

ローカル 5G を活用した自動走行及び 4K 映像の実証実験に関する取り組み

畑 本 浩 伸・飛 鳥 馬 翼

大規模災害が発生した後は復旧作業が行われ、作業中の二次災害を回避する方法の1つとして、安全な場所からの建設機械の遠隔操作が挙げられる。複数台の建設機械を使って土砂を運搬する場合、同一運搬経路の往復作業に対しての作業員による操作疲労の低減を目的とした自動走行システムの利用が望ましい。従来は建設機械に搭載されたカメラからの低解像度の映像が遠隔操作室に集約されていたが、現場の状況判断を詳細に把握するためには、カメラ映像の高度化が必要と考えられる。本稿では、先端の無線通信システムであるローカル 5G を活用した自動走行及び 4K 映像伝送の実証実験に関する取り組みについて紹介する。

キーワード：ローカル 5G, 無人化施工, 遠隔操作, 自動走行, 4K 映像

1. はじめに

台風や地震や火山などの自然災害に対して、災害補修時における二次災害予防のための無人化施工技術が開発されている。無人化施工では、車載カメラや周囲の固定カメラ、さらには GNSS (Global Navigation Satellite System) 等の情報通信機器が搭載された建設機械が利用され、それらの情報が安全な場所にある遠隔操作室へと情報が集約されている。土木現場における情報通信システムのさらなる高度化を図るためには、4K カメラを用いた映像の高品質化、建機の傾きや振動などの現場情報のフィードバックが行われる。このときの情報量の増加に伴い、従来よりも高速で低遅延の伝送が可能な無線通信システムが必要になる。

電気通信事業者によって近年、日本各地で運用が行われている第五世代無線通信システム (5G) は、超高速で超低遅延、そして多数同時接続の無線通信の実現が可能なシステムである。加えて、地域や産業の個別ニーズに応じて地元企業や自治体などが主体となって 5G システムを構築する「ローカル 5G」^{1), 2)} に注目が集まっている。建設業界においても、施工時のデジタルトランスフォーメーションを加速するための1つの選択肢として、複数の企業が無線局免許の取得に動いている報道発表が行われていた。ローカル 5G は免許制度によって利用場所の周波数占有が可能であり、無線 LAN (Local Area Network) システムのような周辺の無線局からの同一チャンネル間干渉を気にする必

要がないメリットがある。

本稿では、ローカル 5G を用いた建設機械の自動走行及び 4K 映像伝送に関する(株)熊谷組の取り組みについて紹介する。

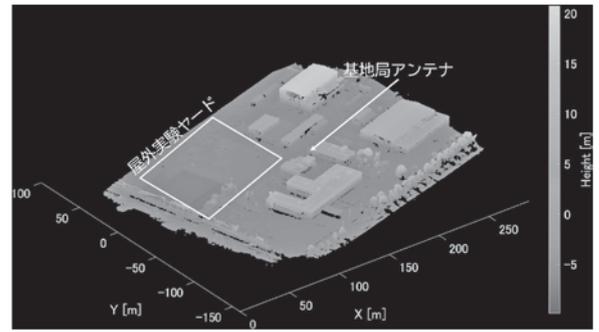
2. システム構成

茨城県つくば市の熊谷組技術研究所にローカル 5G を構築した。所内の屋外実験ヤードには遠隔操作室及び、不整地運搬車が配備されている。ヤード近くの建物屋上に基地局用のアンテナを設置し、指向性パターンを屋外実験ヤードに向けるものとする(写真-1)。

図-1に、建設機械と遠隔操作室間のシステムブロック図を示す。同図より、上り回線の場合、車載カメラの映像、GNSS 情報、車両の加速度情報などの情報パッケージが LAN を通じてスイッチングハブに集約され、5G 用の通信端末を使って無線の変調信号が送信される。操作室側では基地局のアンテナでパッケージが受信され、5G 基地局の無線機器によって復調された後、サーバー及びルーターを経由して復号されたパッケージがディスプレイ上の映像や、加速度再現装置での重機の傾きとして出力される。なお、重機側に 360 度カメラが設置されていれば、全方向映像を遠隔操作室側のヘッドマウントディスプレイ上で把握できる。下り回線の場合、遠隔操作室における操作レバーの情報、あるいは制御 PC によるルート指示情報が基地局を通じて、端末へと受信される。このとき、建設機械



