

公衆無線網を用いた油圧ショベル遠隔操作

林 宏 樹・山 本 新 吾・三 鬼 尚 臣

携帯電話は、音声通話、映像通信、データ通信と適応範囲を広げており、その用途は拡大の一途を遂げている。更なる用途拡大により、人々の暮らしをより豊かにすることが携帯電話事業者の責務であると考えている。

一方、建設土木現場では、人が立ち入ることができない危険な現場にて、建設機械を遠隔操作し施工を行う無人化施工が行われている。無人化施工は、通常の施工と比較し施工効率が60%程度と低く、その一因として通信距離、無線の干渉、通信遅延など無線における課題がある。この無線における課題に対して、公衆無線網を利用することで施工全体の効率改善を行える可能性があると考えられる。

ここでは、世界初の公衆無線網を介した油圧ショベルの遠隔操作について紹介する。従来の特定小電力無線を利用した遠隔操作とHSDPAを利用した遠隔操作の効率比較実験を行い、ほぼ同等の施工効率を得られることを確認した。また、公衆無線網の発展に伴う無人化施工の将来展望について述べる。

キーワード：無人化施工、遠隔操作、油圧ショベル、情報通信技術、携帯電話網、公衆無線網

1. はじめに

遠く離れた人と情報の伝達を行いたいという欲求は、太古の時代からの人類普遍のものであった。烽火（のろし）から始まったと考えられている遠隔地との情報伝達の手段は、伝書鳩、飛脚、モールス信号とその進化の歴史をたどり、1876年に固定電話の発明へと至る。1979年に自動車電話サービスが開始されて以来、携帯電話は爆発的な発展を遂げ、音声通話以外にもメールやインターネットアクセスなどのデータ通信、テレビ電話による映像通信とその適応範囲を広げている。無線情報通信技術の発展により、いつでもどこでも遠隔地の“人とコミュニケーションを取る”こと及び“データにアクセスすること”が可能となった。

一方、建設土木現場では、1990年11月に噴火した雲仙普賢岳の堆積土砂を緊急に除去する災害復旧工事として、1994年に建設機械を遠隔操作し施工を行う無人化施工が行われた。その後、無人化施工の技術開発が進み災害復旧現場での導入が多くなり、適応範囲の拡大が期待されているものの、通常の有人施工と比較し、施工効率が低い、施工精度が低いなどの課題があり、安全上無人化施工が欠かせない災害復旧現場や特殊で劣悪な作業環境への導入に留まっている。施工効率、施工精度をより改善し、システム導入のコスト

が抑えられれば、効率・精度・コストなどの問題から導入が困難で、従来有人施工では危険であった現場での施工が可能となり、非常に大きな意義があると考えられる。

無人化施工にて一般的に利用される遠隔操作システムは、図-1に示すようなものである。施工フィールド及び建設機械の車載カメラの映像を50GHz帯の簡易無線で伝送し、その映像を見ながら、オペレータは、遠隔操作用コントローラを操作し、遠隔操作機能搭載建設機械に対し429MHz帯の特定小電力無線を介して運転制御信号（操作コマンド）を送ることで、建設機械を遠隔操作する¹⁾。この無人化施工において公衆無線網を用いた建設機械の遠隔操作は行われていないが、公衆無線網を利用することにより通信距離にとらわれない建設機械の遠隔操作が可能となり、また双方向通信による建設機械からの情報伝送が同一無線で可能となり、無人化施工に大きな変化をもたらすこ



