

5G 高速通信システムによる建設機械遠隔操作技術

建設機械遠隔操作技術の一般工事利用に向けた取り組み

堀 尾 訓 之・蔵 多 正 人・岡 本 邦 宏・古 屋 弘

これまで建設機械の遠隔操作は、様々なシチュエーションで技術開発や一部実用が行われてきたが、従来の実用レベル通信手段では、建設機械を搭乗操作と比べた時に、違和感なく操作できる通信速度で、映像等を送受信することができなかった。故に通信を専用回線で確保するなどの制約に縛られるため、災害復旧などの限られた条件の下でしか行われることがなかった。しかし、「超高速」「超低遅延」「多数同時接続」を特徴とする5G通信を用いることで、建設機械の遠隔操作が、より一般的なものとして現場投入される可能性が広がっている。建設機械の完全自動・自律化運転を実現するために欠かせないものとして、遠隔操作技術は一層進化、確立することが求められている。本稿ではこのたび実装した実証実験の概要と成果について報告する。

キーワード：最先端通信技術 5G、建設機械自動・自律化、遠隔操作技術

1. はじめに

2020年3月より国内で5Gのサービスが開始されたが、これに先立って行われた総務省の「5G総合実証試験」において、KDDIを実施主体として、大林組、日本電気（NEC）は、建設分野で5Gを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、大容量を活かした建設機械の遠隔操作において、施工効率向上などの成果を得ることができた。最終年度となる2019年度は、道路工事への適用を想定し、遠隔操作による統合施工管理システムを開発、実証試

験を行った。新たに開発した統合施工管理システムでは、遠隔操作による丁張レス施工とレーザーキャナを用いた高精度施工管理を組み合わせた。本稿では、この実証試験における建設機械遠隔操作にクローズアップし、実施概要と成果について述べる。

2. 実証試験概要

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（油圧ショベル）、運搬（クローラーキャリア）、敷き均し（ブルドーザ）、転圧（振動ローラ）の4台の建設機械のうち、前3者を5Gによる遠隔操



