

建設機械の遠隔操作技術  
向上に関する  
共同研究報告書

平成28年12月

国立研究開発法人土木研究所  
国立研究開発法人情報通信研究機構

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 建設機械の遠隔操作技術向上に 関する共同研究

## 要 旨 :

大規模事故や自然災害等の発災時に、迅速な復旧と安全な施工を両立するため、建設機械の遠隔操作に関する技術開発が求められている。本共同研究は、土木研究所 先端技術チームにおける土木機械技術や建設工事評価手法などの研究資源と、情報通信研究機構 多感覚・評価研究室における情報通信技術や認知機構の定量的評価技術などの研究資源について、個々の基礎研究の成果を適切に融合させ、社会的要請に沿った研究成果の社会還元を目的として実施することとした。

この実現ため、遠隔操作建設機械による作業効率を定量評価する手法を開発し、これを基盤として、遠隔操作作業者に映像や通信の環境が与える影響を評価分析することで、遠隔操作環境と作業効率の関係を明らかにした。また、これらの分析結果を踏まえて、作業効率向上を企図した新しい遠隔操作環境を開発した。

キーワード：無人化施工，遠隔操作，視覚情報，作業効率，映像・通信技術



研究担当者

	所属	氏名
国立研究開発法人 土木研究所	先端技術チーム 主席研究員	藤野健一
	先端技術チーム 主任研究員	茂木正晴
	先端技術チーム 主任研究員	山口 崇
	先端技術チーム 研究員	西山彰彦
国立研究開発法人 情報通信研究機構	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 室長	安藤広志
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究マネージャ	西村竜一
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 主任研究員	Daniel CALLAN
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	伊藤禎宣
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	木村敏幸
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	坂野雄一
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	竹本浩典
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	Juan LIU
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 研究員	Parham MOKHTARI
	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 有期技術員	Cengiz TERZIBASH
	ワイヤレスネットワーク研究所 宇宙通信システム研究室 主任研究員	有本好徳



## 目次

1. 研究の概要 .....	3
2. 研究の目的 .....	4
3. 研究の項目 .....	4
4. 研究組織 .....	5
5. 研究内容 .....	6
A) 油圧ショベル無人化施工の遠隔操作と搭乗操作における操作者視点の比較に 関する研究 .....	6
概要 .....	6
B) 無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価 .....	24
概要 .....	24
C) 操作方式の違いによる油圧ショベル無人化施工の作業動作解析 .....	40
概要 .....	40

D) 油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作インターフェースの違いによる作業効率の向上について .....	61
概要 .....	61
E) 高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作 .....	76
概要 .....	76
F) 映像通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデルタスクによる評価 .	96
概要 .....	96
G) 建機の遠隔操作環境へ適用する移動体用広帯域光無線通信装置の開発 .....	115
概要 .....	115
6. ま と め .....	129
7. 研 究 成 果 .....	130
対外発表 .....	130
受賞 .....	132

# 1. 研究の概要

独立行政法人土木研究所と独立行政法人情報通信研究機構は、共同研究協定を締結し、平成25年10月1日から平成26年3月31日までの期間、「建設機械の遠隔操作技術向上に関する共同研究」を実施した。

大規模事故や自然災害等の発災時に、迅速な復旧と安全な施工を両立するため、建設機械の遠隔操作に関する技術開発が求められている。本共同研究は、土木研究所 先端技術チームにおける土木機械技術や建設工事評価手法などの研究資源と、情報通信研究機構 多感覚・評価研究室における情報通信技術や認知機構の定量的評価技術などの研究資源について、個々の基礎研究の成果を適切に融合させ、社会的要請に沿った研究成果の社会還元を目的として実施することとした。

この実現ため、遠隔操作建設機械による作業効率を定量評価する手法を開発（対外発表(2)）し、これを基盤として、遠隔操作作業者に映像や通信の環境が与える影響を評価分析（対外発表(1)(3)）することで、遠隔操作環境と作業効率の関係を明らかにした（対外発表(4)(6)）。また、これらの分析結果を踏まえて、作業効率向上を企図した新しい遠隔操作環境を開発した（対外発表(5)(7)）。

対外発表のうち(4)と(7)については、建設ロボットシンポジウムにて発表し、優秀論文賞を受賞した。

## 2. 研究の目的

本共同研究では，大規模土砂災害発生時において迅速かつ安全な施工を実施するために，建設機械の遠隔操作技術に対する具体的なニーズや使われ方を明確化し，既存技術，あるいは先端的技術を導入した技術提案を目的としたものである。

提案された技術に関しては，災害発生時に利用される無人化施工技術（遠隔操作システム）および次世代の遠隔制御システムへ反映を図るものである。

共同研究協定書より抜粋

## 3. 研究の項目

研究項目	研究細目	研究分担	
		甲	乙
1. 遠隔操作における情報提示・伝達と作業効率の関連性に関する研究	超臨場感技術の適用方式	○	◎
	標準プラットフォームによる作業効率評価	◎	○
2. 遠隔操作による作業の効率向上手法の研究		◎	◎

※ 甲：独立行政法人土木研究所，乙：独立行政法人情報通信研究機構

共同研究協定書より抜粋

## 4. 研究組織

所 属 名	氏 名	役 職 名
独立行政法人 土木研究所	※藤野 健一 茂木 正晴 山口 崇 西山 章彦	技術推進本部 先端技術チーム 主席研究員 技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員 技術推進本部 先端技術チーム 主任研究員 技術推進本部 先端技術チーム 研究員
独立行政法人 情報通信研究機構	※安藤広志 西村竜一 Daniel CALLAN 伊藤禎宣 木村敏幸 坂野雄一 竹本浩典 Juan LIU Parham MOKHTARI Cengiz TERZIBASH 有本 好徳	ユニバーサルコミュニケーション研究所 多感覚・評価研究室 室長 多感覚・評価研究室 研究マネージャ 多感覚・評価研究室 主任研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 研究員 多感覚・評価研究室 有期技術員 ワイヤレスネットワーク研究所 宇宙通信システム研究室 主任研究員
※印は、研究責任者を示す		

共同研究協定書より抜粋

## 5. 研究内容

### A) 油圧ショベル無人化施工の遠隔操作と搭乗操作における操作者視点の比較に関する研究

#### 概要

地震・火山噴火等により発生する災害の復旧工事において、人が入り込むことの出来ない危険地域内で安全に施工できる遠隔操作による無人化施工が利用されている。しかし、油圧ショベルによる無人化施工は、搭乗操作に比べ作業状態の確認やバケットの奥行の把握が困難であること、動作状況を示すモニタへの表示の遅延などの要因によって作業効率が6～7割程度に低下している。

本研究では、遠隔操作時における作業効率の向上を目的に、土木研究所建設機械屋外実験場において油圧ショベルを用いた遠隔操作と搭乗操作による比較検証実験を実施した。実験では、遠隔操作の作業効率が良いオペレータと作業効率が悪いオペレータとの間で、サイクルタイムとアイマークカメラを用いたオペレータ視点、作業状況の動画を記録し比較分析を行った。その結果に基づき遠隔操作の作業効率低下の要因及び改善のポイントについて考察した。

#### 5-A.1. はじめに

地震・火山噴火等により発生する災害の復旧工事において、人が入り込むことの出来ない危険地域内では施工方法として建設機械の遠隔操作、いわゆる無人化施工が活用されている。

しかし、油圧ショベルによる無人化施工は、遠隔操作であるために、直接オペレータが油圧ショベルに搭乗して行う操作（以下、搭乗操作）と比較すると作業状態の確認といった知覚情報やバケットの奥行の把握等の空間の把握が困難であること、作業状況を示すモニタへの表示の遅延などの要因によって作業効率が6～7割程度に低下する。今後発生する災害への迅速かつ安全な復旧活動において無人化施工技術の進展は現場で期待されるものである。

## 5-A.2. 研究の目的

本研究では、無人化施工で使用されている建設機械の内、油圧ショベルを対象とし、遠隔操作と搭乗操作において、また、遠隔操作に慣れているオペレータと慣れていないオペレータとの間では、どのような状況で作業効率に違いが生じているのかについて実験により確認し、今後の遠隔操作の作業効率向上についての手がかりを得ることを目的とした。

## 5-A.3. 実験方法

現場を想定したフィールド内で油圧ショベルによる規定動作の操作実験を実施し、作業時におけるオペレータの視点及び視界映像、後に示す「標準作業」1回毎に掛かる作業時間（以下、サイクルタイム）を計測・記録した。

これらの結果について、遠隔操作での作業に最も慣れているオペレータと作業に慣れていないオペレータの間で実験結果を比較し、サイクルタイムの違いが生じた理由について考察を行った。また、遠隔操作と搭乗操作でサイクルタイムの差が最も大きかったオペレータに対しても同様に、サイクルタイムの違いが生じた理由について考察を行った。

### 5-A.3.1. 実験フィールド

油圧ショベルの遠隔操作と搭乗操作についての的確に比較を行うため作業フィールドを Figure.A-1 のとおり設定し、繰り返し作業により評価した。また、土の掘削作業を実験対象とした場合、掘削放土の位置や量によって条件が都度変化するため、比較対象としては適当ではないと判断し、実験での作業の設定を以下のように設定した。

### 5-A.3.2. 標準作業概要

Figure.A-1 に示す実験フィールドにおいて油圧ショベルを作業エリアまで走行し、固形対象物をバケットによって Point1 から Point2 に繰り返し移設する作業を行うこととした。

具体的な作業内容としては、まず Figure.A-2 の示すようにバケットによる作業に適した位置まで建設機械を移動する。その後、固形対象物を Point1 から Point2 に移設し、次に再び Point2 から Point1 に移設する。Point2 から Point1 への移設については、Figure.A-3 のとおり 770mm 四方の枠を設定し、そこへ移設する。以上の作業を標準作業として設定した。

尚、移設する固形対象物は、ドラム缶( $\phi 570\text{mm} \times$ 高さ 760mm, 重量約 100kg, 持ち手高さ 2,000mm)とした。

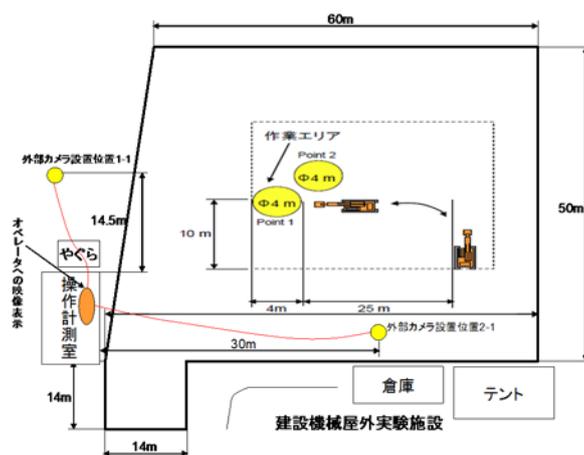


Figure.A-1 Outline of test field

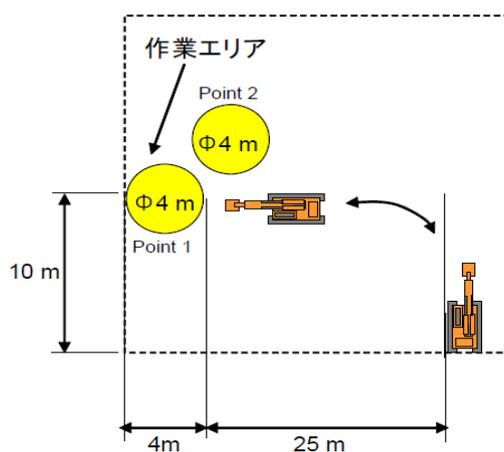


Figure.A-2 Work area

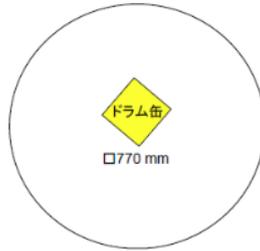


Figure.A-3 Detail of Point 1

### 5-A.3.3. 遠隔操作カメラ映像

遠隔操作を行う際に必要となる外部カメラ 2 台は Figure.A-1 に示す配置とした。さらに油圧ショベルの搭乗視点としてのカメラ 1 台の映像と併せて計 3 台のカメラ映像を操作計測室のモニタにより確認しながら、オペレータが遠隔操作を行った (Figure.A-5)。また、外部カメラの上下左右の旋回、ズーム等の操作はカメラオペレータが操作を行うこととした。



Figure.A-4 State of the experiment



Figure.A-5 Remote control operation

#### 5-A.3.4. 対象油圧ショベルの仕様

実験で使用した油圧ショベルは、12tクラス、バケット容量0.5m<sup>3</sup>でリモコンにより遠隔操作が可能なものを選定した。

#### 5-A.3.5. オペレータ

Table.A-1 のとおり、A～Dの4名のオペレータを対象として実験を行った。

Table.A-1 Operators for this experiment

オペレータ	年齢	性別	建設機械作業	
			経験年数	遠隔操作
A	40代	男	6年	遠隔操作実験5回以上
B	30代	男	5年	なし
C	30代	男	12年	なし
D	30代	男	18年	なし

