

次世代高速通信 5G を用いた重機の遠隔操縦試験

古 屋 弘 森 直 樹
(本社機械部)

永 嶋 充
(東京機械工場)

Remote Control Test of Heavy Machinery Using Next-Generation High Speed Communication Technology 5G

Hiroshi Furuya Noaki Mori
Mitsuru Nagashima

Abstract

Communication technology has resulted in major changes in the construction field. In recent years, it has become a core technology in construction work utilizing information and communication technology. The authors conducted a verification experiment of construction efficiency incorporating 5G, a new generation communication technology, for the remote control of heavy machinery. Because 5G can transfer large volumes of data, a remote-control system using high-resolution video was developed in this study. Consequently, a 35% improvement in efficiency was achieved compared to conventional remote control using wireless LAN. In this report, the outline and results of the present experiment are shown and the unsolved issues from the experiment are introduced.

概 要

通信技術は建設分野において大きな変革をもたらした技術の一つである。近年、ICT(Information and Communication Technology)を活用した施工において中核技術となりつつある。今回、筆者らは重機の遠隔操縦に新しく仕様策定された第5世代移動通信システム5Gを取り入れた施工効率の検証実験を実施した。今回の実験では5Gが大容量データの通信を可能とすることを生かし、高解像度の映像を用いた遠隔操縦を行った。その結果、従来の無線LANを用いた遠隔操縦に対して35%の効率改善が実験で認められた。本報文ではこの実験概要と成果の他、実験において明らかになった課題に関して紹介する。

1. はじめに

建設分野では、近年様々な新しい技術が取り入れられ、施工の合理化や効率化、安全性の向上に貢献している。この中で建設機械のロボット化は、遠隔操縦技術の開発と実用化に始まり、近年では重機の自律運転への試みも開発が進みつつあり、これらの新しい技術は、雲仙普賢岳のような災害復旧現場や、急傾斜地における工事など、危険や苦渋を伴う作業における作業環境の改善と安全性の向上につながっている。主に遠隔操縦による無人化施工技術であり、建設ロボットの代名詞になっている。この背景には、国土交通省が2003年より総合技術開発プロジェクトとして、3次元空間データを用いた施工技術や、遠隔操作ロボット等による施工技術の研究開発を支援してきたことがある²⁾。そこではICT(Information and Communication Technology) やロボット技術が活用されている。これらは2016年からスタートしたi-Construction³⁾に引き継がれ、建設プロジェクトの合理化と変革を大きく進めている。

このような技術開発の基盤技術として、コンピュータのハードウェアとソフトウェアの進化により3次元デー

タを容易に扱えるようになった。また測位においては今では当たり前のように利用しているGNSS(Global Navigation Satellite System)が、測量だけでなくマシンコントロール、マシンガイダンスシステムに不可欠のものとなっている。

遠隔操作に欠かせない通信に関しては、無線LANの高度化、商用通信ネットワークの充実、ならびに通信費用の低下が、建設現場での仕事のやり方を一変させた。このように近年のICTを用いた建設工事では、通信技術は施工における生産性向上や合理化に向けての中核技術の一つである。

今回、筆者らは無人化施工における重機の遠隔操縦に、新しく仕様策定された第5世代移動通信システム5Gを取り入れた実験を行った。本報文ではその目的と実験結果を紹介する。

