

無線ネットワーク環境で重機のスムーズな遠隔操縦を実現するサービスの紹介

重機遠隔操縦サービスの紹介

太田 大輔

建築土木業界における生産性向上や働き方改革を実現するにおいては、ICTを活用した施工や生産プロセスそのものの変革が重要であり、建設重機の自動化や遠隔操縦、自律化に大きな期待が寄せられている。重機の遠隔操縦においては無線ネットワークが必要不可欠となるが、通信変動が課題となる。そこで、無線ネットワークの実効伝送量を予測し、伝送量に見合う安定した映像伝送と操作を可能とする適応遠隔制御技術を開発し、同技術を活用した重機遠隔操縦サービスの提供を開始した。

キーワード：遠隔操縦、バックホウ、無線ネットワーク、適応映像配信制御技術、適応遠隔制御技術

1. はじめに

建築土木業界では、熟練職人の高齢化や若手就業者の減少が進み、増加するインフラ補修工事・災害復旧工事への対応が困難な状況にある。従来の危険で過酷な現場のイメージを払拭し、性別や年齢を問わない多様な人財を呼び込むことで、労働力を確保していくことが急務となっている。こうした中、安全・安心な作業、快適な労働環境を実現する重機の遠隔操縦が着目され、技術開発が進められている。

重機の遠隔操縦を実現するには、重機のある施工フィールドから離れた遠隔地に対して、重機の周辺を含む当該エリアの様子を確認するための映像配信と、重機を遠隔操縦するための操作命令を行う必要がある。これらの通信には無線通信が不可欠となる。有線通信では、移動・旋回する重機の作業を制限することになり、通信インフラの構築にも多大なコストが掛かるためである。

一方、無線通信では、導線やファイバーなどのケーブルで電波の伝送路を保証された有線通信とは異なり、電波として空中を伝送することから、距離に依存する電波の減衰、地物による遮蔽、他の電波源の妨害などの影響を受けることになる。これらの影響により、無線通信では、有線通信と比較して、通信の品質は安定しない。その結果、通信品質の劣化が生じやすく、その影響で配信映像の遅延や乱れ、操作命令の遅延や途切れなどが生じ、操作者による操作性の違和感や作業効率の低下のみならず、重機制御の遅れによる事故の危険性につながるおそれがあった。

前述の課題に対し、通信の実効伝送量を予測し、伝送量に見合う映像伝送と操作を可能とする適応遠隔制御技術^{1)~4)}が開発された。通信品質の変動が頻発する無線環境下でも、安定した映像を伝送できるとともに、操作命令の到達遅延も予測し正確な操作を実現できるため、長時間にわたってスムーズな遠隔操縦が可能となる。本稿では、適応遠隔制御技術と、同技術を活用した重機遠隔操縦サービスについて紹介する。

2. 適応遠隔制御技術の紹介

映像配信では、どのような通信路においても、物理的な制約から遅延時間が必ず生じる。そのため、重機を遠隔操縦するために使用する映像配信用の画面などには、施工フィールドの実際の状況が少し遅れて映し出されることになる。長時間にわたってスムーズな遠隔操縦を行うには、遠隔操縦で使用する映像配信の遅延時間を小さくかつ一定に保ちながら、ある程度高い画質を担保することが重要である。特に、遅延時間を一定に保つことが遠隔操縦においては重要となる。遅延時間を一定に保つことができれば、操作者は配信映像の遅れのタイミングに合わせて遠隔操縦することが可能となるためである。また、映像配信の遅延時間を小さくすることで遠隔操縦のリアルタイム性を高めることができ、さらに高い画質を担保することができれば、搭乗時と近い感覚で遠隔操縦を行うことができる。

