

3. 携帯電話通信による超長距離遠隔操作実証実験の報告

株式会社フジタ

○ 野末 晃
三鬼尚臣
渋谷光男

1. はじめに

1994年に雲仙普賢岳で始まった無人化施工は、火山堆積物を除石することから始まり、現在ではコンクリート構造物である砂防えん堤を施工することが可能となっている。

2011年は世界的にも未曾有な巨大地震による災害を経験し、無人化施工技術が福島第一原発の瓦礫撤去に活用された。無人化施工での技術的な課題として、無線の到達距離が短いことと無人化施工設備の立ち上げに時間が掛かり過ぎることが挙げられる。そこで最近、通信速度の高速化が顕著な移動体通信回線網（携帯電話通信）を利用した長距離遠隔操作の有効性の検証を行った。既に2008年10月に雲仙普賢岳赤松谷川上流部付近にてNTTドコモが提供するHSDPAの携帯電話通信網を利用した長距離遠隔操作実験を実施し、従来の特定小電力無線による遠隔操作に匹敵する成果を得た⁽¹⁾。そこで、次世代高速通信LTE（Long Term Evolution）元年と言われる2011年の9月には、HSPAを利用して、操作信号に加えて映像信号を長崎県から約1,000km離れた千葉県の油圧ショベルまで伝送する遠隔操作掘削実験を実施した。本論文は、前述の実験での課題、事前の屋内試験における映像伝送の遅延や超長距離遠隔操作実験での課題を整理し、その解決方法と合わせて、携帯電話通信による操作・映像信号伝送の可用性について報告するものである。

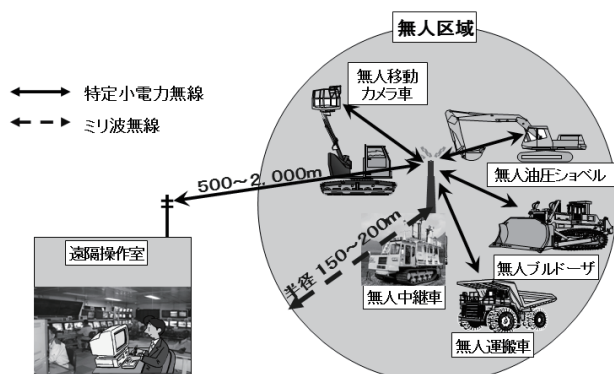


図-1 無線中継方式概要

2. 超長距離遠隔操作実験の目的

2.1 無人化施工における課題

従来の無線中継方式を図-1に示す。この方式は、特定小電力無線の到達距離が短いために比較的到達距離の長いミリ波無線を搭載した移動中継車を介して行うシステムである。

無人化施工においては施工効率と無線環境に関わる課題があり、特に無線環境に関わる課題⁽²⁾を以下に示す。

- 1) 操作の遅れがあり、操作しにくい。
- 2) 無線干渉により同時稼働台数が限られる。
- 3) 150mを超える遠隔操作を行うためには中継設備が必要で準備工に多大な時間とコストがかかる。

2.2 超長距離遠隔操作実験の目的

前述の2)と3)の解決手段として、携帯電話通信による超長距離遠隔操作実験を行い、その可用性を検証することを目的とした。また、1)に関しても操作の遅延の解析を行うこととする。図-2に2008年に実施した携帯電話通信による遠隔操作実験のシステム構成図を示す。

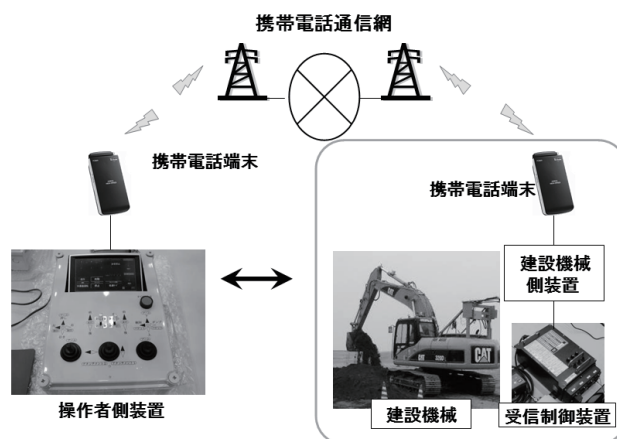


図-2 システム構成図

当時の実験で課題⁽¹⁾の一つとして建設機械とコントローラの通信セッションの確立があり、さらに操作側のユニットのハードとソフトを独自開発しているために拡張性を阻害している点があった。この2点を解決するため今回は、市販のモバイルルータを採用し、検証を行うことも目的とした。

