

30. 無人化施工のマンマシンインターフェイスに関する調査

独立行政法人 土木研究所 技術推進本部（先端技術）：○山口 崇、石松 豊、山元 弘

1. はじめに

我が国では、地形的および気象的条件のため、火砕流、土石流、地すべり、および崖崩れなどの土砂災害が多数発生している（平成6～15年の平均で837件／年 国土交通省調べ）。これらの災害復旧や災害防止を行う事業では、二次災害や災害の発生が予想される大変危険な現場での作業を伴うこととなる。このような危険区域での土木作業では、安全対策として遠隔操作型の建設機械による無人化施工を実施することが有効であり、雲仙・普賢岳の噴火災害の復旧事業をはじめとして近年多くの災害復旧の現場などで遠隔操作型の建設機械を用いた無人化施工が行われている。

しかし、これらの無人化施工における施工効率は、作業内容により違いはあるが、操作者が搭乗して操作する場合の6割程度と言われており、低いのが現状である。無人化施工などの遠隔操作による作業の実用性や効率に大きく影響する要因として、機械の作業状況（機械の位置、姿勢、作業対象との位置関係、作業対象の状況など）を操作者に伝える方法の良否が常に問題となっている。

そこで本調査では、遠隔操作による効率的な作業実施のために、操作者への確に作業情報を伝達するマンマシンインターフェイスのうち情報表示技術について、現状の課題の整理を行ったものである。調査は、既存文献による分析と現場調査などの実態調査を行った。

2. 無人化施工

無人化施工は、油圧ショベルやブルドーザーなどの建設機械に無線受信機、コントローラ、電磁比例弁を取り付け、遠隔地からオペレータが無線で送信する操作信号により建設機械を動かす技術と、建設機械の施工状況の目視確認が困難な場合に施工のために必要な建設機械近傍の画像などの情報をCCDカメラ等で取

得し伝送する技術を用いて、安全な遠隔地から建設機械を操作して作業を行う施工法である。

この施工法は、雲仙・普賢岳の噴火に伴う災害復旧工事に適用されたことを契機として、適用できる工種を増やしながら、飛躍的に進歩・発展し、それ以降、現在までに106件（1994.1～2004.9、建設無人化施工協会調べ）の工事実績がある。特に災害復旧工事では、非常に危険な災害発生現場で作業員の安全を確保しつつ、迅速に工事を施工することが必要なため、無人化施工は重要な施工法の一つとなっている。

無人化施工のマンマシンインターフェイスに関しては、雲仙・普賢岳の噴火に伴う災害復旧工事に無人化施工が適用され始めた当初、様々な試行錯誤が行われた。施工状況の画像情報に関しては、遠近感を補完するために3次元モニタと偏光メガネやヘッドマウントディスプレイを用いて立体画像を表示することも試



図－1 最近の無人化施工の事例

みられたが、オペレータの疲労感が強く長時間の作業には不向きであるなどの理由から、現状ではCCDカメラの2次元画像を用いて、複数箇所・方向（建設機械の種類、作業により異なる）からの画像により遠近感を補っている。その他では、エンジン回転数、冷却水温度、燃料残量などの建設機械の状況情報や建設機械の稼働音も提示することも試みられたが、現状では、それらの情報は利用されていない状況である。

なお、ブルドーザーによる敷均し作業や振動ローラによる締固め作業では、GPSなどを用いて、建設機械の位置情報などをリアルタイムで計測し、その情報を利用して敷均し高さや締固め回数の管理を行う情報化施工の技術も利用されている。

3. 既存文献による課題の調査

雲仙・普賢岳および有珠山の噴火に伴う災害復旧工事など、実際に無人化施工を導入した事例について文献等の資料を収集し、マンマシンインターフェイス等に関する課題を整理・分析した。

結果は図-2のとおりであり、マンマシンインターフェイスに関する課題では、視覚関連の課題が29%を占めており、触覚関連と操作遅延関連の課題がそれぞれ10%を占めていた。したがって、文献によると視覚関連の情報が最も重要であることが分かった。

視覚関連の課題の内訳としては、遠近感把握の困難性、立体（凹凸）感の把握の困難性が視覚関連の44%を占めている。

2次元の画像による遠近感把握の困難性については、一般に遠近感と視野角との関係があり、目標物と背景との距離が同じであれば、広い視野角が得られる広角レンズの方がカメラに近い物がより大きく、遠い

物はより小さく写るという仕組みから遠近感がより協調された奥行きのある構図となり、視野角が狭いレンズでは奥行きの乏しい画面になる。しかしながら、広角レンズは広い範囲を把握可能であるが精度の高い仕事には向かないため、視野角の拡張については、作業内容に配慮し適切な選択をすることが望ましい。

