

無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について

伊藤 禎宣¹・坂野 雄一²・藤野 健一³・安藤 広志⁴

¹正会員 国立研究開発法人情報通信研究機構 (〒619-0289 京都府相楽郡精華町光台3-5)

E-mail: sadanori.ito@nict.go.jp

²国立研究開発法人情報通信研究機構 (〒619-0289 京都府相楽郡精華町光台3-5)

E-mail: yuichi@nict.go.jp

³正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: fujino@pwri.go.jp

⁴国立研究開発法人情報通信研究機構 (〒619-0289 京都府相楽郡精華町光台3-5)

E-mail: h-ando@nict.go.jp

災害発生時の危険除去や復旧・復興の作業において、作業員の安全確保を目的とした無人化施工が行われている。無人化施工現場における一つの大きな課題は作業効率の低下である。その原因の一部として、作業員が観察する映像における解像度の低さと奥行き情報の欠如が考えられる。本研究では、雲仙普賢岳の災害復興現場にて現行の作業内容を模擬し、現行環境である2Dかつ低解像度の小型多画面の複数視点圧縮映像条件と、提案環境である両眼立体3Dかつ4K解像度(3840×2160画素)の大型単画面の非圧縮映像条件との間で作業効率を比較した。その結果、現行環境に比べ提案環境を用いることで作業効率が23～35%向上した。また、動作種別と映像環境による作業効率の差異が観察された。差異の発生原因を含め、観察から得られた知見についても報告する。

Key Words : *unmanned construction system, visual environment, operational efficiency*

1. はじめに

災害発生時の危険除去や復旧・復興の作業には、様々な危険が伴う。作業の遂行と作業員の安全確保の両立を目指して、建設機械を安全な遠隔地から操作する、無人化施工の技術開発が進められている¹⁾。無人化施工技術は、無線操作機と遠隔操作対応の建設機械、現場視認用の映像伝送装置などを中心に構成される²⁾。

無人化施工現場における一つの大きな課題は、作業効率の低下である。搭乗操作と遠隔操作を比較した場合、その作業効率(施工効率)は、5割程度とも言われている³⁾。このような作業効率の低下は、様々な要因から複合的に発生すると考えられる。個別に列挙するならば、搭乗操作と遠隔操作では、操縦桿の配置や操作量などのヒューマンインタフェースが異なるため新たな学習を要すること、操作信号送信時と映像信号受信時の伝送遅延が操作性を悪化させること、映像や音響、振動などのフィードバック情報が搭乗時とは異なること、などが考えられる。

我々は、これらの作業効率低下要因のうち、映像条件の影響について検討を進めている。まず土木作業対象物を想定して、定量的な影響比較のための実験室実験による基礎的検討を行った。例えば、視距離約5 mで模擬作業具の奥行き位置を回答する実験では、3D(両眼立体視)映像条件では2D映像条件に比べて奥行きの回答誤差が少ない傾向があり、回答誤差の平均値は、4K(3840×2160画素)3D条件と4K2D条件の比で約60%減少した(誤差平均約25 cmから約10 cm)。一方で、解像度の低い(480×270画素)条件では、3Dと2Dの回答誤差に差がなく、両眼立体視条件での奥行き判断に一定の解像度が必要であることも示された。

また、視距離約5 mで模擬地面平面の斜度を回答する実験では、高解像度の3D映像条件で回答誤差が減少する傾向があり、回答誤差の平均値は、4K3D条件と4K2D条件の比で約25%減少した(誤差平均約16度から約12度)。但し、模擬地面平面の土砂粒径が小さい(例えば粒径φ1 mm)条件では、この傾向は現れず、対象物に対する映像分解能の必要性が示されている。

