7. 多様な災害に向けた無人化施工技術の開発と適用

ICTを活用した多種・多数機械の遠隔操作

鹿島建設株式会社

○ 領木 紀夫 川音 一郎 伊東 真

1. はじめに

無人化施工技術は、約20年前に火山活動を再開した雲仙普賢岳での災害復旧工事を契機に実用化され、ICTの飛躍的な進歩により高度化が進んできた。

しかし昨今の災害復旧は、大規模、原子力発電 所、特殊作業など多様な形態になってきており、 その復旧工事における無人化施工技術もさらなる 進化が求められている。

今回,多様な災害に対応する無人化施工技術を 開発し,福島第一原子力発電所復旧工事に適用し たので,その内容について報告する。

2. 無人化技術の沿革

無人化施工技術は雲仙普賢岳噴火災害緊急対策工事での「試験フィールド制度」適用を端緒として発展し続けてきた。その後、有珠山災害復旧工事にて遠隔操作技術が体系化され、近年では ICT の進歩による情報化施工技術も組み込まれている。

本技術は、「人間が立ち入ることが出来ない危険な作業現場において、遠隔操作が可能な建設機械を使用し、作業を行うこと」と定義され、無人化施工における機械の遠隔操作は操作信号やカメラ映像の伝送、およびネットワーク化が主要な構成要素となっている。

2.1 操作信号の伝送

建設機械の遠隔操作に使用する電波は一般に特定小電力無線を用いており、その伝送距離は約200mまでと短い。しかし、無人化施工にはそれ以上の伝送距離となる場合も多く、中継局の設置や無線の高出力化が必要となる。特例として2Wの建設無線も活用されてきたが、通信速度や連続通信に課題があった。図-1は雲仙普賢岳で実施された「中継方式」、図-2が有珠山で実施された「建設無線方式」での長距離無線伝送である。

なお、近年では、操作信号を TCP/IP 化し、デジタル伝送を用いて遠隔操作する技術も開発されている。

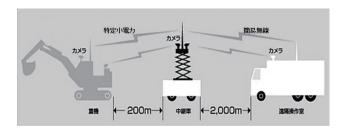


図-1 雲仙普賢岳での「中継方式」

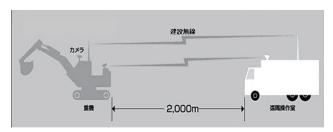


図-2 有珠山での「建設無線方式」

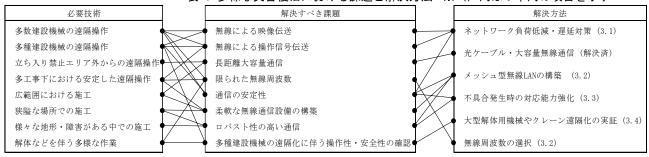
2.2 カメラ映像の伝送

従来はアナログカメラが主流で、映像伝送もアナログ通信で行われるのが一般的であった。カメラ台数が多くなるとアナログ通信の多重伝送には限界があるため、通信設備は過大になる。無線で映像を伝送する場合は、データが大容量となるため、50GHz という指向性が強い周波数帯を使用せざるを得なかった。しかし、昨今は ICT の進歩によって多重伝送が無理なく行えるようになり、通信設備の簡素化、及び指向性の比較的小さい周波数帯での伝送が出来るようになった。

2.3 ネットワーク化

従来,操作信号の伝送とカメラ映像の伝送は 別々のものとして構築されてきたが,建設機械や カメラをネットワーク端末とみなして現場全体を ネットワーク化することで,操作信号とカメラ映 像の伝送の一元化が進んだ。さらに光ケーブルを 用いることで,現場だけでなく遠隔地に設置され る操作室の機器までもネットワークの一部に組み 入れた「超遠隔無人化施工技術」も実証段階にあ る。

表-1 多様な災害復旧における課題と解決方法 ※()内は3章内の項目を示す



3. 多様な災害向けの無人化施工技術

これまでの無人化施工技術は土工事が中心であったが、市街地災害、原子力発電所災害などの復旧では、複雑な地形での作業やコンクリート造・鉄骨造の様々な建物の撤去・解体など、多様な対応が必要になってきている。

表-1 に,これら多様な災害復旧に必要な技術,解決すべき課題,その解決方法の関係をまとめた。 以下に本システムで行った解決方法について, その内容を示す。

3.1 ネットワーク負荷低減・遅延対策

無人化施工は緊急性を伴うことが多く、設備の設置作業ですら危険を伴うため、その設備はより簡素であることが望ましい。一方で、建設機械を遠隔操作する場合にオペレータの目の役割を果たすカメラの映像は、操作に支障のない視認性を要し、遅延を最小限に抑える必要がある。