前述の状況を実現するためには、通信の実効伝送量に対して配信する映像のビットレートが超過しないようにしなければならない。映像のビットレートに対し

て通信の実効伝送量が不十分であれば、画面に映し出される配信映像の再生が停止してしまうためである。特に、通信の品質が安定しない無線通信においては、通信の実効伝送量が大きくかつ頻繁に変動するため、その変動に合わせて配信する映像のビットレートを制御する必要がある。映像のビットレートを固定にする方法では、通信の実効伝送量が劣化した場合でも配信映像の再生が停止しないよう、映像のビットレートは低い値で設定しなければならず、常時、画質の低い映像で遠隔操縦を行うことになり作業効率が大きく劣化するおそれがあるためである。

配信する映像のビットレートを制御する方法として、通信回線の状態に応じて複数の映像ビットレートから選択する方法が知られている。但し、基本的にはフィードバック制御系となるため、今現在の映像のビットレートに対して通信の実効伝送量が不十分となった場合に映像のビットレートを更新する手法となることから、通信の実効伝送量が不十分となった場合に映像の再生が一時停止するおそれがあった。この課題に対して、送信側で映像を配信してから受信側で再生するまでの一連の流れを閉ループ制御系としてモデリングし、PID制御を用いて映像ビットレートを制御する手法なども提案されているが、無線通信のような通信変動が大きい環境への適性は低い。このことから、将来の通信の実効伝送量の変動の予測に基づいて映像のビットレートを制御しながら映像配信することが重要となる。

しかしながら、通信の実効伝送量は、RTT (Round-Trip Time)、パケットロス、可用帯域、クロストラヒック、電波状態など時々刻々変動する複数の要因が複雑に絡み合った結果として表れるため、将来の通信の実効伝送量を確定的に予測することは困難である。また、予測が外れた場合、特に通信の実効伝送量が予測値を下回ってしまった場合には、配信映像の再生が停

止し、遠隔操縦の作業効率を大幅に劣化させてしまうおそれがある。そこで、通信の実効伝送量自体を予測するのではなく、通信の実効伝送量の確率的な広がりや予測する手法が開発された⁵⁾。唯一に予測値を確定することではなく、過去1分間の通信の実効伝送量の変動をAIで分析し、予測モデルをリアルタイムに構築し、未来の通信の実効伝送量の変動を確率的な広がりや予測する。無線通信環境として、LTE (Long Term Evolution)、HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access)、FTTH (Fiber To The Home) + WiFi、の3つの方式にて、それぞれ200秒先までの通信の実効伝送量を90%以上の精度で予測できることを立証した⁵⁾。なお、4G (第四世代) や5G (第五世代) などの無線通信環境に対しては、LTEと同じ直交周波数分割多重の通信方式を用いていることから、同様の予測精度を期待できる。以上から、提案手法は、様々な通信環境に対して、高い精度で通信の実効伝送量の予測が可能である。

この予測技術を用いた映像配信制御技術が開発された^{1), 2)}。通信の実効伝送量の確率的な広がりから通信の実効伝送量が劣化する可能性を予測できるため、配信映像の再生停止を生じさせない最大の映像データサイズを算出することができ、その算出結果から映像のビットレートとフレームレートを導出できる。以上をリアルタイムかつ動的に映像のビットレートとフレームレートを制御することができるため、無線通信のような不安定な通信環境でも、途絶やノイズのない高品質な映像をリアルタイムに配信することが可能となる(図-1)。

映像配信と同様、遠隔操縦の操作命令についても、物理的な制約から遅延時間は必ず生じる。そのため、遠隔地での遠隔操縦の操作命令が実際の重機に反映されるまでには少し時間を要することになる。長時間にわたってスムーズな遠隔操縦を行うには、遠隔操縦の