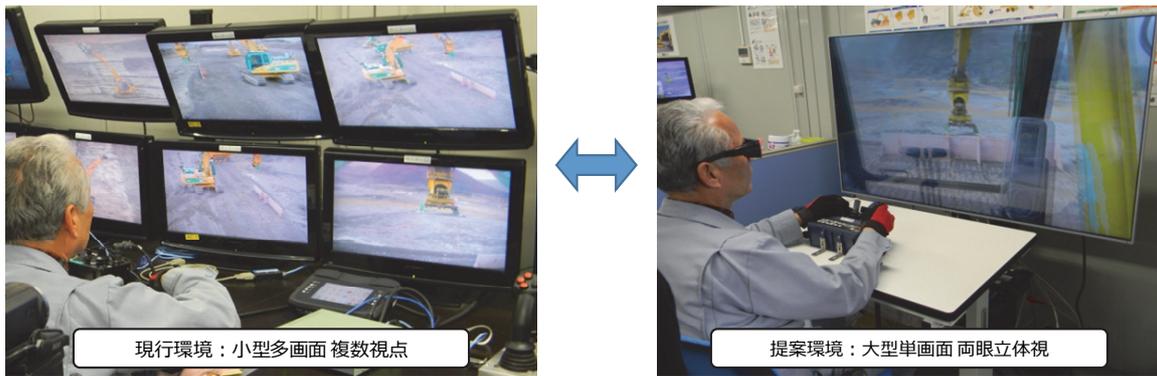


図-1 遠隔操作室の現行環境と提案環境

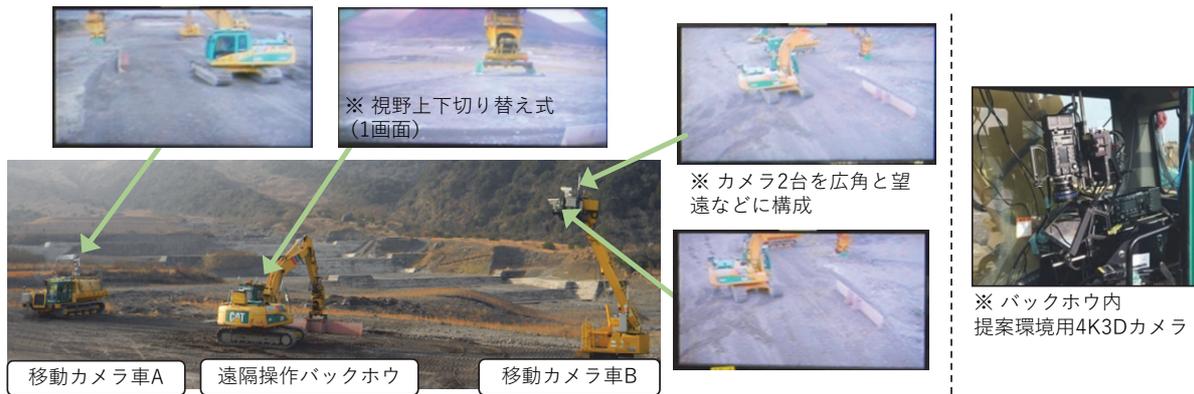


図-2 実験機材の配置およびカメラの構成

本稿では、これら基礎実験の結果を踏まえ、映像条件が実際の作業効率に与える影響について、無人化施工の熟達者による操作で比較する実験を実施したので、これについて述べる。本実験は、現実的な作業状況での作業効率比較を行うため、雲仙普賢岳の災害復興現場にて、現行の作業内容を模擬し、映像条件毎の比較を実施した。また、高品質映像条件としては、現時点で実現可能な映像環境として、4K解像度(3840×2160画素)かつ両眼立体視の4K3D映像を非圧縮で呈示するものとした。

2. 高品質映像環境による遠隔操作の現場実験

実験室実験の結果を踏まえ、理想的な高品質映像として4K3D映像を用いた建設機械の遠隔操作環境を構築し、同環境による比較実験を実施した。無人化施工の現在環境と4K3Dの提案環境で作業態様から、それぞれの利点欠点を踏まえた適正な映像環境の構成方法を得ることを目的とする。

本実験は、無人化施工による工事を実施中の株式会社熊谷組 赤松谷11号作業所にご協力を頂き、2015年2月に実施した。同所は、長崎県南島原市に所在し、雲仙普賢岳の火山活動に伴う土石流等の災害からの安全確保を目

的とした砂防施設の建設を行っている。土石流等の危険から作業員の安全を確保するため、建設機械は、数百mの遠隔地から遠隔操作される。

本工事中、床固工の施工工程では、RCC (Roller-Compacted Concrete) 打設のため、鋼製型枠設置位置のマーキングと、同型枠の設置作業が、繰り返し行われている。マーキングは、RTK-GPS装置とスプレーを備えた無人測量機によって、型枠設置位置の地面へ直接円形のマークをスプレーすることで行われる。鋼製型枠の設置は、マーカ-3点を型枠の左右端及び中央として、鋼製型枠用アタッチメント付きのバックホウで行われる。本実験では、バックホウを利用する鋼製型枠の設置作業を実験課題とした。同作業に用いる現行環境は、小型多画面の複数視点映像であり、提案環境は、大型単画面の両眼立体視映像である(図-1)。

(1) 実験装置

本実験における使用機材類を表-1に示す。現行環境の遠隔操作は、複数台の車載カメラと外部カメラによって得られた映像を圧縮処理して無線LAN等で伝送し、遠隔操作室の複数ディスプレイに表示して行われている。本実験では、通常の作業で用いる映像構成として、建機車

表-1 主な実験機材類

機材名	台数	備考
建設機械		
遠隔操作バックホウ	1台	鋼製型枠用アタッチメント付
鋼製型枠	1台	全幅6 m
マーカー	9個	プラスチック製 赤色円板φ10 cm
映像関連： 現在環境		
移動カメラ車A	1台	散水車上に搭載
移動カメラ車B	1台	クレーン上に広角・望遠カメラ2台
建機搭載カメラ	1台	キャビンの屋根上に搭載
映像伝送装置	一式	5 GHz帯無線LAN
液晶ディスプレイ	4台	
映像関連： 提案環境		
建機搭載4K3Dカメラ	1台	操縦席に搭載
映像伝送装置	一式	光ファイバ
4K3Dディスプレイ	1台	

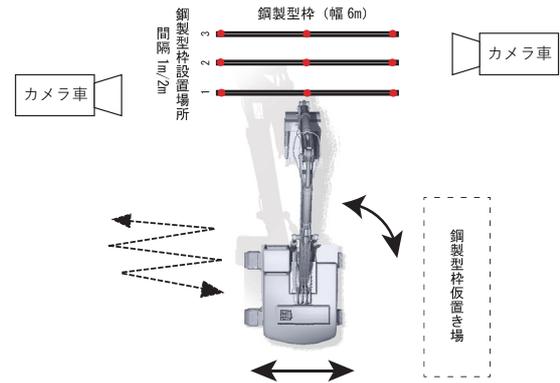


図-4 鋼製型枠設置作業の配置

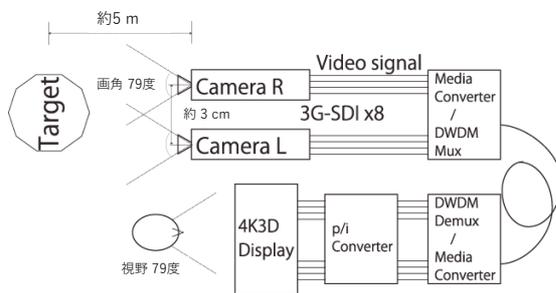


図-3 提案環境の装置構成

載カメラ用1画面と外部カメラ用3画面による遠隔操作を行った。なお、車載カメラは、操縦者がカメラ方向をやや上方やや下方で切り替えることができる。また、外部カメラは、カメラオペレータがカメラの方向やズームを制御する。外部カメラの配置と各画面の例を図-2に示す。