図-1 無人化施工遠隔操作システム

とができると考えている。

ここでは過去に例が無い取組みとして、NTT ドコモが提供する公衆無線網の高速パケット通信規格である HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) を利用した建設機械の遠隔操作について述べる。無人化施工における無線技術に関する課題を公衆無線の利用により解決し施工効率の改善に繋げ、また公衆無線網を利用した遠隔操作における将来的な課題発見を行うことを目的とする。HSDPA の技術的特徴としては、無線環境の変動に応じて高速に送信方法を変化させることにより収容加入者数の増大、情報 1 bit 当たりの設備の低コスト化、データ伝送速度の高速化、低遅延化の要求条件を達成していることがあげられる²⁾。遠隔操作のようなリアルタイム性を要求されるアプリケーションが実際に利用可能かどうかの検証には意義がある。公衆無線網は、遠隔地の人と人、または遠隔地の人とデータを繋げることに利用されているものの、“遠隔地の作業と人”を繋げること、すなわち遠隔操作に本格的に利用されていない。通信メディアとして音声・映像の他に作業と人を繋げる遠隔操作を提供することは今後、場所にとらわれない作業や労働の提供による新たな産業の創出が期待できる。また、公衆無線網を利用することにより無人化施工の適応範囲を拡大することは、建設土木業界においても意義がある取組みであると考えている。

本稿では、無人化施工における課題について整理し、世界初の公衆無線網を用いた建設機械の遠隔操作について述べ、施工効率比較実験、伝送遅延計測実験について報告を行い、将来の展望を述べる。

2. 無人化施工における課題

無人化施工における課題は、映像の質が悪い、建設機械にかかっている力が分からないなどの直接施工効率に関わるものと、システム構築に時間とコストがかかる、建設機械の輸送コストがかかる、無線が干渉し建設機械が動かさないことがあるなどの工事全体の進捗やコストに関わるものと大きく2つに分類できると考えられる。文献³⁾やオペレータからのヒアリングなどから得られた無人化施工の課題を以下にまとめる。

(1) 施工効率に関わる課題

- ・映像の視野角が狭い、奥行きが分かりにくい
- ・映像を見ることにより目が疲れる
- ・建設機械にかかっている力や建設機械の傾きが分

からない

- ・操作レバーの操作感が悪い
- ・操作の遅れがあり、操作しにくい

(2) 工事全体の進捗やコストに関わる課題

- ・遠隔操作機能搭載建設機械の数が少なく、建設機械の輸送コストがかかる
- ・無線が干渉し、同時に動かせる建設機械の数が限られている
- ・150 m を超える遠隔操作を行うためには無線中継器が必要¹⁾となり、コストがかかる

以上のように無人化施工における課題としては、施工効率に関わる課題と、工事全体の進捗やコストに関わる課題との大きく2つに分けられる。従来のこれらの課題についての取組みとしては、映像関連に関わる取組みが多い³⁾。オペレータから離れた施工現場の状況を知る手段は、映像のみである場合が多く、映像の改善が施工効率の改善に繋がると考えられているためである。例えばモニタの大きさ、カメラの画角が施工効率にどのように影響しているかを調査し、広角のカメラを利用した方が施工効率が向上するという報告がある⁴⁾。また、工事全体の進捗やコストに関わる課題に対する取組みとしては、遠隔操縦ロボットロボQの取組みがある⁵⁾。ロボQは、遠隔操作機能搭載建設機械の数が少ないことに着目し、建設機械の輸送コスト軽減、初動体制の迅速化を目的とした、汎用の建設機械に現地で簡便に着脱可能なコンパクトタイプの遠隔操縦ロボットである。

従来の取組みとして、映像関連、初動体制迅速化に対する取組みは多く見られる。無線関連技術に関する取組みとして、無線 LAN を用いる取組みなどあるものの⁶⁾、多くは見られない。無線関連技術に関する課題としては、

- ・操作の遅れがあり、操作しにくい
- ・無線が干渉し、同時に動かせる建設機械の数が限られている
- ・150 m を超える遠隔操作を行うためには無線中継器が必要となり、コストがかかる

などの課題があげられ、これらの課題を解決することで無人化施工全体の効率を改善することが可能であると考えられる。

そこで我々は、建設機械の遠隔操作に公衆無線網の適用を提案する。公衆無線網を利用することにより、無線の干渉を軽減し、また通信距離を飛躍的に伸ばした遠隔操作が可能となる。通信遅延については後述するが、現状の公衆無線網においても従来の特定小電力