立体感、とりわけ凹凸状態把握に関する問題については、カメラ位置による影響が大きな理由の1つに挙げられており、特に高所からのカメラ画像は地表の陰影が消えて見えることから凹凸が捉えにくく、横方向からの画像を追加するなどの工夫が必要である。

CCDカメラの2次元画像を用いた遠隔操作では、視点の違う複数台のカメラによる画像を用いるなど遠近感や立体感を2次元画像でも把握しやすいように現場で工夫している。しかしながら、目で直接見て作業する搭乗操作と比べると、文献では遠近感や立体感が操作性に大きな影響を与えることが示されている。

触覚関連の課題の内訳としては、操作レバーの形状と操作性に関する課題で触覚関連の58%を占めている。遠隔操作のレバーは短く、微細な操作が難しく、操作レバーにエンピ管を差し込んで改良を行っているケースが多く、オペレータの手、指の感覚に合わせた操作レバー

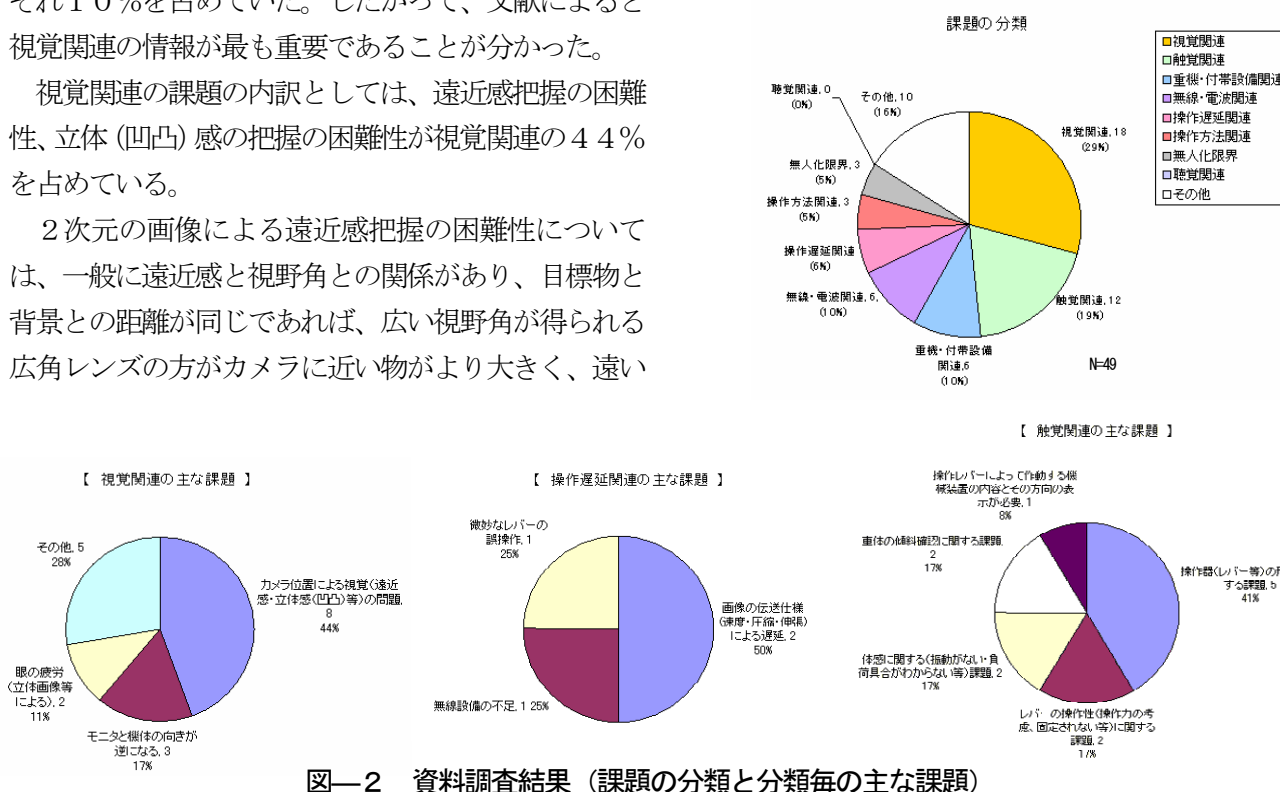


図-2 資料調査結果（課題の分類と分類毎の主な課題）

(およびボタン) の配置や形状が課題となる。

また、バックホウは遠隔操作機のレバー操作が搭乗席でのレバー操作とほぼ同じとなっているが、ブルドーザーやダンプトラックなどは、搭乗操作の場合、両手両足を使った操作であるのに対し、遠隔操作の場合は搭乗時と同じ数だけの操作を両手のみで行わなければならないため非常に複雑な操作となる。

