

無線ネットワークを用いた建機の効率的な遠隔制御に向けた超低遅延映像伝送技術

中 島 康 之・本 玉 靖 和・實 田 泰 之

建機の自動化・自律化運用による省人化や、災害復旧における危険地域作業において無線ネットワークを介して遠隔から建機を制御する場合、建機に設置したカメラ映像を高品質、安定かつ低遅延に伝送することが不可欠となる。本稿では、遠隔から建機を効率的に操縦するために必要となる、超低遅延映像伝送技術について述べる。またローカル 5G などさまざまな無線ネットワークを用いて遠隔操作実験を行い、超低遅延ビデオエンコーダや適切なエラー耐性機能を活用することにより、遠隔操作における目安とされる End-End 遅延時間を 300 ms 以内に抑えつつ、伝送障害に対しても安定して高品質映像を伝送して建機操縦できることが確認できた。

キーワード：無人化施工，遠隔操作，映像伝送，レジリエントな無線通信，低遅延映像符号化

1. はじめに

国土交通省にて策定された i-Construction 2.0 では、少子高齢化に伴う建設現場での作業要員の減少に対して抜本的な省力化対策に取り組むために建設現場のオートメーション化（自動化・自律化）の推進が述べられており、その1つとして遠隔施工技術の普及促進が挙げられている¹⁾。遠隔施工においては無線環境における現場映像の確認が必要となるが、映像伝送の遅延やパケットロスなどに起因する映像品質劣化により施工効率が低下する可能性がある。このため、ローカル 5G などさまざまな無線環境において遠隔操縦システムを運用する際の課題を整理し、無線環境に応じた実験システムを構築した。実証試験において超低遅延映像コーデックやパケットロス対策を活用すること

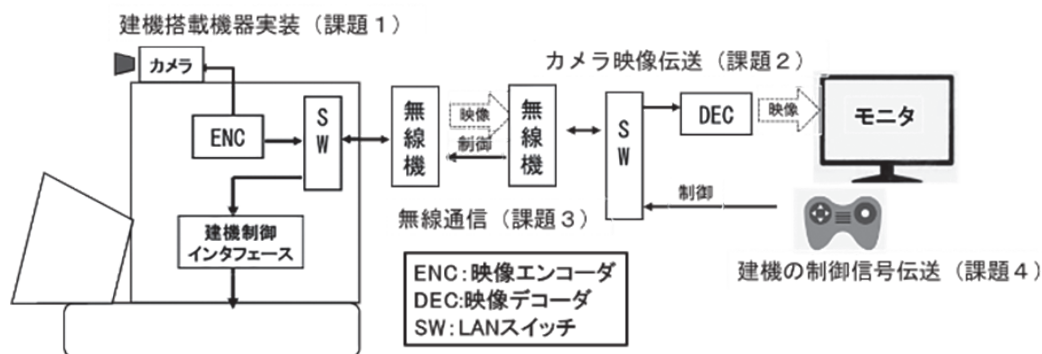
により遠隔操縦に適した環境を構築できることが確認できた。

2. 建機の遠隔操作における課題と対策

以下に建機の遠隔操縦におけるシステム構成と課題を示す（図－1）。

（1）普及に向けての実装における課題と対策

建機の自律化・無人化施工に関する課題は映像機器選択、建機制御方法、通信手段など様々な要素が複合的に関わるため、それぞれの専門性が求められる点といえる。例えば、建機に搭載するカメラは作業状況把握や危険察知のためには正面、左右、後面で4台程度必要となる。これに伴い映像圧縮伝送のエンコーダも



図－1 遠隔施工のシステム構成

それぞれ必要となるが、コスト観点ではなるべく1つの装置にまとめ、簡単に実装できるようにする必要がある。

(2) カメラ映像伝送遅延に関する課題と対策

カメラ映像を元に遠隔操作を行う上での課題としてはシステム全体の遅延、映像圧縮における符号化データ量の変動、通信ネットワーク品質が挙げられる。以下各課題と対策について述べる。