無線とほぼ遜色の無い通信遅延となっていることを確認している。

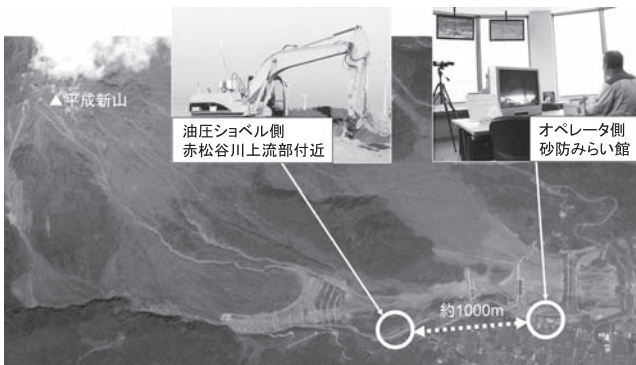
3. 公衆無線網を利用した油圧ショベル遠隔操作実験

公衆無線網を利用した建設機械の遠隔操作を検証するべく、2008年10月に普賢岳赤松谷川上流部付近にて、世界で初めてNTTドコモが提供するHSDPAの公衆無線網を利用した油圧ショベルの遠隔操作実験を行った。なお本実験は、国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所の協力のもとに行われた。

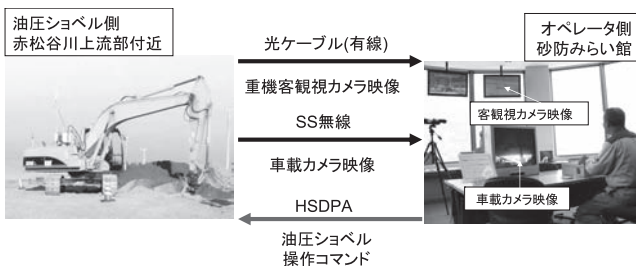
(1) 実験概要及びシステム構成

実験は、2008年10月9日に行った。晴天に恵まれ視界は良好であった。油圧ショベルとオペレータとの位置関係を図一2に示す。油圧ショベルとオペレータとは直線距離にして約1000mであった。これは従来の特定小電力無線などを使用する場合、無線中継器が必要となる距離である。オペレータは大野木場砂防みらい館4階監視ルームから普賢岳赤松谷川上流部付近にある油圧ショベル（キャタピラーージャパン社製320CL）を遠隔操作した。

