

堤体盛土でのローカル5Gを用いた複数重機連携の遠隔操縦実証実験

稲川 雄 宣 古 屋 弘 丹 羽 宣 道

岩 下 正 剛 羽 立 征 治 堀 尾 訓 之
(ロボティクス生産本部) (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)

Remote Control Verification Experiment Using Local 5G in Dam Embankment

Yusen Inagawa Hiroshi Furuya Norimichi Niwa

Seigo Iwashita Seiji Hatachi Toshiyuki Horio

Abstract

A demonstration experiment of the remote control of construction machinery using local 5G in the construction of an actual site was conducted. In this experiment, an attempt was made to develop an "integrated construction management system" that can implement real-time quality control by combining sensors such as a 3D laser scanner and accelerometer with remote operation and machine control. Consequently, using 5G high-capacity data communication, we successfully obtained end-to-end delay measurement of 200 ms or less, which is a target index for the remote control of construction equipment. Moreover, the effectiveness of this system was confirmed by measuring the leveling height and flatness before and after rolling with a 3D laser scanner.

概 要

ローカル5Gを利用した建設機械の遠隔操縦の実工事への適用を目的として、堤体盛土の実現場の施工において実証実験を実施した。実証実験では、遠隔操縦やマシンコントロールによる施工において、3Dレーザースキャナ・加速度計などのセンサを組合せ、リアルタイムで盛土の品質管理を行うための「統合施工管理システム（以下、本システムという）」の試行も併せて行った。その結果、5Gの大容量データ通信により、高品質な映像環境（2K×5～6台）で、建設機械の遠隔操縦が違和感なく行える目標指標であるEnd to End遅延時間が200msec以下の結果を得ることができた。また、3Dレーザースキャナによる転圧前の敷き均し高さの確認や転圧後の仕上がり高さ・平坦性の確認、締固め品質管理等をリアルタイムに行えることを確認でき、本システムの有効性を検証することができた。

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。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用されている。

また、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が期待されている。さらに、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（例えば、ワンオペレーターでの複数台遠隔制御等）にも寄与するものと思われる。

大林組と日本電気は、2017年度より、KDDIが総務省から受託した委託業務「5Gを利用した建設機械（以下

建機と略記）の遠隔操縦の実証実験」において、建機の遠隔操縦の実証実験を3年間実施してきた¹⁾²⁾。2019年度は酒井重工業も加わり、遠隔操縦を実際の道路造成のように施工図面に基づく工事（一般施工）への適用を想定し、5G通信（第5世代通信規格）を用いた遠隔操縦により、道路造成を実施した³⁾。2018年度の実験結果では、5G通信を用いた遠隔操縦は従来のWi-Fiによる遠隔操縦に比べ、30%程度の施工効率の改善が認められた。

2020年度は官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM)⁴⁾での試行業務に採択され、実現場の施工において5Gを利用した建機の遠隔操縦の実証実験を実施した。また、土木の現場を想定した場合、ローカル5Gを用いて運用されることが考えられるため、本件ではローカル5Gを用いた実証実験を実施した。なお、本実験においても2018年度と同等の30%程度の施工効率を達成するため、遠隔操縦室の映像は2018年度同様に高解像度のモニターを使用した。本実験にてローカル5Gでの遠隔操縦技術を

確立することにより、キャリア5Gでカバーできない山間部においても大容量の5Gを用いることが可能となり、遠隔操縦の適用範囲拡大が図られる。

2. 実証実験の概要

実験は、2021年3月に大林組が施工中の静岡県御殿場市印野字丸尾の境沢川調節池にて実施した。以下に概要について述べる。

2.1 実験手順の概要

今回の実証実験は幅3.3m×60mの堤体にコア材を運搬し敷き均し転圧する一連の堤体造成工事にて実施した。実験の流れ及び建機の動作は以下のとおり。

- ①油圧ショベルでコア材を4回掘削し、キャリアダンプに積込を実施。
- ②キャリアダンプはコア材を約60m先(片道)の造成箇所に運搬し、荷下ろしを実施。
- ③ブルドーザーは運搬されたコア材を2回から3回ほど敷き均しを実施。
- ④振動ローラーは幅3.3m×20mでの6回締固め作業を実施。