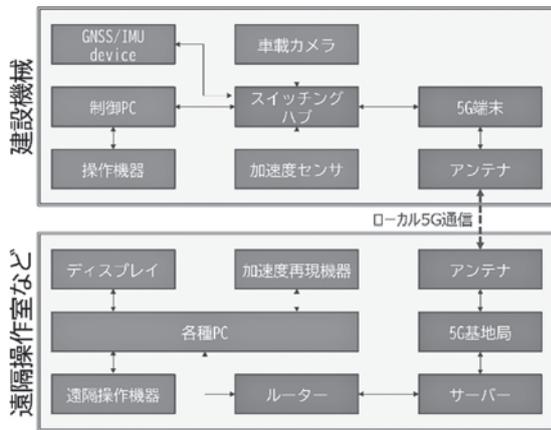
写真一 屋外実験ヤードに指向性を向けた基地局用のアンテナ



図二 計算機シミュレーション評価のための技術研究所点群データ

表一 計算機シミュレーションにおけるパラメータ

パラメータ	数値	備考
搬送周波数	4.85 GHz	ローカル 5G 用の周波数帯
送信電力	23 dBm	上りリンク
アンテナ利得	0 dBi / 17 dBi	端末 (建機) / 基地局
ケーブル損失	3 dB	
雑音指数	8 dB	
アンテナ高	3 m	端末 (建機)
絶対温度	300 K	雑音電力計算に利用
電波伝搬モデル	拡張坂上モデル	無線回線設計に利用される数式



図一 建設機械と遠隔操作室間のシステムブロック図

が遠隔操作、あるいは自動走行として動き、無人化施工が実現できる。

3. 通信品質の評価

(1) 計算機シミュレーション評価

技術研究所内の屋外実験ヤードにおけるローカル 5G の通信品質をシステム構築前に把握するため、回線設計で用いられる無線通信機器等のパラメータを利用しつつ、計算機シミュレーションによる事前の品質評価を行った。図二に、計算機シミュレーション評価のための技術研究所点群データを示す。屋外実験ヤード内の点群データの位置情報を使うことで、基地局と端末間の距離を計算できる。さらに各種実験結果を通じて、周波数や距離やアンテナ高で関数化された電波伝搬の数式 (拡張坂上モデル)³⁾ を使うことで、伝搬損失を計算することができる。

表一に、計算機シミュレーションにおけるパラメータを示す。搬送周波数は 4.85 GHz、送信電力は 23 dBm (端末側)、端末と基地局のアンテナ利得は 0 dBi と 17 dBi、ケーブル損と雑音指数はそれぞれ

3 dB と 8 dB とした。アンテナ高さは建設機械 (端末側) を 3 m とした。伝搬損失の計算結果を使って、各点群から基地局に対する受信信号電力を算出できる。受信信号電力を情報理論における通信路容量の数式⁴⁾ に入力することで、理論上の上限値となる理想スループットを計算した。なお、変調方式や通信路符号化のパラメータによって、実測値は理論値よりも低く制限される。

図三に、屋外実験ヤード内部の理想スループットのカラーマップと、累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) 特性を示す。各地点の無線端末からパケットを送信した場合の上り回線の数値であることに注意が必要である。なお、CDF は屋外実験ヤード内部のデータのみ使用している。同図より、CDF1%、10%、50% 値はそれぞれ 28、36、64 Mbps となっており、実験ヤード内のほとんどの場所で高スループットを期待できる。4K 映像伝送に必要な伝送速度を 40 Mbps とした場合、85% 以上の場所で 4K 映像を遅滞なく遠隔操作側で確認できた (CDF15% で 40 Mbps となる)。

(2) 屋外実験ヤードと周辺における実測評価

屋外実験ヤードにおける通信品質の理論値を把握した後、歩行による無線端末と基地局間の移動通信実験を行った。図四に、上り回線における実測スループッ

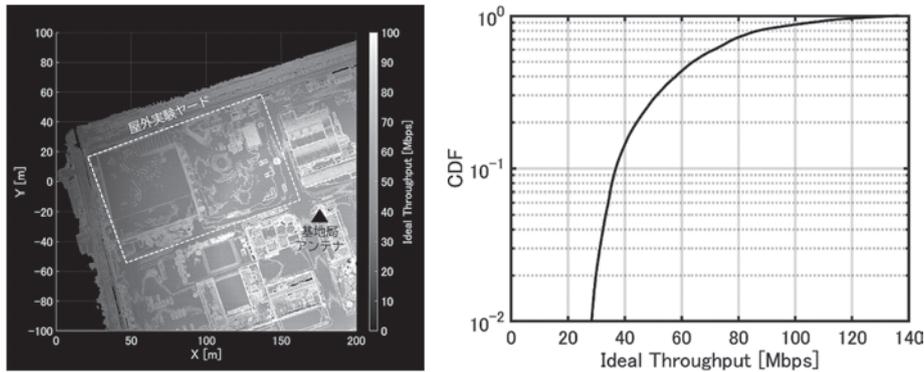


図-3 屋外実験ヤード内部の理想スループットのカラーマップ (左) と累積分布関数特性 (右)