2. 無人化施工技術の発達と課題

ここでは無人化施工に関して簡単にまとめる。

無人化施工技術は、一般には遠隔操縦による重機の操縦であり、建設ロボット技術の一つとして発展し、今日

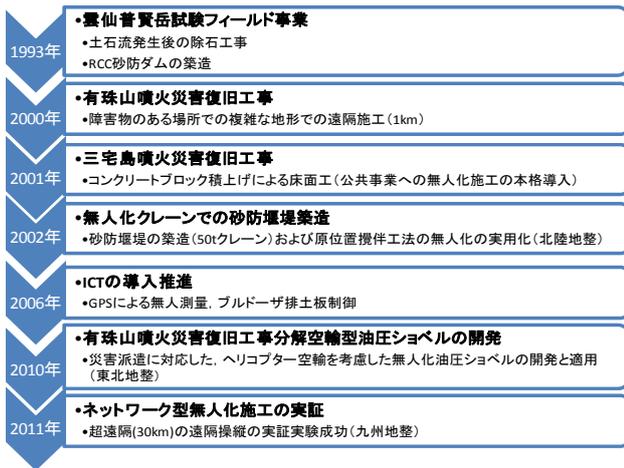


Fig. 1 無人化施工技術の歴史
History of Unmanned Construction Technology

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。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重機が導入されたのは、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により河川中央の河床の掘削を行ったものであったが、この水中作業を安全に行った技術は、無人化施工技術の基礎になった。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⁴⁾。その後も我が国は数多くの自然災害によって多くの被害を受けているが、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。しかし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び施工性(施工効率等)が劣るなどの問題がある。また、通常の有人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が課題である。また、建設業の就労者の高齢化と若年労働者の不足傾向は年々悪化しており、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。さらに、若年層の建設産業就労者数の低下は⁶⁾、次世代への技術継承のみならず、ICTなどの導入拡大の観点からも憂慮すべき事態である。

このように無人化施工へのニーズは増えつつあるにも

Table 1 通信技術の変遷
History of Communication Technology

Generation	1G	2G	3G	4G	5G
年代	1970~80	1990	2000	2010	2020
通信速度	2.4kbps	28.8kbps	14Mbps	100Mbps	10Gbps以上
機能/技術	アナログ通信	デジタル通信開始 データ通信開始 (メールなど) ポケベル、PHS	スマートフォン 通信料金の低価格化 CDMA	2011年より4G(3.9G)の運用開始 LTE/WiMAX PREMIUM 4G(DuCoMo)	2017年に仕様策定 2020年運用開始予定

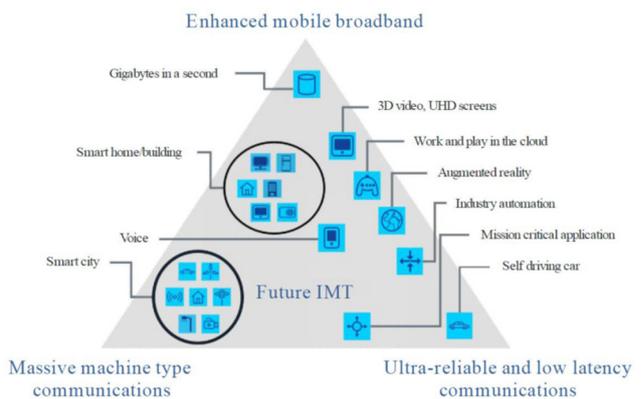


Fig. 2 2020年以降の高速通信システムのシナリオ⁷⁾
Usage Scenarios of International Mobile Telecommunications

かかわらず、それに対応できるオペレータは少なく、技能習得のチャンスが少ないといった状況である。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、対応できるオペレータを確保出来ないことも考えられる。こうした点からも、無人化施工をより平易に利用できるシステムの開発は重要である。

3. 5G通信の概要

携帯電話が登場したのは1980年代である。当時は機器本体の保証料が必要で通信費も高額であることから、建設分野ではなかなか利用が進まなかった。その後データ通信が加わり、携帯電話でメールやインターネットの利用ができるようになった。さらに通信費の低下に伴い爆発的に利用が進んできた。Table 1に通信技術の変遷を示しているが、現在日本で主流なのは第四世代である、いわゆる「4G」である。この通信技術をさらに進化させようとする試みが2017年から本格化し、新しい通信技術である「5G」としての仕様策定、および利用実験を総務省が開始した。5Gは、①高速、②大容量、③低遅延、④高品位、⑤多接続、を特徴としたもので、高速通信に関しては、通信速度は10Gbps以上になる予定である。

上記①の高速、②の大容量通信に関しては、伝送速度

Table 2 5G 総合実証試験の実施概要(2017年度)⁸⁾
 Outline of Implementation of 5G Comprehensive Demonstration Test