#### 5-A.3.6. 計測方法

待機場所から走行を開始した瞬間を「開始」と定義した。作業エリアでの作業が終わり、待機場所まで走行して、機体上部を反転し、ブーム・アーム・バケットの操作が終了した時点「終了」と定義した。「開始」から「終了」までの時間を「サイクルタイム」として計測を行った。

また、作業中にオペレータの頭に視線計測装置（EMR-9(株)ナックイメージテクノロジー製 Figure.A-6 参照）（以下、アイマークレコーダ）を装着し、オペレータ視野の動画と、操作時の視点を計測した。



Figure.A-6 Eyemark recorder

#### 5-A.3.7. 実験回数

作業の開始から終了までを1回とし、オペレータ1人につき油圧ショベルの搭乗操作10回、遠隔操作10回、計20回の実験を行った。

#### 5-A.4. 実験結果

##### 5-A.4.1. 作業効率とサイクルタイムの関係について

本稿では、「サイクルタイムが速い（遅い）」ことを「作業効率が良い（悪い）」ことと同義であると定義して以後のデータ選定や比較を行った。

##### 5-A.4.2. サイクルタイム計測結果

オペレータ4人の搭乗操作10回のサイクルタイムを Figure.A-7 のグラフにまとめ、遠隔操作10回のサイクルタイムについては Figure.A-8 のグラフにまとめ、搭乗操作は各オペレータともに油圧ショベルの操作経験者であるため、サイクルタイムも収束しており個人差は少なかった。

遠隔操作では、油圧ショベルによる遠隔操作実験を多く経験したオペレータAのサイクルタイムはばらつきなく安定して速い傾向が見られた。オペレータCは2回目の早い段階でサイクルタイムが収束し、6回目及び8回目にサイクルタイムが遅くなっているが全体としてオペレータAに次いで速いサイクルタ

イムを記録している。油圧ショベル搭乗操作の経験年数が最も長いオペレータ D のサイクルタイムは安定しているが、他のオペレータと比較して遠隔操作での作業に時間を要している。経験の浅いオペレータ B については好不調の波が激しい結果となった。

#### 5-A.4.3. サイクルタイム平均による比較

作業に慣れた状態でのデータについて比較を行うため、実験回数を重ね、サイクルタイムが十分収束した状態<sup>2)</sup>である 4 回目からのデータを平均化し、遠隔操作と搭乗操作の比較を行った。結果を Table.A-2 にまとめた。

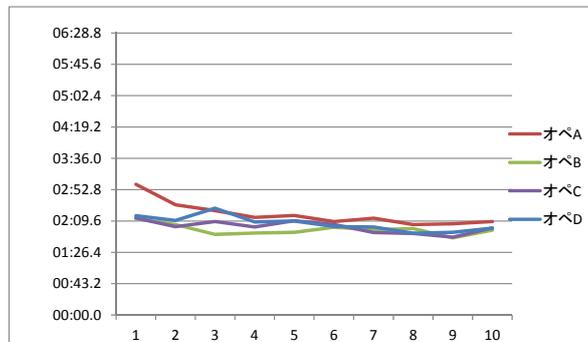


Figure.A-7 Cycle time (Manned operation)

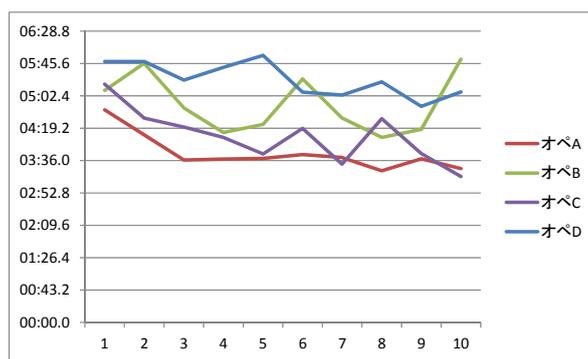


Figure.A-8 Cycle time (Remote control)

Table.A-2 Average cycle time

オペレータ	作業時間 (4回目～10回目平均)		作業効率 (遠隔/搭乗)
	搭乗	遠隔	
A	02:10.5	03:35.4	61%
B	01:55.4	04:41.7	41%
C	01:58.4	03:53.4	51%
D	02:01.1	05:17.9	38%

オペレータ A～D は油圧ショベルの搭乗操作について十分な経験を積んでいるため、搭乗操作でのサイクルタイムの平均について、オペレータ間で大きな差は見受けられない。しかし、遠隔操作ではサイクルタイムに差が見られた。遠隔操作のサイクルタイムが最も早かったオペレータ A については、搭乗操作に比べ遠隔操作のサイクルタイム比率が 61%であり、また、遠隔操作に慣れていないオペレータ D のサイクルタイム比率は 38%にまで低下した結果となった。

#### 5-A.4.4. 比較検証データの選定

遠隔操作での作業に最も慣れているオペレータと最も慣れていないオペレータの間で実験結果の比較を行う。対象となるオペレータは、Table.A-2 の結果に基づき遠隔操作のサイクルタイム平均が最も速いオペレータ A と最も遅いオペレータ D を選定した。尚、オペレータ D の搭乗操作についてはオペレータ A より 10 秒程度速いが、遠隔操作ではオペレータ A と比較してオペレータ D の作業は 102.5 秒遅い結果となっている。さらに、オペレータ D はオペレータ A～D の 4 名の中で、サイクルタイム比較（搭乗/遠隔）が 38%と最も低い結果となった。

対象とするオペレータ A とオペレータ D について、以下の①、②の方法で比較検証を行った。

- ①オペレータ A とオペレータ D の遠隔操作についての比較（以下、オペレータ技量比較）
- ②オペレータ D の遠隔操作と搭乗操作についての比較（以下、操作方法比較）

オペレータ A の遠隔操作とオペレータ D の搭乗操作，遠隔操作の各 10 回の作業データの内，「4.2 サイクルタイム平均による比較」と同じく，4～10 回のデータを比較対象とした。

さらに，分析し易くするため各サイクルタイムを「走行」「（固形対象物の）つかみ」「（固形対象物の）持ち上げ・旋回」「（固形対象物の）おろし」「（アームの）引上げ」の 5 つの要素に区分けした。（以下，区分けしたサイクルタイムを，各区分の「作業時間」とする。）

これら 5 つの区分から，差が大きく表れた 3 つの区分について比較を行った。

#### 5-A.4.5. オペレータ技量比較

オペレータ A とオペレータ D の遠隔操作について比較を行った。各作業区分における作業時間の比較結果は Table.A-3 のとおりである。この中から，作業時間の差が大きく表れた「走行」「おろし」「引上げ」の区分を比較する。さらに「走行」「おろし」「引上げ」について，作業 4～7 回目のデータの内，最も作業時間の短かったデータを採用して，各作業中のオペレータの視界映像と視点について比較を行った。視点解析の画像とポイント（オペレータの注視位置）を以下のとおりまとめた。

Table.A-3 Comparison of operation time (unit: seconds)

オペレータ	操作方式	走行	つかみ	持上・旋回	おろし	引上げ
A	遠隔	37.4	47.5	29.9	27.4	12.0
D	遠隔	62.4	54.3	29.0	38.3	31.6
作業時間差		25.0	6.8	-0.9	10.9	19.6

##### 5-A.4.5.1. 「走行」作業中視点のポイント

###### (1)オペレータ A 遠隔操作(Figure.A-9)

- 1)左履帯先端部，走行先を 9:1 の割合（注視時間）で確認している。
- 2)見るのは車載型カメラのみで，外部カメラは確認していない。

(2)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-10)

- 1)轍と走行先を交互に確認している.
- 2)カーブする際に、外部カメラ映像により油圧ショベルの姿勢を確認している.

5-A.4.5.2. 「おろし」作業中視点のポイント

(1)オペレータ A 遠隔操作(Figure.A-11)

- 1)固形対象物の取手部分(以下、バー)とバケット先端の位置関係のみを注視している.
- 2)バーと固形対象物を 1:4 の割合 (注視時間) で確認している.
- 3)車載型カメラのみ確認している.

(2)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-12)

- 1)2:1 の割合 (注視時間) で車載カメラと外部カメラを確認している.
- 2)下ろし始めは杵を注視し、途中からブーム・アーム・バケットの状態を把握するため外部カメラを確認している.
- 3)対象物が地面に置かれる直前でバーとバケットを注視している.

5-A.4.5.3. 「引上げ」作業中視点のポイント

(1)オペレータ A 遠隔操作(Figure.A-13)

- 1)バケットの動きを少な目にして、常に車載カメラにバケットが写っている状態を保っている.
- 2)見ているのは車載型カメラのみ.

(2)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-14)

1)バケットをバーから引き抜く際に、外部カメラと車載カメラの映像を頻繁に確認している.



Figure.A-9 View point analysis

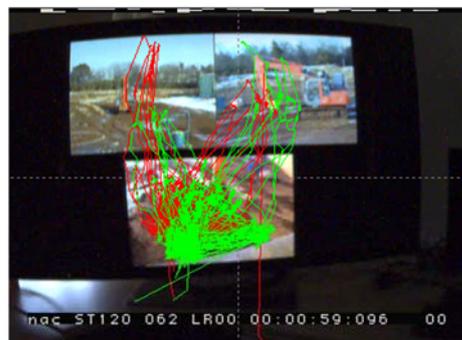


Figure.A-10 View point analysis



Figure.A-11 View point analysis



Figure.A-12 View point analysis



Figure.A-13 View point analysis

("Pulling up", operator A, remote control)

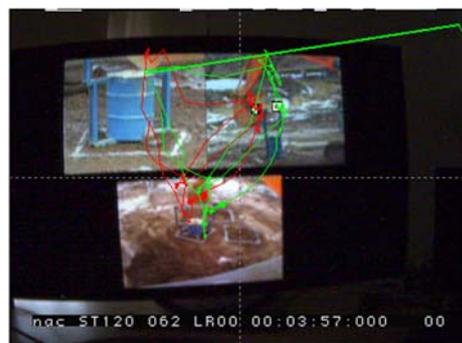


Figure.A-14 View point analysis

("Pulling up", operator D, remote control)

#### 5-A.4.6. 操作方法比較

オペレータ D による油圧ショベルの遠隔操作と搭乗操作について比較を行った。作業区分における作業時間の比較結果は Table.A-4 のとおりとなった。比較対象データは、「5-A.4.5.オペレータ技量比較」と同様に選定し、「走行」「つかみ」「引上げ」の3区分を比較対象とした。各作業中の動画、視点についての比較結果を以下のとおりまとめた。

##### 5-A.4.6.1. 「走行」作業中視点のポイント

###### (1)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-15)

- 1)左右の轍と走行先を交互に確認している。
- 2)カーブする際に、外部カメラより油圧ショベルの姿勢を確認している。

###### (2)オペレータ D 搭乗操作(Figure.A-16)

- 1)直線部は左履帯先頭部分から轍に沿って真っすぐ先を交互に確認している。
- 2)カーブでも同じく履帯先頭部から轍に沿って先を見るが、確認する距離が直線部より短い。
- 3)カーブの途中で短時間であるが数回バケットを確認している。

##### 5-A.4.6.2. 「つかみ」作業中視点のポイント

###### (1)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-17)

- 1)バケットをバーに近づける際に、外部カメラと車載カメラを交互に確認した。
- 2)バケットがバーに近づくほど、外部カメラを見る頻度が高くなった。

###### (2)オペレータ D 搭乗操作(Figure.A-18)

1)つかみの作業では、バケットとバーの両端を交互に確認しており、視点はそこだけに集中している。(Figure.18 参照、但しオペレータ D 搭乗操作の画面は、アイマークレコーダでの計測ずれが原因でオペレータの視線が背景画像に対して若干上の位置で記録されており、実際はバケット先端部付近に視線が集中している。)

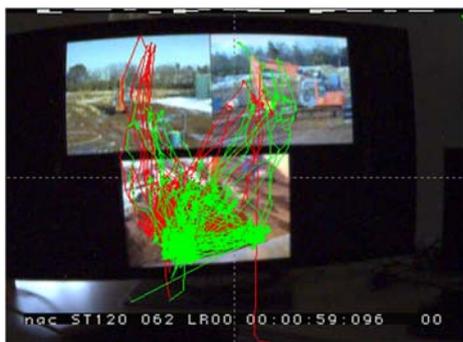


Figure.A-15 View point analysis  
("Moving", operator D, remote control)



Figure.A-16 View point analysis  
("Moving", operator D, manned control)

Table.A-4 Comparison of operation time (unit: seconds)

オペレータ	操作方式	走行	つかみ	持上・旋回	おろし	引上げ
D	遠隔	62.4	54.3	29.0	38.3	31.6
D	搭乗	33.7	13.7	3.5	15.2	6.4
作業時間差		28.7	40.6	25.4	23.1	25.2

