土砂運搬にはクローラダンプを用い、それぞれ遠隔オペレータが運転を行った。あわせてバックホウのオペレータにクローラダンプの運転も行わせる、すなわち1人のオペレータが2台の重機を運転する試験も行った。バックホウのオペレータは自身の重機を遠隔操縦しつつ、クローラダンプを音声で運転するシステムを新たに開発し、5Gの試験とともに実用性の検証を行った。

音声コマンドは、重機のオペレータが普段使う言葉を抽出し、音声認識システムを改良し搭載した。実施状況はFig. 10に示す。実用化に向けて十分な音声認識精度および運転効率を確保できることが確認でき、遠隔操縦における省力化に向けた新たな技術開発を行うことができた。

### 3.4 無線エントランスの活用

5G回線が災害発生場所で必ずしも利用できるとは限らない。このため遠隔操縦による無人重機の近傍に5G基地局を配置し、重機が作業を行っている危険地域から十分離れた場所に遠隔操縦室を置くことを想定し、その間の通信をFig. 11に示すような無線エントランスで接続することとした。この無線エントランスとは、通信事業者向けに開発された携帯電話基地局用の無線伝送路装置で、マイクロ波回線を用いた無線通信手段である。今後Last One Mileをローカル5Gを用い、商用通信との間を無線エントランスで結ぶような方式が必要になるが、それに先駆けた実験を行った。

## 4. 重機の遠隔操縦試験

試験は2018年11月から12末日まで実施し、期間中に2つのフェーズを実施した。システムの動作検証と5Gの伝送確認試験を前半で、遠隔操縦室を750m移設し本格的な遠隔操縦試験とデータ取りを後半に行った。

### 4.1 試験方法

試験方法の概要をFig. 12およびPhoto 2に、実際の試験状況をFig. 13に示す。試験は所定の位置に待機したクローラダンプが土砂積み場所へ移動し、バックホウが土砂を積み込み、クローラダンプが荷下ろし場所へ移動して土砂を下ろす。この作業を3回繰り返し、クローラダンプ

が待機場所に戻るまでの時間を記録した。この一連の作業に関して、搭乗操作と5Gを用いた遠隔操縦で作業時間の比較を行った。クローラダンプの移動距離は40m、バックホウで積み込む土砂は礫質土で単位体積重量 $1.9\text{t/m}^3$ 、3回のすくい取りと積み込みでクローラダンプには1回あたり約3tの土砂を積み込んだ。

試験では下記の所要時間の計測を行った。

- ① 有人操縦(オペレータ搭乗)による時間の計測(基準試験)
- ② 5Gを用いた遠隔操縦による時間の計測

## 4.2 試験結果

試験は搭乗操作を2018年11月29日に、5Gによる遠隔操縦試験を2018年12月4日～12月6日に実施した。試験による土砂積み込み・運搬に要した時間をまとめたものをFig. 14 に示す。なお、オペレータは、バックホウは50代男性、クローラダンプは20代男性であった。グラフ中には遠隔操縦試験に移る前にオペレータ訓練も実施したので、そのときに要した時間も参考に記載している。

試験の経過と土砂積み込み・運搬に要した時間を考察すると、搭乗操作ではほぼ一定で、重機の作業能力を使い

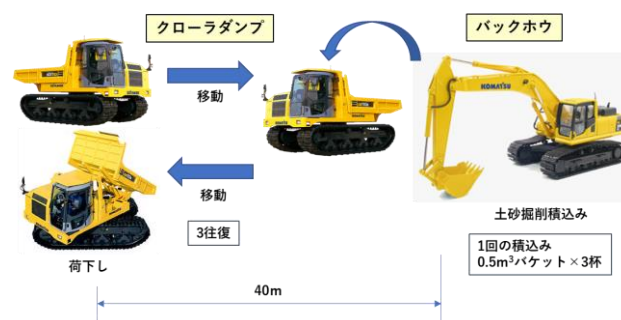


Fig. 12 試験概要  
Outline of Field Test



Photo 2 遠隔操縦室内部  
(遠隔操縦：クローラダンプ(左)、バックホウ(右))  
Remote Control Room



Fig. 13 試験状況(5Gによる遠隔操縦)  
Test Status (5G Remote-Control)

