

建設機械の遠隔施工における 5G の導入

無人化施工における新しい挑戦

古 屋 弘

PC とソフトウェアの高度化、GNSS の利用、そして通信技術の進歩は建設分野において大きな変革をもたらした技術であるが、近年の ICT の活用が広まる中で、特に施工において通信は重要な位置付けとなりつつある。今回、筆者は建設施工分野での新しい通信技術の試行として、重機の遠隔操縦に新しい次世代通信 5G を取り入れた施工効率の検証実験を実施した。実験では 5G の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。

キーワード：無人化施工、遠隔操縦、通信、無線 LAN、5G

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、さらには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、近年では重機の自立運転への試みも開発が進みつつある¹⁾。これらの技術は、雲仙普賢岳のような災害復旧現場のほか、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作業の安全性を向上させる新しい技術として、主に遠隔操縦による施工技術であり、建設ロボットの代名詞になっているとも言える。この背景には、国土交通省でも 2003 年より総合技術開発プロジェクトとして、ICT やロボット技術を活用し、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大きい²⁾。これらはさらに 2016 年からスタートした i-Construction³⁾ にも引き継がれ、さらなる建設プロジェクトの合理化と変革が進みつつある。

このような技術開発の背景には、コンピュータ、測位技術の進化と通信技術の高度化が大きく寄与している。コンピュータの進化はその性能に合わせたソフトウェアとともに、3 次元データを容易に扱えるようになり、測位においては今では当たり前のようになっている GNSS が、測量だけでなくマシンコントロール／ガイダンスシステムに不可欠のものとなっている。

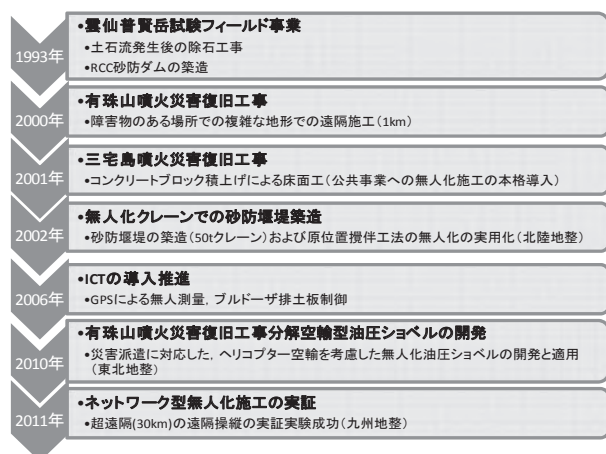
今回のテーマである通信に関しては、無線 LAN の高度化とともに、商用通信ネットワークの充実と通信費用の低下が、建設現場での仕事のやり方を一変させたと言ってもいい（携帯電話の普及が最も特徴的な例である）。

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。今回、筆者は重機の遠隔操縦に新しい次世代通信 5G を取り入れた実験を行った。本稿ではその目的と狙い、および実験結果を紹介する。

2. 建設に関わる近年の状況

無人化施工技術は、ロボット技術の一つ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。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図 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建設機械が導入されたのは、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で行われたようであるが、水中作業を安全に行った技術は、その後の無人化施工技術の基礎になったと言える。その後、この技術が大きな進歩を遂げたのは、前述の 1993 年の雲仙普賢岳噴火後の復旧工事



図一 無人化施工技術の変遷

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), 5)}。

その後も我が国は不幸なことに、表一1に示すような数多くの自然災害にさらされ(1993年から2016年まで記載)、多くの被害を受けている。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。

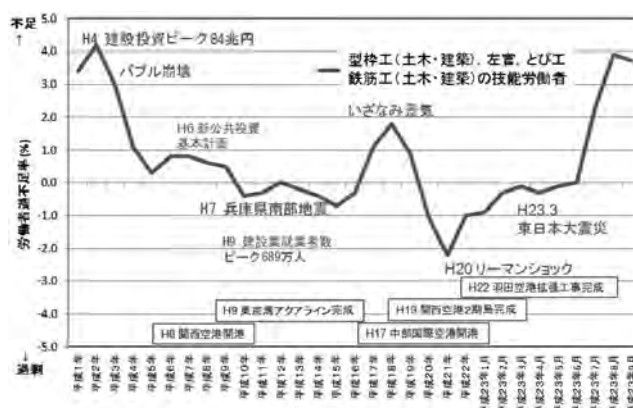
このように、無人化施工は危険区域での緊急的な施工手段として必要不可欠であるが、無人化施工のシステム導入時のイニシャルコストや、運用における経済性および施工性(施工効率等)が劣るなどの問題があ

