

5Gを用いた道路工事の統合施工管理システムの開発

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)

堀 尾 訓 之 蔵 多 正 人 岡 本 邦 宏
(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) (西日本ロボティクスセンター)

Development of Integrated Construction Management System for Road Construction Using Next-Generation High-Speed 5G Communication Technology

Hiroshi Furuya Seigo Iwashita Eiji Jinnai
Toshiyuki Horio Masato Kurata Kunihiro Okamoto

Abstract

The 5G service started in Japan in March 2020. However, prior to that, as one of the “5G practical application demonstration study work” of the Ministry of Internal Affairs and Communications, the authors verified the effect of using 5G in the construction field for three years. It has been implemented since the year. In fiscal year 2019, the authors developed an integrated management system by remote control and conducted a demonstration test, assuming application to road construction. The newly developed integrated management system combines remote-controlled construction without tension and high-precision construction management using a laser scanner. In a field test, a new construction system using 5G and a new method to use it are proposed. This report presents the outline and results of this field test.

概 要

2020年3月より国内で5Gのサービスが開始されたが、これに先立ち総務省の「5G実用化実証検討業務」の一つとして、筆者らは5Gを建設分野で用いた効果の検証を2017年度から実施してきた。2018年度までは主に災害復旧を想定したシステムを構築し、5Gの高速、大容量を活かした遠隔操縦による重機の運転において施工効率の向上などの成果を得ることができた。2019年度は、一般の道路工事への適用を想定し、遠隔操縦による統合管理システムを開発し実証試験を行った。新たに開発した統合管理システムでは、遠隔操縦による丁張レス施工とレーザースキャナを用いた高精度施工管理を組み合わせている。今回の試験では、このシステムが実用化に耐えうることを検証するとともに、新しい建設分野の働き方を提案することができた。本報文ではこの実験概要と成果について述べる。

1. はじめに

筆者らは2017年度から5Gを用いた遠隔操縦システムの開発を実施してきたが、2019年度は5Gの実用化検証の最終年度の試験として、建機の遠隔操作による道路造成試験を実施した。Fig. 1に示すように、2017年度は建機単体の遠隔操作、2018年度は土砂災害を想定した緊急の復旧工事を想定し、遠隔操作により迅速且つ安全に土砂を撤去し災害復旧を行う¹⁾シナリオとした。2019年度は遠隔操作を実際の道路造成時のように施工図面に基づく工事(一般施工)へ適用することを想定し、道路造成を5G通信を用いた遠隔操作で実施した。今回の実験では、特に建設に多くの人々が参加できることなどを考え、Fig. 2に示すように「SDGs」⁴⁾を考慮した提案を行うこととした。この実験では、遠隔操作による作業だけではなく、一般の施工において重要な品質管理に関しても遠隔で実施することとし、高精度な出来形管理と品質管理(道路工事において最も重要な剛性)も遠隔で実施することとした。これらを実現するために国内でも初めての試みとし

て、遠隔操作とマシンガイダンスを組合せた「統合施工管理システム」を構築し試験を実施した。さらに遠隔制御による3Dレーザースキャナを組合せ、リアルタイム出来形管理も試みることにした。

2. 5Gを用いた実証試験の概要

大林組は2017、2018年度に引き続き、2019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。2019年度の試験では試験エリア内に2つの基地局を設置し、複数の周波数帯(3.7GHzおよび28GHz)を利用し、3台の遠隔操縦建機と2台のレーザースキャナを組み合わせるとともに、振動ローラの自動運転も組み合わせると統合施工管理システムを構築して試験を行った。



Fig. 1 これまでの5G通信を用いた建機の遠隔操作試験
Remote Control Test of Construction Machinery using 5G Communication in 3 Years