(a) システム全体の遅延

図—1に示すように、ビデオカメラ、映像エンコーダ、無線ネットワーク、映像デコーダ、映像モニタそれぞれにおいて遅延が発生するため、End-Endの遅延が施工効率に影響を与える。このため、例えばビデオカメラや映像モニタについては秒60フレーム以上の機器を用いることで遅延量を17ms程度に抑えることが可能となる。また、映像コーデック、通信ネットワークは遅延量が数十～数百msレベルになることもあり、慎重に選択する必要がある。

人間の遅延に対する知覚は100ms程度以上との報告があるが²⁾、近年自動車に搭載され始めた電子ミラーは表示までの遅延200msを超えないことが国連で規定されており³⁾、国内でもこれを遵守している。一方、建機の遠隔操作においては、標準的な作業を模擬して定量評価を行った例があり⁴⁾、実験結果からは屋外直視、70ms、300msの遅延において作業効率にはほぼ変化がなかった。このため、300msのEnd-End遅延は施工効率上一つの目安になると考えられる。

(b) 映像圧縮における符号化データ量の変動

映像符号化方式の国際標準のMPEGでは初期のMPEG-1やMPEG-2から最新のVVCに至るまで、他のフレームとは独立して符号化するイントラフレーム符号化と、前後のフレームとの動き補償予測により予測差分を符号化するインターフレーム符号化を組み合わせで高い圧縮率を達成している⁵⁾。ただし、非常に情報量の多いイントラフレームと情報量の少ないインターフレームから構成されているため、ネットワーク帯域が限られている場合は、最大情報量となるイントラフレームを遅延なく伝送できるように設計する必要がある。このため、利用可能な帯域に対して平均符号化レートを低く設定する必要があるが、結果的に所望の画質を得ることが困難となる可能性がある。さらに建機に複数のカメラを設置する場合、それぞれの映像は異なる方向を向いているため、発生する情報量も異なり、全体の伝送量にある制限内に制御することは困難になる可能性がある。

また、(a)項で述べた遅延にも影響するが、MPEGでは通常前後のフレームを用いて予測符号化している。このため、デコーダ側では時間的に後のフレームの情報が揃わないと現フレームのデコードができないため、後続のフレームバッファ分の遅延が発生する。したがって、低遅延性が要求される場合は符号化効率を少し犠牲にして時間的に前のフレームのみを用いて符号化する必要がある。

なお、MPEGでは他の低遅延符号化手法としてイントラスライス符号化を用いることが可能である⁶⁾。この場合、イントラフレームを用いずにすべてインターフレーム符号化とし、各フレームにおいて、あるスライスのみをイントラ符号化することで、低遅延性と各フレームの符号化情報量の均一化を図ることが可能となる。

(c) 通信ネットワーク品質

有線、無線ネットワークいずれもIP伝送を行う場合、伝送遅延、ジッタ、パケットロス、帯域変動の4つの品質劣化要因について留意する必要がある。伝送遅延についてはネットワーク構成に依存する部分が大きいが、Wi-Fiやローカル5Gのように局所エリアで利用する場合は大きな遅延にはならない。しかしながら、通信キャリアが提供するLTEや5Gについては、最寄りの基地局と無線コア設備を経由し、また遠隔地の場合は基幹回線網を用いることからこれらの遅延影響がある。さらに、地球から3万6千km離れている静止衛星通信回線では数百ms以上の伝送遅延、500–1,000km程度の低軌道衛星では100ms以下になる可能性があり、利用するネットワークによる影響を精査する必要がある。

ジッタについては、パケット到着間隔が変動することにより発生するが、映像のデコーダはある許容時間内に復号して表示することが求められるため、ジッタによりパケット到着が遅れると最悪のケースでは、そのパケットデータを用いて復号するフレーム再生時間に間に合わず再生フレームがドロップされ、スムーズな表示ができなくなる可能性がある。このため、ジッタが大きなネットワークを利用する場合はあらかじめデコーダ側のバッファ容量を増やしておく必要がある。