図-1 5G実証試験シナリオ



図一 試験エリア配置

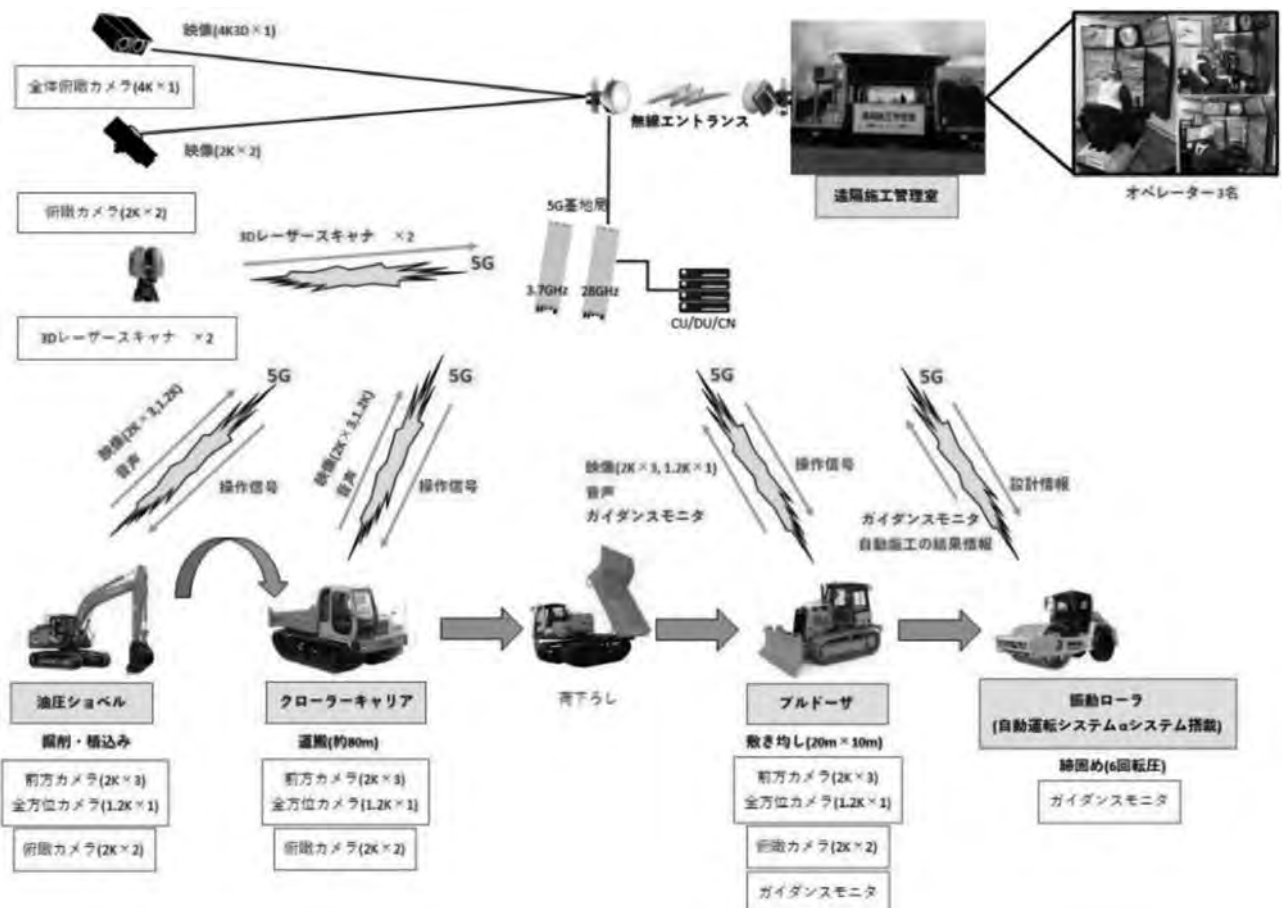
作, 振動ローラを自動運転とした。また2台のレーザー
 スキャナによるリアルタイム出来形管理も合わせ, 工
 事箇所を無人とし, 遠隔施工管理室より建設機械運
 転操作と施工管理を行う実験とした。5G 実証試験シ
 ナリオとして図一にイメージを示す。試験は大林組
 JVが三重県伊賀市で施工中の川上ダムにて実施し
 た。試験エリア配置を図一に示す。建機フィールド
 から約500m離れた遠隔施工管理室を無線エント

ランス回線で結び, 遠隔操作と管理を行った。

建設機械遠隔操作における安全・品質・仕上がりに
 影響を与える問題点の抽出。および有人による搭乗操
 作と比較した施工効率の低下を少なくできる機器構成
 と手法について確認した。

(1) 映像伝送システム

安全で効率の高い遠隔操作を行うため, 重要な映像
 伝送システムは以下の構成とした。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。
 取得した映像はエンコーダにて映像圧縮を行い, 基地
 局に5G通信にて伝送, デコーダにて復号し, 振動セ
 ンサ等を付けた体感型操作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。カメラ映像取得か
 らモニタ出力までの遅延は, これまで他で行ってきた
 遠隔操作実証試験で, オペレーターが運転操作で気にな
 らない映像遅延時間として, 得ている経験値の
 200ms以下を目標とした。また安全確保を目的とし
 て, 動作確認のために建機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台の俯瞰用4K3D



図三 映像機器配置

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。映像機器配置を図一3に示す。

(2) 汎用遠隔操縦装置 (サロゲート)

遠隔操作システムにはサロゲートを用いた。建設機械へ搭載するにあたり改造が不要で、遠隔操作と搭乗操作の切り替えを容易に行うことができるため、柔軟に使い分けが行えるサロゲートが最適である。本試験では油圧ショベル、クローラーキャリア、ブルドーザにサロゲートを搭載して、遠隔操作による試験を実施した。ブルドーザは他の建設機械と異なり、操作レバー先端部に速度調節やブレード操作入力部などがあったため、アクチュエータで操作レバーをコントロールしていた従来のサロゲートと異なり、電気的介入による操作信号でコントロールするサロゲートを新たに製作した。