実験エリアでは3Dレーザースキャナにて実験開始前に道路造成箇所を測量し、測量した結果をガイダンスモニタにすぐに表示できるように設定した。

また、実験ケースとしては以下の2ケースを実施した。

- A 油圧ショベル：遠隔 キャリアダンプ：遠隔
ブルドーザー：遠隔 振動ローラー：自動
- B 油圧ショベル：超遠隔 キャリアダンプ：自律
ブルドーザー：遠隔 振動ローラー：自動

Fig. 1にケースBの概略図を示す。

2.2 システム構成

実験に使用した機器構成をFig. 2に示す。今回の実証実験では、油圧ショベル、キャリアダンプ、ブルドーザーの計3台の建機を、5Gと5GHz帯無線(4.9GHz無線LAN)を利用して汎用遠隔操縦装置と電気信号制御装置による遠隔操縦を行った。

5Gの高速大容量と低遅延を活用することで油圧ショベルは搭乗操作と同様の操作性を実現させるとともに、5GHz帯無線を利用したキャリアダンプとブルドーザーの遠隔操縦及び自動運転システムを搭載した振動ローラーと連携させる。なお、遠隔操縦室は試験ヤードから約500m離れた位置に設置している(Photo 1)。また、実証ヤードから約300km離れた大阪枚方市の大林組西日本ロボティクスセンター(以降WRC)から油圧ショベルの長距離遠隔操縦、キャリアダンプの音声操縦にて搭乗操作と同様の操作性についても確認した。

また、現在の施工方法では、測量や施工を順次行って出来上がった工事物(出来形)に対して品質の確認を行うのが一般である。しかし、5Gを利用すれば、遠隔操縦に測量や施工の結果を集約して、測量と施工を同時に実施することが可能となり、作業のムラや無駄な工数を削減

[PRISM-5G ケースB：超遠隔×油圧ショベル、遠隔×ブルドーザー、自律×キャリアダンプ 自動×ローラー]

【操作】

- OP1名がWRCからバックホウを運転
- OP1名が遠隔操作室からブルドーザーを運転
- キャリアダンプは自律運転(BHから音声操作)
- ローラーが自動運転で所定の場所を転圧