これらの相反する課題を解決するために,以下のような対策を実施した。

① 作業に必要な解像度の評価

通常作業時は HVGA 画質で行い, 細かな作業は VGA 画質で行う。HVGA 画質におけるデータ伝送量は VGA の半分となるためネットワーク負荷を半減させることが可能となった。

② アナログカメラの採用

アナログカメラ+エンコーダ・デコーダ方式を 採用することで、web カメラを採用する場合に予想 される遅延、フリーズの懸念を解消する。また、 画質設定の変更を遠隔操作室から出来るようにす ることで、用途に応じた設定での効率的なデータ 伝送を可能とした。

③ フルフレーム送信タイミングの調整

一定間隔で送受信するフルフレーム送信のタイミングをずらすことで,データ伝送のピークをカットし,伝送過多によって通信不具合が発生するリスクを軽減した。

これらの対策については、映像遅延・画質の確認を目的とした実機による実験を行った。アナログカメラを直接有線でつないだ映像と、エンコーダ・デコーダでデジタル変換し無線送信した映像



写真-1 遅延確認状況

を比較し、作業に影響のない遅延、画質であることを確認した。(写真-1)

3.2 最適な無線ネットワーク形態の構築

災害時は、有線設備の損傷により無線設備が様々な用途で多用され、無人化施工に使用できる電波が少ない場合も多い。特に2.4GHz帯は一般的な無線LANで用いられている。無人化施工ではこのような状況下でも安定した通信が必要である。

そこで、本システムでは、遠隔操作信号のみ従来から使用されている 429MHz 帯の特定省電力無線を採用し、カメラ映像の伝送と切り離すことで、無線不具合が操作・映像の両方へ影響することを防ぐこととした。

カメラ映像伝送は建築工事で実績のある 5GHz 帯のメッシュ型無線 LAN を採用した。5GHz 帯の無線は、7 チャンネルとチャンネル数は少ないが、基地局を設置する際に申請が必要であるため、多数の使用者による干渉のおそれが少ない周波数帯でもある。

しかし,5GHz帯の無線は,高出力で伝送距離が長いことによる相互干渉や,指向性が強いことによる障害物の影響(電界強度の低下)が懸念され,適切な基地局配置が求められる。そこで,表-2の確認項目に沿って実証実験を行い,適切な基地局配置計画を可能とした。

表-2 確認項目

障害	確認項目
電界強度の低下	電界強度低下時の映像品質
・移動による距離減衰 ・建物陰への移動	複数映像伝送時の相互干渉
・アンテナ直下での作業	ハンドオーバー機能
	高低差 10m 程度での伝送機能
相互干渉	同一周波数電波の相互干渉

3.3 不具合発生時の対応能力強化

無人化施工においては、各種不具合発生時に、現場に立ち入ることなく原因を絞込める事が重要である。

そこで、システム障害が発生した時に迅速に対応できるよう、「不具合機器探索プログラム」と「メッシュ型無線 LAN 監視プログラム」を導入した。
① 不具合機器探索プログラム

このプログラムは、機器ごとの通信状況を確認するためのものであり、ネットワーク障害が発生した際に、どの機器に異常があるかを迅速に探索することができる。全ての機器に割り当てられたIPアドレスに向けて一斉に信号を発信、レスポンス時間を測定することで異常がある機器を速やかに判定し、異常のない機器を青色、異常がある機器を赤色に表示する。写真-2にこのプログラム画面の一部を示す。

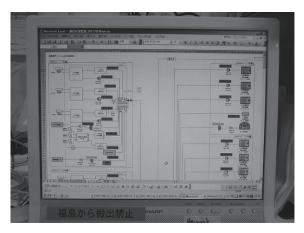


写真-2 不具合機器探索プログラム

② メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

遠隔操作建設機械のオペレータは、常に遠隔操作室でメッシュ型無線 LAN を経由した映像を見ながら操作するため、映像が送り続けられていることが重要になる。

そこで、カメラ画像に異常が発生した際に,監視プログラムによりそれが無線の不具合なのか否かを速やかに判断し,原因の絞込みが迅速に行えるようにした。写真-3 は無線監視プログラムの画面である。

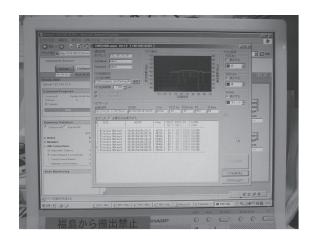


写真-3 メッシュ型無線 LAN 監視プログラム

3.4 多種建設機械の遠隔操作

多様な災害に対応するためには、ショベル系建設機械のみならず、大型クレーンや解体用建設機械など様々な建設機械の遠隔化が必要となる。そこで今回、クレーンや大型解体用機械の遠隔操作化を行った。