3. 無人化施工の映像遅延

3.1 遠隔操作における動画圧縮方式

遠隔操作において映像情報は必要不可欠なものであることから、映像伝送に必要な伝送量を検討する。アナログテレビのカラー映像信号はNTSC方式のコンポジット映像信号であり、伝送フレーム数：30fps、有効走査線：480本である。これはドットに換算すると640×480である。これをデジタル情報として伝送するには640×480=307,200画素に色情報(24bit)と30フレーム/秒を乗算すると221Mbpsの伝送速度が必要となる。無線LANのIEEE802.11gでの最大伝送速度54Mbpsではあるが実効伝送速度は、15Mbps程度であるので、現状では伝送できない。そこでかなりの圧縮が必要である。現在普及している中で最も圧縮効率の良い(約1/100が可能)H.264動画圧縮方式を採用した。

3.2 遠隔操作における遅延

無人化施工における施工効率の低下の主要因として操作遅延が挙げられる。従来は、操作信号を特定小電力無線で伝送し、映像信号をミリ波無線で送信している。この場合、映像信号はアナログのまま変調し、広い帯域を利用して送信するため映像の遅れは殆ど無いに等しい。論文⁽²⁾によると特定小電力無線の場合、ラジコン装置のレバー操作から油圧シリンダが動作するまでの遅延が500ms程度としている。有人搭乗操作の場合が300msとしているので200ms程度が遠隔操作による遅延となる。



図-3 デジタル伝送による操作遅延と映像遅延

2007年頃から映像信号は無線LANの普及に伴い、デジタル伝送に移行してきた。ビデオコンバータにより、アナログからデジタルにエンコード、伝送後にデジタルからアナログにデコードされるため、遅延が発生し操作性に悪影響を及ぼしている。それゆえ映像の遅延を検討する必要性が生じてきた。今後は図-3に示すようにオペレータはモニターを見て操作しているので、映像遅延も含めた全体の遅延として検討することが重要になる。

3.3 現状の遠隔操作における遅延測定

現状の無人化施工で実施している重機搭載カメラの映像がどの程度遅延があるかを測定し、その値を今回の評価指標値とした。

測定法は遠隔操作器の操作レバー、搭載カメラ映像のモニター、ストップウォッチ表示ソフトのPC画面を同時にデジタルビデオカメラで撮影する。動作の対象は、油圧ショベルのバケット開閉、アーム引き伸ばし、ブーム引き伸ばし、左右旋回動作を各10回ずつ行いレバー動作開始時間とモニター上の建機の動作開始までの遅延量を測定した。

遅延量の測定はビデオデータを1コマずつ再生することで行った。PCの表示ソフトは1秒間に40フレーム表示されるので±25msecの精度となる。

測定結果のグラフを図-4に示すように遅延量は、バケット980ms、アーム1,040ms、ブーム1,210ms、旋回1,210msであった。無線LANと比較して、伝送能力が低いHSPAは評価判定の指標値としてそれぞれの許容増加値は、映像情報の遅延が600ms以上から作業時間が増加する⁽³⁾とされていることから500ms以内とした。