パケットロスについては、特に無線環境では障害物や雑音により伝送ロスが発生する。前者については建機から無線基地局が常に見えている環境では問題ないが、建機作業においてバックホウが旋回するような場合に基地局から一瞬見えなくなりパケットロスが発生する。後者については、例えば豪雨や干渉などで十分に受信信号からパケットを復元できないような場合に

パケットロスが発生する。このため、前者については ARQ (Automatic Repeat reQuest) などの手法によりロストしたパケットを再送信するような方法を用いることが可能である。ただし、この場合再送信処理に必要な遅延が発生する。また、後者については FEC (Forward Error Correction) などのエラー訂正技術を用いることが有効となるが、エラー訂正用のオーバーヘッドが必要となるため、伝送に必要な情報量が増加する。

帯域（スループット）については、映像を所望の品質で伝送できるかを決定するための重要なパラメータとなる。特に建機の映像伝送のような場合は上りの帯域が重要となる。また、静止衛星回線経由の無線ネットワークでは通常数百 kbps 程度帯域しか確保できないが、最近登場した低軌道衛星では上り回線でも 5–20 Mbps 程度の伝送速度が得られ⁷⁾、それぞれの無線回線の特徴を踏まえて選定する必要がある。さらに衛星通信回線や通信キャリアが提供する LTE や 5G などパブリックなネットワークを用いる場合、ネットワークの利用状況により帯域変動が予想されるため、エンコーダ側で利用可能な帯域に適応的に対応できるよう制御する必要がある。

(3) 無線通信を利用する上での課題と対策

これまで映像を用いた無線接続による遠隔施工については、1993 年に普賢岳災害復旧工事において数 km 離れた場所から数 Mbps の業務用無線により遠隔操作⁸⁾した例があるほか、2011 年に福島原発においてメッシュ無線 LAN を用い、10 台の建機で遠隔施工を行っている⁹⁾。近年は第 5 世代移動システム (5G) や低軌道衛星通信が利用可能になってきており、遠隔から映像伝送して建機を操作するための無線通信環境の選択肢が従来に比べ格段に広がっている。また、建機の旋回などにより通信路が瞬断するような施工現場ならで

はの状況に対して、メッシュ型ネットワークの利用や、ARQ などのエラー対策を施しレジリエントな無線ネットワークを構成する必要がある。さらに回線の帯域変動も予想されるため、映像コーデック側での適応レート制御が必要になる。