### 5-A.4.6.3. 「引上げ」作業中視点のポイント

#### (1)オペレータ D 遠隔操作(Figure.A-19)

- 1)バケットをバーから引き抜く際に、外部カメラと車載カメラの映像を頻繁に確認している。
- 2)引き抜いたあと、ブーム・アーム・バケットを引き上げる際は外部カメラを見て作業装置の状態を確認している。

#### (2)オペレータ D 搭乗操作(Figure.A-20)

- 1)引上げの作業では、バケット先端部の両端のみを確認している。バケットの位置が上がるにつれ、視線も上がっている。(Figure.20 参照, Figure.18 と同様の理由から、実際はバケット先端部付近に視線が集中している。)



Figure.A-17 View point analysis



Figure.A-18 View point analysis

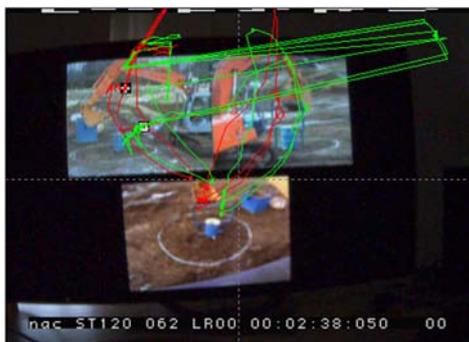


Figure.A-19 View point analysis



Figure.A-20 View point analysis

## 5-A.5. まとめと考察

### 5-A.5.1. 作業効率低下の原因について

以降、「サイクルタイムが速くなる（遅くなる）」ことを「作業効率向上（低下）」と表現する。

#### 5-A.5.1.1. オペレータ技量比較

オペレータ A は「走行」「おろし」「引上げ」の各作業時において、殆ど車載型カメラの映像のみを使用し、さらに作業に必要なポイントに視点を集中している。また、常にバケットを車載カメラの視界範囲に収めた状態で操作をしており、バケットの位置を継続して確認することにより、車載カメラ映像から確認できない部分のブーム・アーム・バケットの状態をイメージして作業を行っていると考えられる。

オペレータ D は、奥行の把握やブーム・アーム・バケットの状態把握が必要となる箇所において、複数の画面を頻繁に確認している。

オペレータ D の複数の画面を確認する行為が、オペレータ A による遠隔操作と比較して作業効率を低下させた原因だと考えられる。

#### 5-A.5.1.2. 操作方法比較

オペレータ D の搭乗操作は、作業時に視認するポイントが絞られていることが結果から考察できる。特に、Figure.A-16, Figure.A-18, Figure.A-20 におけるオペレータ D 搭乗操作における視点軌跡の画面が直線であることから、作業中のオペレータの視点には決められたルートが存在し、そのルートを沿うような形で視点を動かしていることが分かった。

一方、遠隔操作では、「つかみ」「引き上げ」の奥行検知や「走行」の際のブーム・アーム・バケットの状態把握の為に複数の画面を確認しており、その確認行為が作業効率低下の要因であると考えられる。

### 5-A.5.2. 作業効率向上のポイント

オペレータ技量比較や、操作方法比較の結果により、「①作業時におけるブーム・アーム・バケットの作業状態把握」「②作業空間における奥行き情報の把握」そしてこの2つを把握するための「③複数画像からの情報提供方法」、この3つのポイントが、遠隔作業において作業効率を向上するポイントであると考えられる。

### 5-A.5.3. オペレータ A の遠隔操作時視点について

オペレータ技量比較、操作方法比較を行った中で、オペレータ A の遠隔作業とオペレータ D 搭乗操作の作業中の注視箇所がほぼ同一であると判明した。

(Figure.A-21, Figure.A-22 参照, 但し Figure.A-21 については, Figure.A-18 と同様の理由から実際はバケット先端部付近に視線が集中している。)

オペレータ A は今回のような遠隔操作実験を数多くこなしており、効率よく作業を行うコツを習得したものと考えられる。搭乗操作と同じ視線で作業をする際には、遠隔操作経験による慣れによって車載カメラ映像からの視覚情報を、搭乗操作と同様な視点に置き換えて把握しているものと考えられる。

しかし、見ている箇所は同じでも遠隔操作と搭乗操作の作業速度には大きな差が生じている。Table.A-5 はオペレータ A 遠隔操作とオペレータ D 搭乗操作の作業時間比較結果である。実際に記録された動画を確認した結果からも、固形対象物の「つかみ、持上・旋回、おろし」といった区分ごとの作業時間に明確な差が現れていることが分かった。このことは、オペレータ A が車載カメラから得られる「奥行きを中心とする空間把握に必要な情報」が、搭乗操作時に得られる情報と比較すると少ない（臨場感不足）ことにより、作業状況を把握するまでに時間がかかることが要因であると推測できる。

Table.A-5 Comparison of operation time (unit: seconds)

オペレータ	操作方式	走行	つかみ	持上・旋回	おろし	引上げ
A	遠隔	37.4	47.5	29.9	27.4	12.0
D	搭乗	33.7	13.7	3.5	15.2	6.4
作業時間差		3.7	33.8	26.4	12.2	5.5



Figure.A-21 View point analysis  
(Operator D, manned control)



Figure.A-22 View point analysis  
(Operator A, remote control)

#### 5-A.6. 結論

これまでの実験結果から、油圧ショベルの遠隔操作に使用する映像を車載カメラからの映像に限定し、外部カメラの使用頻度を極力下げて、搭乗操作に近い視覚情報を提供することが作業効率向上に繋がると考えられる。

ただし、作業空間内での作業対象への奥行きやバケットを中心とする作業状況の把握といった搭乗時と同様な臨場感を提供するような工夫が必要だと考えられる。また、既存の遠隔操作システムのように車載カメラの角度を固定（若しくは角度切替え）するのではなく、作業状況に応じてオペレータ視点に追従した視覚情報が提供できるシステムを提案することによって、搭乗操作に近い作業効率を実現できるものと考えられる。

#### 5-A.7. 今後の課題と研究方針について

オペレータが遠隔操作を行う際に使用する視覚情報の提供方法が遠隔操作の作業効率向上において重要な因子であることが、今回の実験によって明らかになった。このことは結論でも述べているが、複数の映像情報を提供するのではなく搭乗操作と同様にオペレータの視点に追従した視覚情報を遅延なく提供する技術開発と検証評価が必要だと考えられる。

さらに、作業において設置・掘削などの精度が求められる場合は、作業空間の情報提供が前述の視覚情報と同様に必要だと考えられる。

また、遠隔操作に必要なリモコンの操作レバーなどのインターフェース部分が、作業効率向上に影響していると考えられることから、今後マンマシンインターフェースについて比較検証することが必要であると考えられる。

## 参考文献

(1) 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技術ニーズ-遠隔操作システムの検証実験報告-”, 第12回建設ロボットシンポジウム論文集, pp89-96, 2010.

(2) 茂木正晴, 藤野健一, 西山章彦,“建設機械遠隔操作の習熟に関する研究—建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察—”, 平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.19-22, 2012.

## B) 無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価

### 概要

本研究は、無人化施工において利用されている建設機械の遠隔操作技術の実態を明らかとするため、現場で利用されている遠隔操作システムの作業効率に関する基礎的なデータを計測し、作業効率を向上させるためのシステム・構築法の提案を目的としている。

本研究報告は、標準的な作業手順や作業環境を整えることによって遠隔操作の方式の差異による作業効率の違いを評価できるモデルタスク<sup>1)</sup>を活用して、搭乗と遠隔での操作や遠隔操作の環境の違いなどの操作インターフェースの違いについて作業効率（作業時間）の差異について計測実験を行った結果を述べる。また、これに基づき遠隔操作における作業効率改善の方法について考察する。

#### 5-B.1. はじめに

現在、日本では災害発生時（地震・噴火などによる災害）の初動対応として無人化施工が適用されている。この無人化施工は、人が立ち入ることのできない危険な箇所（雲仙普賢岳、福島第1原子力発電所の瓦礫撤去等）での迅速且つ安全な施工技術として利用されている。現在の無人化施工技術により、作業員やオペレータの安全を確保しながらある程度の品質や効率で施工を行うことは可能である。しかし、有人による施工機械の操作に比べて作業の品質やスピードが劣るなどの課題があり、現場での適用に際して更なる作業効率（作業時間）の向上が期待されている。

そのため、適切な遠隔操作方法や新たな機器の開発を目的として無人化施工における作業効率（作業時間）を評価することにより、ディスプレイや通信系などの機器の違いやオペレータの習熟や経験の差異が作業の効率に及ぼす影響の検討が進められている。

しかし、実現場（特に災害発生後の復旧活動）では作業の進捗に伴う環境変化のため、同一環境条件での比較検証実験・計測ができない状況にあり、それが研究開発を適切に進める上で1つの障害となっていた。

本報告は、土木研究所において提案した作業効率（作業時間）の評価のために定式化した、現場での掘削作業を想定し、繰り返しが可能なモデルタスク<sup>1)</sup>を活用して、搭乗と遠隔での操作、あるいは、遠隔操作における操作環境や操作方法の違いなどの操作インターフェースの違いについて作業時間を計測する実験を行った結果を述べる。また、これに基づいて、遠隔での操作における作業効率の改善方法について考察を行う。

## 5-B.2. 作業効率の比較検討の流れ

油圧ショベルの搭乗での操作は、オペレータは直接目視による視覚と聴覚、体性感覚情報などの知覚システムをフルに活用しているものと考えられる。

一方、遠隔での操作では、一般に対象となる作業現場から提供される映像のみにより操作が行われ、更に映像も幾つかの視野の情報に限られている。

この差異が作業効率（作業時間）に与える影響を定量的に把握することは、遠隔での操作効率向上に関する研究を進める上で有効かつ不可欠である。そこで、土木研究所では標準的モデルタスク<sup>1)</sup>による試験方法を提案し、より定量的に作業効率（作業時間）の改善に向けた検討を進めている。

比較検討に関しては、Fig. B-1 に示すフローに基づき検討を進めた。まず、搭乗での操作と無人化施工の現場で実際に使用されている遠隔装置での操作による基礎データを取得した。次に、操作装置や操作環境等の条件を変え、その違いによる作業効率の比較検討を行った。なお、作業効率の指標は、作業開始から終了までのサイクルタイムとした。

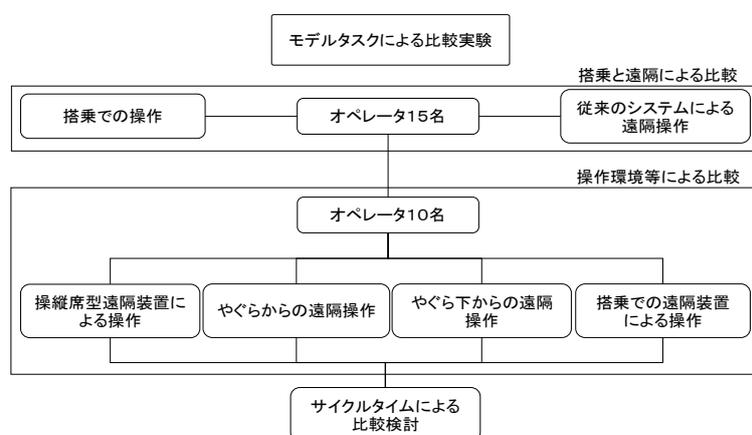


Fig. B-1 比較実験フロー

### 5-B.3. モデルタスク

参考文献 1)にて提案されたモデルタスクの作業環境を Fig. B-2 に示す。

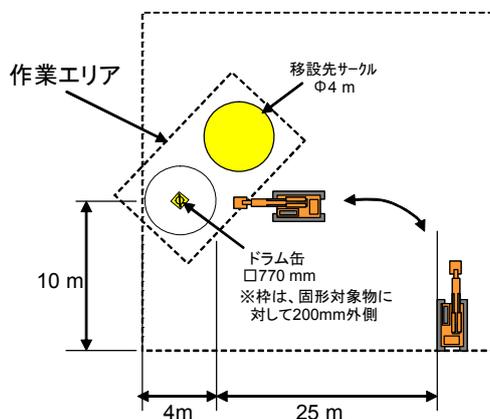


Fig. B-2 モデルタスクエリア平面図

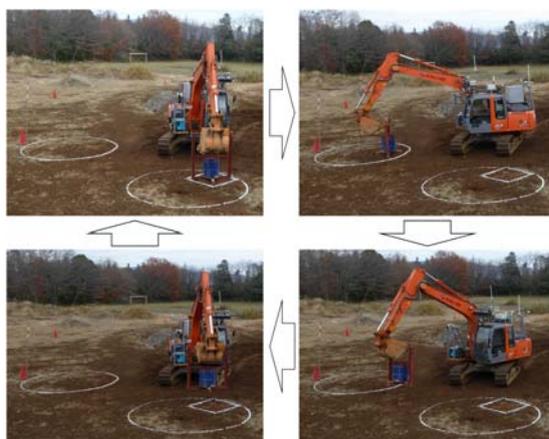


Fig. B-3 固形対象物の移動手順

このモデルタスクは、これまでに実施されている油圧ショベルによる無人化施工の作業要素を取り入れたものである。ここで、油圧ショベルは屈曲部を含む約 30m の経路を作業エリア手前まで走行し、作業に適した位置まで移動してから、Fig. B-3 に示すように固形対象物を移設先サークルに移設し、その後、再び、初期位置の枠内に固形対象物を戻す作業を行う。