	技術目標	実施主体	主な構成会社	概要	主な想定実施場所
I	ユーザ端末5Gbpsの超高速通信の実現 ※基地局あたり10Gbps超	株式会社NTTドコモ	・東武タワースカイツリー株式会社 ・総合警備保障株式会社 ・和歌山県	・高臨場・高精細の映像コンテンツ配信や広域監視、総合病院と地域診療所間の遠隔医療に関する実証	・東京都（東京スカイツリータウン周辺） ・和歌山県
II	高速移動時における2Gbpsの高速通信の実現	エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社	・東武鉄道株式会社 ・株式会社インフォシティ	・高速移動体（鉄道、バス）に対する高精細映像配信に関する実証	・栃木県（東武スカイツリーライン・日光線沿線） ・静岡県
III	1ms（無線区間）の低遅延通信の実現	KDDI株式会社	・株式会社大林組 ・日本電気株式会社	・建機の遠隔操作など、移動体とのリアルタイムな情報伝送に関する実証	・埼玉県（大林組東京機械工場）
IV	ユーザ端末5Gbpsの超高速通信の実現 ※基地局あたり10Gbps超	株式会社国際電気通信基礎技術研究所	・那覇市 ・京浜急行電鉄株式会社	・屋内スタジアムでの自由視点映像の同時配信や鉄道駅構内における高精細映像の収集配信に関する実証	・沖縄県 ・東京都（羽田空港国際線ターミナル駅）
V	1ms（無線区間）の低遅延通信の実現	ソフトバンク株式会社	・先進モビリティ株式会社 ・SBドライブ株式会社	・トラックの隊列走行、車両の遠隔監視・遠隔操作に関する実証	・茨城県つくば市
VI	100万台/km ² の多数同時接続の実現	国立研究開発法人情報通信研究機構	・通信事業者 ・地方自治体 ・オフィス機器商社	・生産から消費までの物流管理や在庫管理、自由な働き方を実現するスマートオフィスやテレワークに関する実証	・宮城県 ・石川県 ・大阪府

は現在の携帯電話の通信規格であるLTE(Long Term Evolution : 4G)も高速を謳い、ベストエフォートであるが1Gbpsを実現している。しかしこの値は基地局から移動局(受信者)に向けて発射される電波の通信経路であるDownlink方向のものであり、重機の遠隔操縦に必要な映像伝送はこの反対方向のUplinkを用いることとなり、これは10Mbpsである(Wi-Fi : 2.4GHzは双方向とも11Mbps)。この速度ではフルHDと呼ばれている解像度1920×1080の2K以上の映像を送るのは厳しいが、今回の実験に用いた5G無線機は、双方向とも300Mbps(将来的には10Gbps)を確保しており、重機からの映像を送ることに対して十分な速度を確保できる。

このような特徴を有する5Gは、その能力を様々な分野に適用できるように国際的な標準化が進められている。5Gの標準化を担当する国際電気通信連合・無線通信部門(ITU-R: ITU Radiocommunication Sector)は、5Gの仕様制定に当たって「5Gが提供すべき通信能力」を定義するために具体的な活用ケースをいくつか想定している。この活用ケースにおいて求められる通信能力を議論する中で、三つの観点を設定している。具体的には、①超高精細ディスプレイや3次元ビデオ、AR(Augmented Reality)向けの「超高速モバイル通信」(Enhanced Mobile Broadband : eMBB)、②スマートシティ/IoT向けの「大量・多地点通信」(Massive Machine-Type Communication : mMTC)、そして③遠隔手術や自動運転といった安定的なリアルタイム通信を前提とするミッションクリティカルなアプリケーション向けの「超高信頼の低遅延通信」(Ultra-Reliable and Low Latency Communication : URLLC)である。このシナリオを図化したものがFig.2である⁷⁾。

このように5G通信技術は、上記の特長を生かし社会全般への大きな変革をもたらすことが期待されている。国内における実用化計画の具体化を総務省が2016年度から進めている。2017年度から実用化実験が開始され、Table 2に示すように様々な分野への適用実験が行われた⁸⁾。

4. 5Gを用いた重機の遠隔操作試験

大林組は2017年5月から開始された総務省が主催する「5G総合実証試験」に、KDDI株式会社を実施主体とした「重機の遠隔操作など、移動体とのリアルタイム情報伝達に関する実証」に、日本電気株式会社とともに参加することとなった。試験は予備試験等を2017年10月から開始し、重機の遠隔操縦の遠隔地画像通信に5Gを適用し、その優位性などを検証した。

著者らは通信の発達の恩恵を現場で感じている。商用通信を主に音声と軽微なデータ通信に利用してきた。遠隔操縦にもこの通信を用いることを検討してきたが、通信速度と帯域(容量)の問題で利用は叶わなかった。遠隔操縦にLTE(4G)を適用しなかったのは、必要な映像の通信が遠隔重機からのUplink方向で、通信速度に課題があるためである。このため、通信事業者と利用者を結ぶ最後の区間の所謂Last one mileは自前で無線LANシステムを構築していた。このためFig.3に示すように既存インフラ(有線通信)と自前の無線LANを組み合わせた長距離遠隔操縦で対応している。一方5Gを利用した場合には、距離の制約なしに直接遠隔操縦装置にアクセス可能で、自前の無線LANが不要となる。