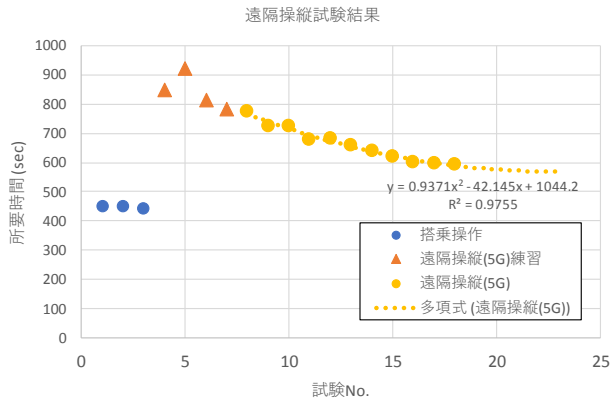


Fig. 14 試験結果(作業時間)  
Test Result (Working Time)

Table 1 試験結果(習熟時の想定時間時間：累乗近似)  
Test Results (Estimated Time of Learning)

|       | sec | 時間比  | 作業効率 |
|-------|-----|------|------|
| 搭乗平均値 | 450 | 1    | 1    |
| 5G漸近値 | 570 | 1.27 | 0.79 |

Table 2 オペレータの感想  
Impressions of the Operator

| 良い感想(印象)                                                                                                                                                                                                                                                                   | 悪い感想(印象)                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>なれば違和感がない</li> <li>実際の操作系と同じなので操縦しやすい</li> <li>画面が大きく鮮明で良い</li> <li>実際の明るさよりも明るく見え、暗くなってからも見やすい</li> <li>操作に対して遅れがなく違和感がない</li> <li>現地の音と振動は重機が状況が解って作業しやすい</li> <li>搭乗操作よりも作業環境が良い</li> <li>前面カメラと俯瞰カメラを使い分ければ問題なく操縦できる</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>慣れるまでにやや時間がかかる(練習は必要)</li> <li>前面カメラの視野は大きく確保されているが、やや足りない感じはする</li> <li>重機の近接時に気を遣う</li> </ul> |

切って作業を行っていることが推察される。一方、遠隔操縦は試験の回数が進み経験が増えるにつれて所要時間が短くなっていることが解る。オペレータの慣れによるものであるが、ばらつきはあるものの一定時間に収束している様子がうかがえる。

5Gによる遠隔操縦に要した時間を外挿し、熟練時の想定時間を累乗近似にて推定するとTable 1 のようになる。5Gを利用した遠隔操縦は、搭乗操作に比較して表作業時間が1.27倍となり、搭乗操作に要する時間を基準とした作業効率は1/1.27=0.79となった。

#### 4.3 試験結果の考察

本試験で、作業効率が一般的に言われている効率低下よりも小さかったことに関して、その要因は、①高精度

な映像、②低遅延、③音響や振動などを伝達したことによる臨場感による作業性の改善が考えられる<sup>10)</sup>。

定性的な要因は上記の3項目であることは間違いないが、それらが今回の作業のどの部分を改善したかを検討した。本試験では、クローラダンプによる移動、バックホウによる土砂の掘削・積込みが遠隔操縦の対象であり、重機の主な動作となる。このどの部分に5Gを用いたことによる効果が出たかを、重機オペレータへの聞き取りと作業分析により検討した。

##### (1) 重機オペレータへの聞き取り

今回遠隔操縦を行ってもらったオペレータへの、操縦に関しての聞き取り結果をTable 2 に示す。これらの結果は、試験の計測値だけではなく実際の作業者感覚を表したものであり、今後のインターフェイスの改善にも役立つものと考ええる。

##### (2) 作業分析(所要時間の分析)

上記のオペレータの感想に加え、客観的にどの部分が搭乗操作に対して時間を要したのかを作業時間の分析から考察する。重機の作業時刻をそれぞれの重機の作業動作に分けた記録も行ったので、この結果をグラフ化したものをFig. 15～Fig. 17に示す。