建設機械の遠隔操作を行う際は、いかにオペレータが作業状態や周囲の状況をリアルタイムかつ正確に把握することができるかが重要な課題である。そのためには、カメラの設置台数と設置位置、ズームやチルトなどの仕様を見極めるとともに、映像の遅延が操作に影響しないことを事前に検証する必要があった。

写真-4 は大型解体用機械による遠隔操作の実機 実験の状況である。複数のオペレータによって操 作性を確認することを目的に,高さ 20m を越える 建物の解体工事での実証を行った。



写真-4 大型解体用機械の遠隔操作実証実験

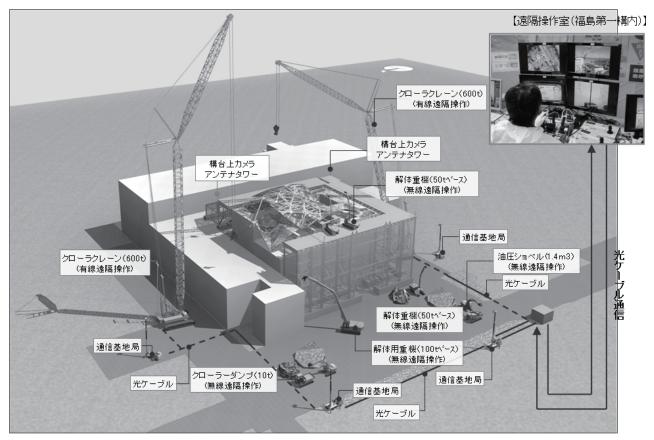


図-3 全体ネットワーク構成

4. 福島第一原子力発電所復旧工事への適用

今回開発したシステムを,福島第一原子力発電 所3号機復旧工事に適用した。

本復旧工事は原子力発電所構内での災害復旧であり、特殊な条件下での完全な無人化施工が要求された。以下に、そのネットワーク構成と、新たに開発した技術について示す。

4.1 本復旧工事でのネットワーク構成

図-3 に今回構築した無人化施工システムのネットワーク構成を示す。本復旧工事では重量物の揚重が計画されており、大型クレーン 2 台も無人化施工のネットワークに組み込まれている。また、解体用機械は建屋周囲のあらゆるエリアに移動しながら作業を行う。これらの遠隔操作の無線環境を確立するため、無線基地局を地上に 4 箇所、構台上に 2 箇所設置し、光ケーブルで無線基地局と遠隔操作室を接続することで大容量伝送に対応した。ネットワークに接続されている機械・機器の一覧を表-3 に示す。

本復旧工事においては、遠隔操作される建設機械の稼動エリアに対して建物が占める範囲が広く、死角ができやすいため、固定カメラも 16 台設置してオペレータの視野を確保した。さらに、クローラクレーン装着カメラの映像も共用し、俯瞰的に現場を見て構内の状況を把握できるものとした。写真-5 は遠隔操作室の状況である。

カメラの台数が多いため遠隔操作室への情報伝送容量は膨大なものになる。また、通信基地局から遠隔操作室までの伝送距離は500mと長い。そこで安定した大容量通信を確保し、かつロバスト性も向上させるため、3条の光ケーブルを敷設した。また、本復旧工事においては解体用機械とクローラクレーン以外にも、建屋上部の解体のための吊り下げ式機械機も遠隔操作する必要があった。そのため、操作無線の発信器をクローラクレーンのマスト上部にも設置した。

表-3 ネットワーク接続機械・機器一覧

12 0 1 7 1 7 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13	VAR 20
機械名・機器名	台数
解体用機械	8 台
クローラクレーン	2 台
吊り下げ式解体機	2 台
建設機械搭載カメラ用エンコーダ	16 台
建設機械搭載カメラ用接点交換機	10 台
場内固定カメラ用エンコーダ	16 台
場内固定カメラ用操作器	16 台

4.2 無線干渉への対応

構内では、様々な復旧工事が行われており、無線の混信が予想された。操作信号用の 429MHz 帯は、遠隔操作無線として同じエリアで使用できる

チャンネル数は少なく、本復旧工事においては 8 台分の通信が限界であった。そこで、構内で使用する無線機器をリスト化し、作業時間帯や距離を考慮して機械ごとにチャンネルを固定した。また、自動玉掛外し装置や吊り荷姿勢制御装置などの揚重ツールの制御信号の通信には 1.2GHz 帯を採用した。