今回の試験では、現在行われている2.4GHz帯の無線

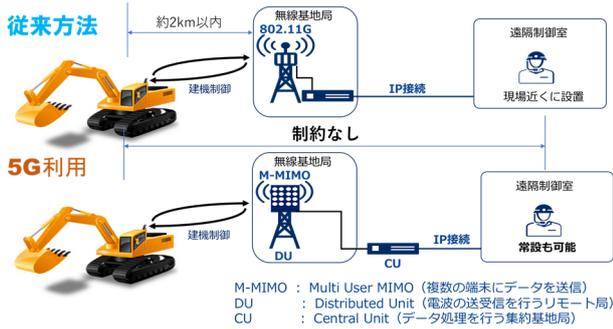


Fig.3 5Gを用いた重機遠隔制御のイメージ
Image of Remote Control of Heavy Machinery using 5G



Fig.6 カメラの配置
Camera Arrangement

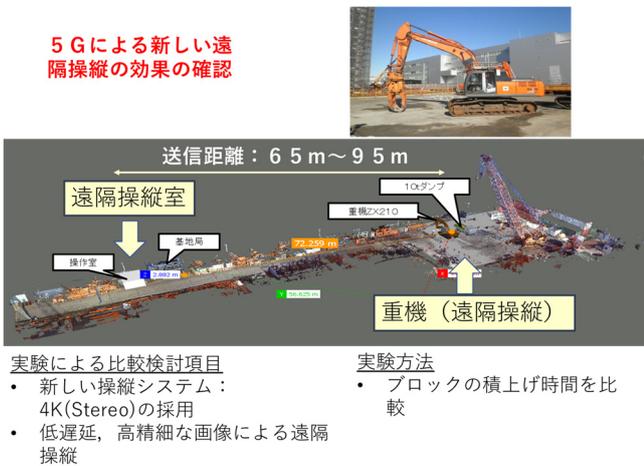


Fig.4 5Gを用いた重機遠隔制御実験の概要
Outline of Remote Control Experiment of Heavy Machinery using 5G



Fig.5 遠隔操縦装置「サロゲート」
Remote pilot "Surrogate"

LANを用いた遠隔操縦(従来技術とよぶ)と、5Gを用いた遠隔操縦による操作性の比較を実施する。試験の概要はFig.4に示す。5Gの高速、大容量、低遅延性を生かし、映像情報を4K(3840×2160=約800万画素の解像度)ステレオで送信する。高精細な画像を用いることによる遠隔操縦の操作性を検証した。なお、遠隔操縦機械は、当社が

開発したサロゲート⁹⁾を用いる(Fig.5参照)。この装置は、既存の機械に後付けで装置を装着することにより、容易に遠隔操縦を実現可能とするもので、電動アクチュエーターとガイド装置により物理的に重機のレバーを操作する。この方式は建設機械の操縦システムの電気信号に割り込むよりも汎用性が高くなり、装着する機械を問わない利点がある。また、操縦席はそのままの形で保持している点とガイド装置はピンで固定されているだけなので、遠隔操縦から搭乗操作に容易に切り替えが可能なシステムである。

今回の試験では、過去に筆者らが実施した3D映像による遠隔操縦¹⁰⁾を再度試みた。ただし、5Gの特性を生かして4Kステレオ画像を利用することとした。この映像データを高速で圧縮展開し、4K裸眼ステレオモニターを用いて操縦を行うこととした。その他の俯瞰カメラ等にも2Kカメラを配置し、これまでの遠隔操縦よりも多くの情報を遠隔操縦オペレータに与え、従来技術との作業効率の比較を行った。これまでも適用検討は行われてきたが、主に通信速度、帯域の問題で無線通信では実現が不可能であった。今回、5Gを用いることにより初めて実現可能となり、その効果を検証した。

4.1 試験の目的

5G通信を用いて遠隔操縦を行う事により、重機の作業効率の改善を確認する。

一般的に、遠隔操縦による作業は作業効率が低下する。一般財団法人先端技術センターのアンケート等によると、作業内容により異なるが、遠隔操縦は搭乗操作時に対して作業効率が1.5～2倍悪化する¹¹⁾。