提案環境側の装置構成を図-3に示す。カメラは、Sony製PMW-F55を2台とし、ハーフミラー型立体映像撮影リグに設置した。レンズは、水平画角79度(仕様値)のCarlZeiss製CP.2 15mm/T2.9とした。映像は、3G-SDI規格の1080p60信号を各4系統、左右両眼計8系統(計24 Gbps)により出力され、4K3D映像を得ることができる。カメラ側の映像出力遅延は、仕様上2 frames以内(60 fps時33 msec以内)である。同出力の伝送経路では、Lynx製OTX1842にて、同軸ケーブル上の電気信号から、シングルモード光ファイバ上のレーザー光に変換する。波長は1500 nm帯であり、網膜まで到達し難いアイセーフ波長(JIS C 6802: 2011)とされる。計8系統の映像信号は、波長多重化装置(CubeOptics製DWDM-MUX)により、1本の光ファイバ信号となる。同信号を無線伝送する装置を別途開発しているが、今回実験では実施安定性のため有線の光ファイバによる伝送とした。遠隔操作側では、波長分離装置(CubeOptics製DWDM-DEMUX)とLynx製

ORX1802により3G-SDI信号に復元する。3G-SDI信号とレーザー光の変換・復元に要する時間は、両側の合計で約0.1 μsec(仕様値)であり、ほぼ無視できる。

撮影側カメラの立体視設定は、カメラ配置を交差法とし、輻輳点と焦点距離をおよその作業距離である約5mに合わせ、レンズ中心間距離は約3 cmとした。本実験では、投影側にプロジェクタではなく液晶ディスプレイを利用しており、映像を水平方向に移動させて無歪条件を再現するのが困難であったため、今回設定では、交差法とした。また、映像中にキャビン内の前後進用レバー等があり、比較的遠景の作業対象(約5 m)とキャビン内(1 m未満)の近景では視差量が大きく異なる。これは、視覚疲労の原因になると考えられる⁹⁾。このため、視差量の差を削減し、違和感無く立体視できる設定として、レンズ間距離を凡そ3 cmとした。

ディスプレイは、58インチサイズの液晶フラットパネルを利用したもので、4K解像度のまま立体映像を表示できる。弊所による試作機(計測技研製作)であり、業務用一般用共に同等品は無いと思われる。現状では60p映像の表示に対応していないため、p/i変換装置(アストロデザイン製VC-7063)を介し、60i映像としてディスプレイに提示する。

撮影側レンズの視野角は79度、投影側4K3Dディスプレイの横幅は約128 cmであるので、操縦者の視距離は約78 cmとした。これにより、操作者の視野角をおおよそ一致させている。また、撮影側レンズは約20度下方へチルトさせている。操縦者側の視線方向が上向きと下向きで逆転すると違和感が生じると考え、投影側画面中心より上から見下す形になるよう、操縦者席の座面高さを調整した。但し、操作の違和感や実験の効率に配慮し、顎台による頭部の固定や操縦者毎の調整は行っていない。

(2) 実験課題

実験課題は、鋼製型枠の設置作業である。型枠の仮置場と設置場所は、直角に配置した(図-4及び図-5参照)。

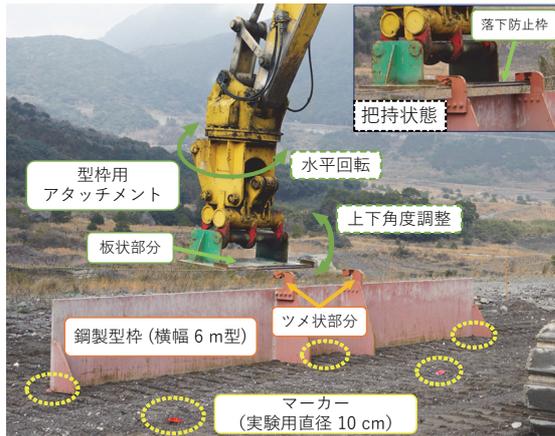


図-5 鋼製型枠およびアタッチメント拡大図

設置場所のマーカーは、実験効率を考慮し、スプレーではなくプラスチック製の円板（直径10 cm）を釘で地面に固定したものとした。型枠の左端・中央・右端を、3点の各マーカー中心部に合わせる形で設置する。設置精度は、通常業務における水準を保つこととした。設置場所は、マーカー3点を1列として、建機から奥行方向に3列設定しており、試行毎に異なる列へ設置することとした。これは、設置位置が同一であると、操縦動作が単調な繰り返しとなり、映像条件の影響を比較できない可能性があるためである。

本実験では、以下の動作フローにおいて設置部を3回繰り返すこととした。

- ・設置
 1. 仮置場：型枠持ち上げ
 2. 約90度旋回
 3. 設置場所：型枠解放
- ・撤去
 4. 設置場所：型枠把持
 5. 約90度旋回
 6. 仮置場：型枠接地

実験の手順は、作業課題の説明、現行環境での課題実施、提案環境での課題実施、事後インタビュー、の順番で行われた。被験者は、遠隔操作に習熟した同現場の操縦者3名である。なお、型枠設置作業については、過去に同作業をしていたA氏、同作業は今回初めてのB氏、日常的に同作業をしているC氏からなる。A氏、B氏、C氏の順に実験を実施した。また、本実験では、操縦者は現行環境には習熟しているものと考え、現行環境終了後に提案環境を実施する順番とした。