この動作は、油圧ショベルによる掘削を模しているが、土砂を利用した場合、一般的にバケットの山積み量の違いが作業に影響してしまう。このため、

バケットの山積み量を毎回同じにすることが困難となり，再現性の観点で問題がある．そこで，Fig. B-4 に示す固形対象物を掬い上げる類似作業モデルを設定した．

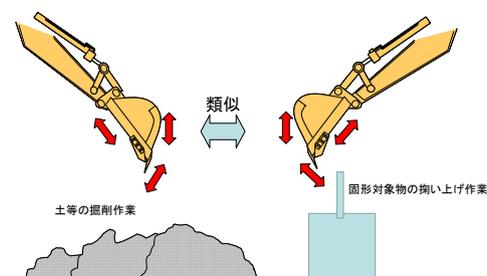


Fig. B-4 作業モデル

今回の評価実験においては，使用する油圧ショベルは  $0.5\text{m}^3$  クラス，固形対象物としてドラム缶形状(底部枠 $770\text{mm}$ ×高さ  $760\text{mm}$ ，重量約  $100\text{kg}$ ，持ち手高さ  $2,000\text{mm}$ )とした．

実験フィールドと実験の様子を Fig. B-5 に示す．



Fig. B-5 実験フィールド全景

## 5-B.4. 搭乗・遠隔操作における比較実験

### 5-B.4.1 実験内容

実験は、土木研究所保有の油圧ショベル（0.5m<sup>3</sup>クラス）を利用し、土木研究所内建設機械屋外実験場において、搭乗操作と遠隔操作によるサイクルタイムの計測・評価を行った。

油圧ショベル操作歴5年以上あるオペレータ15名に実験の協力を依頼し、その各オペレータにより条件を変えて行ったサイクルタイムを計測した。具体的には、モデルタスクによる試験方法により、先に搭乗操作を行い、次に遠隔操作を行って、その各々のサイクルタイムを計測した。また、搭乗操作及び遠隔操作は各々10回実施し、オペレータ15名の操作回数に基づく操作傾向（慣れによるサイクルタイムの変化）を計測した。実験日は、2014年8月4日～9月2日であった。



Fig. B-6 搭乗操作状況

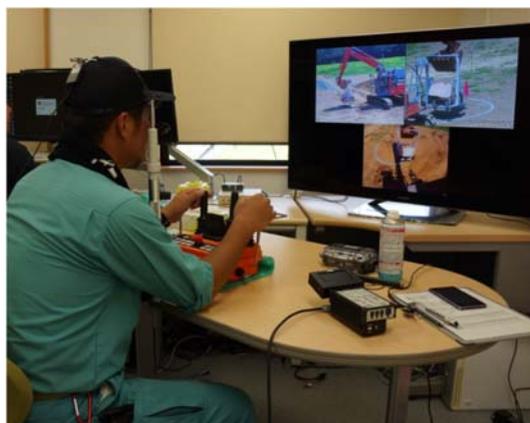


Fig. B-7 遠隔操作状況

#### 5-B.4.2 実験計測結果

実験結果として、オペレータ 15 名の作業時間の平均値を Fig. B-8 に示す。搭乗操作については 2 回目以降からサイクルタイムが安定した傾向が見られた。しかし、遠隔操作に関しては、回数毎のサイクルタイムに若干バラツキが現れる結果となった。また、オペレータによるサイクルタイムの違いは、搭乗操作では標準偏差 18sec となり個人差が小さいのに対して、遠隔操作での標準偏差 81sec となり、個人差によるバラツキが大きいことが傾向として確認された。

次にオペレータ 15 名の平均値から搭乗操作と遠隔操作におけるサイクルタイム差を整理すると、遠隔操作での平均は 294sec であり、搭乗操作での平均 127sec との比較として、約 2.3 倍の時間がかかることが計測された。

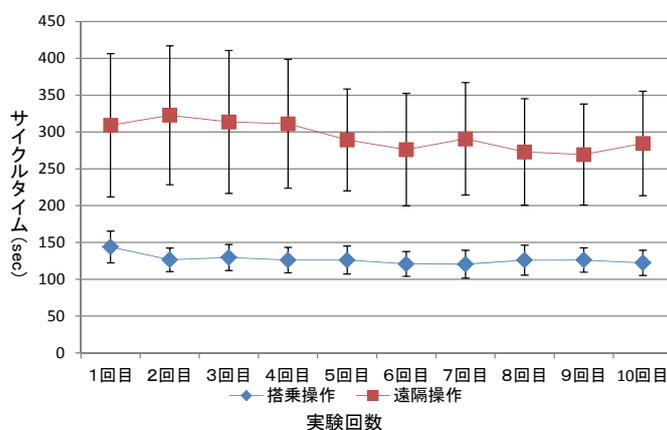


Fig. B-8 搭乗操作と遠隔操作の平均サイクルタイム差

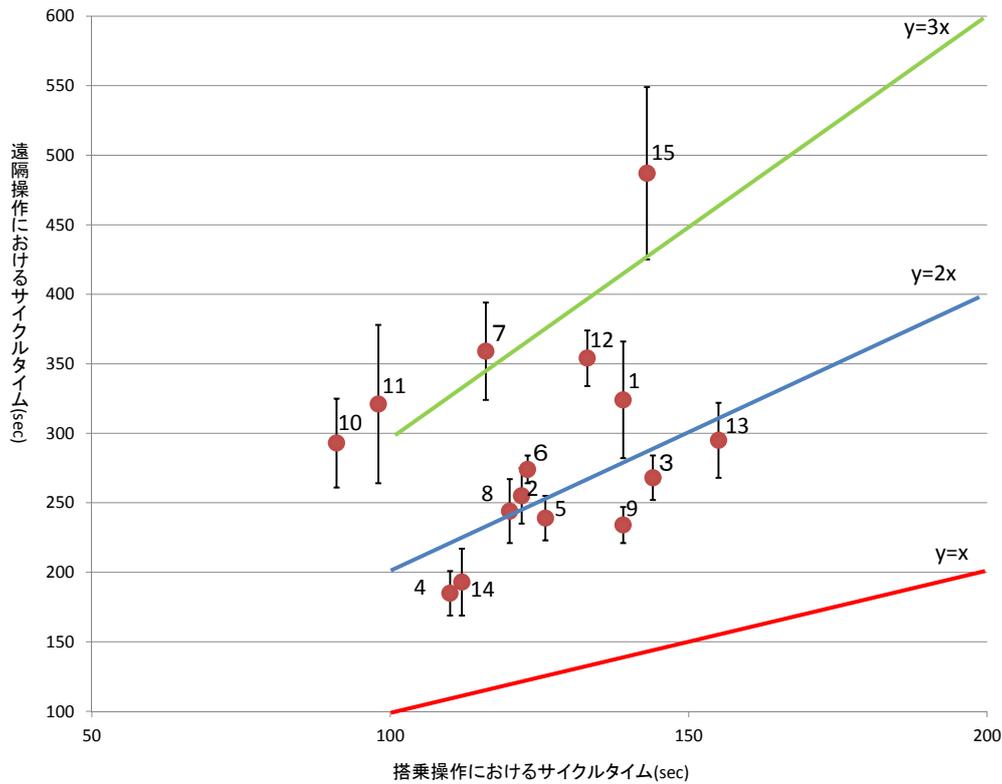


Fig. B-9 オペレータ 15 人のサイクルタイム差

また、本実験での計測データを、横軸に搭乗操作時の平均サイクルタイム、縦軸に遠隔操作時の平均サイクルタイムとして、オペレータ 15 名のサイクルタイムデータ散布図を整理した。その結果を Fig.B- 9 に示す。（Fig. B-9 にプロットされている数字はオペレータ No である。）その結果、サイクルタイム差が約 2 倍( $y=2x$ )の傾向を示すグループと約 3 倍( $y=3x$ )の傾向を示すグループに分類することができた。

これらの各グループでは、10 回の操作における作業時間のバラツキに異なった傾向が見える。すなわち Fig.B- 9 に示すとおり搭乗操作に対して約 2 倍のサイクルタイム差のある遠隔操作グループでは標準偏差は平均 19.7sec、約 3 倍のサイクルタイム差のある遠隔操作グループの標準偏差は平均 43.2sec であり、搭乗操作に比して遠隔操作の所要時間が大きいグループは遠隔操作における所要時間のバラツキも大きいことが示されている。

### 5-B.4.3 オペレータの遠隔操作時間の傾向による分類

実験計測結果で述べたようにモデルタスクをオペレータ 15 名が 10 回実施したサイクルタイムは、搭乗操作に関しては、全てのオペレータについて、サイクルタイムのバラツキは小さかった。しかし、遠隔操作によるサイクルタイムに関しては、Fig. B-9 で見られるように個人によっては、ある程度のバラツキがあることが計測できた。

この遠隔操作でのサイクルタイムの傾向をオペレータの個人毎に分析すると、Table.B-1 に示すようにオペレータは大きく 3 つのタイプに大別することができる。その傾向は、以下のとおりである。

- ①安定タイプ：遠隔操作のサイクルタイムが搭乗操作と同様に安定しているケース (Fig. B-10)
- ②変動タイプ：実験回数毎にサイクルタイムの変動が見られるケース (Fig. B-11)
- ③向上タイプ：実験回数毎にサイクルタイムが短縮するケース (Fig. B-12)

Table.B-1 オペレータの操作時間の傾向による分類

操作傾向	オペレータNo					
安定タイプ	1	2	3	6	9	12
変動タイプ	4	5	10	14		
向上タイプ	7	8	11	13	15	

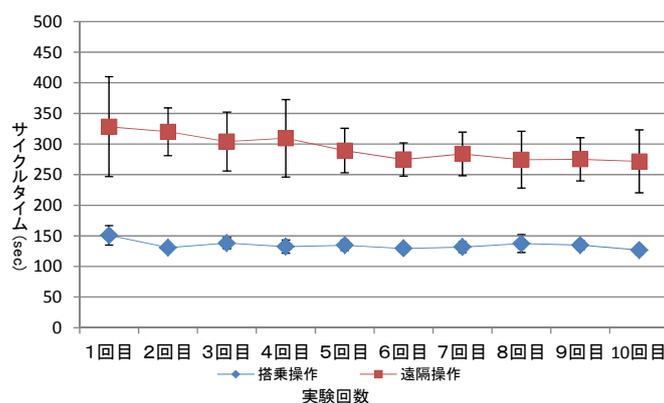


Fig. B-10 安定タイプグループのサイクルタイム

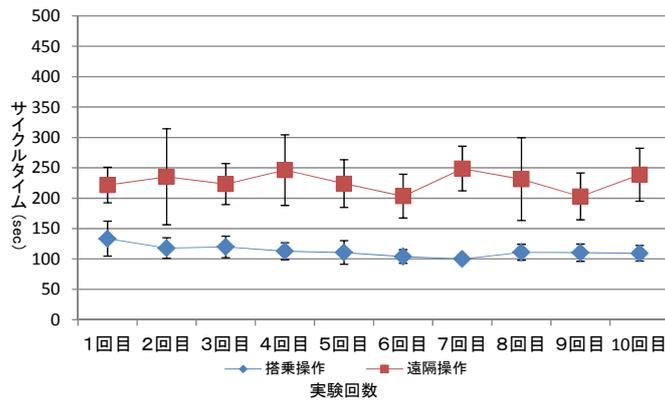


Fig. B-11 変動タイプグループのサイクルタイム

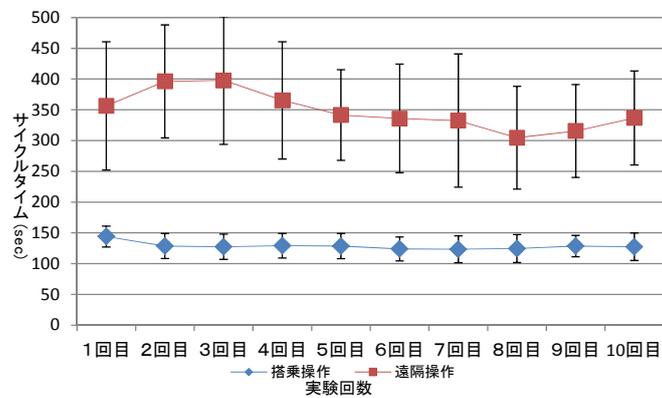


Fig. B-12 向上タイプグループによるサイクルタイム

## 5-B.5. 操作環境等の違いによる比較実験

### 5-B.5.1 実験内容

モデルタスクを用いて遠隔操作時におけるサイクルタイムの遠隔操作の環境および、操作方法の違いによる比較実験を行った。

なお、この比較実験を進めるにあたっては、実験ケースが多岐に渡り、準備から計測に要する時間やオペレータの長時間拘束の困難さからオペレータを限定する必要があるため、前記 15 名から Table.B-2 に示すように 10 名を選抜した。選抜にあたっては、操作技量のバラツキを少なくするため操作傾向が比較的類似しているオペレータを選んだ。