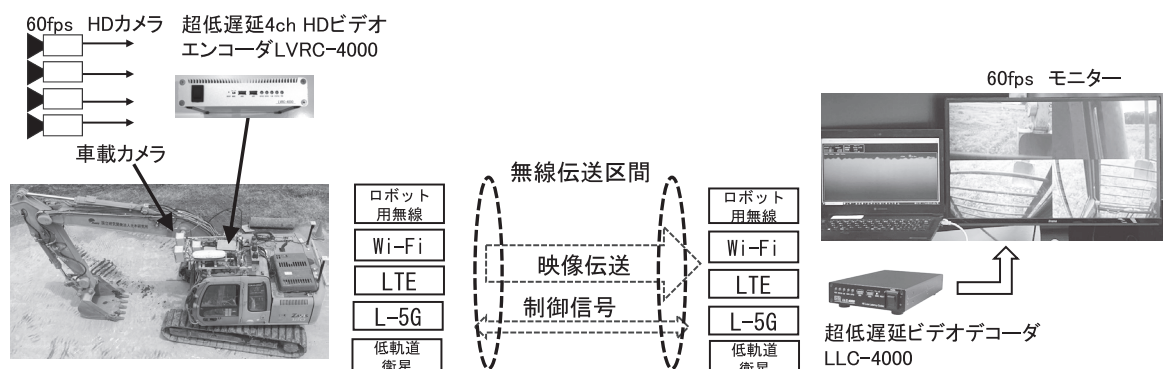
(4) 建機の制御信号伝送における課題と対策

建機を遠隔から操縦するためには建機からの映像情報を基に建機を制御する制御信号を建機側に送る必要がある。映像を圧縮して伝送する場合には、建機の走行や旋回などで画像の変化量が大きくなると符号化情報量も大きくなる。このため、映像伝送ネットワークは無線 LAN などを用い、制御信号用には特定小電力無線を使うなど、ネットワークを分けることがあり、システムが複雑になる可能性がある。このため、複数カメラ映像が搭載されていても、それぞれの符号量を綿密に制御してどのようなシーンでもトータルの符号量を一定以内に収めることにより、制御信号についても映像伝送のネットワークと同一のネットワークで伝送することが可能となる。

3. 遠隔制御実験

(1) 実験概要

2 章で述べた課題を解決するために必要な技術を検証するために無線ネットワークを利用して遠隔制御実験を行った。実験システムとしては、建機側には 4 台のビデオカメラとビデオエンコーダを搭載し、各種無線ネットワークに接続し、復号された映像を見ながら建機を遠隔操縦した (図—2)。実験は国立研究法人土木研究所の自立施工技術基盤 OPERA を利用し実施した。実験フィールドでは遠隔操縦席は①エリアに設置し、走行 (A→D)、旋回 (A, C 点) 等を行った (図—3)。



図—2 実験システム

(2) 実験環境

建機に搭載したカメラはフル HD (1,920 画素×1,080 ライン) で 60 fps キャプチャが可能なビデオカメラを用いた。ビデオエンコーダについては MPEG の HEVC 方式で高圧縮が可能な超低遅延 4K ビデオエンコーダをベースに、1 台で 4ch のフル HD 映像を同時エンコードして、4 ストリーム出力し、建機に後付け可能なエンコーダ (LVRC-4000) を新たに開発した (図-4)。

無線ネットワークについては現実的に入手が可能かつ、なるべく多様な環境での特性を評価するために、以下の 5 種類のネットワークを用いた。

① 5.7 GHz ロボット用無線¹⁰⁾

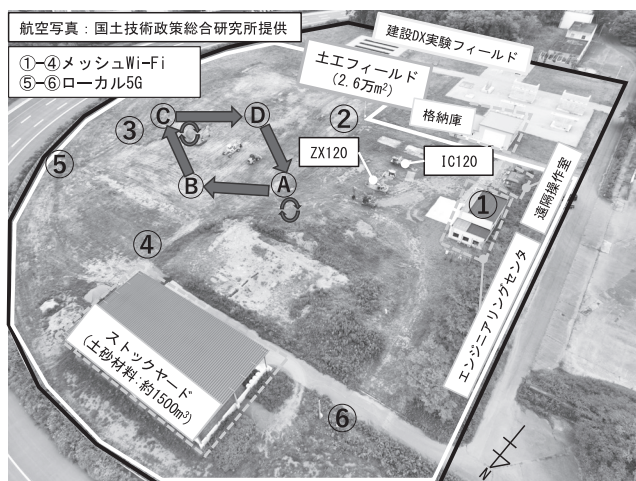


図-3 実験フィールド



図-4 4ch HD エンコーダ (LVRC-4000)

② メッシュ Wi-Fi

③ キャリア LTE

④ 低軌道衛星通信回線

⑤ ローカル 5G

なお、④の低軌道衛星については災害現場などで通信キャリアの携帯回線、光回線が利用できないような状況を想定し、建機からメッシュ Wi-Fi 経由で低軌道衛星回線に接続し、そこからインターネット経由で光回線 (VPN 接続) や LTE を用いて遠隔制御側まで接続した。