次いで振動と操作力(重機の作業部位にかかる負荷に比例した反力)などの体感に関する課題が17%を占めている。体感がないと作業中に発生する振動や力の負荷のかかり具合を把握することができないため、無理な操作を行うこととなる。そのため、建設機械の足まわりの故障の原因となることも多い。また、重機情報の一つである車体の傾斜感覚の不足も課題に挙げられている。

操作遅延の課題の内訳としては、画像伝送の遅延に関する課題で50%を占めている。その主な要因としては、画像の伝送処理時間(圧縮、伸張)が挙げられる。

一般的に、人間がリアルタイムと感じる限界のタイムラグは50msec程度といわれており、2,400bpsの伝送速度の特定小電力無線局を利用した場合、伝送距離が200mを越えたところで「遅れ(40msec程度)」を感じるなどの事例の報告がされている。さらに、無線中継車を介した超遠隔操作施工といわれる1,000mを越える伝送距離の場合には、50msec程度の遅れとなっている(ただし、超遠隔操作におけるこの程度の遅れは満足 of いく結果であると言われている)。

通常の土木施工現場においては有線での遠隔操作も可能であるが、災害復旧現場では有線による伝送は非常に困難である。さらに、無線中継車を介した超遠隔操作の導入要望は今後

も増えることが予想されることから、画像の伝送方法をはじめ、伝送距離、データ量を十分考慮した上で伝送速度を決定する必要がある。

また、無線が原因による操作遅延については、経験を積むことにより慣れるという報告もなされている。

4. 現場調査

平成15年度に無人化施工を実施していた2工事について、現地調査を行い、操作者に対してヒアリングを実施した。ヒアリング結果のうち、操作に関する結果の抜粋は、図-3のとおりである。

今回調査において、最も多くの操作者が遠隔操作で問題があると感じている課題は、搭乗操作と比較した時間差(操作遅延)であった。これは、今回調査した現場では、現場条件から制御系、映像系の全ての情報を中継車とアンテナ基地局の2箇所を経由して伝達しているなど時間差の発生しやすい状況があり、この問題がクローズアップされる結果となったものと思われる。

また、最も問題がないと感じている課題は、搭乗操

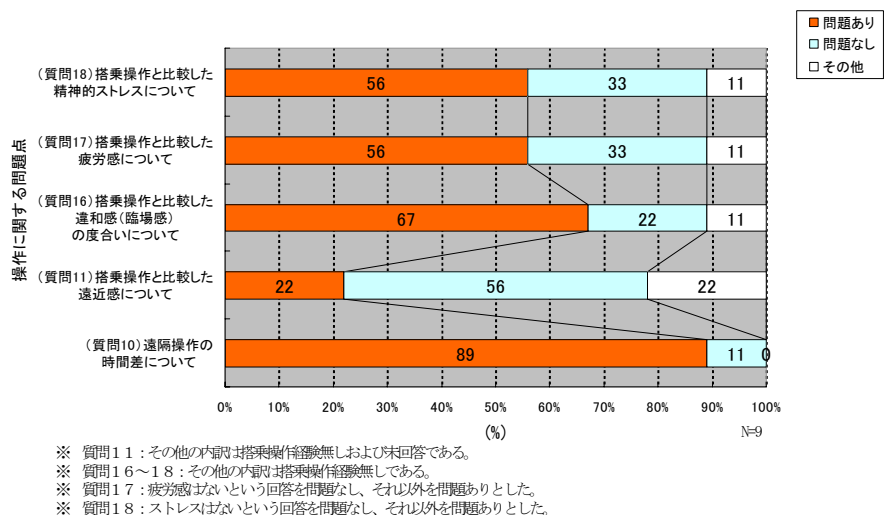


図-3 現場調査結果(操作に関するヒアリング結果の抜粋)



図-4 無人化施工におけるマンマシンインターフェースの事例

作と比較した遠近感であった。この結果は、資料調査と逆の結果となった。問題なしの回答の内訳を見ると、遠近感はつかみ易いが11%で、操作に支障がない程度のある程度の遠近感はつかめるが55%であった。

5. まとめ

無人化施工などの遠隔操作による作業の実用性や効率に大きく影響する要因である、機械の作業状況を操作者に伝える方法の良否について、それに与える影響が大きな課題の抽出を目的として、無人化施工におけるマンマシンインターフェイスに関する資料調査と現場調査による実態調査を行った。

調査実施前、視覚関連の情報が最も重要な課題となることを想定していた。結果は、既存文献の分析においては、視覚関連に関する課題が最も多い割合を占めていたが、今回の操作者へのヒアリングにおいては、最も問題を感じていない課題となった。これは、操作