Table.B-2 対象オペレータ

操作傾向	オペレータNo			
安定タイプ	1	2	9	12
変動タイプ	4	5	14	
向上タイプ	8	11	13	

比較実験については、前記の実験と同様に、先に搭乗操作を行い、次に操縦席型遠隔装置による操作、やぐらからの遠隔操作、やぐら下からの遠隔操作、搭乗での遠隔装置による操作の順番で、モデルタスクを各々10回実行させ、そのサイクルタイムを計測した。実験日は、2014年11月21日～2015年1月26日であった。

#### 5-B.5.1.1 操縦席型遠隔装置による操作

実験で使用している油圧ショベル（日立製 0.5m<sup>3</sup>）と同タイプの操縦席に既存の遠隔装置を接続改造したもので、従来の遠隔操作装置と同様に計測室内で実験を実施した。

比較検証実験での映像装置については、従来の遠隔操作と同様なモニタと映像情報（建設機械搭載カメラ1台、固定カメラ2台からのリアルタイム映像）とした。（Fig. B-13）



Fig. B-13 操縦型遠隔装置による操作状況

### 5-B.5.1.2 やぐらからの遠隔操作

鉄骨製のやぐら（地上高 3.0m）より直接目視にて遠隔操作を実施した。やぐらでの操作に関しては、モデルタスクにおける建設機械の一連の作業範囲を目視にて確認できるもので、室内からの遠隔操作の映像情報より多くの情報が得られる条件での操作となる。ただし、やぐら正面に建設機械が移動した際、バケットによる死角が存在している。



Fig. B-14 やぐらからの遠隔操作状況



Fig. B-15 やぐらでのオペレータの操作状況

### 5-B.5.1.3 やぐら下からの遠隔操作

Fig. B-16 に示すように地上からの直接目視により遠隔操作を実施した。オペレータの位置は、油圧ショベルとほぼ同じ平面上であるが、モデルタスクにおける建設機械の一連の作業範囲が目視で確認できる位置としたため、やぐらからの操作に比べると結果として死角は少ない。



Fig. B-16 やぐら下からの遠隔操作状況

### 5-B.5.1.4 搭乗での遠隔装置による操作

搭乗での遠隔操作については、手持ち型の遠隔操作装置を Fig. B-17 に示すように建設機械操縦席に持ち込み、操縦席内の操作レバーを使わずに遠隔装置によってモデルタスクを遂行した。

映像等、操作に必要なオペレータへの情報については、操作装置以外は全て搭乗操作と同じ条件となっている。



Fig. B-17 搭乗での遠隔操作状況

### 5-B.5.2 実験結果

これらの実験結果（得られたサイクルタイム）を Fig. B-18,19 に示す。

遠隔操作環境の違いによるサイクルタイム差に関しては、やぐらの上からの遠隔操作  $235\text{sec}\pm 13.7$ 、やぐらの下からの遠隔操作  $197.7\text{sec}\pm 5.8$  で見られるように環境から与えられる視覚情報の違いによってサイクルタイム差が現れることが明らかとなった。

操作インターフェースの差による違いに関しては、搭乗操作  $120\text{sec}\pm 3.4$  に最も近いサイクルタイムは、搭乗での遠隔操作機器の利用時  $171\text{sec}\pm 6.9$  であった。また、遠隔操作  $267\text{sec}\pm 17.9$  に対して操縦席型遠隔装置  $257\text{sec}\pm 14.4$  は若干サイクルタイムが短くなる傾向が確認された。

これらの結果については、現在更に詳しく検討中であり、それについては追って報告することとしたい。

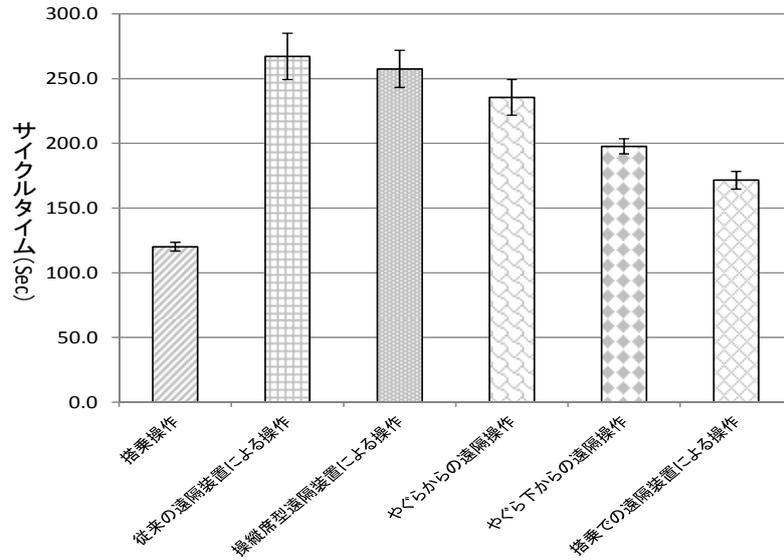


Fig. B-18 操作環境等の違いによるサイクルタイム

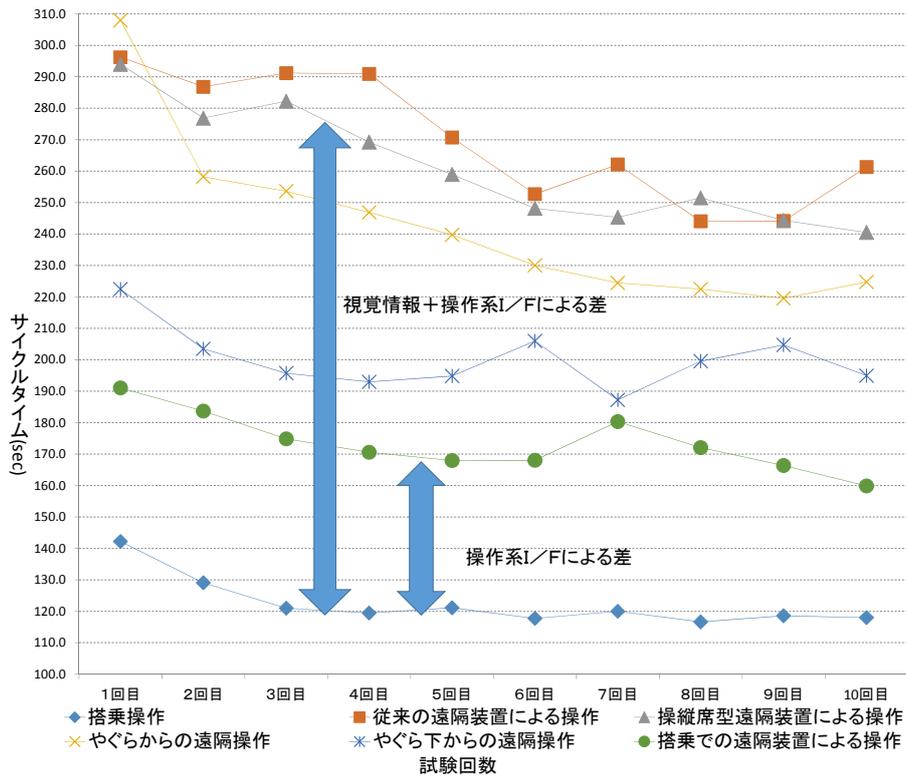


Fig. B-19 比較実験における結果

## 5-B.6. まとめ・考察

### 5-B.6.1 搭乗操作と遠隔操作の実態

これまで油圧ショベルによる無人化施工では一般に搭乗での施工と比べて約1.7倍の時間を要するものと言われてきた。本実験でのモデルタスクによる実験で、オペレータの搭乗操作と遠隔操作を比較した場合、遠隔操作は搭乗操作の概ね約2.3倍の時間を要する結果が得られ、サイクルタイムによる指標により作業効率の実態を確認することができた。また、遠隔操作によるサイクルタイムには、個人差による傾向として、大別すると3つの傾向を確認することができた。

### 5-B.6.2 操作環境等の違いによる比較検証実験

比較検証実験では、Fig. B-19に示すように搭乗操作から従来の遠隔操作の他に段階的に操作環境や操作系インターフェースを変えることによって、サイクルタイム差の違いを確認することができた。このことは、搭乗での操作時に得られる環境情報の取得によって作業効率が向上できること、モニタ等からの映像情報からでは認知することができないファクターが存在していることを示唆しているものと考えられる。また、搭乗での遠隔操作装置によるサイクルタイムが搭乗操作に対して約1.4倍であることは、操作インターフェースの研究開発によって作業効率の改善が可能であることを暗示していると考えられる。

今後は、この実験結果について更に分析を行い、実験に基づく基礎データの蓄積及び解析をとおして、人間科学分野での基礎実験等による人の空間認知、知覚システムに関する研究に進めて行きたい。また、作業効率改善に向け、映像装置・操作インターフェースの技術開発の必要性が示されたと考えており、これについても検討を進めて行きたい。

## 参 考 文 献

- (1) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一: 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案, 建設機械施工, Vol.66, No.8, pp.71～79, 2014.
- (2) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Akihiko Nishiyama: RESEARCH ON OPERATOR'S MASTERY OF UNMANNED CONSTRUCTION, Proceedings of The 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.540-547, 2013.
- (3) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ohtuki, Takeshi Hashimoto: RESEARCH ON VISUAL POINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHNERY, Proceedings of The 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.532-537, 2011.

## C) 操作方式の違いによる油圧ショベル無人化施工の作業動作解析

### 概要

本研究では油圧ショベルの遠隔操作において、操作方式による作業効率への影響の実態を把握し、作業効率向上に繋がる知見を得ることを目的とする。この目的のため、複数の操作方式によりモデルタスク<sup>(1)</sup>(土木研究所提案)を用いた比較検証実験を実施し、実験中の油圧ショベルの挙動について動作解析を行った。その結果、油圧ショベル遠隔操作について、インターフェースの操作性、映像情報の作業効率への影響について実態を把握し、作業効率向上に繋がる知見を得ることができた。

#### 5-C.1. はじめに

地震・火山噴火等により発生する災害の復旧工事のように人の立ち入りが禁止された危険地域内における施工方法として、建設機械の遠隔操作いわゆる無人化施工が活用されている。災害への迅速かつ安全な復旧活動の技術として、無人化施工の進展は現場で期待されるものである。

無人化施工で遠隔で行う油圧ショベルの操作はオペレータが油圧ショベルに搭乗して行う操作（以下、搭乗操作）と比較すると作業効率が低下することがわかっている。当研究所では、無人化施工作業効率低下の実態と要因、改善策について研究を進めてきているところである。

#### 5-C.2. 研究の目的

これまでの研究<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>から遠隔操作の操作方式毎に作業効率が変わる原因は、遠隔操作装置の操作性、提供される映像から得られる情報量の差にあるのではないかと考えた。

本研究の目的は、この考えに基づき作業要素毎の作業時間や実験記録動画を解析し、インターフェースの操作性、映像情報の作業効率への影響について実態を把握し、無人化施工の作業効率向上に繋がる知見を得ることである。

当研究所において、Fig.C-1 のフローのとおりモデルタスクによる比較実験を

進めているところである。モデルタスクを用いて遠隔操作の映像情報および、操作条件の違う6通りの操作方法による比較実験を実施し、後述する「標準作業」1回毎に掛かる作業時間（以下、サイクルタイム）及び作業時の全景映像を計測・記録した。（Fig.C-1）