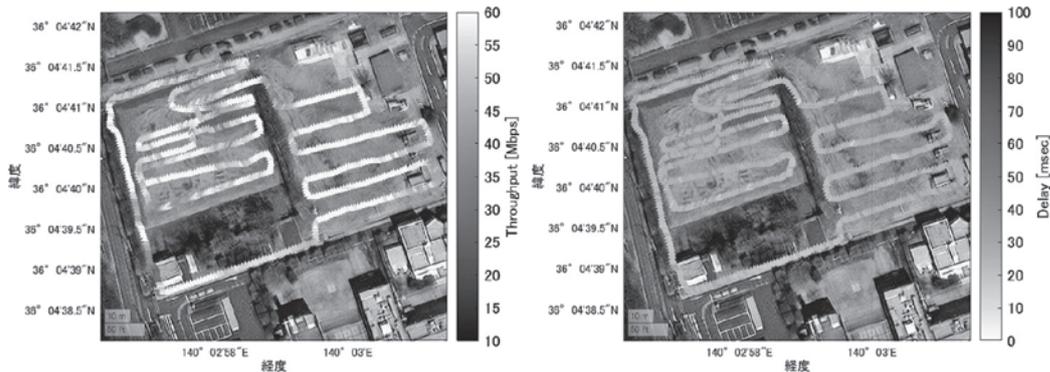


図-4 上り回線における実測スループット特性 (左) と遅延特性 (右)

ト特性と遅延特性を示す。同図のスループット特性より、ヤード内の数多くの場所において 40 Mbps 以上の伝送速度を達成可能であることを確認した。なお、ヤード外の建物の影となる場所においては、見通し外の通信となるためスループットが低下する。また、遅延特性においては、大半の場所で 50 msec 以下の遅延となることを確認した。建設機械と遠隔操作室間が見通しである限り、少なくとも 1 台の建設機械が 4K 映像を伝送する際に特段の遅延が発生しないと予想できる。

4. 自動走行並びに映像伝送の評価

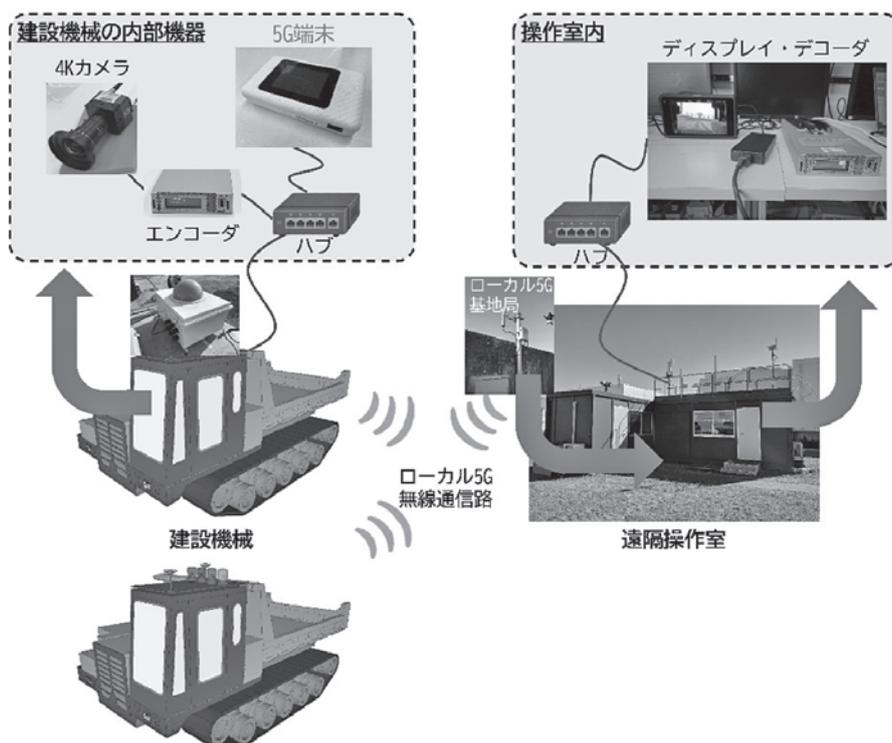
技術研究所内におけるローカル 5G の基本的な通信品質を把握した後、自動走行⁵⁾並びに映像伝送の評価を行った。図-5に、屋外実験ヤードでの建設機械の自動走行並びに映像伝送実験における構成図を示す。同図より、2 台の不整地運搬車を用意し、4K カメラ、エンコーダ、ハブ、ローカル 5G 端末を配置し、遠隔操作室側にデコーダ、ディスプレイを設置した。屋外実験ヤード近くの建物の屋上に基地局用のアンテナが配備され、受信パケットが遠隔操作室へと転送されている。12G-SDI 規格の映像信号がエンコーダを通じて LAN で伝送可能なパケットに変換され、デコー