3. 実験結果

まず、本実験におけるサイクルタイムの比較を行った

表-2 遠隔操作実験サイクルタイム平均

	現行環境 (秒)	提案環境 (秒)	提案 / 現行
設置作業	262.3	194.8	0.74
撤去作業	69.0	56.1	0.81

(表-2) . サイクルタイムの平均値は、現行環境と提案環境の比で、設置作業で74%、撤去作業で81%、と減少していることが確認できた。これは、高品質な映像環境による作業効率向上の効果であると考えられる。

本章では、建機の動作種別毎に、作業効率の変化結果と、その原因についての考察を述べる。

(1) 動作分類

本稿では動作種別を「旋回」、「履帯移動」、「最終調整」、「解放」、「把持」、「その他」の6種類に分類し、各所要時間を計測した。分類は、建機動作のビデオ記録による区分が明瞭にでき、作業段階毎の建機動作や外部カメラ動作に特徴的な差異があり、比較が有意と考えられる基準として設定した。

「旋回」は、バックホウの旋回機構による旋回動作を指す。

「履帯移動」は、履帯による移動や超信地旋回を指す。履帯移動と旋回が同時に行われている場合は、履帯移動として計測した。履帯移動と旋回の両動作について、3秒未満の微少な動作はこれを除いた。

「最終調整」は、鋼製型枠の設置作業のうち、履帯移動や旋回動作によって建機車体の位置と方向が確定した時点から、鋼製型枠が設置場所に接地するまでを指す。主にブームとアームの操作で鋼製型枠をマーカー3点の上方へ移動させ、アタッチメントの回転機構も併用して型枠をマーカー各点の中心に合わせて、接地させるまでの動作となる。

「解放」は、鋼製型枠の接地後、鋼製型枠ツメ状部分からアタッチメント板状部分を抜去するまでを指す(図-5)。これにより設置作業が終了する。

「把持」は、撤去作業の開始時に、アタッチメント板状部分を鋼製型枠ツメ状部分へ挿入するまでを指す(図-5把持状態参照)。

「その他」は、履帯移動前のアーム操作など、上記に分類されない状況を表す。

(2) 動作毎所要時間

これら動作の所要時間を積み上げグラフとして図-6に示す。また、映像条件毎に各動作の所要時間平均と分散を表-3に示す。

動作毎の所要時間のうち、実験状況の差異や個別の事



図-6 動作毎所要時間グラフ

由があるものについて、以下に注記する。

A氏による提案環境の設置作業第2試行、第3試行では、「その他」動作時間が長い。第2試行では、キャビンの右ピラー部にマーカーが隠れてしまい、設置位置と車体の距離を調整する試行錯誤による時間のロスがあった。キャビン内にカメラを設置しているため、作業対象の距離によっては、このような状況が生じる。通常の搭乗業務であれば、頭部を移動させて対応するところである。実際、本実験中も、提案環境では頭を動かして覗きこむ動作が見られた。現在の提案環境では、このような視点変更には対応していない。この点について、他の2名には、実験実施前に、マーカーと車体との距離によって、マーカーが見えなくなることがある、と予め伝えることとした。また、第3試行でも「その他」動作時間が長い。鋼製型枠設置位置は、試行毎に2 m奥行方向に移動するため、履帯移動が必要となる。この場合は、履帯移動終了前に試行錯誤的にアームを動かす動作が多く行われた。

表-3 動作毎の平均所要時間

(sec.)	旋回		履帯移動		最終調整	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Multi.	21.8	3.9	103.4	21.5	137.9	59.0
4K3D	19.8	2.1	133.8	66.9	77.9	23.3
比率	0.91		1.29		0.56	

(sec.)	解放		解放 w/o Cam.		把持		把持 w/o Cam.	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Multi.	30.0	16.7	16.9	9.1	24.3	12.5	19.8	8.4
4K3D	13.9	4.0	13.9	4.0	24.7	15.7	24.7	15.7
比率	0.46		0.82		1.02		1.25	

このような試行錯誤による時間経過は、実験の本旨と離れ、実験の実施時間上の問題も懸念された。このため、鋼製型枠設置場所の奥行方向の間隔を、A氏の実験条件では2m幅としていたところ、他の2名では1 m幅へと変更した。

B氏の現行条件による実験は、試行のカウントミスのため、作業が1回少ない。図-6中では、設置と撤去が一回ずつ少ない。

なお、最も作業時間が短く、各試行間の時間差が少なく安定しているのは、同作業を通常業務とするC氏であった。C氏の1~2試行目の設置作業のサイクルタイムは、現行環境で160秒前後、提案環境で70~80秒前後(42%、52%の減少)と分散が小さい。今後、同環境で作業を継続しても安定的に結果が出ることが期待される。

以下、動作毎に現行環境と提案環境の差異について述べる。また、作業状況やインタビューをもとに、差異が生じた原因について検討する。

(3) 動作毎作業状況

a) 旋回動作

旋回動作の所要時間平均は、現行条件で21.8秒、提案条件で19.8秒、比率は0.91であり、大きな差は現れなかった。

現行環境では、旋回中の全景や旋回先を画面内に収めるため、カメラオペレータが外部カメラを操作する。この操作の遅れが、旋回動作自体を遅らせる原因になることが予想された。実際に、外部カメラは旋回状況を後追いでいたが、これによって旋回動作を遅らせる状況は、明瞭には確認できなかった。これは、作業者が旋回動作時に必要とする主な情報である旋回停止位置と車体方位について、車体の一部でも映っていれば推測して操縦を継続できることが理由であると考えられる。

提案環境では、旋回停止位置の確認は、車載カメラの視野に依存する。車載カメラが広視野角であることと、視点に変化がないことは有利な点であったと考えられる。一方、事後インタビューにて、提案環境では、立体視や広視野角の映像に起因すると思われる映像酔いの指摘が