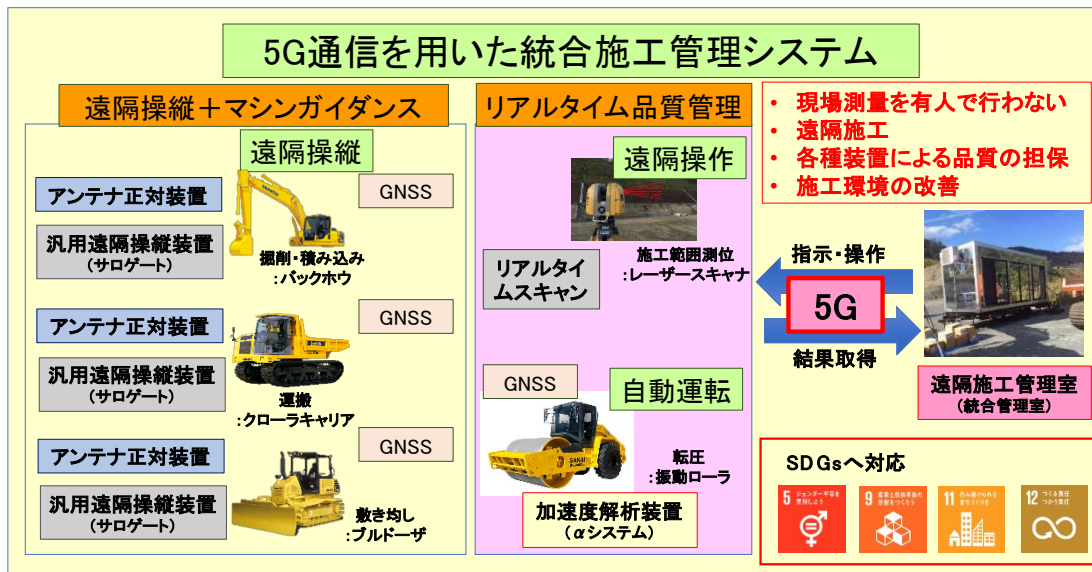


Fig. 2 5G実証試験シナリオ
Scenario of 5G Demonstration Test for Construction

2.1 試験の目的

建設分野、特に遠隔操縦に5Gを利用する目的に関しては文献4)に示すが、2019年度の試験では遠隔操縦を災害対応だけでなく実際の工事への適用を試みるために、模擬道路の造成を目指した統合施工管理システムの実証を行った。試験の概要はFig. 2に示すように、道路の路体・路床の造成をイメージし、材料土の掘削積み込み(バックホウ)、運搬(クローラキャリア)、敷き均し(ブルドーザ)、転圧(振動ローラ)の4台の重機のうち前3者を5Gによる遠隔操縦、振動ローラを自動運転とした。また、遠隔操縦室内のサーバに格納した施工計画データを用いて直接重機土工を行う、いわゆるマシンガイダンスシステムと遠隔操縦と組み合わせ、さらに出来形計測としてレーザースキャナによるリアルタイムスキャン、品質管理として振動ローラに加速度応答を用いたリアルタイム品質管理が行えるαシステム⁵⁾⁶⁾⁷⁾を実装した。

今回の実験ではFig. 2に示すように、これらを統合して遠隔操縦による丁張りレス、および品質管理の自動化を統合した「5Gを用いた統合施工管理システム」の実用化

検証を行うこととした。

2.2 試験場所

試験は大林組が施工中の三重県伊賀市青山羽根の川上ダムにて実施した。試験エリアの概要をFig. 3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エリアで行い、本試験は約500m離れた遠隔操縦エリアから重機を操縦した。

2.3 機器構成および配置

試験に使用した重機をTable 1に、試験エリアの配置をFig. 4に、試験概要と機器構成をFig. 5に示す。以下、重機に付随する装置を示す。

2.3.1 汎用遠隔操縦装置(サロゲート[®]) 重機側の遠隔操縦システムには2018年度に引き続き大林組が開発した「サロゲート[®]」⁸⁾を用いた。建機の改造が不要で脱着可能であり、遠隔操作と搭乗操作の切替えを容易に行うことができるため、作業環境に応じて使い分けすることができる。特に、実際の工事では遠隔操縦だけでな

く搭乗操作が必要な場合があり、迅速かつ柔軟に遠隔操作と搭乗操作が行えることもサロゲートの利点である。本試験では油圧ショベル、クローラキャリア、ブルドーザに各1台ずつサロゲートを搭載して、遠隔操作による試験を実施した。クローラキャリアへの装着状況をFig. 6に示す。

2.3.2 アンテナ方向制御装置(スカイジスター®)
 今回の試験で用いる電波は指向性が強いので、基地局と建機に搭載する移動局のアンテナを、建機が移動・旋回



Fig. 3 試験実施場所
Test Site

Table 1 試験に使用した重機
Heavy Equipment used for Testing

	油圧ショベル	クローラキャリア	ブルドーザ	振動ローラー
	ZX135US	EG135R	D5K2	SV900
建機				
仕様	バケット容量0.5m³	積載重量6t	ブレード幅3220mm	締固め幅2,133mm
用途	掘削・積込み	運搬・荷下ろし	敷き均し	締固め

した際にも正対するようにする必要がある。このために、アンテナ方向制御装置を作成した。この装置は「スカイジスター®」として大林組が開発した吊り荷の姿勢制御装置を応用したものである。本試験では油圧ショベル、クローラキャリア、ブルドーザに各1台ずつアンテナ方向制御装置を搭載した。5G基地局のアンテナの緯度経度情報を登録して常に5G基地局と5G端末のアンテナを正対させるよう設定し、理想的な無線環境を作ることに利用した。装置をFig. 7に示す。

2.3.3 GNSS 建設分野ではICTの利用が急速に進みつつあるが⁹⁾、その中核がGNSS(Global Navigation Satellite System)である。今回はGPS(アメリカ)とGLONASS(ロシア)の2衛星を受信可能なGNSSを、建機の位置情報の取得やアンテナ方向制御の方位角の取得に用いた。今回の試験では、これらの制御情報の取得とともに各重機の位置と稼働状況を示す事にも利用した。

2.3.4 映像伝送システム 遠隔操作作用の映像を取得するため、各建機の前面に2Kカメラを3台、建機の周囲を監視する映像取得のため、建機の上部に1.2K全方位カメラを1台設置した。設置の様子をFig. 8に示す。取得した映像はエンコーダにて映像圧縮を行い、遠隔施工管理室に5G通信にて伝送し、デコーダにて復号し、遠隔操作オペレータ用座席の前面にあるディスプレイに表示した。違和感のない遠隔操作を行うためには映像遅延が短いことが必須であるため、今回の試験でもEnd to Endの遅延として200ms以下を目指した。また、5Gシステムへの要求性能として、エンコーダ、デコーダの設定から1カメラ当たり10~15Mbpsの上りIPスループットを想定した。一つの建機当たり4台のカメラを設置することから、40~60Mbpsの上りIPスループットが必要と想定し、一つの建機あたり5G端末を1~2台設置した。