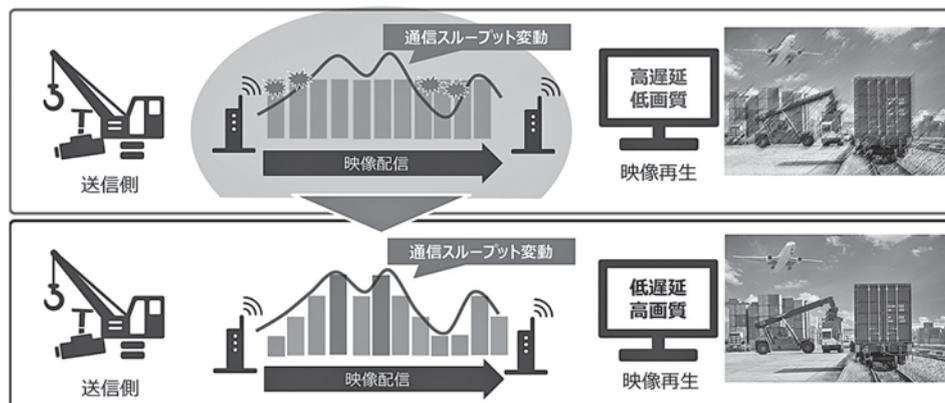


図-1 適応映像配信制御技術

操作命令の到達遅延を小さくかつ一定に保つことが重要となるが、遠隔操縦の操作命令に係るデータサイズは固定となるため、映像配信のようにビットレートとフレームレートを制御することで送るべきデータサイズを変更することができない。そのため、通信の実効伝送量の変動する場合、操作者は操作命令の到達遅延に合わせて遠隔操縦することができない。また、通信の実効伝送量が劣化した場合、作業命令に基づき重機が動くまでの遅延時間が大きくなるため、操作者は、自らの遠隔操縦結果が重機に伝わっていないように感じたり、意図しない動作が行われているように感じたりして、必要以上に遠隔操縦を行ってしまい、結果として、重機が目標地点よりも行き過ぎてしまい、周辺構造物に衝突するなどの危険性があった。

そこで、通信遅延の避けられない環境でも遠隔制御の安定性と操作性を改善するために、操作命令の到達遅延を考慮して遠隔操縦時の重機の稼働量を最適化する手法が開発された^{3), 4)}。これにより、通信の実効伝送量が劣化した場合、操作の行き過ぎの発生を抑制するよう重機の稼働量を調整できるため、無線通信のような不安定な通信環境でも、操作者は安心して遠隔操縦を実施することが可能となる(図-2)。

3. 開発技術の実証

国土交通省が実施した「遠隔操縦における作業効率向上に資する技術(無線通信技術、映像処理技術)」の技術検証に参画し、建機の遠隔操縦において適応遠隔制御技術を用いることで、従来の制御技術(無人化施工方式の第二世代)より優れた作業効率を実現可能なことを実証した(図-3)。本実証は、2019年10月に長崎県の同省雲仙復興事務所の作業現場(水無川1号砂防堰堤内上流)で実施した。本実証では、重機(バックホウ)に設置されたカメラの映像を約100m離れた場所にある遠隔操縦室に無線で送り、その映像を見ながら土砂掘削の遠隔操縦を行った。実証の結果、配信映像の遅延時間は、従来技術参考値の500msと比較して328msと向上でき、配信映像自体に乱れやコマ落ち、ノイズなども生じなかった。また、30m³当たりの作業時間は、従来技術参考値の60分と比較して25分33秒と約2.3倍に向上した。以上から、映像の安定性や作業効率性の改善を立証できた。