図-7 提案環境による操作状況画面



図-8 現行環境による操作状況画面 (矢印を除く)

あった。この映像酔い感が原因となって、提案環境側の旋回動作が遅くなった可能性も考えられる。今回実験では、いずれが主要因であったかについては不明瞭であり、その分析は今後の課題とする。

b) 履帯移動

履帯移動の所要時間平均は、現行条件で103.4秒、提案条件で133.8秒、比率は1.29であり、現行条件が有効な結果であった。

履帯移動は、鋼製型枠設置位置を調整するための左右移動のほか、設置場所と建機車体の間に適切な距離を保つため、履帯でジグザグ状に移動するものである(図4破線矢印参照)。本来業務では、型枠を横に並べながら移動していくため、履帯方向は型枠に平行としている。今回実験では、奥行方向に移動するため、このような動作となる。

履帯移動においては、実験エリア内での設置位置と車体位置、車体方位、履帯方位を知る必要がある。

現行環境では、車載画像に加えて俯瞰画像からこれらを直接視認することができる。

提案環境では、車体の位置と方位は、車載画像から間接的に推測する必要がある。また、提案環境の車載カメラでは、搭載角度設定上、履帯が画面内に映らない(図-7参照)。履帯を動かして車体移動方向を知ることで、間接的に履帯の向きを知ることができる。これらの直接的情報の不足が、所要時間の差に表れたと考えられる。また、事後インタビューの中で、提案環境では、環境音や俯瞰映像など、進行方向や周辺の安全確認を素早く行う仕組みが無いことが指摘されている。実験環境下のため、基本的に障害物は無いが、履帯移動の速度にネガティブな影響を与えた可能性がある。

c) 最終調整

最終調整の所要時間平均は、現行条件で137.9秒、提案条件で77.9秒、比率は0.56であり、提案条件が有効な結果であった。

最終調整では、地面平面上のマーカー3点の位置と、鋼製型枠の位置姿勢を正確に把握する必要がある。立体視映像を用いる提案環境は、実験室実験の結果からも、地面平面の傾きや鋼製型枠の奥行方向の位置把握において、効果的であろうと考えられていた。また、別途実施した作業観察の結果から、作業対象物の奥行距離が不明瞭な映像環境では、作業対象物を地面平面付近で移動させることで、オクルージョンやキャストシャドウによる位置把握が行われやすいことがわかっている。今回の実験では、このような奥行不明瞭場面特有の動作は見られず、かつ所要時間平均が減少していることから、立体視映像に一定の効果があつたと考えられる。

また、提案環境は、広視野角であることから、操作状

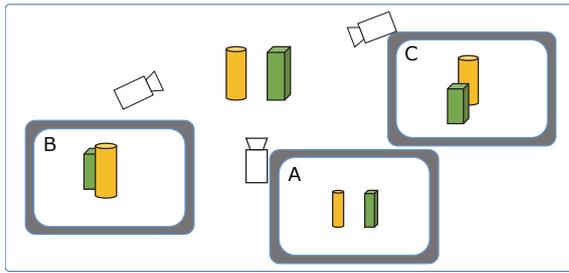


図-9 カメラ視点による配置の見え方の違い



(a) 提案環境映像(正面方向・一部拡大) 「ブーム下げ」の視認容易
(b) 現行環境映像(側面方向) 「ブーム押し出し」の視認容易

図-10 解放・把持動作時の映像例

況画面内にマーカー3点と鋼製型枠全体を捉えることができる(図-7および図-5参照)。カメラの視点や倍率の差異による映像上のズレを考慮する必要がなく、直感的に操作できることは、作業効率に効果的に働くと考えられる。

多画面の現行環境では、作業状況に応じて、作業対象の一部を拡大表示する(図-8)。この場合、適切な解像度で作業領域全体を1画面で見ることができない。このようなカメラの拡大縮小や移動の操作は、カメラオペレータの判断や作業者の指示によって行われる。適切にカメラ操作が行われなければ、作業時間が増える原因となり得る。しかし、最終調整の動作時間中に関しては、撮影対象がずれるなど、適切とは言えない状況になっても、作業が停止することはなかった。作業対象を正確に捉えずとも、一定範囲を確認できれば、経験や予測によって、ある程度は作業を継続できることが理由と考えられる。但し、明瞭な差異は得られなかったが、操作速度を若干遅らせるなどの負荷にはなっていた可能性がある。

多画面構成が操作難度を上げる原因として、各画面に跨る対象物の位置調整に、複合的な判断が必要となることが考えられる。

第一に、外部カメラの撮影方向や撮影視点により、画面上での作業対象物の向きや移動方向が異なる点がある。図-8中の矢印方向は、右旋回操作時の鋼製型枠の画面上での移動方向を表す。このような差異があるため、作業者が適切に操縦桿操作を行うためには、対象物の画面上の向きと建機正面方向に対応する実際の向きを変換する必要がある。このような心の中で行う三次元形状の回転は「心的回転(メンタルローテーション)」と呼ばれる。回転角度つまり撮影角度の差異が大きいほど、負担が大

きいことが知られている⁷⁾。異なる画面を参照する度に毎回異なる心的回転が必要であり、このことは所要時間の増大や、リモコンの操縦桿を別方向に倒してしまうなどのミスが増える原因になっていると考えられる。