実験のシステム構成について図一3に示す。油圧ショベルは、今回試作したHSDPA対応遠隔操作コントローラを用い、遠隔操作を行った。映像について



図一2 実験場所上空写真

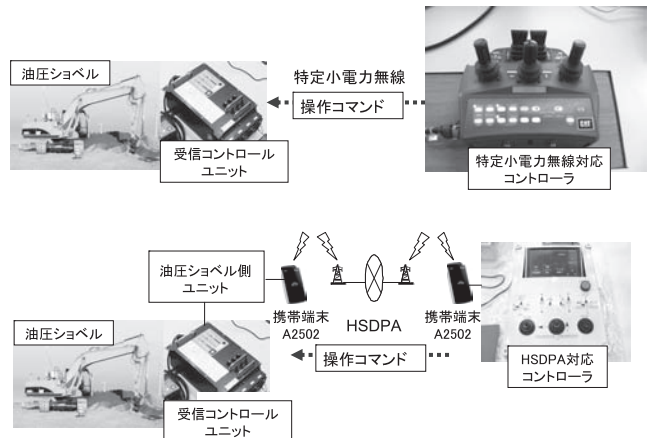


図一3 実験システム概要

は、油圧ショベルキャブ上の車載カメラ映像及び客観視用カメラとして現地は備え付けの監視用カメラを用いた。

(2) 従来システムとの構成比較

今回の実験では、油圧ショベルの操作コマンドはHSDPAを介して伝送し、映像データは従来のSS無線及び光ケーブルにて伝送した。図一4に従来の特定小電力無線を利用したキャタピラーージャパン社製の遠隔操作コントローラと、HSDPA対応遠隔操作コントローラとのシステム構成の比較を示す。従来のシステムでは、オペレータからコントローラの各ボタンやジョイスティックにより与えられる操作コマンドはRS422信号に変換され、特定小電力無線を介して油圧ショベル側受信コントロールユニットに送信している。受信コントロールユニットはRS422信号を解析し、各電磁バルブなどに信号出力することで油圧ショベルが動作する。一方、今回試作したシステムでは、操作コマンドのRS422信号は、遠隔操作コントローラ及び建設機械共にHSDPAで接続された携帯電話端末（NTTドコモ社製A2502）や油圧ショベル側ユニットを介して、受信コントロールユニットに入力している。受信コントロール以下油圧ショベルが動作するまでの部分は従来システムと同様である。



図一4 遠隔操作のシステム構成比較

(3) 実験時の様子

事前に電波計測を行い、普賢岳赤松谷川上流部付近及び大野木場砂防みらい館付近がHSDPAのエリアであることを確認した上で今回の実験を行った。実験は、まず砂防みらい館より赤松谷川上流部付近の油圧ショベルを遠隔操作し、その後赤松谷川上流部付近へ移動、目視で遠隔操作した。複数のオペレータの方に遠隔操

作を体験して頂いたところ、操作レバーの形状が従来と違うことについて指摘を受け、HSDPA を介した遠隔操作は従来と比較し若干遅延が大きいように感じるものの遠隔操作すること自体に全く問題はないとコメントを頂いた。

今回の実験では、映像の伝送は従来のシステムで行ったが、建設機械の操作コマンドを公衆無線網HSDPA を介して伝送し遠隔操作を行った。オペレータのコメントより、体感上特に問題なく遠隔操作可能であることを確認した。このような公衆無線網を利用した建設機械の遠隔操作は、世界で初めての試みであり、通信技術の発展及び建設施工技術の発展にとって意義があるものと考えている。

4. 施工効率比較実験

HSDPA を介した遠隔操作が従来の特定小電力無線を介した遠隔操作と比較しどの程度の施工効率が得られるかを検証するとともに、通信遅延が施工効率にどの程度影響を与えるのかを検証するために、施工効率比較実験を行った。また、HSDPA 及び特定小電力無線の通信部分の遅延の計測実験を行った。施工効率比較実験はキャタピラージャパン(株)の協力のもと、キャタピラージャパン秩父デモセンターにて行われた。

(1) 施工効率比較実験方法

施工効率を比較するために、油圧ショベル（キャタピラージャパン社製 320DL）を用いて一定の区画（5 m × 4 m：深さ 1 m）を掘削し、掘削にかかった時間を計測する実験を行った。比較を行った操作条件は、

- ① 通常の有人施工
- ② 特定小電力無線を用いた無人化施工
- ③ HSDPA を用いた無人化施工
- ④ 通信遅延なしの無人化施工
- ⑤ 通信遅延 100 ms の無人化施工
- ⑥ 通信遅延 350 ms の無人化施工

以上の 6 パターンとした。図-5 に掘削範囲と油圧ショベルの位置関係を示す。油圧ショベルは適宜移動し作業を行った。掘削範囲は 5 m × 4 m、深さ 1 m とし、掘削後押し固めて掘削範囲を成型が終了した時点で、作業完了とした。掘削範囲はあらかじめ白線で土表面に記し、オペレータに分かるようにした。また放土範囲は掘削範囲から 90 度左方向に旋回したあたりとした。掘削開始から作業終了までの時間を計測し、作業終了後、掘削範囲の計測を行い、土量を計算した。