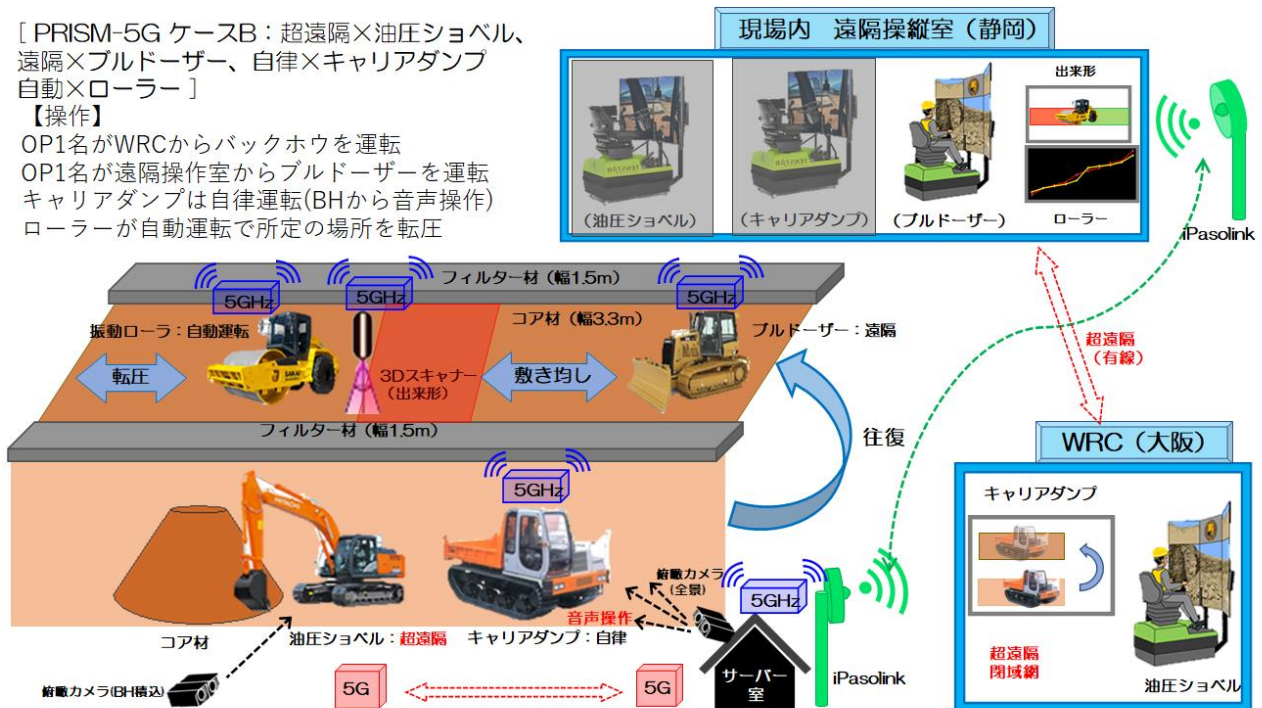


Fig. 1 試験盛土の規模と計測概要
Scale of Test Embankment and Measurement Outline

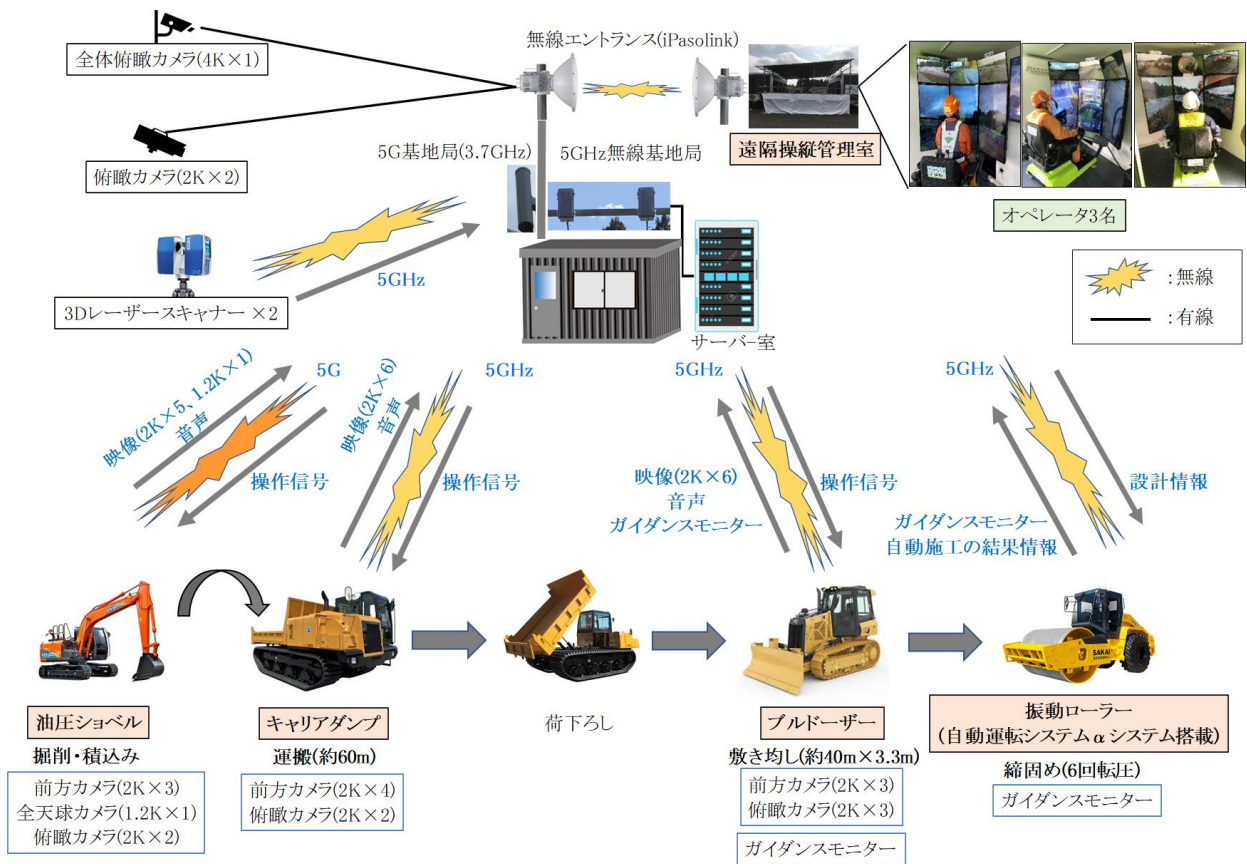


Fig. 2 機器構成
Equipment Configuration

することができる。

今回は、2台の3Dレーザースキャナを用いて測量を行い、土砂量や造成結果をリアルタイムに遠隔操縦管理室にて把握することによって、一般工事における測量と施工を同時に実施することを再現した。また、αシステム⁴⁾⁵⁾⁶⁾・コンパクトマイスター等のGNSSや加速度応答値による転圧回数、換算乾燥密度、地盤反力係数等による面的品質管理も試行した。

3. ローカル5G性能評価

3.1 システム環境