これらの結果を見ると、バックホウの土砂積込みやクローラダンプの土砂積込み後の移動、ダンプアップ時は搭乗操作とさほど時間が変わらないことが解る。この結果は、5Gを用いることによる成果であると考ええる。一方、クローラダンプがバックホウへ接近する方向の所要時間は、搭乗操作と遠隔操縦では大きく異なっており、遠隔操縦は搭乗操作の約2倍の時間を要していることが解る。

高精細な映像を提供し、遅延が少ないことによる操作性の改善は実現できたが、重機同士の接近は遠隔オペレータに負担を強いることになり、この部分は聞き取りでの意見もあったが改善の重要なポイントであると考え<sup>11)</sup>。

#### 5. Wi-Fiを用いた映像伝送試験

遠隔操縦における映像伝送は現在の現場でも利用されており、それらにはWi-Fiが用いられている。映像伝送においては遅延が問題とならないようなモニタリングでは近年では4Kカメラが用いられており、低いフレームレートで送ることが多いが、遠隔操縦ではSVGAを用いたり周波数帯域を分割して多チャンネルで映像を送信したりしている。

今回は、現在使われているWi-Fiを5Gの試験と同一の条件で使った場合の現象を確認することを目的に、あえて多チャンネル化を行わずに映像伝送を行う試験を行った。試験のカメラ等の構成をFig. 18に示す。

映像の伝送試験は2019年2月20日～22日に大林組西日本ロボティクスセンターで実施した。今回使用したWi-Fiアクセスポイントは、周波数帯域は802.11nの2.4GHz帯を使用した。データ伝送速度は、20MHz(最大145Mbps)、40MHz(最大300Mhz)のオート設定にした。フレームレ

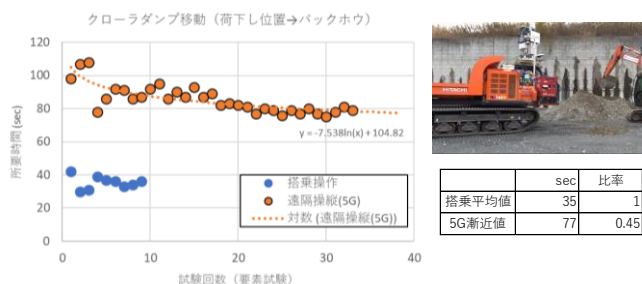


Fig. 15 試験結果

(クローラダンプがバックホウに近づく)

Test Results (The Crawler Dump Approaches the Backhoe)

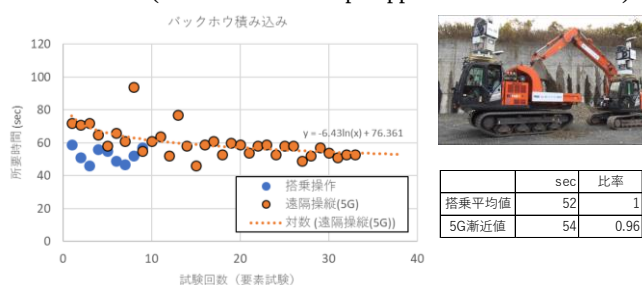


Fig. 16 試験結果

(バックホウがクローラダンプに土砂を積み込む)

Test Results (Backhoe Loads Sand on Crawler Dump)

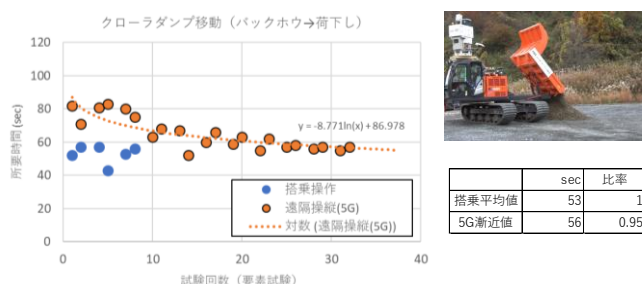


Fig. 17 試験結果

(クローラダンプが土砂を移動・ダンプアップ)