(3) 遠隔施工管理室および体感型操作席

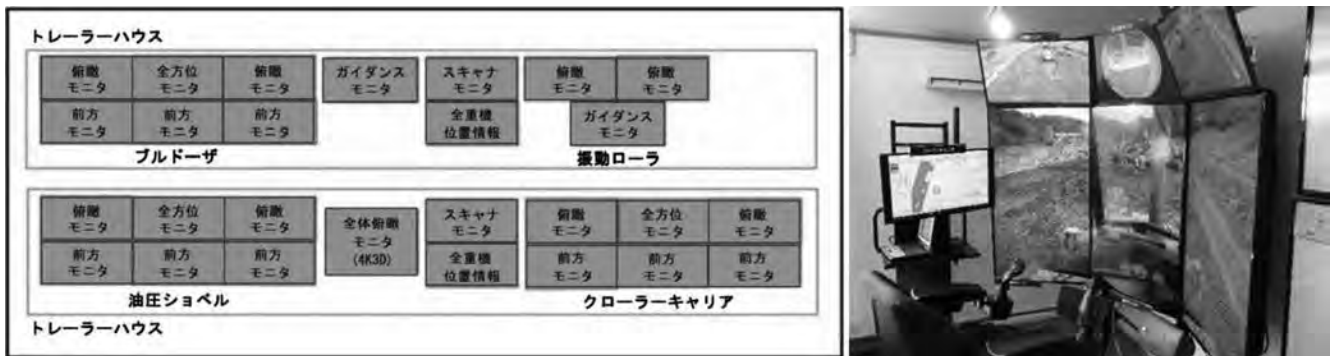
本試験では4台の重機を遠隔操作または自動運転制

御するために、トレーラーハウスを2台使用し遠隔施工管理室を構成した。モニタの配置と設置例を図一4に示す。オペレーターに臨場感を与えるため、各建機に外部ステレオ集音マイクと振動センサを取り付け、映像とあわせて音声・振動データを5G通信に乗せて遠隔施工管理室に送り、ステレオスピーカーおよび操作席に取り付けた重低音スピーカー(振動を操作席に伝達)で再生する「体感型操作席」を採用した。