第二に、外部カメラの撮影倍率により、対象物の画面上の移動量と実際に必要な移動量が異なる(図-8中の矢印長さ参照)点がある。マーカーに鋼製型枠を近づける場合、画面中でマーカーと鋼製型枠の距離を見積もったのち、各画面の撮影倍率に応じて操作量を変更せねばならない。しかし、鋼製型枠部分の拡大画像や、解像度の低い画像では、撮影倍率を正確に把握することは難しい。これは、意図した操作量に対して、移動量が大きすぎるなどの齟齬が増え、所要時間が増大する原因になっていると考えられる。同様に、鋼製型枠の一部などが拡大表示された映像では、姿勢把握を助ける形状の輪郭や肌理の勾配といった映像情報が減少するため、型枠全体の姿勢把握が難しくなる。実験では、型枠の左右いずれかの端点とマーカーの中心位置を合わせても、型枠の姿勢によって、反対側の端点が合わない状況が生じていた。

第三に、カメラの撮影視点により、対象物二点間の画面上での相対位置が異なる点がある。撮影視点による見え方の変化という意味では、第一の問題と同様であるが、対象物間を結ぶ辺や面が無いので、判断の難度が増す。状況を簡素化した模式図を図-9に示す。左円柱と右角柱を一列に並べる課題を考える。カメラ位置と画面例(A~C)から、対象物の画面上での相対位置や重なり方が違って見えることがわかる。今回実験の多画面条件では、マーカーが見える撮影倍率では、鋼製型枠全体を映すことができないため、模式図でのカメラの視点はとれない。このため、カメラBとカメラCのような、一列に並んだ状態でも画面上には異なる方向にズレが残る組み合わせで位置調整を行う必要がある。実験上では、それぞれの撮影視点映像を交互に確認しながら、微少な調整移動を繰り返すことになっていた。

このように多画面による様々な影響を受けながら、複合的な調整作業を、画面間で視線移動しながら行うことが、多画面条件での所要時間に表れたものと考ええる。

d) 解放

解放動作の所要時間平均は、現行環境で30.0秒、提案環境で13.9秒、比率は0.46であり、提案条件が有効な結果であった。

解放動作は、主に二つの段階で行われる(動作については図-10参照。各部名称については図-5参照)。第一段階は、アタッチメントと鋼製型枠の噛み合わせを解除して非接触状態にするため、ブームを下げる操作である。第二段階は、アタッチメントを鋼製型枠から離すため、運転席側から奥行方向へアームを押す操作である。

第一段階のブーム下げは、cm単位の精度が要求され

る動作となる。現行環境の場合、アタッチメント付近を拡大表示しなければ、噛み合わせ状態の確認は困難である。このため、現行環境での所要時間のうち、平均13秒は外部カメラによる拡大表示操作の待ち時間であった。この時間を所要時間から除く(表-3「解放 w/o Cam.」)と、現行環境の所要時間は16.9秒となり、比率は0.82と差は縮小した。提案環境の場合、接触状態か否かの判断であれば、映像から可能である。第二段階のアーム押し動作は、押し出す方向も停止場所も任意であるため、操作の自由度は高く、難度は低い。提案環境では、カメラ待ちや心的回転などの負荷も少ないことが有利であったと思われる。

e) 把持

把持動作の所要時間平均は、現行環境で24秒、提案環境でも24秒であった。

把持動作は、鋼製型枠のツメ状部分中心へアタッチメント板状部分を挿入し、落下防止枠と噛み合わせることで行われる(図-5および図-10参照)。この動作では、ツメ挿入部分へアタッチメント板状部分の高さを合わせることで、アタッチメント中心とツメ中心を合わせることで、型枠面に対して板状部分を垂直に挿入すること、などの制約を満たす精度の高い動作が必要である。このため、解放動作に比べて難度は高い。このような動作を行うため、現行環境では、アタッチメント付近の拡大表示が用いられる。なお、このための外部カメラ操作待ち時間の平均は、解放動作時の13秒に対して、把持動作時は5秒と短い。これは、把持動作が、解放動作の後に行われるため、カメラオペレータによるカメラ移動量が少ないことが影響している。カメラ操作待機時間を除くと、現行環境では19秒となり、比率は1.25と、現行環境が有効であった。

この動作では、アタッチメント板状部分と型枠ツメ状部分との相対位置情報が必要である。現行環境では、鋼製型枠側方からの映像によって、この間隙を直接視認できる(図-10 (b))。このため、相対距離の把握は容易である。建機操作のための心的回転は必要となるが、側方映像一画面で、操作に必要な情報を全て得られるため、複数画面を併用する最終調整動作のような負担は生じない。

一方で提案環境では、ツメ自体による遮蔽があるため、間隙を直接視認して相対距離を把握することは難しい(図-10 (a))。ツメを含む鋼製型枠とアタッチメントの画面上の重畳状態などから前後関係や距離を把握することは可能であるが、間隙の直接視認に比べて容易とは言えない。また、両眼立体視映像による奥行距離の判別は可能であるが、直接視認に比べれば、奥行距離の把握精度は低い。このような差異が所要時間の差に現れたものと考えられる。

(4) 事後インタビュー

実験実施の翌日、現行条件と提案条件の比較による感想の聞き取りを目的として、被験者3名へのインタビューを実施した。実施の都合上、3名同時に約20分間で行った。その概略について以下に記す。

a) 画質について

非圧縮高解像度の映像画質については、概ね肯定的であった。特に、高解像度+大画面であるため、必要に応じて(カメラのズーム操作やパン・チルト操作、切り替え操作を待つことや、多画面を見比べる動作をせずに)詳細部分を確認できる点については、3名から好評であった。