今回は、これを5G通信の大容量通信を利用し遠隔操縦に高品質な映像を用い操縦性を高め、作業効率の改善が図れるかどうかの検証を行うことを目的とする。

4.2 試験場所および使用した機材

大林組東京機械工場に、Fig.4に示す試験ヤードを設け試験を実施した。なお、試験に使用した機械はバックホ

Table 3 カメラの配置(概略仕様)
Camera Arrangement (Outline Specification)

機材	重機	俯瞰	制御室	操縦室	備考
1.2Kカメラ	1	2			ネットワークカメラ
1.2K全天球カメラ	1				ネットワークカメラ
4Kカメラ	2				Quad 3G-SDI による4K出力
2Kカメラ		2			ネットワークカメラ
2K全天球カメラ	1				ネットワークカメラ
4K Encoder/Decoder			1	1	それぞれ1台
ワークステーション			1	1	4K映像マージ/操縦室制御
50インチ裸眼3Dモニタ				1	
27インチ2Kモニタ				3	
WiFiルータ	1	1		1	俯瞰カメラはまとめて1台
5G通信基地局	1			1	それぞれ1台



Photo 1 試験ヤード(ブロック積み上げ)
Test Yard (Concrete Block Stacking Up)

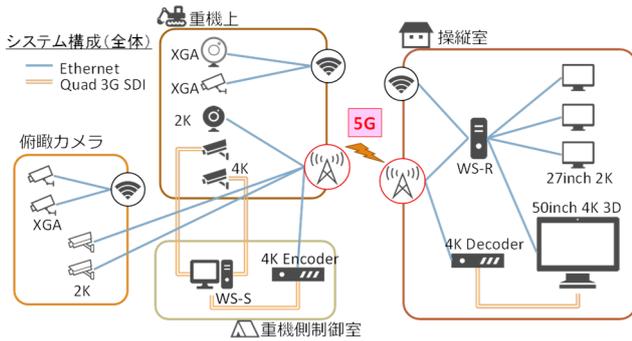


Fig. 7 機器構成(カメラと機器接続)
Device Configuration (Camera and Device Connection)



Photo 2 遠隔操縦室
Remote Cockpit

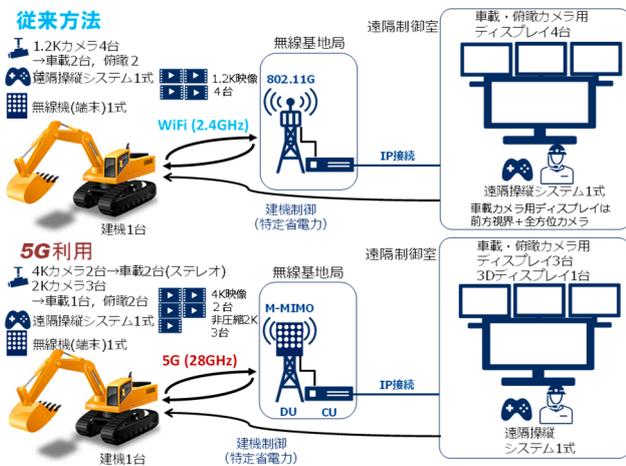


Fig. 8 機器構成(システム模式図)
Device Configuration (System Schematic Diagram)

ウで、先端のアタッチメントをフォークに取り替え、ブロックを掴む機構とした。また、試験に用いたブロックは一辺50cmの立方体、重量220kgの無筋コンクリート製である。

遠隔操縦において重要なカメラはFig.6のように配置した。それぞれの設置数量をTable 3に示す。なお、カメラ等の接続の概念をFig.7に示すが、Wi-Fiと5Gの切り替えは遠隔操縦室から行える仕様とした。システム全体の

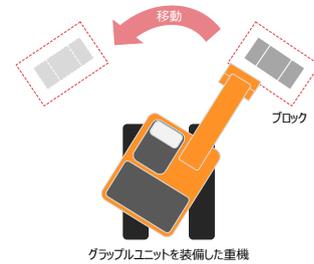


Fig.9 試験方法の概要
Outline of Test Method

模式図をFig.8に、遠隔操縦室および試験ヤードの写真をPhoto 1, 2に示す。

4.3 試験方法

試験は従来の無線LANと5Gを用いた遠隔操縦システムの作業性を比較した。具体的には以下の4パターンによるブロックを3個ピラミット状に積上げるのに要する時間の計測を行った。なお、下記の①と②は基準試験である。試験は1セット3回の積み上げを基本とした。