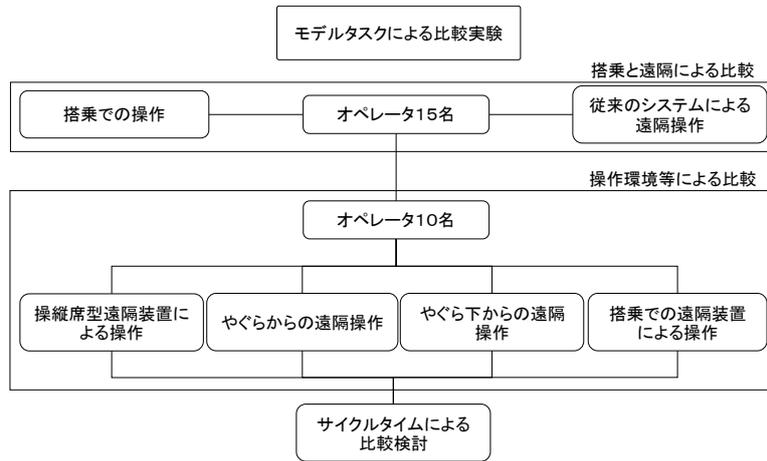


Fig. C-1 Flow of comparative experiments

### 5-C.3. 実験方法

#### 5-C.3.1. 実験フィールド

実験フィールドは Fig.C-2 のとおり設定した。

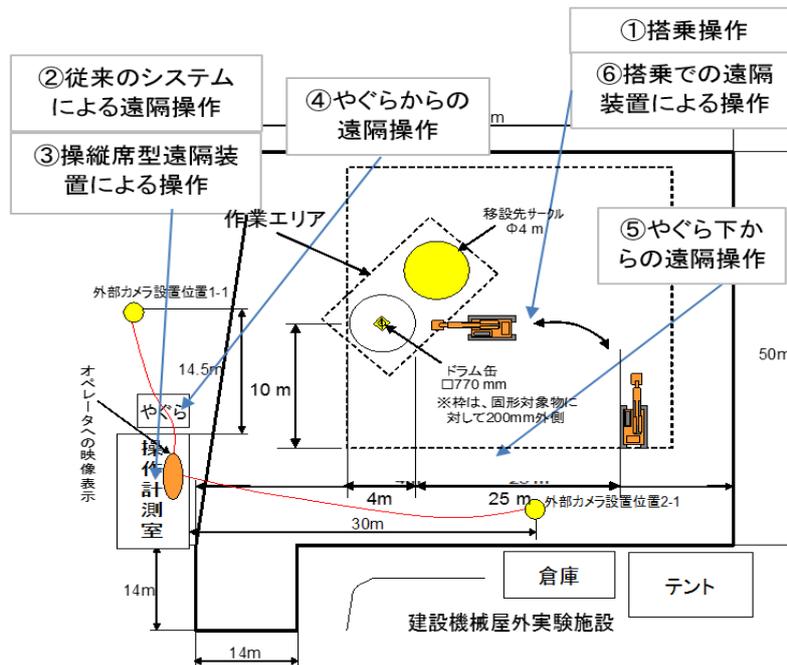


Fig. C-2 Overview of the experimental field

### 5-C.3.2. モデルタスクの概要

本研究においては以下の作業を標準的なモデルタスクとして設定した。

①実験フィールド (Fig.C-2) において作業位置 (作業エリア付近) まで建設機械の走行を行う。

②掘削作業の代替として、固形対象物をバケットでつかみ初期位置から移動先サークルに移動する。

③固形対象物をバケットでつかみ、移動先サークルから初期位置に移動する。

(初期位置については、770mm 四方の枠を設定し、その枠内に固形対象物を設置する。枠を外れて設置した場合は再度固形対象物を持ち上げて設置をやり直す。)

なお、移設する固形対象物は、ドラム缶( $\phi 570\text{mm} \times$ 高さ 760mm, 重量約 100kg, 持ち手高さ 2,000mm)とした。

### 5-C.3.3. 実験用機材等

#### 5-C.3.3.1. 油圧ショベル

遠隔操作型油圧ショベル（12tクラス、バケット容量0.5m<sup>3</sup>）を使用した。

#### 5-C.3.3.2. 映像装置

操作計測室内で遠隔操作を行う際に必要となる操作用の映像を撮影するため、外部カメラ2台を配置した（Fig.C-2）。油圧ショベルからの映像と併せて計3台のカメラ映像を操作計測室のモニターに表示させ、オペレータが遠隔操作を行った。また、外部カメラの上下左右の旋回、ズーム等の操作は専属のカメラオペレータが操作を行うこととした。

#### 5-C.3.4. 操作方式

Fig.C-1に記載されている6通りの操作方法の詳細を以下に示す。

##### (1)搭乗操作

油圧ショベルにオペレータが搭乗して、運転席に備え付けてある実機のレバーを使用した通常の搭乗操作を行う（Fig.C-3）。



Fig.C-3 Boarding operation

## (2)従来のシステムによる遠隔操作

ここでいう「従来のシステム」とは、現在、無人化施工の現場で一般的に使用されている遠隔操作方法を指す。Fig.C-2の「操作計測室」内で、5-C.3.3.2に述べた映像装置による3台のカメラ映像を確認しながらリモコンによる遠隔操作を行う。(Fig.C-4)



Fig.C-4 Remote control according to the conventional system

## (3)操縦席型遠隔装置による操作

Fig.C-2の「操作計測室」内でカメラからの映像を確認しながら実機と同じ操縦席（以下、操縦席型遠隔装置）及び実機と同じレバーにより遠隔操作を行う。(Fig.C-5)



Fig.C-5 Cockpit type remote device

#### (4) やぐらからの遠隔操作（目視）

実験フィールド（Fig.C-2）内に「やぐら」として記した場所にある高さ 3m の鉄塔（以下、やぐら）の上から、作業全景を目視しながらリモコンによる遠隔操作を行う。（Fig.C-6）



Fig.C-6 Remote control from the tower (visual)

#### (5) やぐら下からの遠隔操作（目視）

実験フィールド(Fig.C-2)の「⑤やぐら下からの遠隔操作」で示された箇所（高さ 0m）にオペレータを配置して、全景を目視しながらリモコンによる遠隔操作を行う。（Fig.C-6）

#### (6) 搭乗での遠隔装置による操作

油圧ショベルにオペレータが搭乗して、リモコンにより操作を行った。（Fig.C-7）



Fig.C-7 Boarding operation using the remote control device

### 5-C.3.5. 操作方法の設定について

6つの操作方法はTable.C-1のとおり分類できる。

操作方法①と⑥，②と③を比較することにより，インターフェースの違いによる影響を把握できる。操作方法①と③，②④⑤⑥を比較することにより，映像情報の違いによる影響を把握できる。

Table.C-1 Classification of the operation system

		映像情報			
		遠隔目視 (やぐら)	遠隔目視 (やぐら下)	搭乗操作時 の視界映像	モニター (カメラ3台による映像)
操作イン ターフェース	実機レバー			①搭乗操作	③操縦席型遠隔装置 による操作
	リモコン	④やぐらからの 遠隔操作	⑤やぐら下からの 遠隔操作	⑥搭乗での遠隔装置 による操作	②従来のシステム による遠隔操作

インターフェースの操作性と映像情報の作業効率への影響について実態を把握するため，これらの操作方法を設定した。

### 5-C.3.6. オペレータ

Table.C-2のとおり，油圧ショベルの搭乗での操作経験が5年以上あるオペレータ10名を対象とした。

Table.C-2 Age and construction machinery years of experience of operator

オペレータ	年齢	経験年数	オペレータ	年齢	経験年数
No.1	38歳	20年	No.6	30歳	15年
No.2	35歳	10年	No.7	32歳	10年
No.3	34歳	10年	No.8	31歳	15年
No.4	34歳	10年	No.9	39歳	15年
No.5	57歳	30年	No.10	46歳	20年

### 5-C.3.7. 計測方法

待機場所から走行を開始した瞬間を「開始」とした。作業エリアでの作業が終わり、走行して待機場所へ戻り、機体上部を反転し、停止姿勢をとった時点「終了」とした。「開始」から「終了」までの時間を「サイクルタイム」として計測を行った。なお、作業効率を評価するにあたり、サイクルタイムを指標とした。また動画解析用として、遠隔操作用の映像を記録するカメラとは別に設置した固定カメラにより、作業全景(Fig.C-8)を記録した。



Fig.C-8 Installation of work for the camera

### 5-C.3.8. 実験回数

モデルタスクとして設定した作業をオペレータ 10 名が、6 つの操作方式毎に 10 回の繰り返し作業を行った。

## 5-C.4. 実験結果

### 5-C.4.1. 計測データの整理

操作方式毎のサイクルタイムの違いがどのような原因によるものか把握することを目的として、以下の 1)~3)の流れで実験により得られたデータを整理した。

1)サイクルタイム平均を基に比較対象とするオペレータを選定する。

- 2)各サイクルタイムを作業要素毎に分割する.
- 3)作業時間差が大きい作業要素について，油圧ショベルの作業動画解析を行う.

#### 5-C.4.2. 比較対象データの選定

作業に慣れた状態でのデータについて比較を行うため，サイクルタイムのばらつきが十分収束した状態<sup>(2)</sup>である4回目から10回目のデータを比較対象とした。

#### 5-C.4.3. 比較対象とするオペレータ

作業を行った10名のオペレータに対し，6つの操作方式全体の平均サイクルタイムを算出した。動作解析の考察を行い易くするため，対象オペレータを一人に限定した。搭乗操作と従来システムによる遠隔操作の平均サイクルタイム差が一番大きく現れているオペレータを，動作に差があり比較を行いやすいと想定し，比較対象として選定した (Fig.C-9)。

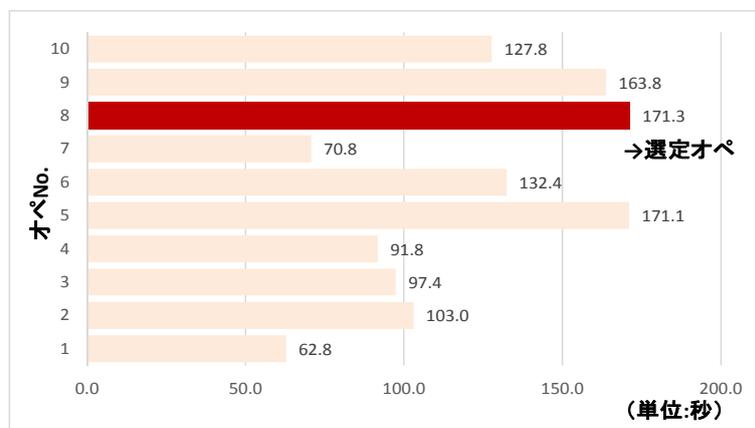


Fig.C-9 Cycle time (average cycle time difference between the remote control and boarding operations)

#### 5-C.4.4. サイクルタイム分割

選定したオペレータについて、操作方式毎の4回目～10回目の作業に掛かったサイクルタイムのうち、中央値の作業データを選定した。次にサイクルタイムを「走行」「(固形対象物の)つかみ」「(固形対象物の)持ち上げ・旋回」「(固形対象物の)下ろし」「(ブーム・アームの)引上げ」の5つの作業要素に区分けした。以下、区分けしたサイクルタイムを、各区分の「作業時間」とする。

#### 5-C.4.5. 動作解析

各操作方式について、搭乗操作との作業要素毎の作業時間差をまとめた。さらに、搭乗操作と差が大きく現れている作業要素を中心に油圧ショベルの作業記録動画を搭乗操作と比較の基準として解析を行った。

##### 5-C.4.5.1. 従来のシステムによる遠隔操作と動作解析結果

「つかみ」「持ち上げ・旋回」「走行」についてサイクルタイム差が大きく現れた。

Table.C-3 Cycle time compared with the boarding

操作方式	(単位:秒)						
	つかみ	持ち上げ・旋回	下ろし	引き上げ	作業合計	走行	合計
搭乗操作	20.1	18.8	14.0	7.6	60.5	80.4	140.9
従来システムによる遠隔操作	45.5	65.8	23.9	29.7	164.9	149.3	314.2
作業時間差	25.4	47.0	9.9	22.1	104.4	68.9	173.3

#### 【つかみ】

- ・ブーム・アームを操作開始するまでに、長い停止時間があつた。
- ・その後バケットをつかむまでも、少し動かして停止を繰り返した。
- ・アームを動かす際に小刻みに左右の旋回を繰り返した。

【持ち上げ・旋回】

- ・軌跡は搭乗操作と同じ.
- ・旋回速度が搭乗に比べて遅い.

【走行】

- ・走行速度自体が遅い.
- ・搭乗操作の急角度で曲がる動作と比べて、左に少しずつ旋回を行った.

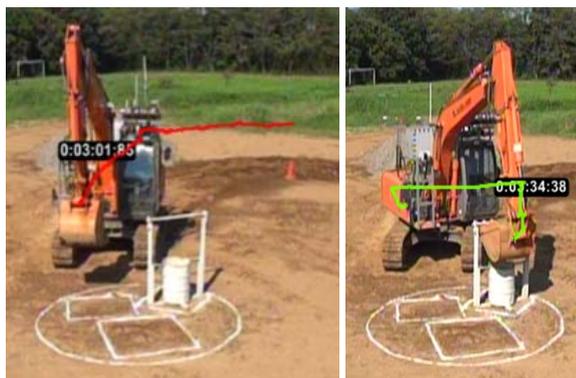


Fig.C-10 Operation analysis results (L: traveling,R: grab)

5-C.4.5.2. 操縦席型遠隔装置による操作と動作解析結果

「つかみ」「下ろし」「走行」についてサイクルタイムの差が大きく現れた.

Table.C-4 Cycle time compared with the boarding

(単位:秒)

操作方式	つかみ	持ち上げ・旋回	下ろし	引き上げ	作業合計	走行	合計
搭乗操作	20.1	18.8	14.0	7.6	60.5	80.4	140.9
操縦席型遠隔装置による操作	59.2	23.1	30.5	26.3	139.1	126.8	265.9
作業時間差	39.1	4.3	16.5	18.7	78.6	46.4	125.0

【つかみ】

- ・左右の旋回作業は多く見られたが、動作は従来の遠隔操作による操作での操作よりスムーズで、急発進・急停止は殆ど見受けられなかった.
- ・作業を停止せず連続して作業を行っていた.