現行環境との比較という面では、映像圧縮によるノイズに対して「(現行環境では)石が四角くなって背景と重なる。(提案環境ではそれが無いのが良い)」等とする指摘があった。土砂のように空間周波数の高い映像を、H.264など現在主流の動画圧縮手法で圧縮した場合、画像を特定画素数のブロック単位で処理するため、そのブロック毎にモザイク状のノイズ(ブロックノイズ)が生じる。また、高い空間周波数成分を間引く処理が行われるため、画像の輪郭周辺でモヤモヤしたノイズ(モスキートノイズ)が生じる。石が四角くなる、背景と重なる、というのはこれらのノイズに対する指摘と考えられる。このようなノイズの無い非圧縮映像について、好評であった。

b) 両眼立体映像について

立体映像については、奥行き感を得ることができた、という面では肯定的な評価であった。一方で、奥行き方向の鋼製型枠設置動作に対して、横方向からの映像は、やはり欲しい、との意見であった。動作所要時間からも、「最終調整」「解放」での提案環境の有効性に対して、「把持」動作では、横方向映像のある現行環境が有効という結果が出ている。各動作が要求する映像情報に応じた構成が必要、と言える。

また、今回大画面の立体映像としたこともあり、建設機械の旋回動作時に「酔い」を感じるとして否定的な評価があった。立体映像及び大画面に起因する映像酔いについては、個人差や慣れの問題もある。しかし、旋回時は一時的に飛び出し量を減らす等の映像装置側での対策や、旋回を低速化する等の操作側での対策も考えられる。今後の検討課題としたい。立体視に用いるメガネによる疲労については、今回の実験が30分程度と短時間だったこともあり、特に感じないとのことであった。

c) 総合的な評価

全体として、現行環境を提案環境にそのまま置き換えることはできるか、との問いに対しては、視野角外の周辺状況が不明瞭であることについて指摘があり、提案環境に追加で外部の俯瞰カメラ1台が必要、というのが概

表-4 現行環境の画面使用状況概略

	現行環境の映像使用状況						提案環境 適否
	ズーム	ワイド	側方視点	俯瞰視点	建機視点	多画面	
旋回	×	◎	×	○	△	△	同等
移動	×	◎	×	◎	○	○	否
調整	◎	○	○	○	○	◎	適
解放	◎	×	◎	×	△	△	同等
把持	◎	×	◎	×	×	△	否

使用頻度	高	中高	中低	低
記号	◎	○	△	×

※側方視点は、主に移動カメラ車A (図-9) によるズーム側での撮影を表す。
 ※俯瞰視点は、主に移動カメラ車B (図-9) によるワイド側での撮影を表す。
 ※多画面は、複数画面を見比べる状況を表す。

ねの回答であった。

4. 議論

遠隔操作の現場実験の結果として、作業全体のサイクルタイムは、提案環境が有効という結果を得た。一方で、各動作単位では、現行環境と提案環境で異なる有効性が示された。ここで、動作分析の結果から得た現行環境における凡その映像使用状況と、提案環境の有効性の適否を表-4にまとめる。動作状況に応じて、各視点や映像倍率は選択利用されていた。俯瞰画像が重要な履帯移動や拡大画像が重要な把持動作では、現行環境の所要時間が短く、建機搭載カメラ視点以外の有効性が示されている。一方で、最終調整段階の、多画面を高頻度に見比べる状況では、最も現行環境と提案環境と動作時間比が大きく(0.56)、単一画面の提案環境が有効な結果であった。提案環境では、対象全体を画面画角内に内包し、心的回転などの負荷なく詳細を視認できることや、一定の奥行感があることが主な優位性であると考えられる。また、把持動作では、現行環境の外部カメラに有効性がある一方で、外部カメラ操作に伴う時間のロスが大きな割合を占めていた。

このような観察分析の結果から、作業効率を向上させるバックホウの遠隔操作映像環境は、今回提案の広視野角・高解像度・立体視の搭乗者視点カメラを構成の中心として、安全確認用の広域俯瞰カメラと、直視困難な作業対象のための外部カメラを必要に応じて加えるのが適切である、と考えられる。但し、多画面環境においては、作業者の視線移動や心的回転等による作業負荷が観察された。このため、外部カメラ台数は集約して最小限の台数にすべきと考える。

このような外部カメラ設置の適否や設置場所の判断ををアルゴリズムとして記述した例を表-5に示す。本例では、心的回転による負荷軽減のため、カメラ台数を可能な限り削減し、設置場所は、搭乗者視点カメラ側へ寄せる判断を行う。また、外部カメラ使用時と搭乗者視点カ

表-5 外部カメラ設置判断フローの例

```

Algorithm 1: External camera installation decision flow
Output: "ExtCameraList": the external cameras settings and numbers

"Objects" is an array of the work objects
"Procedure" is a list of the work procedure
"VisualEfficiency" is the work efficiency depends on the visual environment
"InitExtCameraList" is an array of the ExternalCameras in the initial state
"NearestCamera" is an ExternalCamera nearest the BackhoeCamera
"CameraRange" is camera's field of view
"OpTime" is the operating time caused by the manual handling of the external camera.
// rangeSearch(X,Y,Z): Finds all the X points that are within distance Z of the Y.
// kNNSearch(X,Y): Find the closest point in X to Y.

BEGIN
SET Objects TO visibility (complete | partial | hidden)
n ← number of Objects
FOR i = 1 TO n DO
IF objects[i] IS NOT visible(complete) THEN
SET objects[i] TO hasExternalCamera(nearestPointOfBackhoe)
ENDIF
ENDIFOR
WHILE InitExtCameraList IS NOT empty DO
NearestCamera ← InitExtCameraList.nearest(BackhoeCamera)
CameraList ← rangeSearch(InitExtCameraList, NearestCamera, CameraRange)
IF CameraList NOT CONTAIN visible(hidden) THEN
FOR i = 1 TO n DO
aot ← Procedure.amountOfOperatingTime(CameraList[i])
ADD CameraList[i].Efficiency(ExternalCamera) * aot TO ExEf
ADD CameraList[i].Efficiency(BackhoeCamera) * aot TO BkEf
ENDIFOR
IF BkEf > (ExEf + OpTime) THEN
ADD ExtCameraList TO kNNSearch(CameraList, CameraList.median)
ENDIF
ELSE
ADD ExtCameraList TO kNNSearch(CameraList, CameraList.median)
ENDIF
REMOVE CameraList FROM InitExtCameraList
CLEAR CameraList
ENDWHILE
END
    
```