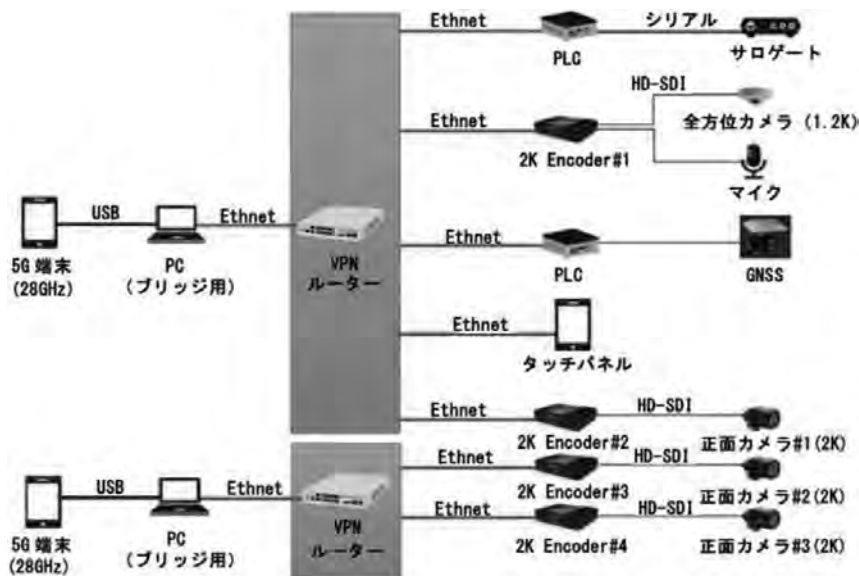
(4) 通信機器構成およびコーデック

通信機器構成は各建機及びセンサに5G端末を接続し、5G通信経由で各機器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端末の接続構成を図一5に示す。なお5G基地局のある建機フィールドと遠隔施工管理室のある遠隔操作エリア間の約500mは、光ファイバーケーブル敷設が困難な場所において利用されることが多い、無線伝送路装置(iPasolink)にて通信した。

今回の試験で用いたコーデックの仕様を表一1に



図一4 遠隔施工管理室モニタ配置と設置例



図一5 油圧ショベル搭載の各機器と5G端末接続構成

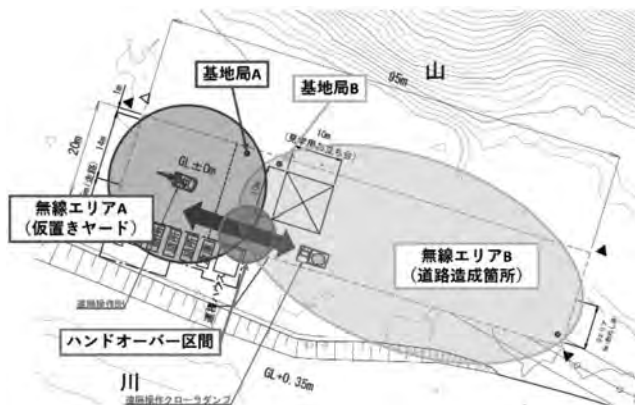
表一 1 コーデック仕様

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 消費電力35W、動作環境0~50℃

示す。エンコード、デコードとも同一仕様のものを用い、今回の試験に用いる全映像を支障無く伝送できるフレームレート及びビットレートを60 fps、10 Mbpsもしくは15 Mbpsと定め、事前試験を行うことで問題がないことを確認し、現場実証試験に臨んだ。

(5) ハンドオーバー対応

今回の実験では図一6のとおり2か所の基地局から、28 GHz2局、3.7 GHz2局の計4局の電波エリアが構築されており、クローラーキャリアは2局の3.7 GHz帯エリアを跨いで移動するため、ハンドオーバーが発生する。今回のシステムでは、複数基地局でハンドオーバーが発生する状況で、IP通信において100~400 ms程度の応答遅延が発生するため、安全を確保しつつ遠隔操作に耐えられる範囲内の最適な機器の選定や閾値の設定が必要となる。



図一6 ハンドオーバー

映像伝送に関しては、応答遅延が発生しても映像がブラックアウトせず直前の映像を保持し、映像を再生し続けることができるエンコーダ、デコーダを使用することで、遠隔操作するにあたり違和感のない操作感覚となった。

3. 遠隔操作による道路造成試験

全ての建設機械を連携させる動作確認は、遠隔操作調整を含めて5日間で行った。そのうち試験は30 cm盛土2層の道路造成(20 m×10 m)を2日間に分けて実施した。道路造成試験の施工手順、および建設機械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、クローラーキャリアに積込を実施。
- ②クローラーキャリアは土砂を約80 m先(片道)の道路造成箇所に運搬し、荷下ろしを実施。
- ③ブルドーザは運搬された土砂を2回から3回敷き均しを実施。
- ④振動ローラは道路造成エリア20 m×10 m内で6回の締固め作業を実施。

建機フィールドを3Dレーザースキャナでリアルタイム測量を行い、ガイダンスモニタと共に遠隔操作室に映し出し、カメラ映像から読み取る不陸の情報を補う、ヒートマップを運転操作の補助情報として使用した。

(1) 建設機械の作業効率

2日間の試験で、遠隔操作による各建機の稼働時間を算出した。各運搬及び造成に関わる作業時間を、国土交通省標準歩掛と比較すると、表一2に示すように、施工効率の平均値は1.4となった。