本検証におけるローカル5GはNSA(Non-Stand Alone)方式で構成されている。基地局制御装置及びコア装置は現場に仮設したプレハブ内に設置し、プレハブ上にローカル5Gアンテナ及び5GHz帯無線アンテナを設置し、各重機との通信を行っている (Fig. 2)。

3.2 ローカル5G検証

基地局と油圧ショベルの距離は30mとして、油圧ショベルはその場で旋回する動作とした。結果を纏めるにあたり、基地局に対する油圧ショベルの向きをFig. 3のように定義する。

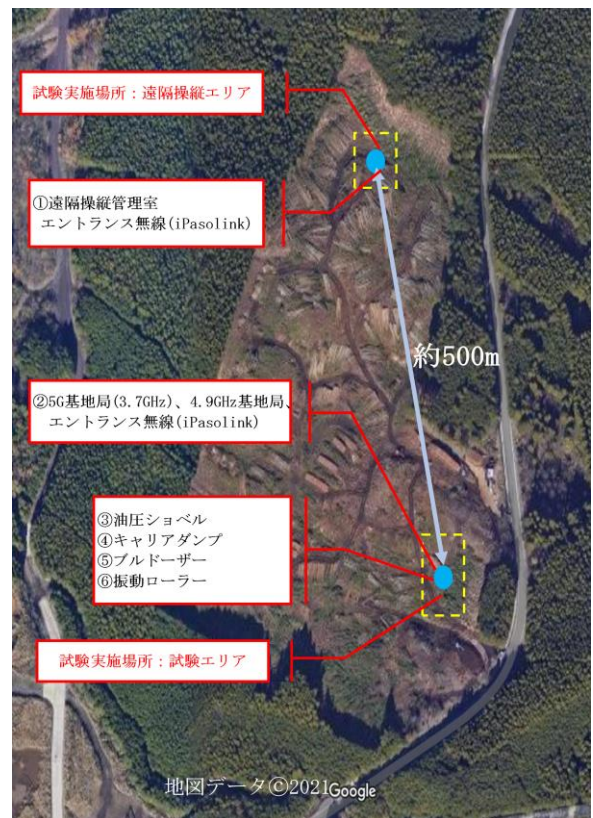


Photo 1 実証実験配置図
Demonstration Experiment Layout

3.3 評価項目

試験内容として建機の遠隔動作を想定した試験を実施した。具体的には構築したローカル5Gのエリア内に在圏する5G端末の性能を確認するため、無線性能試験を実施した。ローカル5G端末を設置する油圧ショベルの遠隔操縦を見越して、油圧ショベル動作範囲における静止時と旋回時のそれぞれについて無線品質評価を行った。