メラ使用時の作業所要時間比や、外部カメラ制御の所要時間が既知であれば、それらを設置の適否の判断基準として用いる。本例は、遠隔操作機械を1台とした限定的な例であるが、このような自動化は、遠隔操作環境の導入時間短縮の一助となると考えられる。

5. おわりに

本稿は、無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率に与える影響について、新たな高品質映像環境の開発と、災害復興現場での映像環境比較実験を通して、検討したものである。

まず、基礎的な視認性実験の結果をもとに、遠隔操作で利用可能な、搭乗者視点の高解像度かつ両眼立体視の映像環境を構築した。

この提案映像環境と現行映像環境の比較実験を雲仙普賢岳の災害復興現場で行い、提案環境でのサイクルタイム減少を確認することができた。

作業内容分析等から、作業動作と映像条件の組み合わせで、映像環境の有効性は異なることもわかった。そこで、作業効率を最大化するための外部カメラ設置判断アルゴリズム案を示した。

今後の課題としては、映像伝送の無線化がある。今回採用した非圧縮4K3D映像の必要伝送速度が24 Gbpsであるのに対して、現状の無人化施工に多く採用される802.11jは規格値で54 Mbpsと十分ではない。地上デジタル放送のような圧縮伝送も可能であるが、圧縮伸張には、その処理遅延時間や実質的な解像度の減少という欠点がある。高品質低遅延な圧縮手法の研究開発も様々に取り組みられているが、我々は、映像情報を圧縮せずに送信

することで、圧縮伸張にかかる遅延時間を排し、高品質な映像をそのまま無線伝送する手法として、建機搭載型の光無線通信装置⁸⁾の開発を進めている。

また、本実験は統計的有意性を示すには至っていない。熟達被験者や実験装置等の制約は大きいですが、詳細な分析的研究も今後の課題である。

謝辞：本研究は、国立研究開発法人土木研究所との共同研究として実施した。本研究に関わる議論や助言を頂いた同研究所の茂木正晴氏、西山章彦氏に謝意を表す。雲仙普賢岳での作業効率実験においては、国交省九州地方整備局雲仙復興事務所の佐藤保之氏、杉山光徳氏、古賀唯男雄氏に様々なご配慮を頂いた。また、株式会社熊谷組の北原成郎氏、飛鳥馬翼氏、岡本仁氏、江良耕一氏をはじめ赤松11号作業所の諸氏には、実験実施にあたり、各種機材の準備や操作者の調整等のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

補注

本稿の第2章及び第3章冒頭部は、「日本ロボット工業会機関誌ロボット2016年1月号」の解説記事「高品質映像による建設機械の遠隔操作」に加筆修正をしたものである。

参考文献

- 1) 新田恭士：災害復旧に貢献する無人化施工技術，土木技術，Vol. 67, No. 4, pp. 16-23, 2012.
- 2) 北原成郎，周藤健：情報化施工に基づく無人化施工の実施：無人情報化施工システムの完成，建設の施工企画，Vol. 694, pp. 48-52, 2007.
- 3) 古澤正紀：無人化施工に見る技術開発の歴史，NETIS プラス，Vol. 2, pp.16-23, 2011.
- 4) 古賀康正：雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工，砂防学会誌，Vol. 52, No. 4, pp. 64-68, 1999.
- 5) 萬徳昌昭，宮元洋，堀之内義博，松井宗廣，櫻井一也，岡村祐介，吉田貴，井澤昌佳，小川正博：砂防における無人化施工技術の発展にむけて－実態調査・アンケート結果に基づく一考察－，第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集，pp. B142-B143, 2013.
- 6) 伊藤崇之：技研における立体テレビの研究成果，NHK 技研 R&D, No. 123, 2010.
- 7) Shepard, R. N. and Metzler, J.: Mental rotation of three-dimensional objects, *Science*, Vol. 171, Issue 3972, pp.701-703, 1971.
- 8) 伊藤禎宣，坂野雄一，茂木正晴，西山章彦，藤野健一，北原成郎，岡本仁，安藤広志：高品質映像による建設機械の遠隔操作，日本ロボット工業会機関誌「ロボット」，Vol. 228, pp.16-23, 2016.

(2016. 9. 27 受付)

REMOTE CONTROLLED CONSTRUCTION EQUIPMENT BY USING HIGH-RESOLUTION STEREOSCOPIC 3D IMAGES

Sadanori ITO, Yuichi SAKANO, Kenichi FUJINO and Hiroshi ANDO

In recovery and reconstruction after disaster, Unmanned Construction System (UCS) is used for the purpose of ensuring safety of operators. Reduction in the work efficiency of the UCS has become a major issue. Part of the cause could be the low spatial resolution and lack of depth information in the video the operators watch. In the present study, we compared the efficiency of the performance of the task similar to the work done in the disaster recovery site of Mt. Unzen under the proposed image environment with that currently used there. The proposed environment consisted of stereoscopic 3D video of uncompressed 4K resolution (3840×2160 pixels) for each eye presented on a large display while the current environment was 2D compressed video of low resolution taken by multiple cameras presented on multiple small displays. The proposed environment improved work efficiency by 23-35% compared with the current one.