オペレータは、無人化施工において主に油圧ショベ

ルを操作している無人化施工歴 7 年の熟練オペレータ 1 名とした。

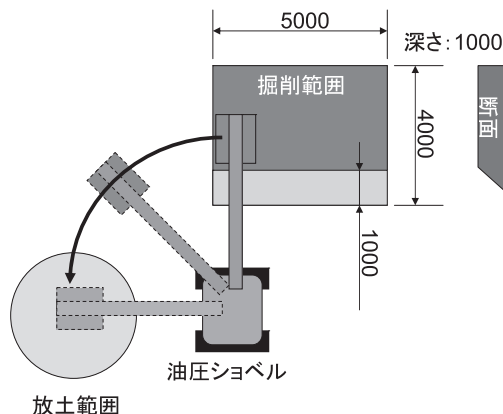


図-5 掘削範囲と油圧ショベルの位置関係

(2) 実験システム構成

実験システム構成図を図-6 に示す。通信遅延なし、通信遅延 100 ms、通信遅延 350 ms と通信遅延を擬似的に付加した実験を行うため、これら 3 つの条件では、操作コマンドを有線で送信し、経由するネットワークエミュレータにて通信遅延を擬似的に付加させた。擬似的に付加した遅延は、それぞれ揺らぎのない固定値とした。映像については、油圧ショベルキャブ上の車載カメラ 1 台と客観視用カメラ 1 台の映像を有線でオペレータ側に伝送し、それぞれを 20 インチカラー液晶ディスプレイに表示した。特定小電力無線を用いた条件では、キャタピラージャパン社純正の遠隔操作コントローラを、HSDPA 及び通信遅延を付加した 3 つの条件では、試作した HSDPA 対応コントローラを用いて実験を行った。実験時の様子を図-7 に示す。

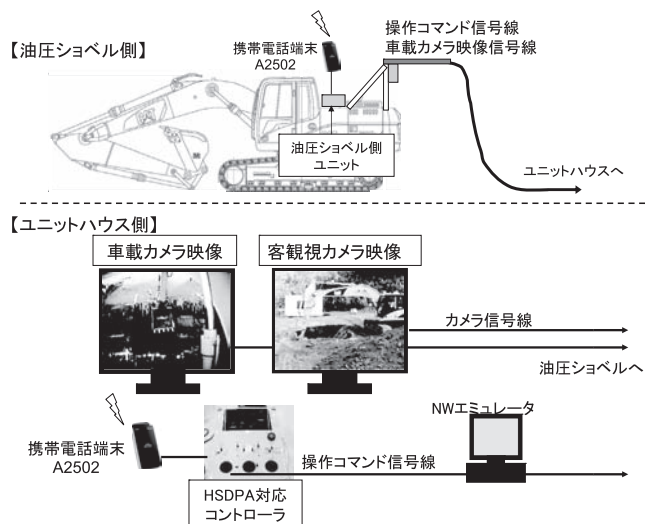


図-6 実験システム構成図

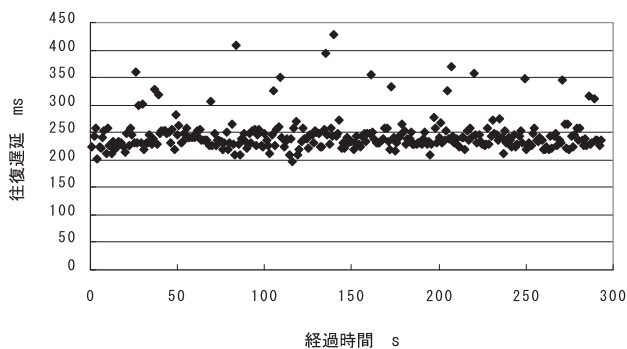


図一七 実験時の様子

(3) 実験結果

実験結果について、表一1に示す。効率については、掘削した土量を作業時間で割り、通常の有人施工の効率を100%とした。また本実験のHSDPAを介した遠隔操作効率計測を行っていた際のHSDPA対応コントローラと油圧ショベル側ユニットとの間の往復通信遅延について図一8に示す。キャタピラージャパン秩父デモセンター（埼玉県秩父市）における実験当時の環境での最小往復遅延は198ms、最大往復遅延は427ms、平均往復遅延は244msとなっており、片道の通信遅延は約120msであった。