- ① 有人操縦(オペレータ搭乗)によるブロック積み上げ(基準試験)
- ② 目視遠隔操縦による積み上げ(基準試験)
- ③ 従来方法(無線LAN)による積み上げ

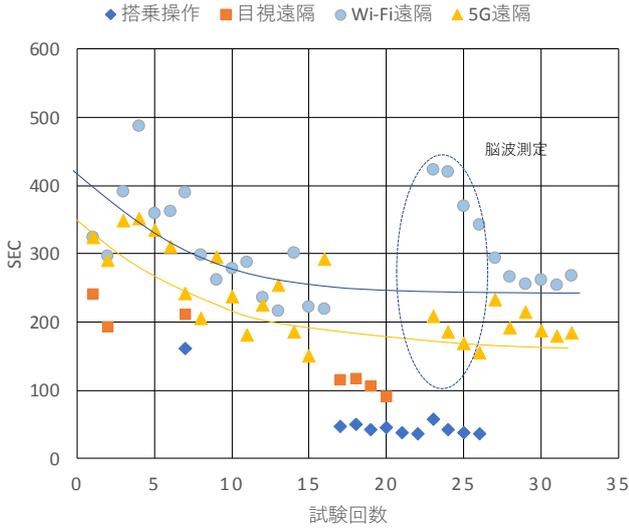


Fig.10 試験結果(ブロック積上げに要する時間)
Test Result (Time Required for Stacking Blocks)

Table 4 試験結果(操作時間:sec)
Test Result

試験方法	搭乗操作	目視遠隔	Wi-Fi遠隔	5G遠隔
平均時間(sec)	53.27	153.14	310.27	235.12

④ 5Gシステムによる積上げ

試験に参加した重機オペレータは、年齢54歳、オペレータ経験17年のベテランである。なお、ブロック積上げは慣れが生じるので、特に上記③と④はあえて交互に行うことにより慣れによる作業時間短縮が偏らないように配慮した。ブロック積み試験のイメージをFig.9に示す。

5. 試験結果および考察

5.1 試験結果

試験は搭乗操縦11回、目視遠隔操縦7回、Wi-Fiおよび5Gによる操縦を各26回実施した。試験結果をTable 4に、この結果を整理してグラフ化したものをFig.10に示す。試験の経過とブロック積みに要した時間を考察すると、試験の日程が進むにつれ、すなわち試験回数が増え経験が増えるにつれてブロック積みに要する時間が短くなっていることが解る。これは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見えてくる。それぞれの結果を外挿し、熟練時の想定時間を累乗近似にて推定するとTable 5のようになる(後述する脳波測定時のデータは近似から除外)。この結果から、5Gを利用した遠隔操縦は、従来技術(Wi-Fi)と比較して作業効率が約35%改善することが解った。(ブロック積上げ時間, Wi-Fi : 5G = 1 : 0.641)。

搭乗操作との比較では、作業効率は搭乗操作で約53(sec)(Table 4)に対して5Gの習熟操作時間177(sec)

Table 5 試験結果(習熟時の想定時間時間：累乗近似)
Test Result
(Assumed Time at Proficiency: Power Approximation)

	熟練時の想定時間(sec)	時間比率(Wi-Fi基準)	外挿近似式
WiFi	276	1	$Y=362.5X^{-0.073}$
5G	177	0.641	$Y=383.59X^{-0.213}$

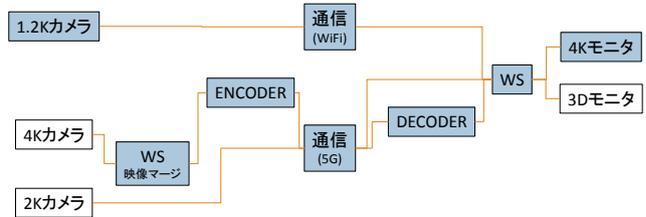


Fig.11 遅延発生箇所
Delay occurrence location

Table 6 遅延時間
Delay Time

	総遅延時間(msec)
WiFi	1200 (最大)
5G	612

(Table 5)から $53/177=0.299 \rightarrow 30\%$ (70%低減)となり、従来から言われている「作業効率が75~80%程度に低下する」¹¹⁾よりも大きくなっていった。これは、ブロック積みのような複雑な作業のためであると考えられる。