者が遠近感などに関する現状の視覚情報に満足している訳ではないが、無人化施工として現状の施工効率(搭乗の約6割程度)で作業を行うには支障がない、ある程度の遠近感などの情報を取得できていることを意味している。

今後は、効率的な作業実施を可能とする視覚情報の表示方法に関して、最新の情報通信技術、ロボット技術及び情報化施工技術を踏まえ、GPSにより計測された位置情報や3D-CADによる設計の3次元情報及びレーザースキャナーやステレオビジョンにより計測された現況地形の3次元情報などの利用の検討を実施する予定である。

また、検討に際しては、平成15～19年度の5年計画で国土交通省が実施している総合技術開発プロジェクト「IT等によるロボット施工システムの開発」の研究項目である「建設機械のIT施工技術の開発」と連携し進めて行くこととしている。(図-5参照)

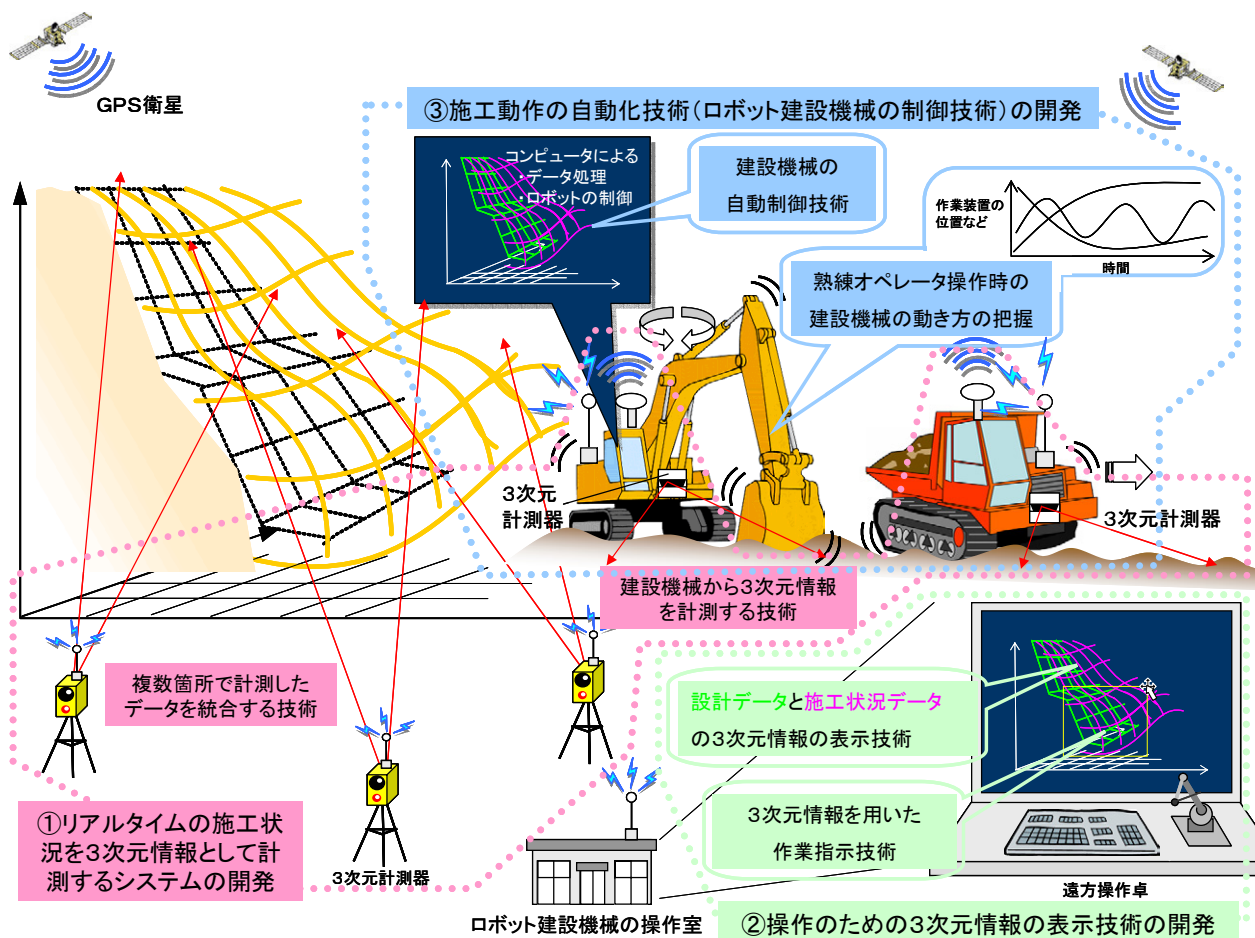


図-5 「建設機械のIT施工技術の開発」における研究概要