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%)とされていることから比較すると、作業シナリオの関係で施工効率にバラつきがあるものの、効率平均としては良好な結果となった。これは高精細な映像伝送をはじめとするシステム構成が良好であったこと、3Dレーザースキャナなどの補助情報が総合的に機能したこと、また搭乗操作では無線機を使ってまで、会話によるコミュニケーションを行うことが少ないが、複数のオペレーターが同室で操作することによる、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と考えられる。

表一2 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

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	10.9	2.0
クローラーダンプ	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

(2) 道路造成結果

今回の試験では、20 m×10 m の造成エリア内に仕上がり厚 30 cm×2 層の造成を 2 日間で行った。一般的に土工事の場合の鉛直（高さ方向の）誤差は±5 cm 程度である。1 日目の施工においては、一部 20 cm を超える目標値との差を示す箇所があった。2 日目は、8 cm と前日に比べ目標値に近い結果となったが、スキャナのコンター図からは一部に凸凹形状が認められた。これは仕上がり結果を左右するブルドーザの敷き均し作業で、マシンガイダンス情報や 3D レーザースキャナの情報を加えても高さを均一に保つ操作は、やや困難であることが解る。ただし 2 日目は 1 日目と比較して誤差が小さくなっており、オペレーターの熟練度が上がれば施工精度が上がる可能性が認められた。さらに施工精度を向上させるためには、ブレード高さを自動制御できるマシンコントロールシステムを採用する必要があると考えられる。

(3) 映像通信遅延計測結果

建設機械の遠隔操作を行ううえで、重要なカメラ映像の通信遅延計測結果を図一七に示す。クローラーキャリアは目標である 200 ms 以下とはならなかったが、オペレーターの感想から十分に施工可能な遅延範囲に収まっていると判断した。クローラーキャリアの遅延時間が長くなった要因の一つに、ハンドオーバー対応として、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。そのため通信遅延の閾値の設定が重要であり、今後も現場実証による実績の積み重ねが必要である。

4. おわりに

遠隔操作による一般施工では、以下のような観点から充分に実用性のある方法であることが確認できた。

- 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、施工管理担当者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、迅速な対応が可能となる
 - 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
- 建設分野では、5G の多接続や高速・大容量の特性を活かすことで、飛躍的な生産性向上が期待される。また建設機械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も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ているが、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山間部や過疎地域での作業が多いダム建設現場などでは、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 5G 端末、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。
- ②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重要であり、大容量データを既存のインフラでは送受信できない可能性がある。

今回の試験では、建設機械の遠隔操作に関する機器類の比較等は行っておらず、定量的評価を行うことはできないが、上記のような課題に対して、今後は様々な機器選定と手法を確立していく必要がある。建設機械の自動・自律化と共に進める遠隔操作技術は、建設業界での働き方を変えられる可能性がある。現地生産

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		06"86	00"21	220	
		06"87	00"22		
		06"88	00"23		
ブルドーザ	06"80	00"15	150		
	06"79	00"14			
	06"80	00"15			



図一七 映像通信遅延計測

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を実現することで、製造業の工場に近い環境で作業できる可能性がある。これにより、多様な人材が建設工事に参加可能となり、建設分野でのダイバーシティの実現も期待できる。

J C M A

《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, 建設機械, 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 拡, 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
- 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, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 11) https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000390.html

[筆者紹介]

堀尾 訓之 (ほりお としゆき)
 (株)大林組
 西日本ロボティクスセンター
 担当課長



蔵多 正人 (くらた まさと)
 (株)大林組
 西日本ロボティクスセンター
 担当課長



岡本 邦宏 (おかもと くにひろ)
 (株)大林組
 西日本ロボティクスセンター



古屋 弘 (ふるや ひろし)
 (株)大林組
 本社技術本部技術研究所
 上級主席技師