表一1 近年の災害

年	大規模災害
1993	北海道南西沖地震(7月) 平成5年8月豪雨(鹿児島県)(8月)
1994	北海道東方沖地震(10月) 三陸はるか沖地震(12月)
1995	兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)(1月)
1997	鹿児島県出水市針原川土石流災害
1998	高知豪雨(9月)
1999	6.29豪雨災害(福岡・中国地方)(6月)
2000	有珠山噴火(3月～) 三宅島噴火:全島避難(7月～) 東海豪雨(9月) 鳥取県西部地震(10月)
2003	宮城県北部地震(7月) 十勝沖地震(9月)
2004	新潟・福島豪雨/福井豪雨(7月) 新潟県中越地震(10月)
2006	平成18年豪雪(日本海側) 平成18年7月豪雨(九州・中部)(7月)
2007	能登半島地震(3月) 新潟県中越沖地震(7月) 福岡県西方沖地震(9月)
2008	岩手・宮城内陸地震(6月) 平成20年8月末豪雨(紀伊半島から関東)(8月)
2009	平成21年7月中国・九州北部豪雨(7月)
2010	西日本豪雨災害
2011	東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)(3月) 紀伊半島豪雨災害(9月)
2012	平成24年梅雨前線豪雨(九州から近畿)(7月) 三陸沖地震(12月) 平成24年豪雪(11月～平成25年3月)
2013	平成25年台風26号(大島土石流)(10月)
2014	伊豆大島近海地震(5月) 平成26年8月豪雨による広島市の土砂災害(8月) 御嶽山噴火(9月)
2015	箱根山で火山活動が活発化(5月) 鬼怒川の氾濫(9月)
2016	平成28年(2016年)熊本地震(4月)

り、さらに、通常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技術適用にあたっての課題である。

ところで、図一2は1989年からの国土交通省「建設労働需給調査結果」に2011年の月次状況、および関連する社会情勢の一部を追記したものである⁶⁾。建設業の活況は、公共投資に大きく影響を受ける点で他産業との相違点であるが、図一2において、バブル崩壊後はいざなぎ景気の期間を除き、建設業労働者の需給は安定からやや過剰状態であったが、2011年3月の東日本大震災以降、労働者の不足傾向が顕著になりつつあることが解る。このような情勢のなか、建設業の就労者の高齢化と若年労働者の不足傾向は、他産業に比較して悪化しており、震災復興に関わる建設需要のほか、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応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などの導入に向けてのリテラシーの向上といった観点からも憂慮すべき事態である。



図二 建設業における熟練工の不足率

このような建設業を取り巻く環境の中で、無人化施工へのニーズは増えつつあるにもかかわらず、無人化施工に対応できるオペレータは少ない。新しいオペレータ育成は必要であるにもかかわらず、技能習得のチャンスが少ないといった状況である。また、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、上記のような建設業の若年就労者不足に伴い、無人化施工を必要としている時に、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。

3. 5G 通信に関して

携帯電話が登場したのは1980年代であり、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。しかし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り、さらに通信費の低下に伴い爆発的に利用が進んできた。表—2に通信技術の進化を示しているが、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、例えば高速通信に関しては、通信速度は10 Gbps以上になる予定であるという。

表—2 通信技術の変遷

Generation	1G	2G	3G	4G	5G
年代	1970～80	1990	2000	2010	2020
通信速度	2.4kbps	28.8kbps	14 Mbps	100 Mbps	10 Gbps 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	・201年より4G（3.9G）の運用開始 ・LTE／WiMAX ・PREMIUM 4G（DoCoMo）	・2017年に仕様策定 ・2020年運用開始予定