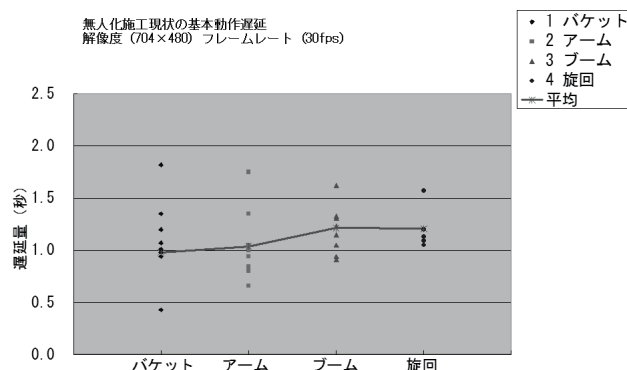


図-4 無人化施工における基本動作遅延測定結果

なお、ビデオエンコーダの各設定値と伝送媒体は、画像解像度：704×480、1秒間のフレーム数：30、圧縮率：30%であり、無線LANを利用している。

3.4 評価試験の仕様策定

超長距離遠隔操作実験の事前評価として屋内による評価試験を実施した。評価指標となる仕様をメーカーのデザインツールにより、画像解像度、フレームレート、圧縮率、画像変化率のシミュレーションを行った。画像解像度は高解像度(4CIF:704×480)と低解像度(CIF:352×240)の2種類、フレームレートは10、12、18、24、30の5種類、圧縮率は10、30、50%の3種類、画像変化率は最大、大、中、小、最小の5段階の150通り行った。

画像変化率が最大の結果を表-1に示す。HSPAの上り伝送速度は、300～500kbpsであることから下限を350kbpsとして、高解像度:12fps、50%圧縮、低解像度の場合:30fps、50%圧縮で検証することにした。

表-1 映像パラメータ関連表（画像変化率最大）

画像変化率最大					
フレーム レート (fps)	圧縮率 (%)	解像度 (pixels)	転送速度 (kbps)	解像度 (pixels)	転送速度 (kbps)
30	10	704×480	1,210	352×240	444
24			1,010		368
18			785		290
12			565		209
10			518		190
30	30		761		302
24			645		252
18			508		199
12			364		141
10			334		128
30	50		690		268
24			572		217
18			452		173
12			324		124
10			296		113

4. HSPA による遠隔操作屋内評価試験

4.1 屋内試験の通信環境調査

評価試験を行う前に HSPA の通信環境調査を実施した。調査は、モバイル PC に HSPA 端末を接続してインターネット上の通信速度測定サイトを利用した。試験場所は埼玉県飯能市であり当然サービスエリア内にあることは確認済みである。

下り受信速度 1,415kbps 上り送信速度 474kbps

4.2 接続試験

2008 年の実験時の課題の解決策としてモバイルルータを採用し、VPN（バーチャルプライベートネットワーク）機能、DDNS（ダイナミックアップデイトドメインシステム）機能による通信セッション確立の自動化とセッションキープアライブ機能（ハートビート信号）による通信異常切断時自動復旧を検証する。

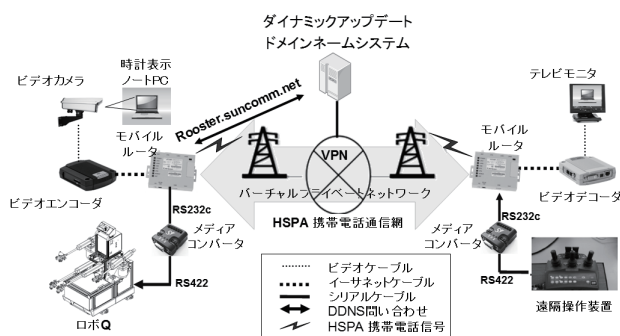


図-5 接続試験の構成図

図-5に接続試験機器の構成と DDNS 機能の模式図を示す。屋内試験においては、油圧ショベルの代わりに簡易遠隔操縦装置（ロボ Q）を用いた。ロボ Q は国交省九州技術事務所とフジタが共同開発したもので、一般の油圧ショベルに搭載することで遠隔操作を可能するための装置である。

4.3 接続試験結果

モバイルルータの自動再接続機能により、立上げ時および回線切断後の再接時に自動で接続が行わ

れることを確認した。自動再接続のためのキープアライブ設定は、60 秒間回線が切断しないと再接続しない。これを 15 秒間に短縮し、実際にアンテナ線を外してからアンテナを再接続後 15 秒間で通信が再開することを確認した。これらのことから HSPA による自動接続・再接続とダイナミック DNS の検証が行えたことは実用システムとして十分機能することを確認した。