また、安全確保を目的として作業監視員、オペレータに施工現場全体の様子を伝えるため、建機1台あたり2台の俯瞰用2Kカメラ、施工エリア全体に対し1台の4Kカメラ、



Fig. 4 試験エリアにおける機器配置
Equipment Layout in Test Area

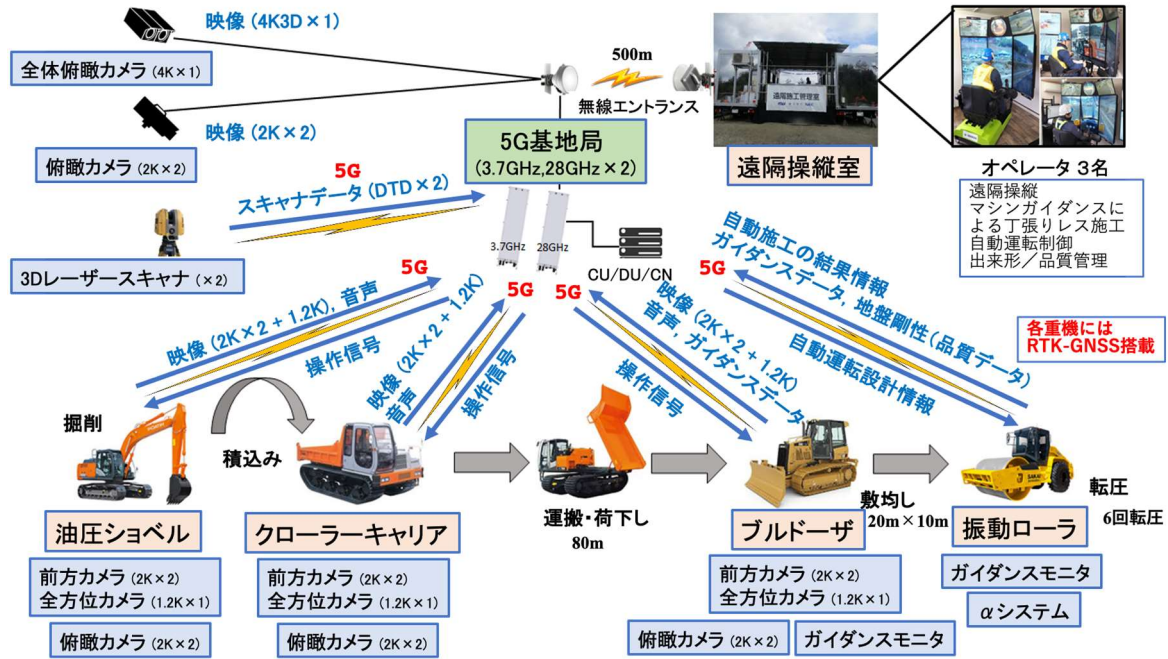


Fig. 5 5G実証試験における機器構成
Equipment Configuration in 5G Verification Test



Fig. 6 汎用遠隔操縦装置(サロゲート)
General-Purpose Remote Control Device
(Surrogate)



Fig. 7 アンテナ方向制御装置
Antenna Direction Control Device



Fig. 8 建機へ搭載したカメラ
Camera Mounted on Construction
Machinery

2台の2Kカメラを設置した。この映像は5Gを経由せず遠隔施工管理室に伝送した。

2.3.5 遠隔操縦室および体感型操縦席 2019年度の試験では4台の重機を遠隔操縦または自動運転制御するために、トレーラーハウスを2台使用し遠隔操縦室を構成した。モニタの配置と設置例をFig.9に示す。また本年度の試験でも、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)で再生する「体感型操縦席」を採用した。

2.3.6 通信機器構成及びコーデック 今回の試験では、各建機及びセンサに5G端末を接続し、5G基地局経由で各アプリケーションのデータを集約した。代表例と

して油圧ショベルに搭載した各機器と5G端末の接続構成をFig.10に示す。なお、5G基地局のある試験エリアと遠隔施工管理室のある左岸天端(遠隔操作エリア)間を無線エントランス(iPasolink)にて接続した。

また、今回の試験で用いたコーデックの仕様をTable2に示す。エンコード、デコードとも同一仕様のものを用い、室内試験で今回の試験に用いる全映像を支承無く伝送できるフレームレート及びビットレートを定め、それぞれ60fps、10Mbpsもしくは15Mbpsとした。

2.4 統合施工管理システム

今回の試験では、実際の工事への適用を目的として、単なる遠隔操作ではなく、ICTを活用した施工指示、遠隔操作、出来形・品質管理を統合した「統合施工管理システム」を構築し試験を行うこととした。本システムは建機の施工範囲や施工方法をGNSSのサポートなどで実施し、

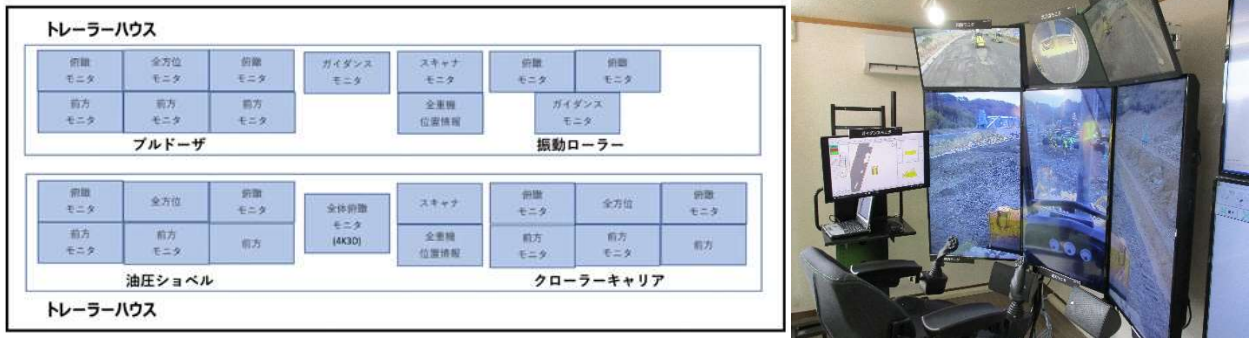


Fig. 9 遠隔操縦室(モニタ構成と内部の機器配置)
Remote Control Room (Monitor Configuration and Internal Equipment Layout)