実験の結果、従来の特定小電力無線を介した遠隔操作とHSDPAを介した遠隔操作では、効率56.7%と56.8%とほぼ同等の効率を得られることが分かった。オペレータも「HSDPAでは、特定小電力無線との遅延の違いをほとんど感じなかった」とコメントした。また、通信遅延を比較してみると、遅延350msでは44.1%、遅延100msでは59.9%、遅延なしでは、66.5%と遅延が小さくなることにより効率が向上することが分かる。従来、通信遅延と施工効率との関係について言及した文献はなかったが、通信遅延が施工効率に大きな影響を与えることが本実験より明らかに



図一八 実験時の往復通信遅延データ

表一1 効率比較実験結果

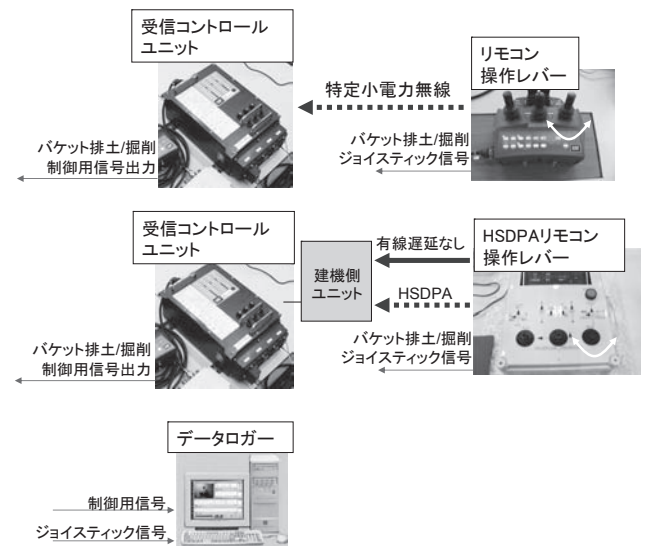
	① 通常有 人施工	無人化施工				
		②特定小 電力無線	③ HSDPA	④遅延 なし	⑤遅延 100ms	⑥遅延 350ms
時間(分:秒)	7:14	12:45	12:50	11:07	11:54	13:51
土量 m ³	19.44	19.44	19.58	19.86	19.17	16.41
効率(通常を1)	100.0%	56.7%	56.8%	66.5%	59.9%	44.1%

なった。

(4) 通信遅延計測実験

HSDPA及び特定小電力無線について、無線区間の通信遅延を比較するために、通信遅延計測実験を行った。実験システム構成を図一9に示す。計測方法は、コントローラの操作レバー操作信号（右レバー左右動作：バケット排土/掘削動作）と油圧ショベル側受信コントロールユニットからの制御用出力信号とを同期させながら計測し、操作レバー操作から制御用信号出力までの時間を計測した。計測を行ったのは、

- ①特定小電力無線
 - ②HSDPA対応コントローラでHSDPA接続
 - ③HSDPA対応コントローラで有線接続(通信遅延なし)
- の3つの条件である。



図一九 通信遅延計測実験システム構成

計測結果を表一2に示す。結果は10回分の計測データを平均したものである。また、本通信遅延計測実験はNTTドコモR&Dセンタ（神奈川県横須賀市）にて行ったが、実験時の環境では、最小往復遅延155ms、最大往復遅延340ms、平均往復遅延191msとなっており、片道の通信遅延は約95msであった。

結果をみると、実験時での環境では、特定小電力無線とHSDPAでは、操作レバー操作から受信コント

表一 2 通信遅延計測実験結果

	操作レバー操作から 制御用信号出力までの時間 ms
①特定小電力無線	229
② HSDPA	223
③遅延なし	108

ローラからの制御用信号出力までの時間が 229 ms と 223 ms となっており、ほぼ同等の結果であった。通信遅延計測実験時の片道通信遅延は約 95 ms であった。通信遅延なしの場合の実験結果が 108 ms であるため、203 ms (95 ms+108 ms) が HSDPA の場合の推測される遅延時間であるが、通信遅延の揺らぎなどもあるため、223 ms という結果は妥当であると考えられる。これらのことから特定小電力無線における通信遅延は、本実験環境での HSDPA における通信遅延とほぼ同等であると考えられ、約 100 ms 前後であると考えられる。