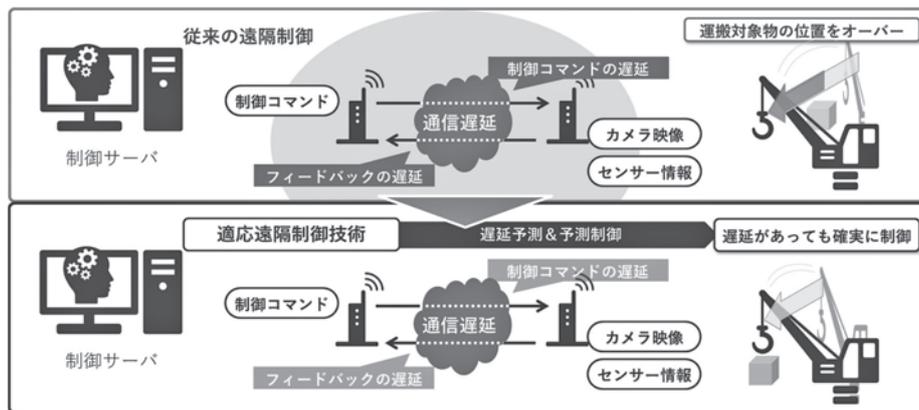


図-2 適応遠隔制御技術

国土省実証：建機遠隔制御の作業効率化

映像配信の遅延を予測による安定した映像伝送
操作コマンドの到達遅延予測で操作ミス発生も抑制

- 重機からのカメラ映像を遠隔操縦室に無線で送り映像を見ながら土砂掘削の遠隔操縦を行う実証実験
- 検証項目すべて(映像の解像度・映像の安定性・作業効率性)において従来技術より優れていることを実証(例) 作業効率性：約2.3倍に向上

図-3 実証結果

4. 重機遠隔操縦サービスの紹介

適応遠隔制御技術を活用した重機遠隔操縦サービスを紹介する(図-4)。本サービスは、建設現場にWi-Fiやローカル5Gなどの無線ネットワークを構築し、適応遠隔制御技術を活用した映像配信用のソフトウェア(適応映像配信ソフトウェア)と遠隔制御用のソフトウェア(適応遠隔制御ソフトウェア)を用いて、現場のカメラ映像を遠隔地にいる操縦者がリアルタイムに確認しながら重機をスムーズに操縦できるようにするものである。

図-5に、本サービスによるシステム構成例を示す。施工フィールドの状況を撮影するカメラとそれを映し出すモニタ、遠隔操縦を行うために重機に取り付けるアクチュエータや遠隔操縦装置、それらを接続するためのネットワーク装置に加え、重機側と遠隔操縦を行う操縦室側に適応映像配信ソフトウェアと適応遠

隔制御ソフトウェアを配置するだけのシンプルな構成で機能する。なお、図-5では、重機のある施工フィールドと遠隔操縦室との間をパソリンク®などの超小型マイクロ波通信システムで接続し、施工フィールド内を5G帯無線アクセスシステムで接続しているが、無線ネットワークの構成はその限りではない。施工現場環境に応じて、LTEや5Gなどのキャリアネットワークやローカル5Gなどのローカルネットワークなど最適なネットワークで構成することができる。また、適応遠隔制御技術は、施工フィールドと遠隔操縦室の間における通信の実効伝送量や遅延時間などのネットワーク状況を予測することができるため、ネットワークの構成自体に依存せずに機能する。そのため、施工進捗に応じた遠隔操縦室の場所や重機の作業場所の変更や、施工現場自体の変更でネットワーク構成を変更しても、他の構成を変更せずに遠隔操縦を継続実施す