(3) 静的ネットワーク特性

静的なネットワーク特性を以下に示す (表-1)。表において「移」は移動端末, 「基」は基地局側を示す。

表から静止状態では 10 Mbps レベルの低軌道衛星通信を除き、上り下りともに 20-40 Mbps 程度のスループットが得られていることがわかる。回線遅延については、ロボット用無線とメッシュ Wi-Fi が平均 4-5 ms であるのに対し、LTE やローカル 5G では平均 30-40 ms の遅延が計測された。低軌道静止衛星回線については LTE 経由で平均 84 ms、光回線経由で 60 ms となり、静止衛星通信回線に比べて大幅に遅延量が削減できている。

遅延ジッタについてはネットワークの構成上、ロボット用無線とメッシュ Wi-Fi のみの測定となったが、Peer-to-Peer 接続していたロボット用無線では ±7 ms 程度のジッタとなった。一方、メッシュ Wi-Fi では 50 ms レベルのジッタが生じていることがわかった。パケットロスについてはロボット用無線のみの計測となったが、静止状態では特にエラーなく伝送できていた。

なお、4ch の映像伝送の符号化レートは安定しており、また制御信号のデータレートは非常に小さく、各ネットワークのスループットは十分確保されているこ

表-1 各種ネットワークにおける伝送特性

システム構成	静止/移動	スループット Mbps		パケット損失	遅延 ms			揺らぎ ms	
		移→基	基→移		最小	平均	最大	最小	最大
ロボット用無線	静止	33	28	0%	2.77	3.87	8.25	-6.02	6.98
〃	移動	27	26	0.80%	2.86	24.34	401.8	-448.5	283.7
メッシュ Wi-Fi	静止	39	44	-	2.96	5.40	30.00	-52.66	52.81
〃	移動	52	50	-	3.47	11.82	142	-274.0	275.1
キャリア LTE	静止	29	27	-	22	33	54	-	-
〃	移動	30	26	-	22	46	175	-	-
ローカル 5G	静止	26	26	-	31	44	56	-	-
低軌道衛星+LTE	静止	9	10	-	55	84	203	-	-
低軌道衛星+光	静止	15	14	-	33	60	290	-	-



図—5 低軌道衛星回線による映像伝送特性

とが確認できたため、制御信号もこのネットワークに含めてインバンドで伝送を行った。参考に低軌道衛星回線で1chの映像を伝送した時のビデオ符号化レートの変動を示す(図—5)。図からもビデオエンコーダのレート制御が有効に働き、最大ビットレート以下で安定して符号化伝送できていることがわかる。これらの結果からビデオエンコーダの設定としては、各chで3Mbps(低軌道衛星は1Mbps)の符号化レートでイントラスライスを用いた符号化により低遅延化を図った。

(4) 建機走行・旋回時の特性

建機を走行、旋回させた時の伝送特性についても実験結果を同じ表に示す(表—1)。スループットについては、静止時とおおよそ同程度であった。遅延時間については建機の走行・旋回に伴い、どのネットワークでも増加が確認された。Peer-to-Peer接続のロボット用無線では旋回によるパケットロスの影響で遅延量が平均20ms程度増加し、ジッタ量も最大で300–400msまで増加している。これに対してメッシュWi-Fiでは旋回等による切断発生時も別ルートでの接続となるため、ジッタ量は最大300msレベルとなったが平均遅延量は12msに抑えられた。

(5) カメラからモニタまでのEnd-End遅延時間

ビデオカメラ入力から映像モニタ出力までのトータルの遅延時間について、パケットロス対策として誤り訂正(ARQ)を利用しない場合と利用した場合で測定した。

ARQがオフの場合、ネットワーク以外の遅延量(ビデオカメラ+ビデオエンコーダ+ビデオデコーダ+ビデオモニタ)は103msに抑えられた。別途ビデオエンコーダからモニタまでの遅延を測定すると86msとなっており、カメラでの遅延は17msレベルといえる。さらにネットワーク遅延を加えた場合でもトータルで115–163msとなり低遅延性を確保することができた。