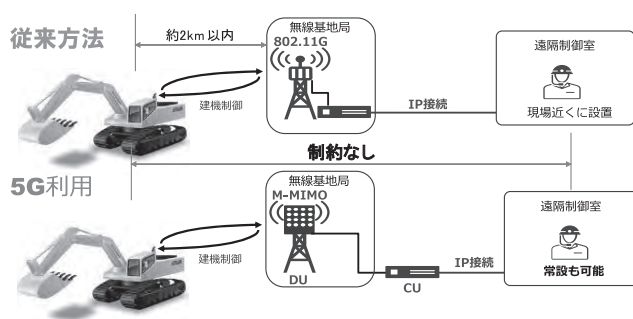
この通信技術は、上記の特長を生かし社会全般への大きな変革をもたらすことが期待されているが、この実用化実験が2017年度から開始され、2018年1月現在、様々な分野への適用実験が行われている⁷⁾。

4. 5G を用いた重機の遠隔操作実験

株大林組も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)を実施主体とした「建機の遠隔操作など、移動体とのリアルタイム情報伝達に関する実証」を目的として、日本電機(NEC)(株)とともに参加することとなった。実験は予備実験等を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。

筆者はこれまでも通信の発達之恩恵を特に現場で感じているが、商用通信を主に音声と軽微なデータ通信を利用してきた。遠隔操縦にもこの通信を用いることも検討してきたが、通信速度と帯域（容量）の問題で利用は叶わなかった。特に遠隔操縦に適用しなかった

のは、通信の方向性に課題があり、遠隔操縦に必要な映像情報は、遠隔重機からのuplink方向の通信であるためである。現在の4Gではユーザー側へのdownlink側の速度は高速であるが、uplink方向はその速度が遅い。この状況により商用無線通信を遠隔操縦に使うことが困難であった。このため、遠隔操縦における通信の所謂Last one mileは自前で無線LANシステムを構築していた。既存インフラ(VPNなどの有線通信)と自前の無線LANを組み合わせた長距離遠隔操縦も実用化されているが、5Gを利用した場合、直接遠隔操縦装置にアクセス可能となるため、自前の無線LANが不要となり、図—3に示すように遠隔操縦の新しい方法が開拓される可能性がある。



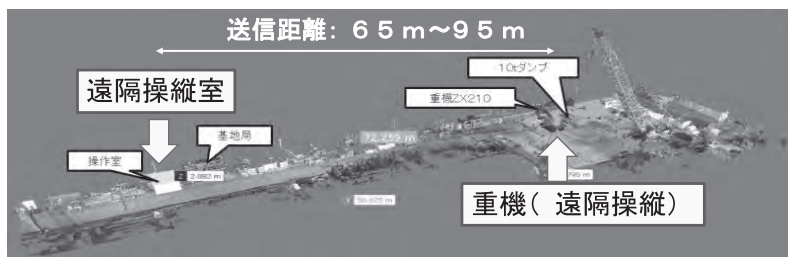
図—3 5Gを用いた重機遠隔制御のイメージ

今回の実験では、現在行われている2.4 GHz帯の無線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した。実験の概要は図—4に示すが、5Gの高速、大容量、低遅延性を生かし、遠隔操縦にとって最も重要な映像情報を4Kステレオで送信し、高精細な画像を用いての遠隔操縦オペレータに与える影響、すなわち操作性の比較を検証する予定である。なお、遠隔操縦機械は、当社が開発したサロゲート⁸⁾を用いた(図—5参照)。

5. 実験の新規性

今回の実験では、遠隔操縦の映像通信に5Gを用いることにより、映像の高精細化とともに、以前筆者らが実施した3D映像を遠隔操縦に適用することを再度試みることとしている⁹⁾(写真—1, 2)。今回の実験では、5Gの特性を生かし、4Kステレオ画像を利用することを大きな特徴としている。この映像データを高速のCODECにより圧縮展開し、4K裸眼ステレオモニタ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