Test Results (Crawler Dump Moves and Dumps Sand)

トは5Gと同様に60fpsとした。本試験において移動操縦室はロボティクスセンターの作業施設内に設置し、Table 3に示す6種類の試験を行った。試験の結果をTable 4にまとめる。

試験の結果、試験ケース5ですべての映像を伝送することができたが、映像の画質はビデオビットレートを落としたために劣っていた。このときの遅延は160msであった。

以上の結果をまとめる。

- ① 5G実証試験の時と同様な環境を作り試験を行ったが、5Gの場合はすべての伝送ビットレートを15Mbpsのクリアな2K画像を8台分同時リアルタイム伝送できた
- ② Wi-Fiアクセスポイントの場合、同条件の伝送ビットレートでは8台分同時にリアルタイム伝送は

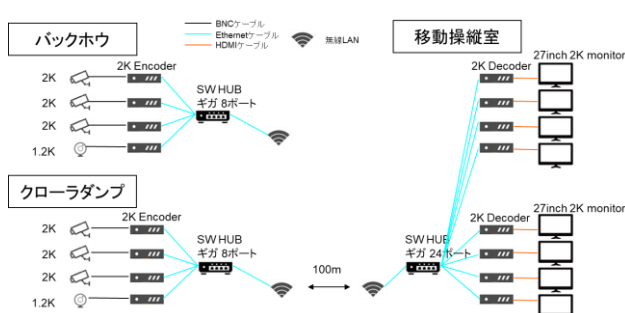


Fig. 18 カメラと通信の構成(Wi-Fi通信)

Camera and Communication Configuration  
(Wi-Fi communication)

Table 3 Wi-Fi試験ケース

Wi-Fi Experiment Case

| 実験ケース    | カメラ<br>接続台数    | 重機と基地局<br>の距離(m) | ビデオのビット<br>レート (Mbps) |
|----------|----------------|------------------|-----------------------|
| 5G (基準値) |                | 150              | 15<br>(1台あたり)         |
| 1        | 2K×6<br>1.2K×2 | 100              | 15                    |
| 2        |                | 50               | 15                    |
| 3        | 合計8台           | 50               | 10                    |
| 4        |                | 100              | 10                    |
| 5        |                | 100              | 5                     |

Table 4 Wi-Fi試験結果

Wi-Fi Experiment Result

| 実験<br>ケース | 映像伝送<br>できた台数 | 状況                                                                                                                                             | 状況写真                |
|-----------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1         | 2             | ・カメラが2台以上の条件下では、受信側映像が点滅したり画像ロスになってしまった<br>(伝送帯域の不足のため、8台合計120Mbpsがすべて伝送できない)<br>・pingコマンドで、各WiFiアクセスポイントの応答速度を計測したが、3桁、4桁msecの応答やタイムアウトを繰り返した | 点滅／画像ロス<br>俯瞰モニタ写らず |
| 2         | 2             | 同上                                                                                                                                             |                     |
| 3         | 4             | ・1つの重機のためのカメラ (4台)にした場合、4つの映像はすべて伝送表示できたが、2つを同時にオンにすると、すべての映像受信が画像ロスになった<br>・pingコマンドの各WiFiアクセスポイントの応答速度は2桁msecの応答                             | 画像ロス<br>俯瞰モニタ写らず    |
| 4         | 4             | ・カメラが4台以上の条件下では、受信側映像が点滅したり画像ロスになってしまった<br>・pingコマンドの各WiFiアクセスポイントの応答速度は1桁、2桁msecの応答                                                           | 画像ロス                |
| 5         | 8             | ・画質はまあまあで、8映像がリアルタイム伝送できるようになった<br>・pingコマンドで、各WiFiアクセスポイントの応答速度を計測したが、1桁、2桁msecの応答でタイムアウトがなくなった                                               | 映像受信成功              |

できなかった。

- ③ 各15Mbps(合計120Mbps)を、画質が落ちる現象のある伝送ビットレートを3分の1の各5Mbps(合計40Mbps)に落としてやっとリアルタイム伝送ができた。