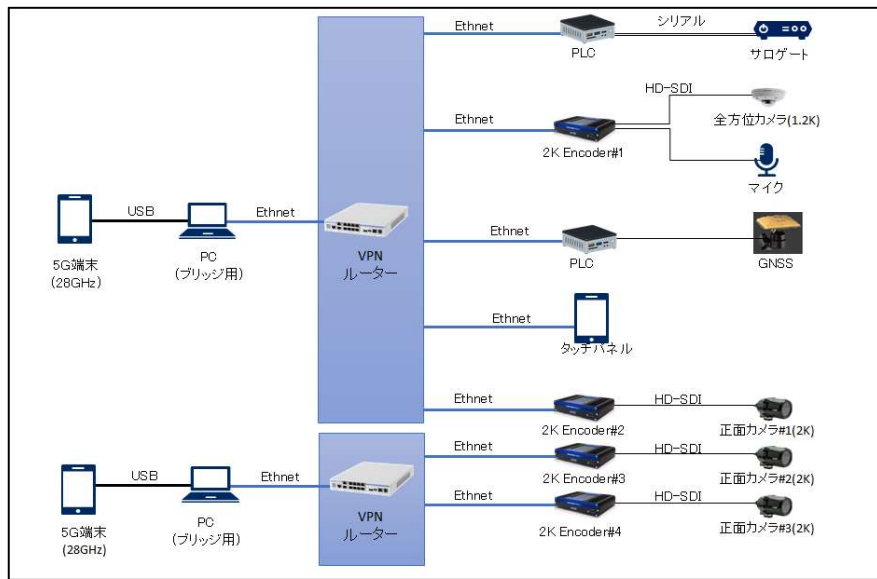


Fig. 10 油圧ショベルに搭載した各機器と5G端末の接続構成
Connection Configuration of Each Equipment Mounted on Hydraulic Excavator and 5G Terminal

その結果を取得するマシンガイダンスシステムと、今回新たにリアルタイムモニタリング機構を開発し試験に用いた3Dレーザースキャナー及び付随する品質管理システム(αシステム)で構成する。システムの構成はFig. 5に示したが、このシステムを用いることにより、従来のように、施工場所の測量を行い各建機に施工範囲などが解るようなマーク(丁張り)を作業員が現場で設置したり、施工後の出来形や品質を作業員が改めて測量や様々な装置で計測する必要がなくなる。遠隔操作と上記の各機器を統合した「統合施工管理システム」を5Gを用いて構築し、新しい施工方法を試験することとした。これらのシステム構成概念図をFig. 11に示す。

2.4.1 遠隔マシンガイダンスシステム マシンガイダンスシステムは、3次元データを処理し施工位置を指示するシステム、および建機の位置を正確に取得するためのGNSSシステムで構成され、このシステムから演算された建機の施工位置と作業指示をPCに表示させるシステムである。このシステムにより施工現場での作業員

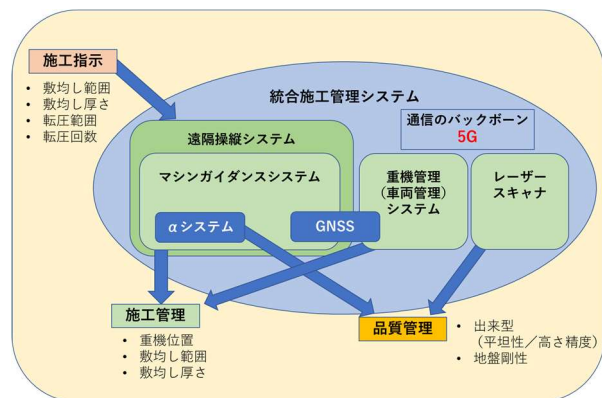


Fig. 11 統合施工管理システムの概念図
Conceptual Diagram of Integrated Construction Management System

の測量を不要とし、建機の作業範囲や施工情報(敷均し高さや転圧回数)を建機オペレータがモニターで確認でき、そ

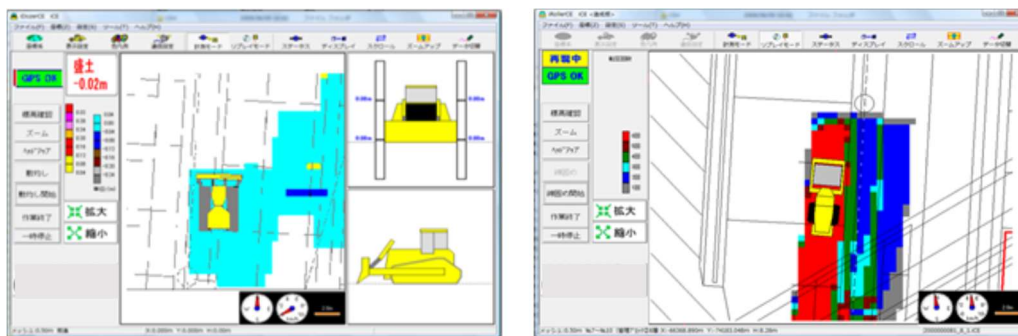


Fig. 12 マシンガイダンスシステムの表示画面(左：ブルドーザの敷き均し計画 右：ロールの転圧状況)
The Display Screen of the Machine Guidance System