4.4 映像伝送遅延測定

超長距離遠隔操作実験の事前評価として屋内での映像伝送評価試験を行った。

HSPA 伝送試験の前にビデオコンバータの性能を測定するためにビデオエンコーダとデコーダを直接ネットワークケーブルで接続して測定した。ネットワークケーブルの伝送遅延は RTT (Round Trip Time: 往復遅延時間) 1ms 以下なのでほぼ 0 とみなすことが出来る。10 回測定した平均値が 140ms であった。次に図-6 のように HSPA 回線を介して測定したところ 10 回の平均値が 320ms となった。前節の 140ms を差し引いた 180ms が HSPA 回線による伝送遅延と推定した。

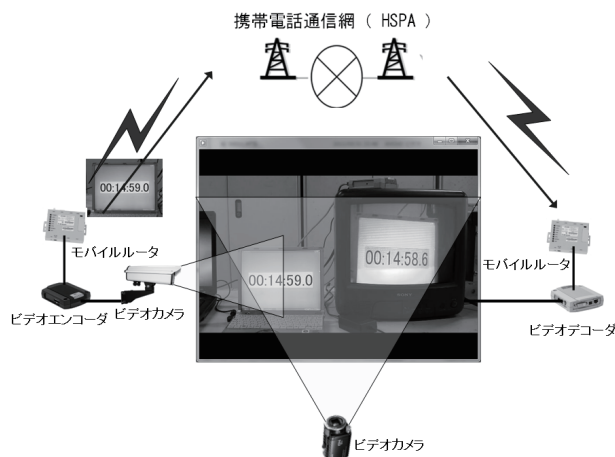


図-6 映像伝送遅延測定状況

5. 超長距離遠隔操作実験

5.1 超長距離遠隔操作実験概要

広範囲な警戒区域外から無人化施工による作業を実現するために超長距離の遠隔操作実証実験で携帯電話通信網（HSPA）を利用して実施した。図-7 のように長崎県の遠隔操作室と千葉県の造成現場にある油圧ショベルは 1,000km 離れている。遠隔操縦専用機は、全国に 2011 年 8 月集計でわずか 54 台（建設無人化施工協会 HP から）が登録されているが既に稼動中等で調達が困難であった。そこで、屋内試験と同様にロボ Q を油圧ショベルに装着して遠隔操作の実験を行った。但し、ロボ Q を搭載したことで遠隔操縦専用機と比較して操作信号を受信してからロボ Q の空圧シリンダが動き

出すまでの制御遅延が 50～100ms あるためその分遅延量は増大することを考慮しなければならない。

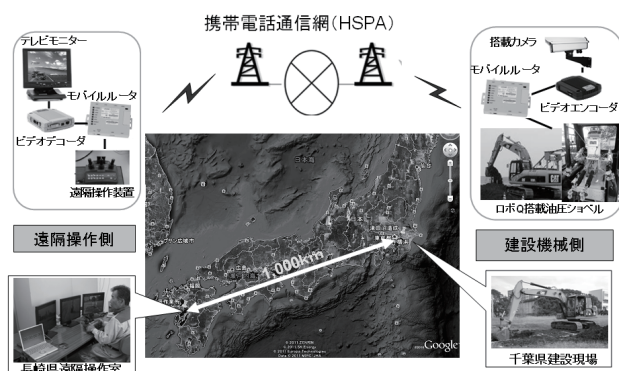


図-7 超長距離遠隔操作実験位置図

5.2 現地通信環境調査

実験を行うには事前に通信環境の調査が必須であり、調査の結果を以下に示す。調査方法は、屋内試験と同様である。

長崎県操作側：下り受信速度 829kbps

上り送信速度 530kbps

千葉県建機側：下り受信速度 2,028kbps

上り送信速度 413kbps

操作信号のデータ量は 2kbps もあれば十分であるので考慮する必要がない。重要なのは、映像信号であり、千葉県側の上りの送信速度 413kbps が上限と考える。表-1 を参照すると低解像度では問題がないが高解像度の場合は、18 フレームの 50%圧縮率が限界と推測することができる。