試験においてシステムの総遅延時間も計測した。計測は2つの時計の時刻同期を行い、遠隔操縦重機付近の時計と遠隔操縦室の時計の時間差により計測を行った。総遅延時間は、①無線区間、②ルータ、③コーデック機器、④ワークステーション、⑤3Dディスプレイの総遅延である。Fig.11に映像データの流れと遅延発生箇所(図中の色付け部分)を示すが、総遅延時間はTable 6の通りであった。

5.2 ブロック積上げ試験結果の考察

以上の結果から、Wi-Fiを利用した従来の遠隔操縦に対して5Gを用いた遠隔操縦の方がブロック積上げ時間が少なく、効率がおおよそ35%改善したことが解った。遅延は5Gでも約600msecとなり通信区間の低遅延をシステム全体で生かすことができなかったが、5Gによる遠隔操縦はオペレータが習熟しない時点でもWi-Fiによるものよりも速かった。これは高精細で奥行きが解りやすい4K画像(俯瞰カメラは2K)と3Dの効果によるものが大きいと考えられる。高解像度の映像は、従来のWi-Fiや4Gでは重機側から送ることが困難であったが、今回の試験では5G通信を用いることによりこれを実現できたことは今回の試験の成果である。

なお4K画像による作業効率の改善は、文献11)でも高



Fig.12 脳波・心拍測定装置

Electroencephalogram / Heart Rate Measuring Device

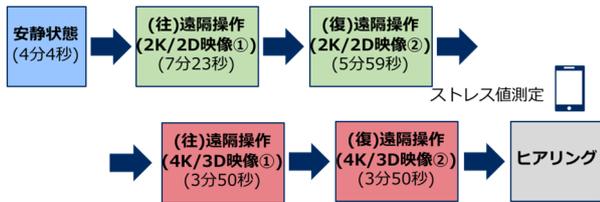


Fig.13 脳波測定計測手順
EEG Measurement Procedure

① 安静状態	<ul style="list-style-type: none"> ● 安静状態における脳波/心拍情報/ストレス値を計測 ● 本情報を基礎データとし操作時データとの比較に利用
② 建機操作	<ul style="list-style-type: none"> ● 実際の建機操作時におけるストレス値を計測 ● 今までの通常操作時におけるストレス値を把握
③ 遠隔操作 (2K/2D映像)	<ul style="list-style-type: none"> ● 2K/2D映像の遠隔操作時におけるストレス値を計測 ● 建機操作時とストレス値の変化があるかを確認
④ 遠隔操作 (4K/3D映像)	<ul style="list-style-type: none"> ● 4K/3D映像の遠隔操作時におけるストレス値を計測 ● 2K/2D映像時と比較したストレス値の変化を確認

Fig.14 ストレス値の測定方法
Method of Measuring Stress Value

精細の映像が作業効率を改善する旨が考察されている。

5.3 脳波・心拍測定

Wi-Fiを用いた遠隔操縦と5Gによる遠隔操縦では、5Gの方が作業時間が短く効率が上がったことが解ったが、遠隔操縦オペレータに対するストレスの違いを、脳波測定を行い比較してみることにした。なお、今回のストレス値の測定は、あくまでも参考として試行したものであり、算出しているストレス値や脳波データの正確性を保証するものではなく、測定値は各操作間の相对比较による傾向を示すものである。

試験は、Fig.12に示すような頭部に装着できる脳波デバイスを用いた。これはデバイスの内側にある電極がオペレータの額部分に接触し脳波を測定するとともに、耳たぶで心拍数を計測し、そのデータをスマートフォンおよびPCにて記録する装置である。測定装置を遠隔操縦オペレータが装着して、Wi-Fiおよび5Gによる遠隔操縦と搭乗操作における脳波(α波やβ波など)と心拍数データ

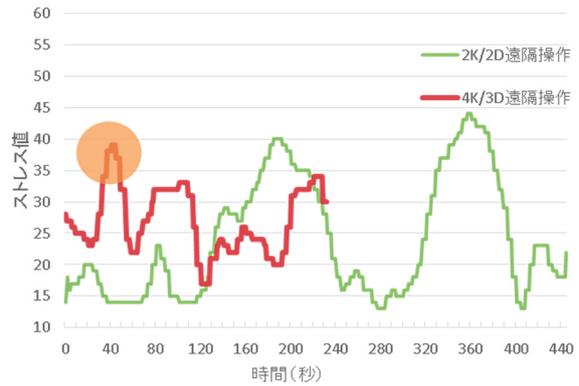


Fig.15 遠隔操作(2K/2Dと4K/3D)時のストレス値比較
Comparison of Stress Values in Remote Control (2K/2D and 4K/3D)