5Gによる新しい遠隔操縦の効果の確認

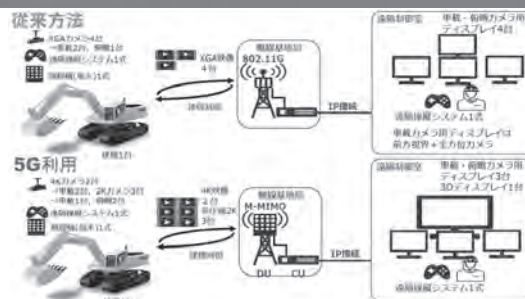


実験による比較検討項目

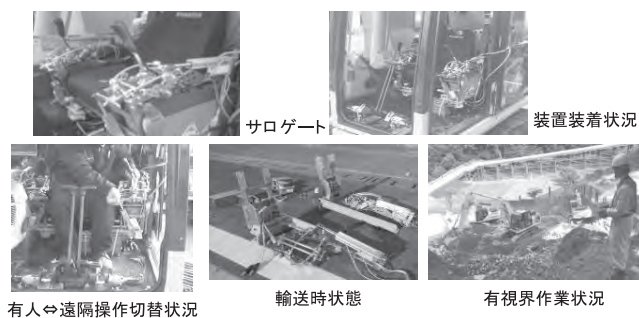
- 新しい操縦システム:
4K(Stereo)の採用
- 低遅延、高精細な画像による遠隔操縦

実験方法

- ブロックの積み上げ時間を比較



図ー4 5Gを用いた重機遠隔制御のイメージ



図ー5 サロゲート



写真ー2 遠隔操縦室

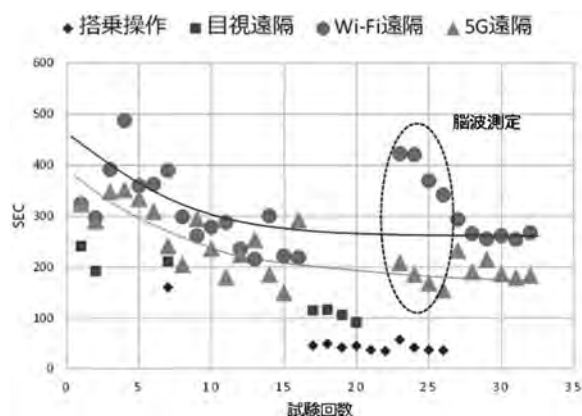


写真ー1 実験状況

技術との作業効率の比較を行う予定である。これらの技術は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、その効果に期待した。

6. 実験結果

実験は従来から行われている Wi-Fi による通信を利用した遠隔操縦と、5G を用いた技術と比較を重機に



図—6 実験結果

よるブロック積みの必要時間の対比で行った。実験は2018年2月1日～2月16日に行い、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。試験によるブロック積みに要した時間を整理したものを図—6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うかがえる。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、ブロック2段積みに要する時間は、従来方法では276秒、5G利用で177秒となった。5G活用の優位性は時間の差異で明確に表れているが、この原因は遠隔操縦オペレータに与える情報量、すなわち映像の詳細度および立体視感によるものと考えられる。

7. おわりに

重機の遠隔操縦実験は、2018年2月に終了した。実験を行うにあたり、当初は従来技術の無線LANの部分に5G高速通信に置き換えるだけであろうと簡単に考えていたが、この通信をフルに生かし、高精細な

映像を通信するために、多くの新しい技術を組み合わせ最適化する必要があった。特に4Kをステレオで通信するためには多くの機器が必要であり、さらに一部通信システムの開発も当社は行っている。

5Gの特徴の中に低遅延があり、この部分は遠隔操縦にとって大きな魅力である。遠隔操縦オペレータにとって遅延はストレスの原因となり、作業効率の低下の要因となるからである。今回の5Gではこの部分を大いに活用しようと試みているが、高精細な映像を利用することや4KのCODEC機器、ステレオ再生部での遅延が避けられないことも解ってきた。これらの課題はあるが、高速性、大容量、高帯域を生かした重機の遠隔操縦は間違いなく遠隔操縦の新しい方向性を示してくれるものと確信する。

J C M A

《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 (2018.1 現在)
- 3) http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html (2018.1 現在)
- 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，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例，建設機械，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) www.soumu.go.jp/main_content/000485322.pdf (2018.1 現在)
- 8) http://www.obayashi.co.jp/press/news20161005_1 (2018.1 現在)
- 9) 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

【筆者紹介】

古屋 弘（ふるや ひろし）
（株）大林組技術研究所