5.3 基本動作映像遅延測定

実験基本作業実験を行う前に 3.3 で実施した測定と同様に約 1,000km の距離に対し、HSPA 回線網を介して各動作の映像遅延を含めた総合遅延を測定し評価を行った。図-8 が低解像度での測定状況である。なお、映像の各パラメータを表-2 に記す。

表-2 映像パラメータと推定伝送速度

ケース名	解像度 (Pixels)	フレームレート (fps)	圧縮率 (%)	推定伝送速度 (kbps)
ケース 1	704×480	18	50	452
ケース 2	352×240	28	50	543
ケース 3	352×240	15	50	149
ケース 4	搭乗運転有人作業			—

表-3 に低解像度の各動作の遅延測定結果と判定結果を示す。基本動作総合遅延として、旋回以外は高解像度と低解像度ともに合格した。

旋回において旋回直後は 2 秒近く遅れるが 2 秒後に直ぐ戻るため基本作業実験の結果を見極めたい。オペレータの意見として、2 秒前後であれば作業できないこともないが 2.5 秒遅れると作業は困難とされている。また、解像度による差異が現れなかったのは伝送速度が同程度であったためと考えられる。



図-8 基本動作測定状況

表-3 基本動作測定結果判定表

	基本動作遅延測定結果判定					単位(秒)
	バケット	アーム	ブーム	旋回	総合	
現状無人化施工 評価判定値+0.5	0.98	1.04	1.21	1.21		
ケース 1	1.48	1.54	1.71	1.71		
判定	○	○	○	×		△
ケース 2	1.41	1.52	1.32	2.01		
判定	○	○	○	×		△
ケース 3	1.26	1.20	1.47	1.30		
判定	○	○	○	○		○

5.4 基本作業遠隔操作実験概要

HSPA 回線網を利用した遠隔操作性を検証するために専用オペレータ 1 名による基本作業の実験を行う。実験環境は基本動作実験と同様である。

基本作業は、走行と掘削・横はねのみを対象とする。スタート地点から掘削目標地点まで、約 50m 走行してから、図-9 の①のエリアを掘削して、②のエリアに横はねし積み上げる。エリアの大きさと掘削深さは、3m×3m×1m とする。掘削が終了したらスタート地点に戻る。これを 3 回繰り返し、走行時間、掘削時間、掘削土量を測定した。通常、検証は有人施工との対比で行うが今回は専用オペレータが遠隔地にいるため、同一のオペレータによる比較が出来ない。そこで、別の一般オペレータ（無人化施工未経験）に遠隔操作実験後、ロボQを取外して同様の試験を行い掘削土量と時間を測定して施工数量を測量により測定した（有人施工）。

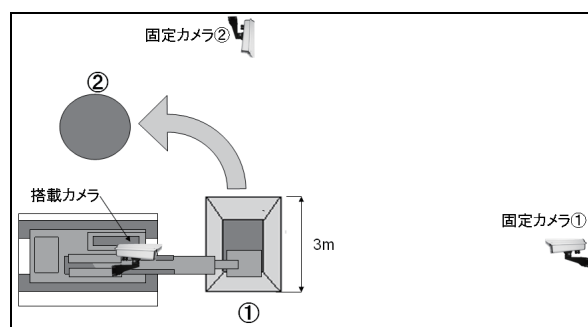


図-9 基本作業実験掘削位置

映像情報として搭載カメラ 1 台と固定カメラ 2 台を配置した。搭載カメラは油圧ショベルのキャ

ビンの中に運転席前方のバケットが映るように広角レンズ(26.3mm)のビデオカメラを取り付けた。固定カメラ①は走行時用に実験ヤード全体を撮影し、固定カメラ②は掘削時用に油圧ショベルの真横に配置した。各々のビデオカメラは実験後の作業分析用に記録を行った。図-10に遠隔操作時の状況を示すと共に3台のカメラ映像モニターの配置状況を示す。図-11には固定カメラ②の実験時の映像で掘削箇所と左に90度旋回して横はね箇所が映る画角としている。なお搭載の広角カメラと固定カメラ①は論文⁽⁴⁾を参考にした。