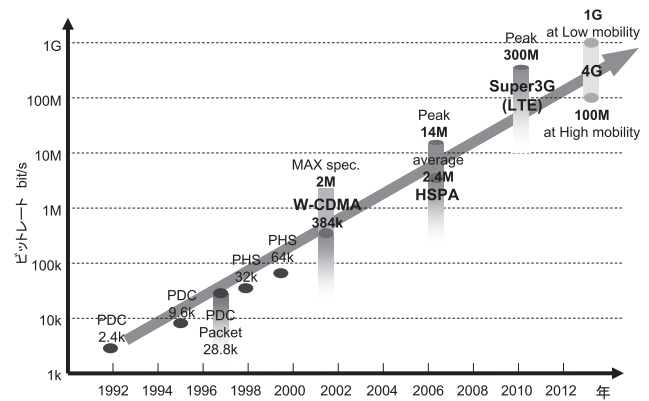
片道通信遅延は、効率計測実験時は約 120 ms であった。したがって効率計測実験時は、特定小電力無線と比較し約 20 ms 程度 HSDPA の方が遅延が大きかったと推測される。秩父デモセンターでの計測時と NTT ドコモ R&D センタでの計測時に見られるような通信遅延の変化は、計測時の電波状況、通信基地局の状態、通信経路など様々な要因が考えられ、予測は難しい。この通信遅延の変化への対応は今後の課題と言えるだろう。

5. まとめ

本稿では、世界初の公衆無線網を利用した建設機械の遠隔操作実験について紹介し、施工効率実験結果、通信遅延計測実験結果について述べた。

普賢岳赤松谷川上流部付近での HSDPA を介した油圧ショベルの遠隔操作実験では、通信距離約 1000 m での遠隔操作に成功し、公衆無線網を用いた建設機械の遠隔操作としては世界で初めての事例となった。施工効率実験を行うことで、従来の特定小電力無線を介した無人化施工と比較し、HSDPA を介した無人化施工では、ほぼ同等の効率が得られることを確認した。また、3つの通信遅延条件で効率比較実験を行い、通信遅延が短ければ施工効率の向上に繋がることを確認した。今回の計測実験では、HSDPA での片道通信遅延が約 100 ms 程度あり、特定小電力無線とほぼ同等であることを確認した。

公衆無線網は図一 10 に示すように⁷⁾、今後も LTE



図一 10 公衆無線網の発展
(文献⁷⁾より再構成)

(Long Term Evolution) や 4G と研究開発を進めており、通信遅延は更に短くなると考えられる。現状の HSDPA で、従来の特定小電力無線と同等の施工効率が得られており、今後 LTE で見込まれている通信遅延の短縮により更なる改善が期待できる。加えて通信帯域の向上により、映像も公衆無線網を介して伝送できるようになれば、従来のような無線中継器が必要のない無人化施工が可能となると考えられる。以上に述べたように、将来的には公衆無線網の利用により、更なる効率向上のほか、通信距離にとらわれる必要のない遠隔操作と無線の干渉の軽減が可能となり、無人化施工の適応範囲拡大が期待される。また公衆無線網の双方向通信を利用することにより、建設機械やその他の計器の情報を施工に活かす情報化施工への展開も考えられる。

6. おわりに

ここでは、公衆無線網を利用した建設機械の遠隔操作についての取組みについて紹介した。まだ実験段階であり、実際の施工に利用するにはいくつか課題が存在すると考えている。今回の実験を通して例えば、建設機械とコントローラとの通信セッション確立、操作レバーの位置や形状、試作りモコンに用いたディスプレイの視認性向上など実装上の課題が見つかった。また、将来的な課題として無線通信路の大きな変動に伴う遠隔操作データ通信の対応、同時使用する建設機械の台数が増加した際の対応、災害時の音声通話と遠隔操作データ通信との共存などの課題がある。これらの課題に対しては、これまでに SIP を用いたセッション確立、通信の冗長性確保や QoS 制御^{8),9)} といっ