写真-5 遠隔操作室

4.3 クレーンの遠隔操作化

大型クレーンの遠隔操作化においては,ショベル系機械に比べてより多くの情報を送る必要がある。また,揚重作業中の操作信号・映像の途切れは大事故につながるおそれがあるため,伝送についてはロバスト性を向上させる必要もある。加えて,揚重作業は特性上細かな動作が必要となるため,遅延も最小に抑えなければならない。以下に,これらの課題を解決するために行った対策について示す。

① 吊荷の状況把握用カメラの設置

大型クレーンではジブ先端にカメラを取付け、その映像を運転室内で確認し操作を行うが、クレーンマスト頂部にもカメラを取付けることで吊荷の状況をさらに把握しやすくした。なお、これらのカメラは地上100mもの位置となるため、420倍の高性能屋外用カメラを選定した。

② 安全情報の伝送

クレーンの運転室に表示される安全装置の情報は、カメラを用いて遠隔操作室のモニターで確認できるようにした。さらに、荷重値やジブ角度などの音声情報も、運転室内にマイクを配置、音声データとして伝送した。

③ その他安全確保

重大事故を引き起こすおそれのあるワイヤーの 乱巻き防止のため、ウィンチドラムの状況を常に 監視するカメラを設置した。



写真-6 クレーンの遠隔操作実証実験



写真-7 モニター映像

④ ロバスト性向上と操作・映像の遅延対策

クレーンの操作信号とカメラ映像の伝送には 信頼性の高い光ケーブルによる有線方式を採用し た。また、遅延を極限まで減らし、かつ作業可能 な画質まで画素数や圧縮率の調整も行った。

4.4 吊り下げ式解体機の開発

建屋上部のがれき解体は、大型の解体機械が近づけない状況で行う必要があった。そのため、大型クレーンで吊り下げて解体作業が可能な無線操作の吊り下げ式解体機を開発した。

短期間で開発する必要があったため、大型解体 用機械のアーム部分から先とパワーユニットをクローラクレーンで吊り下げる方式とした。

解体時の反力が十分取れるか、回転しないかなどが懸念されたが、開発実験と訓練により十分現場で対応なことを事前に確認した。



写真-8 吊り下げ式解体機

4.5 無人給油装置

従来の無人化施工では、燃料給油の際は補給ヤードまで建設機械を戻していた。しかし、線量が高い場合は機械に人が近づけないため、クレーンによって無人給油が行える装置を開発し、適用した。(特許出願中)

燃料タンクはカートリッジ式で、解体用機械に設けたガイドに沿って装填でき、給油口は自動開閉式で、着床すると自動で給油が行える。給油が開始すると回転灯が点灯し、遠隔操作室のモニターでは給油状況の確認ができる。



写真-9 無人給油状況

5. システムの評価

本システムは、原子力発電所復旧工事において 2011年8月から順調に稼動している。施工中であ るがこれまでの評価を以下に示す。

① 映像の遅延

懸念された映像の遅延は、実測値で約 0.1 秒と、 操作に支障のないレベルである。

② ネットワークの安定性

ロバスト性を持たせたシステムにより,建物の 陰でも安定した通信を保っている。

③ 故障モニタリングの効果

不具合時の状態が迅速に特定できるため,的確な対応が取れ,機械の稼働率向上に寄与している。

④ 大型解体用機械の遠隔操作

初めて 30mを越すアームを備えた大型解体用機械の無人化を行ったが、当初の計画通りの解体能力を発揮することができた。

④ 大型クレーンの遠隔操作

大型クローラクレーンの遠隔操作化も初めてであったが順調に作業できており、遠隔操作室で把握できる情報は十分であることが確認できた。また、通信異常による作業上の不具合は発生していない。

⑥ その他の遠隔操作機器

吊り下げ式解体機や,無人給油装置などの開発 により,特殊作業や付帯作業の無人化も実現した。

6. おわりに

今回、多様な災害復旧への対応を目的に ICT 技術を活用した無人化施工のシステムを開発し、実用化を行った。

現在, 難度の高い福島第一原子力発電所 3 号機 復旧工事に適用して良好な結果を得ており, 無人 化施工技術は多様な災害への対応という面でさら に一歩前進したものと考える。

今後は、より多様な災害に対応できるよう、個々の作業に応じた遠隔操作機器、緊急回収などの不具合対応装置、今回の給油装置のような付帯作業用機器など、ハード面の開発も遅滞なく進めていくことが重要であると考える。

参考文献

1) 建設無人化施工協会 技術委員会:無人化施工の推移と 展望,建設の施工企画,11月号,pp.6~12,2006年