基本作業実験は、遠隔操作として3ケースと評価対象として、搭乗運転の有人作業も実施した。



図-10 長崎県側遠隔操作状況



図-11 千葉県側掘削・積み込み実験状況

5.5 基本作業遠隔操作実験結果

実験回数は、Case1:3回, Case2:2回, Case3:1回, Case4:2回であり、1回の実験で掘削は10~13サイクルであった。実験中に撮影していたビデオカメラの映像を再生して、全てのケースについて走行時と掘削時に分けて各動作のサイクルタイムを算出して分析をした。図-12に掘削時の各動作別のサイクルタイムのグラフを示す。

一連の掘削動作を掘削、放土への旋回、放土、掘削への旋回の4種類の動作に分けて、サイクルタイムを測定した。図-12のグラフから有人、無人

化施工とも掘削動作と掘削への旋回動作に時間が掛かっている傾向がある。掘削への旋回動作は、掘削開始箇所への位置合わせの時間が大きいことが読み取れる。さらに旋回動作においては、他の動作に比べて速度・加速度ともに大きいことからオーバーランが度々発生したのが位置あわせの時間を増大している要因である。特に無人化施工のCase1において旋回時の映像遅延が大きく、放土への旋回比率がCase2, Case3とも17%増に対してCase1は32%増となっている。

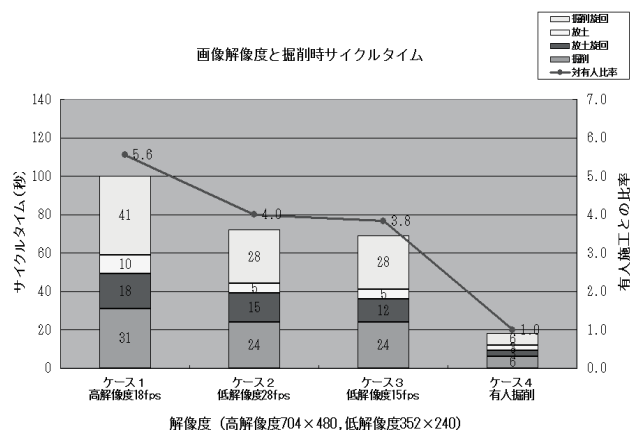


図-12 掘削時サイクルタイム

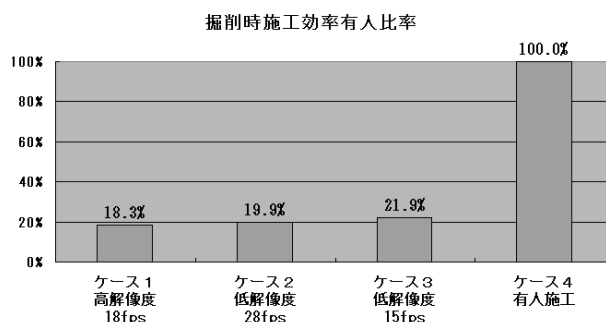


図-13 掘削時施工効率

無人化施工の遠隔操作による効率低下係数は、60%とされている⁽⁵⁾。これと比較すると20%は低い値であるが本実験は全工程が3日間の内、実質2日だけの短い期間であった。60%自体が長期の実績によるものであることから、さらに時間を有すれば施工効率は大幅に向上するはずである。

5.6 複合作業遠隔操作実験

2012年7月に長崎県の無人化施工現場において掘削・積み込み作業に挑戦したのでここに報告する。図-14に掘削・積み込み作業遠隔操作実験の状況を示す。ケース3, ケース2.5(低解像度20fps), ケース4の3ケースを実施しその結果を図-15に示す。

千葉県での実験では施工効率も低く、掘削・積み込み等の複合作業は困難と思われたが、問題なく実施することができた。サイクルタイムの対有人施工比率は3.8倍から2.3倍まで向上した。