【下ろし】

- ・アームの操作毎に旋回方向に振れていた。ブーム操作では振れがなくなった。
- ・設置を2回やり直している。

【走行】

- ・走行速度は同程度。曲がる際で大きな差がついた。
- ・搭乗操作では急角度で曲がっているのに対し、少しずつ旋回して曲がった。



Fig.C-11 Operation analysis results (L: traveling R: grab)

5-C.4.5.3. やぐらからの遠隔操作（目視）と動作解析結果

「つかみ」「下ろし」「走行」の作業についてについてサイクルタイムの差が大きく現れた。

Table.C-5 Cycle time compared with the boarding

(単位:秒)

操作方式	つかみ	持上げ・旋回	下ろし	引き上げ	作業合計	走行	合計
搭乗操作	20.1	18.8	14.0	7.6	60.5	80.4	140.9
やぐらからの遠隔操作	59.0	27.0	33.0	25.5	144.5	120.1	264.6
作業時間差	38.9	8.2	19.0	17.9	84.0	39.7	123.7

【つかみ】

- ・操作開始直後の数秒だけのアーム伸ばしとバケット開きの複合操作を行った。
- ・バケットをつかむ際に何度も旋回による微調整を行った。

### 【下ろし】

- ・複合動作なし.
- ・旋回による位置あわせを何度か行った. 少し動かして停止を繰り返した.

### 【走行】

- ・走行速度は搭乗とほぼ同じ.
- ・曲がる際に少し曲がって止まり, さらに少し進みつつ曲がって止まることを繰り返した.



Fig.C-12 Operation analysis results (L: traveling R: grab)

#### 5-C.4.5.4. やぐら下からの遠隔操作（目視）と動作解析結果

「つかみ」「下ろし」「走行」についてサイクルタイム差が大きく現れた.

Table.C-6 Cycle time compared with the boarding operation

(単位:秒)

操作方式	つかみ	持上げ・旋回	下ろし	引き上げ	作業合計	走行	合計
搭乗操作	20.1	18.8	14.0	7.6	60.5	80.4	140.9
やぐら下からの遠隔操作	34.2	32.8	34.4	14.9	116.3	95.3	211.6
作業時間差	14.1	14.0	20.4	7.3	55.8	14.9	70.7

### 【つかみ】

- ・複合動作なし.

- ・旋回を繰り返して微調整を行った。速度はほぼ一定、急に操作して急停止を繰り返していた。

【下ろし】

- ・移動先サークルへ固形対象物を置く際には、今までの作業と違って比較的スムーズな動作で僅かだが複合動作を行った。
- ・初期位置の枠内に固形対象物を戻す際には、左右に僅かな旋回を繰り返した。

【走行】

- ・走行速度は搭乗とほぼ同じ。左に曲がるポイントから後、走行軌跡が大きく左右に振れた。



Fig.C-13 Operation analysis results

5-C.4.5.5. 搭乗での遠隔装置による操作と動作解析結果

「つかみ」「持ち上げ・旋回」「走行」についてサイクルタイム差が大きく現れた。

Table.C-7 Cycle time compared with the boarding

操作方式	つかみ	持ち上げ・旋回	下ろし	引き上げ	作業合計	(単位:秒)	
						走行	合計
搭乗操作	20.1	18.8	14.0	7.6	60.5	80.4	140.9
搭乗での遠隔装置による操作	27.8	27.0	17.8	11.9	84.5	108.7	193.2
作業時間差	7.7	8.2	3.8	4.3	24.0	28.3	52.3

### 【つかみ】

- ・複合動作を行いつつ作業を行った。
- ・動作が安定しており，挙動もスムーズ．旋回の微調整では少しぶれた。

### 【持ち上げ・旋回】

- ・旋回速度は，搭乗操作と比べてほぼ同程度。
- ・旋回を急停止させたため，固形対象物が揺れてしまい，揺れ終わるまで待つ時間が掛かった。

### 【走行】

- ・搭乗操作と比べて，曲がり方がなめらかでなく，急に角度をつけて曲がっていた。
- ・固形対象物付近まで走行した後，走行を一旦停止して右旋回した後，再度走行を行った。



Fig.C-14 Operation analysis results (L: traveling R: grab)

## 5-C.5. 考察

### 5-C.5.1. 従来のシステムによる遠隔操作

#### 【つかみ】

- ・左のレバーが微妙に斜めに操作されている，僅かに旋回し，それを修正するために時間がかかる。

#### 【走行】

・速度が遅いのは周囲の状況把握が困難であるためであり、特にこれは運転席からの映像情報の視野が狭く、旋回方向の映像情報が把握しにくいことに原因があると考えられる。

### 5-C.5.2. 操縦席型遠隔装置による操作

#### 【つかみ】

・急発進と急停止の頻度が下がったのは、操縦席型遠隔装置のレバーを使用することで、レバーを倒す量と油圧ショベルの動作の関連付けがイメージしやすくなったため、挙動の予測がし易くなったと考えられる。

#### 【走行】

・時間差が生じた理由は、運転席からの映像情報の視野が狭く旋回方向の映像情報が把握しにくいことに原因があると考えられる。

### 5-C.5.3. やぐらからの遠隔操作（目視）

#### 【つかみ】

・アームをたためば固形対象物をつかめる状態にブームとバケットを調整している。

・バケットが固形対象物のバーをつかむ箇所がオペレータ位置から死角で見難い状況であるため、このような挙動になったと推測できる。

・左右に旋回を繰り返す動作は、自分が油圧ショベルと正対する位置にあるため、旋回方向のレバーの操作が逆になることから、旋回方向をイメージし難いことに時間がかかる原因があるのではと考えられる。

#### 【走行】

・建機の走行先が作業開始位置に向いているかを確認しつつ走るため、このような動作になったと考えられる。

#### 5-C.5.4. やぐら下からの遠隔操作（目視）

##### 【つかみ】

・ 旋回を繰り返す動作は奥行きを把握しにくいアングル（作業装置の真横からの操作）であるためと考えられる。

##### 【下ろし】

・ 初期位置の枠内に固形対象物を戻す際に旋回を繰り返したのは、旋回方向がオペレータ側からみて奥行きの把握がし難い位置にあるためと推測できる。

##### 【走行】

・ 走行方向を修正しようとしたが、修正する方向とは逆向きの操作をしている箇所が見受けられた。

・ オペレータと油圧ショベルが正対する位置になるため、左右逆の操作が必要となる。このため操作を誤ったと考えられる。ちなみにこれは作業に慣れたとされる4回目以降の動作であるため、回数を重ねても慣れにくいポイントだと考察できる。

#### 5-C.5.5. 搭乗での遠隔装置による操作

##### 【つかみ】

・ 旋回による微調整に時間が掛かっているのは、実機レバーとリモコンの操作感覚の違いによるものと推測できる。

・ 複合動作が可能なのは、十分な映像情報が得られているため、現状の把握と油圧ショベルの挙動予測が容易であるためと推測できる。

##### 【持上げ・旋回】

・ 搭乗操作で使用する実機レバーと比べてリモコンのレバーは稼動範囲が狭いため、微調整が難しいと考えられる。

##### 【走行】

・ 走行しつつ、固形対象物直前でやや左に旋回している。

・ この作業は他のオペレータ搭乗操作でも行っている「つかみ」を行いやすくするための予備行動だが、リモコンでは走行とレバーの操作を同時に行うこと

ができないため別個に分けて行っていた。このため時間が掛かったと推測できる。

#### 5-C.5.6. 実験全般についての考察

全操作方式の動画を解析した結果、搭乗操作に比べてサイクルタイムの差がつくポイントとして、主に以下の3つに集約された。

##### 1) 急停止・急発進の繰り返し

操作位置の調整がうまくいかず、旋回や「つかみ」のミスやその修正により時間が掛かる。

##### 2) 作業停止の繰り返し

作業と作業の合間に動作を停止することが多い。

##### 3) 複合動作の有無

複合動作を行うことによって、確実にサイクルタイムは縮む。なお「複合動作」とは、2つ以上の動作を同時に行うことであり、「ブーム」「アーム」等を同時に操作することでより早く作業を行うことができる。

#### 5-C.5.7. 操縦席型遠隔装置の効果について

「従来のシステムによる遠隔操作(以下、リモコンによる遠隔操作)」と、今回使用した「操縦席型遠隔装置による操作(以下、実機レバーによる遠隔操作)」を比較して、インターフェースの違いによる影響を考察する。

- 1) リモコンによる遠隔操作が実機レバーによる操作より作業効率が悪い原因として、リモコンのレバーが操作ミスを誘発しやすいことが挙げられる。運転手の腕とレバーの位置関係が搭乗操作と違うため、気付かないうちにレバーが斜めに操作される可能性が高い。油圧ショベルの左レバーの操作の前後がアーム操作、左右が旋回操作である。アーム動作中に、明らかに必要と思えない微速の旋回動作が何度か確認できた。これは左レバーを前後に操作してアーム操作を行う際に、オペレータが気づかないうちに、左レ

バーをわずかに斜めに操作されていたため横方向の操作で行われる旋回動作が行われたと推測できる。

- 2) レバーを倒す量と油圧ショベルの動作量との関係を掴みきれず、急な動作と急停止を繰り返すことで時間がかかることが動画解析結果より読み取れた。
- 3) 実機レバーによる遠隔操作の場合、つかみと下ろし以外の操作は、比較的スムーズな挙動だった。また、作業中の停止時間が殆どなく、連続して動作を行っている。これらのことより、サイクルタイムがリモコンによる遠隔操作より 15%ほど向上している。
- 4) 実機レバーを使用することで、操作性の向上により複合動作が増えると予想したが、作業の殆どで複合動作は見られなかった。「引き上げ」動作のみ複合動作が見られた。これは、映像情報から判断するような事項がなく、ただ引き上げればよい決まりきった動作であるため、複合動作を行うことができたと考えられる。
- 5) 複合動作を行うには、オペレータが作業状況と油圧ショベルの挙動を素早く判断できる十分な情報が必要であると推測できる。「従来のシステムによる遠隔操作」では操作状況を3つのモニター画面から読み取る必要があるため、状況の把握に時間がかかり、操作に慎重であったと推測できる。作業効率向上のためには、インターフェース改良だけではなく、映像情報量を多くして、オペレータが素早く作業状況の把握と油圧ショベルの挙動を予測できるシステムが必要とされる。

#### 5-C.5.8. 映像情報比較

搭乗での遠隔装置による操作（以下、搭乗リモコン操作）の動作解析及び、サイクルタイムから、映像情報を搭乗と同じにすることの効果はあきらかだった。

- 1) リモコンレバーと実機レバーの挙動の違いにより、急発進・急停止はみられたが、その他については搭乗操作と同じように、停止することなく連続して作業を行っていた。
- 2) 複合動作も作業中全てではないが、他の操作方式より際立って多くなっている。

#### 5-C.6. 結論

5-C.5.6 で述べた遠隔操作が搭乗操作に比べて時間がかかる原因のうち、「急停止・急発進の繰り返し」はレバーを倒す量と油圧ショベルの動作量との関係を掴みきれないためであり、インターフェースに原因があると推測できる。リモコンのレバーの形状・動作量と位置を油圧ショベルの実機レバーと同じにするなどのインターフェース改善が有効であると考ええる。

また「作業停止の繰り返し」「複合動作ができない」ことにより遠隔操作に時間が掛かる理由は、周囲の状況と油圧ショベルの挙動の把握に時間が掛かるためであり、遠隔操作を行う際の映像情報に原因があると推測できる。

映像情報を搭乗操作に近づけることができれば、作業効率は大いに向上することが期待できる。搭乗操作そのものでなくとも、奥行きや視野角など要素を選んで情報量を増やした形の映像提供方式についても検討をしていくことが重要であると考ええる。

#### 5-C.7. おわりに

今回の結果は、搭乗操作と遠隔操作の平均サイクルタイム差が最も大きいオペレータを比較対象として動作の比較分析を行い、インターフェースの操作性、映像情報の作業効率への影響について実態を把握した。個人差による影響も考えられるため、今回はオペレータ 1 人について比較を行ったが、今後は技量差の違う複数のオペレータにより傾向が変わるかについて解析を行いたい。

さらに結論で述べたようなインターフェースの改造または映像情報の提供方式について引き続き検討を行い、無人化施工の作業効率向上を図りたい。

## 参 考 文 献

- (1) 茂木正晴， 油田信一， 藤野健一：油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案， 建設機械施工, Vol.66, No.8, pp.71-79, 2014.
- (2) 西山章彦， 茂木正晴， 藤野健一：油圧ショベル無人化施工の遠隔操作と搭乗操作における操作者視点の比較に関する研究， 第 12 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp63-70, 2014.
- (3) 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技術ニーズ-遠隔操作システムの検証実験報告-, 第 12 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp89-96, 2010.
- (4) 茂木正晴， 藤野健一， 西山章彦，“建設機械遠隔操作の習熟に関する研究—建設機械の搭乗及び遠隔操作時における作業効率・精度に関する考察—”， 平成 24 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集， pp.19-22, 2012.