Table 2 コードック仕様
Codec Specifications

項目	仕様	
映像	符号化方式	MPEG-4 AVC/H.264 (ISO/IEC 14496-10)
	映像フォーマット	1080i :1920×1080@59.94Hz
	プロファイル	H.264
	符号化モード	CBR/VBR
音声	入出力	SDIエンベッドオーディオ
遅延		10ms
多重化	ストリーム形式	MPEG-2 TS(188/204byte)
制御	外部制御	HTTP Web制御
	入力信号	GenLock
その他		半二重コーデック



Fig. 13 遠隔施工管理操室内での全建機の位置情報
Position Information of All Construction Machines
in the Remote Cockpit

の指示に従って施工を行うものである。今回の試験では遠隔操縦室にこの機能を集約し、遠隔操作とマシンガイダンスを統合し、クローラキャリアの誘導とブルドーザの敷均しに利用した。これを遠隔マシンガイダンスと呼ぶこととし、その画面をFig. 12に示す。

2.4.2 建機管理(車両管理)システム 今回の試験では建機が狭いエリアで作業を行うことから、建機同士の作業場所を各オペレータが把握することは安全上重要である。このために建機の位置を把握するための建機管理(車両管理)システムを導入した。これはFig. 13に示すように各建機の位置をGNSSで正確に把握し、遠隔施工管理室に各建機の作業状況と位置を示すものである。

2.4.3 3Dレーザースキャナー 5Gの大容量通信の特長を活かし、3Dレーザースキャナーで作業現場をスキャンし、現地形状並びに仕上がり形状(出来形)をリアルタイムに取得することとした。これまでのレーザースキャナーは計測後のデータ変換や処理に一定の時間がかかり、計測後すぐにそれらを利用することができなかったが、今回、新しいスキャナーシステムを開発し、遠隔でのリアルタイムスキャンとデータ処理及びそれらのデータをリアルタイムに遠隔施工管理室に伝送し、オペレータ支援に利用することとした。

3DレーザースキャナーはFig. 14に示すように、油圧

ショベルの掘削積み込み場所の土砂山の形状の計測によるオペレータ補助(土砂山の高さをヒートマップで表示することにより掘削する場所を表示)、およびFig. 15に示すようにローラ転圧後の高さ及び平滑度の計測に用いた。

なお、データ計測は、前者は15秒、後者は転圧開始後から5分を標準の間隔として行い、5G通信を用いてリアルタイムに遠隔施工管理室に伝送した。

2.4.4 αシステム 今回の試験は、道路を造成することを想定している。道路工事で重要な点は、人や自動車が安全に通行するために、平坦性と完成した路面の剛性(固さ)を確保することである。前者は今回の試験では3Dレーザースキャナーで確認することとし、後者を「αシステム」で確認することとした。

3. 遠隔操縦による道路造成試験

全ての建機を連携させる動作確認は操作者による遠隔操作調整も含めて5日間で行った。今回の試験は2層の道路造成(20m×10m)を2日間に分けて実施した。道路造成試験の施工手順、および建機の動作を以下に示す。

- ① 油圧ショベルで土砂を3回掘削し、クローラキャリアに積み込み
- ② クローラキャリアは土砂を約80m先(片道)の道

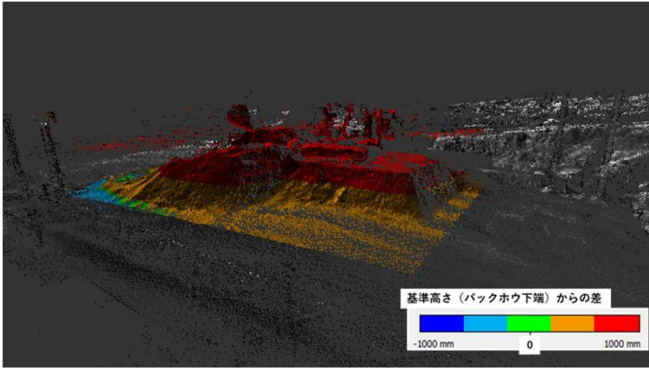


Fig. 14 3Dレーザースキャナーによる土砂山の計測 (高さのヒートマップ)

Measurement of Sand Mountains by 3D Laser Scanner

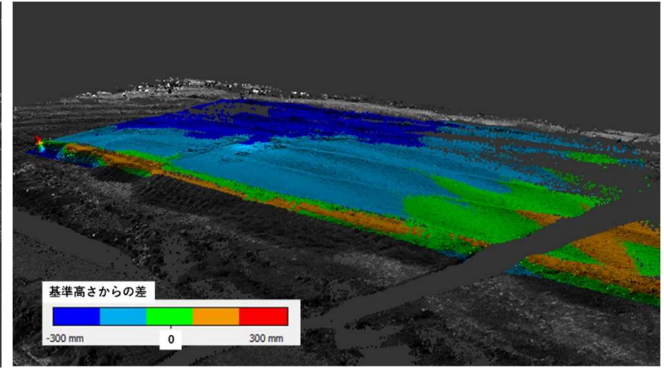


Fig. 15 3Dレーザースキャナーによる道路造成後の計測 (高さのヒートマップ)