図-14 長崎県おしが谷掘削・積込み実験状況

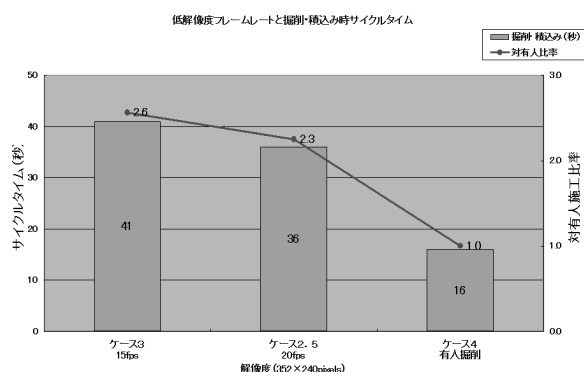


図-15 掘削積込みサイクルタイム

5.6 無人化施工設備の構築時間とコスト

雲仙普賢岳のような本格的な復旧工事においては、遠隔操作室、映像設備、中継設備等の設置工事や配線工事さらに無線と映像の調整に多大の時間とコストを必要としている。通常無人化のための設備の設置・調整に2週間程度かかるのが現状であるが今回の実験では2時間程度で準備が完了している。これは、緊急時の応急復旧において十分活用できると考えられる。雲仙等の現場においても本格的な設備が構築するまでの間に着工前測量やそのための地盤整形等に有効に利用できる。

5.7 オペレータへのヒアリング

基本作業遠隔操作実験後に今回の実験において、操作性、画面の見易さ、遅延の影響についてケース毎に5段階の評価を行った。また操作性低くなると思われる原因や操作性を向上するために必要な事についてヒアリングを行った。

その結果を以下にまとめた。

- 1) 低解像度でも作業が可能で、フレームレートが少なくても遅延が少ないほうが操作性は良い。
- 2) 搭載カメラは2台あったほうが良かった。走行時に足元用のカメラがあると良い。
- 3) 搭載カメラの画角は操作上で十分な広さである。

操作性低下の要因を順に並べるアンケートでは、以下のとおりとなった。

映像遅延>フレームレート>映像の解像度

5.8 本実験のまとめ

本実験の成果を以下にまとめた。

- 1) 2008年の実験の課題である通信セッション確立と通信切断時の復旧は、ソフトを開発することなくルータ本来の機能を活用することで解決した。
- 2) 屋内評価試験においては動画圧縮方式としてH.264の特性を把握し、各パラメータのシミュレーションにより映像伝送の設計に役立つ推定伝送速度の一覧を作成した。
- 3) 超長距離遠隔操作実験において施工効率は低いものの基本作業の可能性を見出すことができた。
- 4) 無人化施工現場での追加実験により、複合作業が可能となり、サイクルタイムも3.8倍(26%)から2.3倍(43%)まで向上した。
- 5) 携帯電話通信による設備構築時間が短いことで応急対応や現場乗り込み時の活用に期待性が認められた。

6. 今後の展望

3. 5GのHSPA通信網は、下りの伝送速度が十分高速であるが上りの伝送速度が300~500kbpsであるため映像伝送にとっては不足であり低解像度でしか利用できない。3. 9GのLTEのサービスは現在都市部だけであるがNTTドコモは、2012年度末に人口カバー率を60%、2014年度末に98%としているので上り伝送速度は4~5Mbpsとなる日はもうそこまで来ている。LTEになれば高解像度でも十分な帯域であり、遅延も激減して施工効率が向上することになる。今後は緊急時の応急復旧や無人化施工の着工時に利用する予定である。

謝辞

本稿を作成するにあたり、国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所、赤松5号作業所、おしが谷上流作業所、丸磯建設の多くの方々にご協力を頂きました。記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 林宏樹, 山本新吾, 三鬼尚臣: “公衆無線網を用いた油圧ショベルの遠隔操作”, 建設の施工企画, No.709, pp.69-75, 2009
- 2) 林宏樹, 田村隆幸, 野末晃: “油圧ショベルにおける通信遅延の分析と改善提案”, 建設機械, Vol.46, pp.32-37, 2010
- 3) 家永貴史, 江淵和久, 志堂寺和則, 松永勝也: “立体映像環境における情報伝達遅延が作業効率に及ぼす影響”, 日本VR学会第4回大会講演資料, 1999
- 4) 茂木正晴, 藤野健一, 大槻崇: “建設現場への無人化施工技術の普及と今後のニーズ”, 建設ロボットシンポジウム論文集, Vol.12, pp.89-96, 2010
- 5) 無人化施工協会 技術委員会 積算WG: “無人化施工の積算基準(案)”, 建設無人化協会, 2005