3.4 測定項目

構築したローカル5Gエリアの無線特性および性能評価の観点で、以下①～④の項目を測定した。

① SS基準信号受信電力 (SS-RSRP)

SS基準信号受信電力は基地局からの電波の受信レベルを評価する基本的なパラメータである。5G端末に接続した測定用PCを用いて、5G端末が受信したSS-RSRPを測定した。

② 送信データ転送速度 (ULスループット)

5G端末あたりの上りリンクスループットを評価する。本実証においては2Kカメラ映像を伝送するために必要なスループット値である55Mbpsを達成することを目標値とする。本実証において、カメラ映像はIP伝送レート10Mbpsのカメラを3台用いて伝送することを想定している。さらにコーデックにより4MbpsのIPヘッダが付与されることから、最低でも42Mbps以上のMACスループットが必要となる。なお、コーデックは映像信号を、主観映像品位を損なわず約25～250分の1にデータ圧縮する最先端技術である一方で、その処理による原理上不可避な遅延が発生する。そのため、伝送容量に応じた最適なコーデックを設定し、遅延を抑制するとともに受信バッファを設けて、映像の途切れが生じないように配慮する必要がある。

③ 送信データのブロック単位での誤り率 (UL BLER)

無線品質の確認のため、上りリンクのブロック誤り率をiPerf(回線の負荷試験を行うツール)で測定する。

④ 遅延時間 (上り)

遠隔操縦を行うにあたり、操縦者が違和感なく操縦できるように車体前方を捉えたカメラの映像が遠隔操縦のモニターに映し出されるまでのEnd to Endの遅延量を200msに抑える必要がある。ローカル5G通信区間での遅延量を測定することで、遠隔制御への影響を定量的に確認する。建機の遠隔動作を想定した試験においては、油圧ショベル搭載のL2SW (Layer 2 Switch) とEPC (Evolved Packet Core) 間の遅延を測定する。油圧ショベルの2Kカメラ伝送を行った試験においては、油圧ショベル搭載にL2SWと、遠隔制御エリアにあるVPNルータ間の遅延を測定する。測定にはEx Ping (GUIでpingを実行出来るソフトウェア) を用いた。

3.5 測定結果

測定結果をTable 1に示す。SS-RSRP については0度の場合のみ-95dBmを下回っている。これは、5G端末を格



Fig. 3 基地局に対する油圧ショベルの向き
Direction of Excavator with Respect to Base Station

Table 1 ローカル5G検証結果
Local 5G Verification Results

測定項目	測定結果 (試験中のデータを 加算平均したもの)
SS基準信号受信電力 (SS-RSRP) 設計基準：-90dBm程度	静止時
	0度：-96.4dBm
	90度：-89.7dBm
	180度：-86.8dBm 270度：-90.8dBm
送信データ転送速度 (ULスループット) 設計基準：44Mbps以上	旋回時：52.9Mbps
	静止時
	0度：50.9Mbps
	90度：55.0Mbps
	180度：54.7Mbps 270度：53.9Mbps
送信データのブロック単位 での誤り率 (UL BLER) 設計基準：10%以下	旋回時：12%
	静止時
	0度：7%
	90度：0%
	180度：0% 270度：2%
遅延 設計基準：30msec以下	旋回時：35ms
	静止時
	0度：25.2ms
	90度：27.5ms
	180度：27.1ms 270度：22.4ms

納したプラスチック製ボックスの前にあるボックスが遮蔽物となって受信レベルが低下したと思われるが、全角度において2K映像伝送を行うには十分な受信レベルであることを確認した。

静止状態で計測した上りスループットは、0度の測定結果が他の角度に比較して3～4Mbps程度低い結果となった。旋回時においては時間平均を取ると52Mbpsとなるが、アームからの電波反射影響や、周辺設備の遮蔽影響に起因して、36Mbps～63Mbpsと違いがあったものの、2Kカメラ伝送を実現するには十分なスループット値を達成できている。