た取組みがあるので合わせて参照されたい。

建設機械の遠隔操作を公衆無線網を介して行うことで、より安全により効率的に行えるように研究開発を進めることにより、無人化施工に留まらず、情報化施工など建設土木施工全体に公衆無線網の適用を行えるようにしたい。また公衆無線網を利用して遠隔地の“人と作業”を結びつける遠隔操作というアプリケーションが、この取組みをきっかけに拡大すれば幸いである。

謝辞：施工効率計測実験を行うにあたり、キャタピラージャパン株式会社様には大変お世話になりました。お礼申し上げます。また、実験にご協力いただきました皆様に感謝いたします。



《参考文献》

- 1) (財)先端建設技術センター：緊急時の無人化施工ガイドブック，大成出版社（2001.7）
- 2) 後藤喜和，松谷英之，大矢根秀彦，深澤賢司：HSDPAの概要および無線ネットワーク装置開発，NTTドコモテクニカルジャーナル，Vol.14 No.3，pp.6-13（2006.10）
- 3) 柳沢雄二，山元弘，邵輝，境田右軌，野末晃，山口崇：作業機械の遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する研究，第11回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.253-262（2008.9）
- 4) 宮島実，関川健一，以倉直隆：無人化施工映像技術に関する検討（バックホウ作業を主体として），第11回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.223-228（2008.9）
- 5) 木村直紀，小阪高志，牧野千代春：遠隔操作ロボット（ロボQ）の今

後の展開，建設の施工企画2007年12月号，pp.10-14（2007.12）

- 6) 井上淳，久野晴生：複数の簡易遠隔操縦建設機械による実証実験，九州技報，第39号論文（2006.7）
- 7) 大矢智之，長敬三，橋橋祥一：将来の高速大容量通信に向けた無線要素技術，NTTドコモテクニカルジャーナル，Vol.16 No.2，pp.24-30（2008.1）
- 8) 林弘樹，田村隆幸，高畑実：遠隔操作ロボット用通信モジュール，日本ロボット学会誌，Vol.26 No.3，pp.277-283（2008）
- 9) Takayuki Tamura, Hosei Matsuoka, Minoru Takahata：Seamless PPP Migration between Disparate Wireless Networks，インターネットコンファレンス2008論文集，pp.25-31（2008.10）

【筆者紹介】

林 宏樹（はやし こうき）
 (株)NTTドコモ
 先進技術研究所
 コミュニケーションメディア研究グループ



山本 新吾（やまもと しんご）
 (株)フジタ
 技術センター
 先端システム開発部



三鬼 尚臣（みき ひさおみ）
 (株)フジタ
 土木本部
 土木統括部
 機械部



橋梁架設工事の積算

——平成20年度版——

■改定内容

1. 共通（鋼橋，PC橋）
 - ・共通仮設費率の改訂
 - ・架設用仮設備機械等損料算定表の改訂
 - ・機械設備複合損料の改訂
2. 橋種別
 - 1) 鋼橋編
 - ・設備損料の諸雑費の改訂（ケーブルクレーン，送出し設備，門型クレーン，トラペラクレーン等）
 - ・架設桁組立・解体歩掛の改訂
 - 2) PC橋編
 - ・プレグラウトPC鋼材縦締工歩掛の新規設定
 - ・コンクリート床版の炭素繊維補強工法の吊

足場改訂

- B5判／本編約1,120頁（カラー写真入り）
別冊約120頁 セット
- 定 価
非会員：8,400円（本体8,000円）
会 員：7,140円（本体6,800円）

※別冊のみの販売はありません。
 ※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。
 ※送料は会員・非会員とも
 沖縄県以外 600円
 沖縄県 450円（但し県内に限る）

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>