Measurement After Road Construction Height by 3D Laser Scanner

路造成箇所へ運搬し、荷下ろし

- ③ ブルドーザは運搬された土砂を2回から3回ほど敷均し
- ④ 振動ローラは道路造成エリア20m×10m内で6回の締固作業

3.1 各建機の作業のサイクルタイム

2日間の試験で、遠隔操縦による各建機の稼働時間を算出した。通信不具合による中断時間と各建機の作業のサイクルタイム表をTable 3に、道路造成試験の作業を開始してから終了するまでの時間と中断時間を引いた実稼働時間と中断時間の累積をTable 4に示す。今回の試験における運搬及び造成に関わる作業時間は、国土交通省の標準歩掛によって比較すると、おおよそTable 5に示すように施工効率の平均値は1.4となった。油圧ショベルやクローラキャリアの作業は標準歩掛よりもむしろ効率が良かったが、敷均しのブルドーザの施工効率が低くなっている。これは遠隔操作による作業効率の低下によるものであるが、全体的に見れば遠隔操作による施工では一般的に1.5~2.0倍の時間がかかる(作業効率は50~75%)とされていることと比較すると良好であった。これは高精細な映像の伝送と3Dレーザースキャナーなどの補助情報を総合的に利用したこと、また、遠隔施工管理室においてオペレータが同室で操縦することによる、各建機の相互コミュニケーションが活発に行われた結果であると考えられる。

作業開始から終了までの時間と中断を含まない実稼働時間の差分は、試験初日には約38分であり、試験2日目には約1時間36分であった。これは2日目に発生したテザリング切断による通信遮断の事象にて各建機が一時的に試験を中断したことが原因である。2日目の方が中断時間が長いにもかかわらず作業時間(実稼働時間)は短くなっているが、操作者が初日より遠隔操作に慣れたことが原因である。

いずれにせよ、一般的な遠隔操縦に比較すると作業効

Table 3 各建機の作業のサイクルタイム表
Work Cycle Timetable for Each Construction Machine

試験日	時間(h)	建設機械			
		油圧ショベル	クローラキャリア	ブルドーザ	振動ローラ
1日目	稼働時間	5:26	5:32	5:28	0:32
	中断時間	0:09	0:27	0:02	0:00
2日目	稼働時間	5:33	5:30	5:25	0:12
	中断時間	0:34	0:30	0:32	0:00

Table 4 作業開始から終了までの時間と実稼働時間
Time from Work Start to Finish and Actual Operation Time

試験日	作業開始から終了までの時間(h)	中断時間を引いた実稼働時間(h)	中断時間の累計(h)
1日目	6:12	5:34	0:38
2日目	5:47	4:11	1:36
2日間の差異	0:25	1:23	-

Table 5 日作業量(土木工事標準歩掛：国土交通省2019.1)に基づく作業効率比較

Comparison of Work Efficiency Based on Daily Work Volume (Standard Civil Engineering Work Rate: MLIT 2019.1)

建機	作業	日あたり標準作業量(m ³)	A:時間当たり作業量(m ³)	今回試験日あたりの土工量(m ³)	B:試験時の時間当たり作業量(m ³)	施工効率 B/A
油圧ショベル	掘削積込み	44	5.5	60(地山)	10.9	2.0
クローラキャリア	運搬	50	6.3	72	13.1	2.1
ブルドーザ	敷き均し	320	40	72	13.0	0.33
						効率平均 1.4

率は高いと評価できる。

3.2 道路造成結果

今回の試験では、Fig. 16に示すように20m×10mの造成エリア内に仕上がり厚30cm×2層の造成を2日間で行った。道路造成試験を行うにあたり、4ヶ所の目印を設置し、



Fig. 16 道路造成前の状況
Situation Before Road Construction

Table 6 目標値と出来形結果
Target Value and Performance Result

計測日	1層目出来形 (m)			
	計測位置	目標標高	測量による計測値	差
2月19日	1	226.900	226.932	0.032
	2		227.115	0.215
	3		226.983	0.083
	4		226.623	△0.277
計測日	2層目出来形 (m)			
	計測位置	目標標高	測量による計測値	差
2月20日	1	227.200	227.155	△0.045
	2		227.288	0.088
	3		227.150	△0.050
	4		227.234	0.034

ブルドーザによる敷均し後の転圧終了時に3Dレーザースキャナーで計測した結果から4ヶ所の部分を抽出し、遠隔操作で施工を行った後の目標値と実施工結果の差異を計測した。各層の施工結果をTable 6に示す。

一般的に、土工事の場合の鉛直(高さ方向の)誤差は±5cm程度である。1日目の施工においてはTable 6, およびFig. 17に示すように一部20cmを超える目標値との差を示す部分があった。しかし、2日目の出来形を測量した結果は、前日の試験に比べ目標値に近い結果であった。ただし、スキャナー結果のコンター図からは一部凸凹の形状が認められた。この結果から、ブルドーザによる土砂の敷均し作業においては、遠隔操作モニタで高さを把握するには限界があり、3Dレーザースキャナーの情報を加えても高さを均一に保つことはやや困難であることが解る。ただし、2日目は1日目に比較して誤差が小さくなっており、オペレータの熟練度が上がれば施工精度が上がる