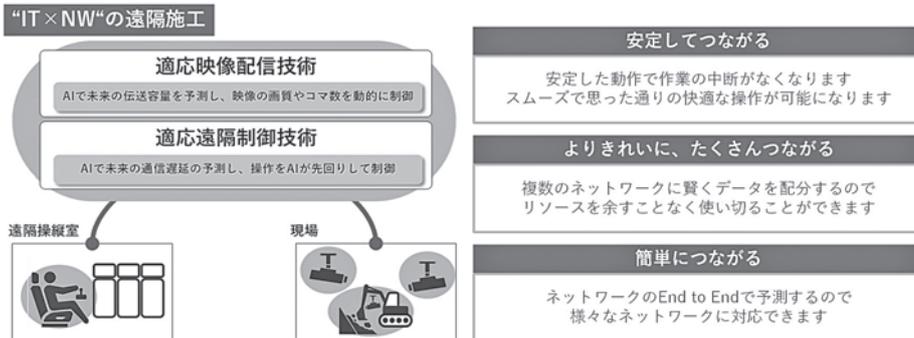


図-4 重機遠隔操縦サービスの概要

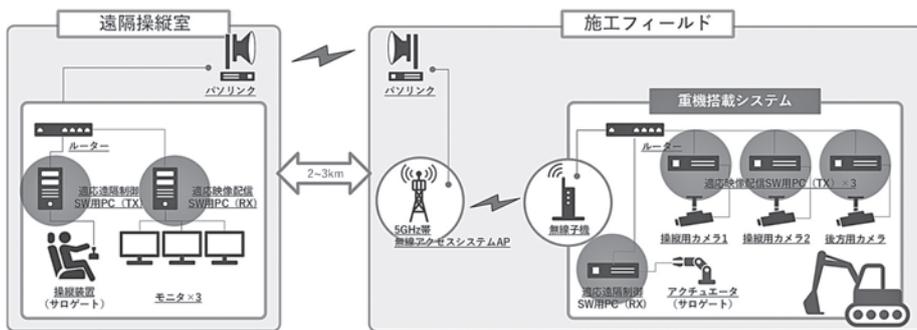


図-5 システム構成例

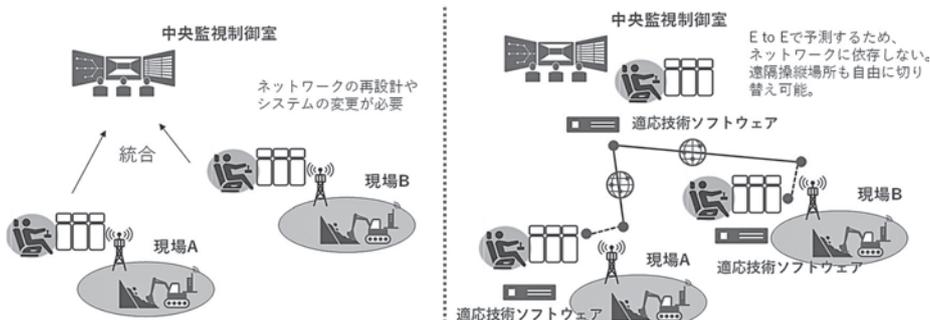


図-6 システム構成例

ることができる。

5. おわりに

建築土木業界を取り巻く環境は厳しく、社会インフラの維持に対して深刻な危機にある。次の世代の人々が、現在と同じように安心して暮らしていける社会を目指し、適応遠隔制御技術を活用した重機遠隔操縦サービスの提供を開始した。なお、遠隔操縦単体での効率性追求には限界があり、搭乗操作による施工を超える作業効率の実現は困難と考える。一方で、人並みの判断力をもつ重機ロボットの開発は容易ではない。遠隔操縦の進むべき方向性は、熟練工の技をより多くの場所で活かせるような進化や、女性や高齢者などこれまでになく人財を活かせるような進化など、人に関して拡張していく方向性と、場所の概念をなくして大規模な現場を共同施工していく、あるいは、自動運転とのハイブリットによって究極の安全な現場を実現していく、という現場そのものの在り方を変えていく方向性があると考えている。目指すべき世界の実現に向けて、遠隔操縦技術を進化させていく。

J C M A

《参考文献》

- 1) 吉田裕志, 笹島和幸, 村瀬勉, 里田浩三, “通信スループット予測に基づく映像配信制御,” 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol.J101-B, No.5, pp.320-337, May 2018.
- 2) H. Yoshida, T. Yoshimoto, T. Innami, K. Ohashi, H. Furuya and N. Mori, “Improving Efficiency of Remote Construction by using Adaptive Video Streaming,” 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Jan. 2019.
- 3) H. Yoshida, T. Kumagai, and K. Satoda, “Dynamic State-Predictive Control for a Remote Control System with Large Delay Fluctuation,” 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Jan. 2018.
- 4) T. Yoshimoto, H. Yoshida, T. Innami, K. Ohashi, H. Furuya and N. Mori, “Improving Workload of Long-Distance Remote Construction Through a WLAN and the Internet,” 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Jan. 2019.
- 5) H. Yoshida, K. Satoda and T. Murase, “Constructing stochastic model of TCP throughput on basis of stationarity analysis,” 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1544-1550, Dec. 2013.

【筆者紹介】

太田 大輔 (おおた だいすけ)
日本電気㈱
新事業推進本部
プロフェッショナル