これらの結果より、Wi-Fiでの通信の限界が定量的に示され、今後現場で大容量通信を必要とした場合の5Gの有用性を改めて確認できた。

## 6. まとめ

本試験で以下の点を具体化した。

- ① 本試験での5Gを「大容量」特性を生かした高精細な映像の伝送だけでなく、uplinkの「低遅延」を実現した。
- ② カメラとコーデックを最適化し、室内試験で遅延80ms、現場の簡易計測でも約100msの遅延を実現した。
- ③ これらの成果により、試験では遠隔操縦の操作性の向上を実現でき、作業効率は搭乗操作の79%を確保することができた。

昨年度は4K-3Dの高精細画像を用いたが<sup>12)</sup>、遅延が大きく約600msの遅延が発生し操縦にやや支障があったことから、本年度はこの反省から、操縦に利用するメインのカメラを4K→2Kとした。ただし カメラ台数を増やし、総伝送量は4Kと遜色ない環境での実験に成功した。

また、低遅延に関しては、一般的に遠隔操縦に支障を与える遅延は200msが閾値とされているが、これを大幅に下回ることができた。遅延は操作信号を映像で確認し次の動作に移るときのタイムラグの発生原因なので、これが小さいほどリアルな操作に近づくことになる。今回はこれを、5Gを用いた遠隔操縦システムを構築することにより操作性の改善を実現した(Uplinkは重機側からのデータで映像情報であり、現在のLTEも基地局から移動局への通信であるdownlinkは高速であるがuplinkは容量も確保されておらずかなり遅い)。

さらに、今回の実験では災害時を想定したトータルシステムを構築することも成功し、今後の実運用への展開も期待される結果となった。

試験は2018年12月に終了したが、この結果をまとめ引き続きユースケースの拡大に関する検討も行い、これに伴う通信機器の選択バリエーションの強化と社内での形式知化、遠隔操縦のみならず自動・自律運転のバックアップ機能としての熟成など、新しいシステム構築をさらに検討する予定である。

## 謝辞

本試験は、2018年度、総務省が委託する「都市又は郊外において1msの低遅延通信を可能とする第5世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討会」により実施している。ご協力頂いた関係者各位に感謝する。

## 参考文献

- 1) Satoru Miura, Kenniti Hamamoto, Izuru Kuronuma : Next Generation Construction Production System Focusing on Automation Technologies of Construction Machines, The 7th Civil Engineering Conference in the Asian Region Proceedings, 2016
- 2) [www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/it/robotto/robottoka\\_3.pdf](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/it/robotto/robottoka_3.pdf), 2019.6 閲覧
- 3) 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, No.681, pp.6-12, 2006.11
- 4) 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, Vol. 41, No. 5, pp. 7-13, 2005.5
- 5) 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.
- 6) 古屋 弘, 森 直樹, 永嶋 充：次世代高速通信 5 G を用いた重機の遠隔操縦試験, 大林組技術研究所報, No. 82, 2018
- 7) 都市又はルーラルにおいて端末からの上り平均300Mbpsを超える超高速通信を可能とする第5世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討請負報告書, KDDI 株式会社, 2019.3
- 8) 森 直樹, 古屋 弘, 宮内賢治：建設機械の改造が不要で着脱可能な装置による無人化施工技術の開発, 熊本城崩落石撤去へ汎用遠隔操縦装置「サロゲート<sup>®</sup>」の適用事例, 建設機械施工 Vol. 69, No. 12, pp. 58-63, 2017.12
- 9) <https://www.obayashi.co.jp/towercrane/knowledge/fellow.html>, 2019.6 閲覧
- 10) 古屋 弘, 栗生 暢雄, 清水 千春：次世代無人化施工技術の開発ー3D映像及び体感装置を用いた遠隔操作ー, 第14回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 109-116, 2012.9
- 11) 伊藤 禎宣, 坂野 雄一, 藤野 健一, 安藤 広志：無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 73, No. 1, pp. 15-24, 2017
- 12) 都市または坑外において 1ms の低遅延通信を可能とする第5世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討報告書, KDDI 株式会社, 2018.3