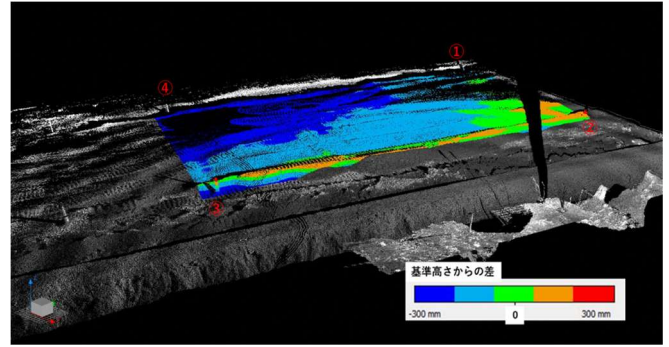


Fig. 17 1層目の道路造成後の測量結果
Survey Results After Road Construction for the First Layer

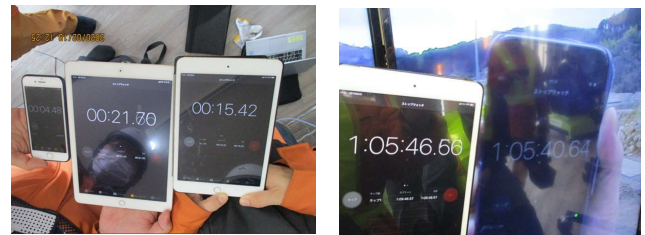


Fig. 18 遅延計測状況
(左：遠隔施工管理室での計測開始 右：遅延計測状況)
Delay Measurement Status

Table 7 目標値と出来形結果
Target Value and Performance Result

建機	計測値			平均値 (ms)	ビットレート (Mbps)
	基準時差 (A)	計測値 (B)	B-A (ms)		
油圧ショベル	6"65	06"78	00"13	140	15
		06"79	00"14		
		06"79	00"14		
クローラーキャリア	6"65	06"86	00"21	220	10
		06"87	00"22		
		06"88	00"23		
ブルドーザ	6"65	06"80	00"15	150	15
		06"79	00"14		
		06"80	00"15		

基準時差(A)：同一場所で直接撮影した時刻差
計測値(B)：統合施工管理室での時計とカメラ越しの時計の時差

る可能性が認められた。

ブルドーザのオペレータにヒアリングした結果、「搭乗操作では目視でブレードの高さを確認して調整を行えるが、モニタ越しでは3Dレーザースキャナーとガイダンスモニターを併せて確認していても、ブレードの調整が困難である」との見解を得た。道路造成の出来形と操作者のヒアリング内容を踏まえて、3Dレーザースキャナーとガイダンスモニターを駆使して道路造成を行うことは可能だが、現在のシステムでは高さの調整に関して課題があることが判明した。

3.3 遅延計測結果

今回の5Gシステムを使った遠隔操作システムの、重機に搭載したカメラから遠隔操縦モニタまでの遅延を1/100秒まで測定した。計測はスマートフォンのアプリケーションを利用し、2台のスマートフォンの画面をFig. 18に示すように、遠隔施工管理室にて時刻計測開始時に1/400のシャッタースピードで写真撮影を行い、その時間差を計測値とした。

計測は2台の建機で3回ずつ行い、その平均値を遅延とした。計測結果をTable 7に示す。今回の試験では遅延は140ms~220msとなった。なお、利用したコーデックは各重機同一で、バッファは100ms、ビットレートは10Mbpsであった。

クローラーキャリアは遠隔操作が違和感なく操縦できる目標指標である200ms以下とはならなかったが、オペレータの感想から十分に施工可能な遅延範囲に収まったと判断した。クローラーキャリアの遅延時間が長い要因の一つに、エンコーダの圧縮率を高くし処理時間が高くなったことがあげられる。

3.4 試験結果の考察

今回の試験では、3台の建機(油圧ショベル、クローラーキャリア、ブルドーザ)の遠隔操作と1台の建機(振動ローラ)の自動運転により、道路造成を行うことをシナリオとして試験を行った。試験には2種類の周波数帯(3.7GHz, 28GHz)を用いるとともに、実際に利用される施工現場では基地局をまたいで重機が移動することを想定し、本試験環境においてもハンドオーバーが発生する環境を構築した。通信品質の劣化が発生しないようにコーデックの受信バッファの値を調整し、遠隔操作の映像の途切れ(ブラックアウト等)の発生頻度を下げた。概ね5秒以下の映像の途切れは発生したものの、遠隔操作に大きな支障は無かった。

実際に遠隔操作に携わったオペレータからは、「違和感のない操作感覚」であるとの感想であった。遠隔操作自体はオペレータが実際に建機に搭乗する作業に比べ作業効率の低下は否めないが、遠隔操作では快適な環境下で施工を行うことができ、この面でも作業員からは好評であった。

一方で、出来形に関しては以下の要因で改善の余地があることも分かった

- ① 今回の造成現場の基盤が粘性土質であり、基盤が軟弱なため造成が難しく、Fig. 19に示すように施工面の凹凸ができやすかった。
- ② このような場所において遠隔操作での映像越しでの造成(特にブルドーザによる土の敷均し)は高さの把握が難しく、平滑な造成が困難である部分があった。

上記のような課題も分かったが、今回のマシンガイダンスシステムでは、オペレータが敷均しのブレード操作(土を敷き均す排土板)を手動で行ったが、近年のマシンガイダンスシステムではこの部分を自動化するものも利



Fig. 19 2層目の出来形(凸凹形状)
Second Layer Finished Shape (Rough Shape)