上り BLERは、物理レイヤで計測した誤り率(最大30%程度)と比較してIPレイヤでの誤り率が抑えられている。これは、HARQ (Hybrid ARQ) やRLC (Radio Link Control) レイヤの再送制御により誤り訂正された結果であるため

である。IPレイヤでの誤り率が0%に近いため、映像伝送でもパケット抜けが発生しにくく、映像乱れの発生防止が期待できる。

遅延については、試験サンプルの加算平均値で30ms程度に抑えられており、要求性能であるEnd to Endでの遅延200ms以内が他の遅延を加えても実現可能なレベルであった。

4. 実証実験

4.1 E2E (End to End) 遅延測定結果

今回の5Gシステムを使った遠隔操縦システムのEnd to End遅延を以下の方法で計測した。まず、1/100秒まで測定できる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、遠隔操縦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った。次に片方のスマートフォンを実施の建機のカメラ位置に持って行き、遠隔操縦画面に映された映像と、もう一つのスマートフォン画面を同時に撮影することで、その時間差を計測値とした (Photo 2)。

計測は3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 2に示す。今回の実験では遅延は160ms~190msとなり、生産性の高い遠隔操縦(=映像の空間分解能の向上)を行うために必要な約50Mbpsのスループットに対して建機の遠隔操縦が違和感なく操縦できる目標指標である200msec以下の結果を得た。

4.2 3Dレーザースキャナ計測結果

3Dレーザースキャナは、地形や構造物の三次元データを取得可能なノンプリズムの計測機器で、計測対象箇所にレーザーを照射し、距離と角度情報を取得して三次元座標を取得する。今回の実験では堤体盛土造成箇所を対象にレーザーを照射し、転圧前と転圧後の三次元座標を取得する計測を実施した。Fig. 4に計測結果を示す。点群データを高さで色分けすることにより、転圧前の敷き均し高さの確認や転圧後の仕上がり高さ・平坦性の確認が可能であると判断された。なお、3Dレーザースキャナは遠隔での指示や設定した間隔での計測も可能となっており、敷き均しを行うブルドーザーのオペレーターが、3Dレーザースキャナのデータを用いて、現在どの程度の高さ及び平坦性を保っているかの確認も可能である。

4.3 実証実験結果

堤体盛土の本体施工において、5G技術を中心とした遠隔操縦を基幹とし、自動運転、マシンコントロール、高性能スキャナの活用などをシステム化した「統合施工管理システム」を実施し、円滑に施工を行うことが出来た。また、静岡県御殿場市から300km離れた大阪府枚方市からの油圧ショベルの超遠隔や音声操作によるキャリアダンプの自律運転もトラブルもなく実施でき、新たな遠隔操縦技術の実証を行うことができた。



(左：遠隔操縦室での計測開始 右：遅延計測状況)

Photo 2 遅延計測状況

Delay Measurement Status

Table 2 遅延測定結果
Delay Measurement Result

建機	計測値			平均値 (ms)	ビットレート (Mbps)
	基準時差①	計測値②	②-①(ms)		
油圧ショベル (5G)	00'14	00'14	00'10	160	10
		00'23	00'19		
		00'24	00'20		
キャリアダンプ (5GHz)	00'04	00'23	00'19	190	10
		00'23	00'19		
		00'22	00'18		
ブルドーザー (5GHz)	00'22	00'22	00'18	190	10
		00'23	00'19		
		00'25	00'21		