ダ側ではパケットがディスプレイで表示可能な 12G-SDI 信号へと逆変換されている。

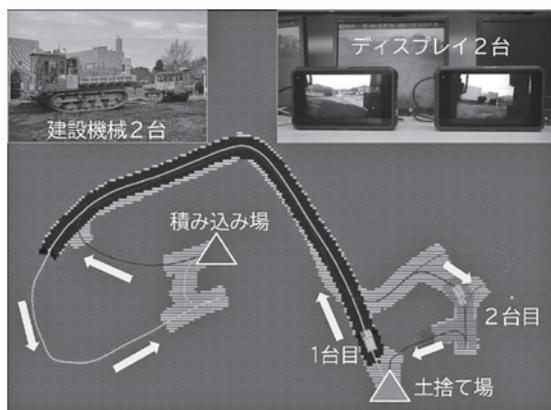
図-6に、建設機械 2 台の自動走行マップと遠隔操作室側の 4K 映像を示す。同図では、屋外実験ヤード内部に土砂運搬の積み込み場と土捨て場が設定され、往路と復路で一部共通した場所を走行することになる。このとき、車両同士が経路内で衝突しないように、あらかじめ走行先の一部のエリアを予約し、他の車両が通過できないようにする。車両 2 台が自動走行する際、走行可能な範囲 (予約した範囲) が太い帯状の点集合として表現される。図-6では 1 台目の車両が土捨て場から出発し、積み込み場への共通ルートを予約していることがわかる。なお、2 台目の車両は土捨て場に向かって途中となる。ローカル 5G 環境下において特段の遅延なく、自動走行ができることを確認した。車両 1 台の 4K 映像伝送を遠隔操作室側のディスプレイで確認することもできた。車両 2 台の 4K 映像伝送の場合、スループットが低下した際にディスプレイ出力に遅延が発生するケースがあることを確認した。

5. おわりに

高速で低遅延な無線通信が可能なローカル 5G シス



図一五 屋外実験ヤードでの建設機械の自動走行並びに映像伝送実験における構成図



図一六 建設機械2台の自動走行マップと遠隔操作室側の4K映像

《参考文献》

- 1) 畑本浩伸, 飛鳥馬翼, 竹下嘉人, 天下井哲生, 古川敦, 北原成郎: 屋外実験ヤードにおけるローカル5Gの通信品質に関する理論と実測特性の比較検討, 土木学会第77回年次学術講演会, VI-749, 2022.
- 2) 畑本浩伸, 飛鳥馬翼, 久保田恭行, 天下井哲生, 古川敦, 北原成郎: ローカル5Gを活用した自動走行及び4K映像伝送に関する屋外実証実験, 土木学会第78回年次学術講演会, VI-791, 2023.
- 3) K. Kitao and S. Ichitsubo: Path Loss Prediction Formula for Urban and Suburban Areas for 4G Systems, Proc. IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006.
- 4) 「ワイヤレス通信工学」三瓶政一, オーム社, 2014年
- 5) H. Hatamoto, K. Fujimoto, T. Asuma, Y. Takeshita, T. Amagai, A. Furukawa and Shigeo Kitahara: A study on an Autonomous Crawler Carrier System with AI based Transportation Control, 2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan.

テムの無人化施工技術への適用を検討した。熊谷組技術研究所の屋外実験ヤード内における計算機シミュレーションによる理想スループットの評価と、歩行による基本的な通信品質の実験評価を行った。屋外実験ヤード内で建設機械2台の自動走行が特段の遅延なく動作することを確認した。加えて、建設機械内に設置した4Kカメラ映像を遠隔操作室側のディスプレイで出力できることを確認した。これからも最新の無線通信システムを用いた様々な実証実験を行い、無人化施工技術の高度化に寄与していきたい。

最後に、本実験にご協力頂きました京セラ(株), 日本電気(株)の関係者各位に感謝いたします。

【筆者紹介】



畑本 浩伸 (はたと ひろのぶ)
 (株)熊谷組
 土木事業本部 土木DX推進部 企画推進グループ
 グループ課長



飛鳥馬 翼 (あすま つばさ)
 (株)熊谷組
 土木事業本部 土木DX推進部 DX推進グループ
 係長