一方、ARQがオンの場合、100ms程度の遅延増加



図—6 映像品質比較
(上: ARQ オフ, 下: ARQ オン)

となり、トータルで210–260msの遅延になったが、効率的な建機の遠隔操縦の目安となる300ms以下に抑えることができた。またこの場合、いずれの回線においても安定して映像伝送ができることが確認できた。ARQオフとオンにおける画質劣化とその改善例を示す(図—6)。図からもわかるように、ARQオフ(図—6上)では建屋の右側などが大きく劣化しているが、ARQを適用することで、パケットロスとなったパケットが再送され、正常に復号できていることがわかる(図—6下)。

4. おわりに

本研究では、比較的高速伝送が可能な5種類の無線ネットワークと超低遅延映像コーデックにより遠隔からの建機制御について静止時および建機動作時におけるネットワーク性能および映像品質について評価を行った。

いずれの無線回線でも上り、下りともに10–40Mbpsレベルのスループットが得られることが分かった。また建機の走行・旋回においてもネットワークの遅延は10–60msに抑えられ、超低遅延ビデオコーデックを用いることにより、ARQなしの場合End-End遅延量は160ms以下となった。またARQを適用することで遅延量は約100ms増加したが、建機旋回時などにおいても映像品質は大幅に改善でき、効率的な無人施工に必要な最大遅延量をクリアできることが確認された。

一方で、現時点ではまだ通信や映像コーデックに関して特に知識がなくてもすぐに活用できる状況とはいいがたく、建機の自動化・自律化が今後広く普及・利用されるためには機器設定含め建設作業者が簡単に設置活用できるようヒューマンインタフェースの工夫などの取り組みが必要になると考えられる。

謝 辞

本研究は、(国研)土木研究所、ハイテクインター(株)、(株)ジッタ中国、および(株)中電工との共同研究(「自律施工技術基盤 OPERA を利用した機械土工の生産性向上に関する共同研究」)として実施した。本研究にかかわる議論やサポートをいただいた関係諸氏に謝意を表する。

また、本研究を遂行するにあたり、ローカル 5G システムをお貸出しいただいた、国土交通省国土技術政策総合研究所に感謝する。

J C M A

《参考文献》

- 1) 国土交通省, i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～, 2024
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 2) 宮里, 岸野, 視覚情報と触覚情報との間の遅延知覚に関する主観評価, テレビジョン学会誌, Vol.49, No.10, pp.1353-1356, 1995
- 3) Proposal for Supplement 4 to the 04 series of amendments to Regulation No. 46 (Devices for indirect vision) 2016. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2016/wp29/ECE-TRANS-WP29-2016-089e.pdf>
- 4) 伊藤, 藤野, 安藤, 通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデルタスクによる評価, 第 16 回建設ロボットシンポジウム論文集, No.06-1, 2016
- 5) 高村, 映像符号化の歴史, 映像情報メディア学会誌 Vol.77, No.2, pp.194-198, 2023
- 6) 坂手, 符号化装置の制御技術, 映像情報メディア学会誌, Vol.67, No.5, pp. 397-400, 2013
- 7) スターリンク仕様,
<https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1470-99699-90?regionCode=JP>
- 8) 久武, 中里, “建設機械等の遠隔施工と電波利用”, 建設の施工企画, 12.5, pp31-39, 2012
- 9) 木村, “福島第一原発のがれき撤去, 危険作業を遠隔操作で”, 日経 XTECH, 2013
<https://xtech.nikkei.com/kn/article/knp/column/20131028/637735/>
- 10) 総務省, “ドローン等に用いられる無線設備について”,
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>

〔筆者紹介〕

中島 康之 (なかじま やすゆき)
ハイテクインター(株)
専務取締役



本玉 靖和 (ほんたま やすかず)
ハイテクインター(株)
取締役副社長



實田 泰之 (じつた やすゆき)
(株)ジッタ中国
代表取締役