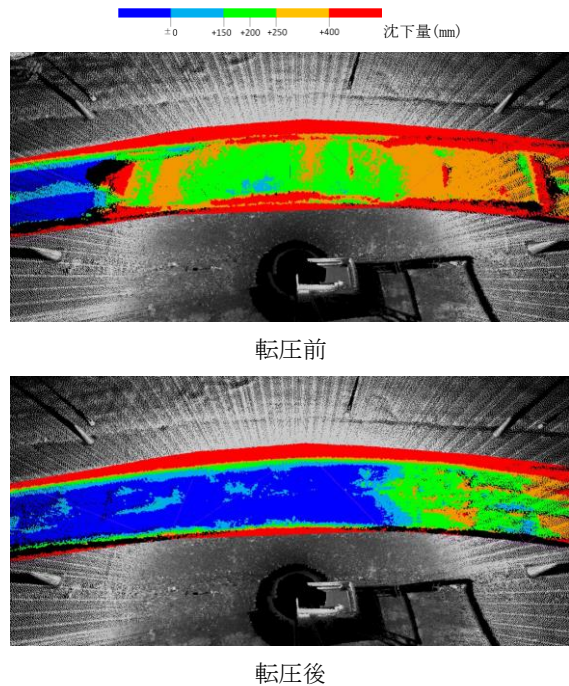


Fig. 4 3Dレーザースキャナによる計測結果
Measurement Results by 3D Laser Scanner

5. 現状での課題

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られるが、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縦では、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。しかし、現在のモバイルネットワークはDLの利用率が高いため、DL：UL比は4:1となっている。今後、ガードバンドを設ける等キャリア5Gとの干渉対応により独自にDL：UL比の設定が可能となれば、上り通信の更なる大容量化が可能となる。現在は法律により、DL：UL比の設定変更は不可であるが、上記変更が可能となる法整備が望まれる。
- ② 現段階ではローカル5Gに与えられた帯域は狭く、また申請に時間を要する等、ローカル5Gを円滑に運用する環境を整備する必要がある。
- ③ 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、商業5Gは整備されていないため、ローカル5Gの利用も視野に入るが、この場合のシステム（基地局と移動局）の迅速な環境整備（ローカル5G用のハードウェアを含む）が重要であるとともに、整備にかかる費用についても低価格への移行が必要である。
- ④ 5G通信による遠隔操縦では5Gの特性である大容量によりコーデックの圧縮率の低減が可能となり、低遅延が実現可能となる。しかし、28GHz帯は指向性が強いいため、重機側に正対装置が必要となる。また、基地局の位置関係から、各重機の作業配置によって輻輳作業となり、通信が不安定化する可能性がある。これらの課題を解決する技術の開発が望まれる。

6. おわりに

今回の実験では、Fig. 1に示したように5Gと5GHz帯無線線を利用して汎用遠隔操縦装置と電気信号制御装置での3台の建機（油圧ショベル、クローラキャリア、ブルドーザー）の遠隔操縦と1台の建機（振動ローラ）の自動運転により堤体盛土（コア材）を施工する実験を行った。5Gの大容量データ通信により、建機の遠隔操縦が違和感なく操縦できる目標指標であるE2E遅延測定200msec以下の結果を得ることができた。また、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することにより、映像の途切れはほぼ発生せず、遠隔操縦に大きな支障は生じなかった。すなわち、ローカル5Gを用いた建機の遠隔操縦による本体堤体盛土造成を実証し、一般施工へのローカル5G適用の可能性を示すことができた。

なお、実際の運用に関しては、イニシャルコスト、運用コスト、申請手続きに時間を要することなどが今後課題となるが、新しい技術や制度がこれらを徐々に解決するものと期待する。

また、国交省では人工知能（AI）搭載の建設機械による自動施工、5G（第5世代通信規格）を活用した無人化施工の実現に向け、基準類の整備や実証試験を行うとしており、国の動向を見ながら引き続き無人化施工に向けた技術開発を実施していく予定である。

謝辞

今回の試験は、国土交通省の2020年度「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」により実施している。また、本実証実験は日本電気株式会社、酒井重工業株式会社との3社コンソーシアムで実施している。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) 官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program：PRISM（プリズム））、内閣府、
<https://www8.cao.go.jp/cstp/prism/index.htm>
(参照 2021-09-09)
- 2) 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
- 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) 古屋 弘, 岩下正剛, 陣内英二他: 5Gを用いた道路工事の統合施工管理システムの開発 大林組技術研究所報, No.84, 2020
- 5) H. Furuya, Y. Tsukimoto, H. Koseki, T. Mansell, V. "Lee" Gallivan and 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 弘, 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ションシステムの開発, 大林組技術研究所報, No.75, 2011