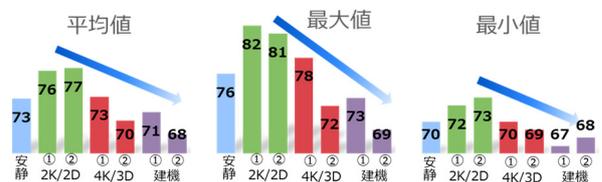


Fig.16 心拍数の比較(2K/2D, 4K/3D, 搭乗操作)
Comparison of Heart Rate (2K/2D, 4K/3D, Boarding Operation)

を収録した(基準値として、何も作業を行っていない安静時のデータも収録)。

試験計測の手順をFig.13, 14に示す。なお、計測値の定義は以下の通りである。

- ① 耳たぶに照射させた光を基に、1分当たりの脈拍数を計測
- ② 操縦中の心拍変動を記録
- ③ 心拍変動を元にした変化率を心拍変動ストレス値、脈波から測定されるα波やβ波など脳波の相対パワーを比較分析する事により導出される数値を脳波ストレス値とする。この両者を元にして算出される値を総合的なストレス値とし、この値を評価基準とする。

実験はブロックを左から右に積む(往路)と、それを元に戻す復路を1セットとした実験を行った。

ストレス値および心拍数値測定結果を以下にまとめる。遠隔操作(Wi-Fi:2K/2Dと5G:4K/3D)時のストレス値比較を1回目の操作に関して行った。測定結果を整理したものをFig.15に示すが、ストレス値はWi-Fiは初期は小さいものの変動が大きく、5Gの方が小さいことが解る。すなわち、ストレス値は、2K/2D > 4K/3Dとなった。Fig.15の円でハッチした部分は、5Gのストレス値が大きい部分であるが、実験上のトラブルによるストレス値上昇が原因とみ

られる。また、今回用いた装置では心拍数も計測できることからこのデータの計測結果をFig.16に示す。平均値、最大値、最小値:2K/2D>4K/3D>安静>建機操作となり、作業のしやすさと関係が深いことがうかがわれた。

また、以上の結果から、Wi-Fiを利用した従来の遠隔操縦に対して5Gを用いた遠隔操縦の方が脳波計測から算出したストレス値は概ね小さく心拍数も低い結果を得た。操作は遠隔操縦のコントローラを映像を見ながら操作するものであるため、この差異は映像からのストレスに起因するものと考えられる。

この結果からも、高精細で奥行きが解りやすい4K画像(俯瞰カメラは2K)と3Dの効果によるものが大きいと考えられ、前述の作業時間の効果の考察とも一致した。

6. まとめ

今回の試験で以下の知見を得た。

- (1) 5Gを利用した遠隔操縦は、従来技術(Wi-Fi)に比較して作業効率を35%改善した。これは高精細映像の伝送を実現することで、オペレータへの情報提供量の増大による負荷の軽減によるものである。
- (2) 搭乗操作との比較では、作業効率は70%低減となった。この結果は、従来実績(75~80%程度の低下)よりも作業効率の低下が大きい、ブロック積みのような複雑な作業のためであると考えられる。
- (3) システム全体の遅延は、約600msであり、遅延の発生源は、コーデック機器、ワークステーション(4K映像のマージ)、3Dディスプレイである。

謝辞

今回の試験は、平成29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。また、脳波・心拍測定は計測に日本電気株式会社、デバイスメーカーとしてSOSO H&Cの協力を得て実施した。

本発表に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, 2018.6 閲覧
- 3) http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html, 2018.6 閲覧
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) TU-R が 5G の仕様作成に当たって想定した活用ケースとそれらを満たす三つの観点 (Recommendation ITU-R M.2083-0), IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, 2015.9
- 8) www.soumu.go.jp/main_content/000485322.pdf, 2018.6 閲覧
- 9) 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」の適用事例，建設機械施工 Vol.69，No.12，pp.58-63，2017.12
- 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－3D映像及び体感装置を用いた遠隔操作－，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