用されているので、このシステムを導入することによりオペレータは前後進のみに特化した作業を行うことで精度を確保できるものと考えられる。

また、「遠隔操作では、オペレータ間のコミュニケーションが容易になる(同じ遠隔施工管理室で直接会話ができる)」という感想も聞かれた。これは、搭乗操作による施工では、オペレータが各々の建機に乗って操縦しているため直接会話をすることができないことが背景にある。通常はクラクションなどで注意喚起や意思疎通を図るが、詳細な情報共有を行うのは困難である。遠隔操作の場合はオペレーター同士で直接コミュニケーションできるため、作業効率の低下を挽回するだけでなく、安全性の向上にも寄与するなど、副次的な効果も認められた。

品質管理に関して、今回の統合施工管理システムでは、3Dレーザースキャナー及びαシステムを導入した。特に前者に関しては、最短15秒間隔で現場情報をスキャンしリアルタイムに遠隔施工管理室へ情報を送ることでオペレータ支援を行うことができた。また、出来形も必要な精度で計測ができ、近年流行のドローンよりも高精度で高頻度な計測が行えることが確認できた^{11) 12)}。これらはさらに詳細なデータ(測定密度を細かくする)では大容量のデータ通信が必要となることから、5Gの活用とセットで現場利用が増加するものと考えられる。

4. まとめ

隔操操縦全般に関しては、2017年度より5Gを用いた遠隔操作試験を開始し、今年度は一般施工を想定して試験を行い道路造成試験を実施した¹⁰⁾。遠隔操縦による一般施工では施工性の低下はあるものの、以下のような観点から十分に実用性のある方法であることが確認できたと思われる。

- ① 清潔で環境の良い遠隔施工管理室で作業ができるため作業環境が改善され、さらに安全に作業がで

きる

- ② 統合施工管理システムにて遠隔操作をおこなうことにより、現場に作業員を配置する必要がなくなり、作業場所での安全性が向上する
 - ③ 出来形、品質がリアルタイムに確認できる
 - ④ 遠隔施工管理室で出来形や品質がリアルタイムに把握できるので、監督員はそれらの状況を容易に把握でき、不具合が発生した場合でも対処が可能となる
 - ⑤ 遠隔や在宅就労による新たな雇用の創出や新たな労働力の掘り起こしにも寄与できる可能性がある
- 建設分野は、5Gの多接続や高速・大容量の特性を活かすことのできる分野で、5Gの適用による飛躍的な向上が期待される。前者は、社会インフラの詳細なモニタリングなどへのセンサネットワークに活用が期待され、後者は建機の遠隔操作のみならず、インフラの遠隔からの点検調査・リアルタイム診断などに活用できる可能性がある。

5G通信はこれから成熟し、さらなる大容量化が実現するものと考え、今後、建設分野で上記のような活用を考えた場合、以下のような課題もある。

- ① リアルタイムモニタリングや今回のような遠隔操作では、現地からのデータをアップロードする際の容量確保が重要となる。下り方向の通信では現在のLTEでも相当な速度を確保できているが、今後は建設分野にかかわらず大容量データの上り通信の大容量化が必要とされるものと考え。
- ② ダム建設現場など山間部や過疎地域での作業が多い建設分野では、必ずしも商用の5Gネットワークを利用できるとは限らない。このような場合、ローカル5Gの利用も視野に入るが、基地局や移動体、およびローカル5G用のハードウェアなどのシステムの迅速な環境整備が重要である。
- ③ ローカル5Gを利用した場合、そのバックボーンとなる回線等も検討する必要がある。大容量データを必ずしも既存のインフラで送受信できない可能性がある。

上記のような課題はあるが、遠隔操作による建設方法は働き方を変える可能性があり、現地生産を特徴とした建設分野が拠点からの遠隔操作による施工の実現のように、製造業に近い形に変革する可能性がある。これにより、今まで建設に参加できなかった人々も参加可能な建設分野でのダイバーシティの実現も期待できる。

謝辞

今回の試験は、2019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。

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) 古屋 弘, 森 直樹, 永嶋 充: 次世代高速通信5G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
- 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, No.681, pp.6-12, 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事例, 建設機, Vol.41, No.5, pp.7-13, 2005.5
- 4) <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/statistics/index.html>, 2020.6 閲覧
- 5) H. Furuya, Y. Tsukimoto, H. Koseki, T. Mansell, V. "Lee" Gallivan, K. Uchiyama: Innovative QC/QA Compaction Method for HMA Pavement using Intelligent Compaction (IC) Technology, The 11th International Conference on Asphalt Pavements, 2010.8
- 6) 根本司, 高倉 拓, 古屋弘: 舗装工事の品質管理の合理化=GPS と振動ローラの加速度応答を利用した検討=, 建設機械, 7月号, 2009.7
- 7) 古屋 弘, 小関裕二: 道路工事におけるインテリジェントコンパクトシステムの開発, 大林組技術研究所報, No.75, 2011
- 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」の適用事例, 建設機械施工 Vol.69, No.12, pp.58-63, 2017.12
- 9) 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
- 10) 古屋 弘, 岩下正剛, 陣内英二, 蔵多正人, 岡本邦宏, 小林只和: 次世代高速通信5Gを用いた重機の遠隔操縦の高度化, 大林組技術研究所, No.83, 2019
- 11) 古屋 弘: 無人飛行機を用いた地形計測と精度検証, 大林組技術研究所報, No.78, 2014
- 12) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: RTK-UAVを用いた地形計測の測位性能および省力効果, Transactions Japanese Geomorphological Union, 40-2, pp.125-134, 2019