## D) 油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作インターフェースの 違いによる作業効率の向上について

### 概要

本研究報告は、建設機械の遠隔操作技術として操作インターフェースや操作時の視覚情報といった異なる運転条件による比較実験を行いサイクルタイム（作業効率）の実態を明らかにした。比較実験の結果を踏まえ、作業効率向上のための検討要素として必要となるインターフェース等の考え方について述べる。

#### 5-D.1. はじめに

災害発生時（地震・噴火などによる災害）における初動対応として建設機械の遠隔操作による無人化施工が適用されており、土砂災害や火山災害等での復旧に活用されている。

これまで、土木研究所で実施した先行研究<sup>(1)</sup>では、遠隔操作でのサイクルタイム（作業効率）が搭乗操作に比べて約2.3倍であるという結果が得られた。また、遠隔での操作環境や搭乗での操作インターフェースの違いについて比較実験を行い、操作環境や操作系インターフェースを変えることにより、Fig. D-1に示すようにサイクルタイム差に違いがあらわれることを確認した。

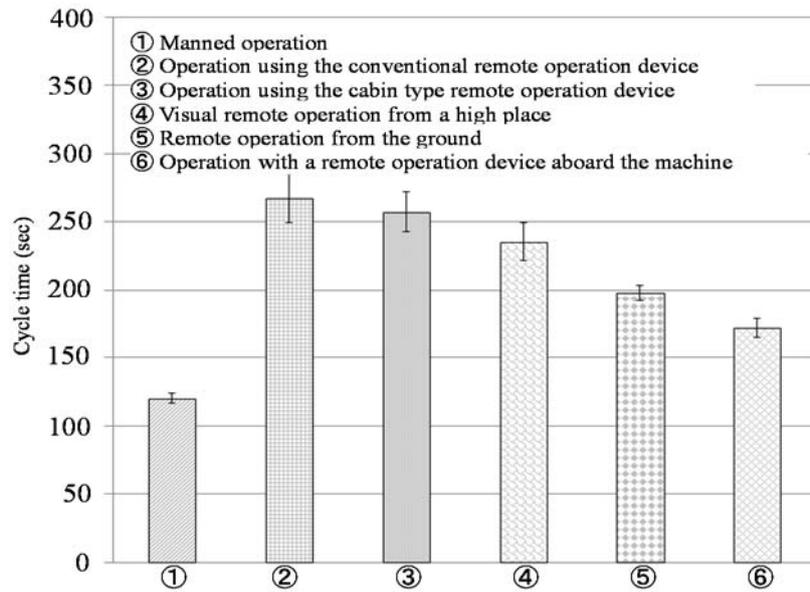


Fig. D-1 Comparative experiment in 2014

これまでの先行研究<sup>(1)</sup>や現場施工実績等によって得られた知見から、搭乗での操作時に得られる環境情報をオペレータにより多く与えることによってサイクルタイム（作業効率）の向上が期待できるのではないかと推定される。

本研究では、操作インターフェース及びモニタ等から得られる視覚情報を搭乗時に得られる視覚情報量に近づけ、従来の遠隔操作システムとの比較実験からサイクルタイム（作業効率）の実態を明らかにし、今後作業効率を向上するために必要となるインターフェース等の考え方を述べる。

## 5-D.2. 比較実験

### 5-D.2.1. 研究目的

遠隔操作時のサイクルタイム（作業効率）の向上、オペレータへの疲労負担軽減に寄与するためのテレオペレーティング、イージーオペレーティングシステムの基礎技術構築を目的とし、遠隔操作をより搭乗操作に近づけることを主眼に、遠隔操作時にオペレータに与える操作インターフェース及び視覚情報量の違いによる比較実験を実施した。

### 5-D.2.2. 実験タスク

比較実験は、実験タスク<sup>(2)</sup>に基づき実施した。実験タスクの作業環境を Fig.D-2 に示す。

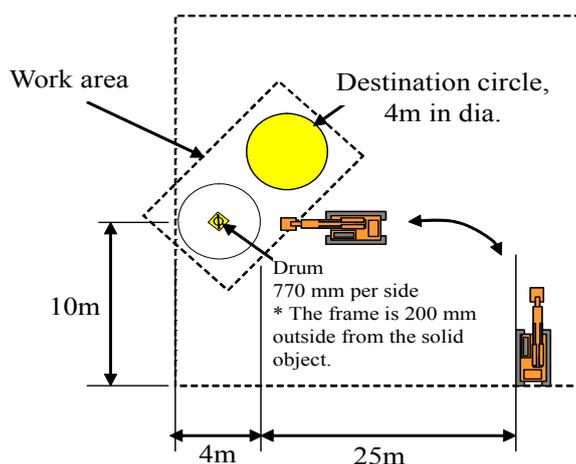


Fig.D-2 Plan view of the experiment task area

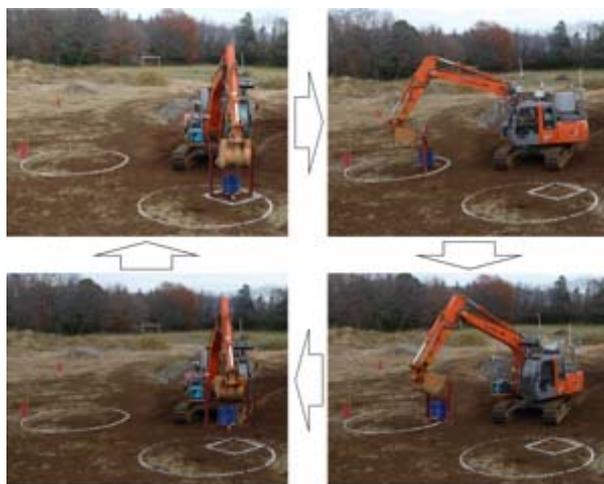


Fig.D-3 Operation procedure

本実験タスクは、これまでに災害現場で実施されている油圧ショベルによる無人化施工の作業要素を取り入れたものである。

油圧ショベルは屈曲部を含む約 30m の経路を作業エリア手前まで走行し、作業に適した位置まで移動してから、Fig.D-3 に示すように固形対象物を移設先サ

一ククルに移設し、その後再び初期位置の枠内に固形対象物を戻す作業を行う。

この動作は、油圧ショベルによる掘削を模しているが、土砂を利用した場合、一般的にバケットの山積み量の違いが作業に影響してしまう。そのため、バケットの山積み量を毎回同じにすることが困難となり、再現性の観点で問題が生じた。そこで、Fig.D-4 に示す固形対象物を掬い上げる作業モデルを設定した。

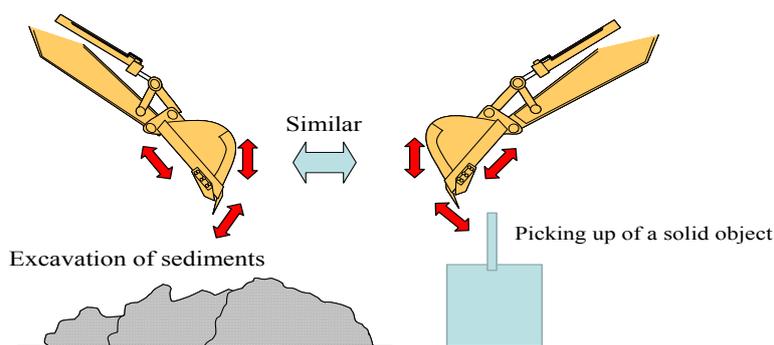


Fig.D-4 Work model

本比較実験では、使用する油圧ショベルは0.5m<sup>3</sup>クラス、固形対象物はドラム缶形状(縦横770mm×高さ760mm、重量約100kg、持ち手高さ2,000mm)とした。

### 5-D.2.3. 実験協力者

実験協力者となるオペレータは、比較検証を目的とすることから2014年に実施した10名とした。実験協力者は、従来の遠隔操作装置 (Fig.D-5) による操作と操縦席型遠隔操作装置による操作 (Fig. D-6) を行った。



Fig.D-5 Operation with the conventional remote operation device



Fig.D-6 Operation with the cabin-type remote operation device

#### 5-D.2.4. 視覚情報の設定

実験時にオペレータに提供される映像情報は、従来、Fig.D-5 に示すモニタ構成となっている。主に建設機械正面の映像と固定カメラからの外部視点映像によって構成している。

なお、本研究では、映像の精細さや3D等を対象にせず、従来の遠隔操作に使用しているモニタ構成を比較基準として、搭乗での操作時に近い、映像情報について検討した。

通信や映像の精細さ、3D等の技術を研究対象としない理由は、通信、映像技術は他分野での研究などによって進められていることから、それらの研究成果を今後活用したいと考えたためである。

##### 5-D.2.4.1. 必要とする視覚情報

人間の視野角<sup>(3)</sup>は、一般的に上 $60^{\circ}$ 、下 $70^{\circ}$ 、左右 $200^{\circ}$ 程度となっている。Fig.D-7, 8に示すように有効視野は、眼球運動だけで瞬時に情報受容できる領域であり、水平角約 $30^{\circ}$ 、垂直角約 $20^{\circ}$ 以内となっている。

安定注視野は、眼球・頭部運動で無理なく注視でき効果的な情報受容ができる領域であり、水平角 $60\sim 90^{\circ}$ 、垂直角 $45\sim 70^{\circ}$ 以内となっている。補助視野は、物体の存在がわかる程度の領域となっており、水平角左右約 $100^{\circ}$ 、下部垂直角約 $85^{\circ}$ となっている。

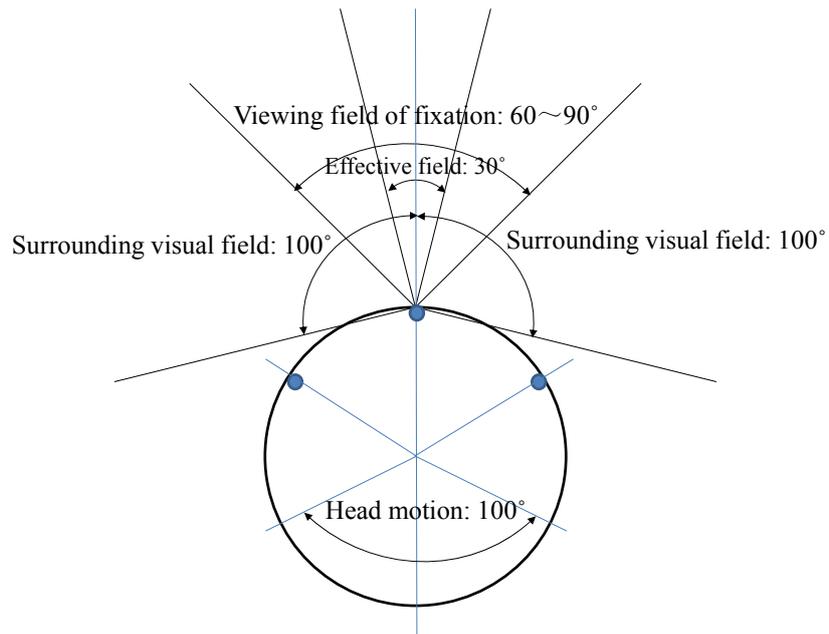


Fig.D-7 General viewing angle (planar)

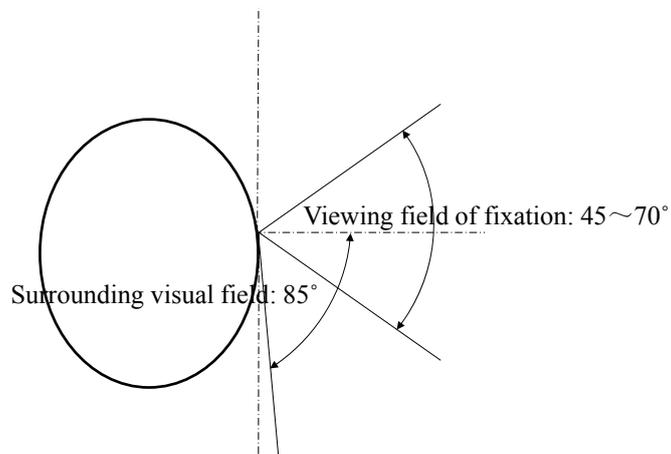


Fig.D-8 General viewing angle (lateral)

#### 5-D.2.4.2. カメラ及びモニタの設定

一般的な視野角と実測によりカメラ設置の設定を行った。

a) 作業視野の把握

Fig.D-9 に示す搭乗操作時の作業視野を把握した。この作業視野に基づき、カメラ配置を行った。



Fig.D-9 Working viewing field of the operator operating at the cabin

b) カメラの配置

設置するカメラは、搭乗時の作業視野に基づき Fig.D-10, 11 のような配置とした。なお、カメラの仕様は、人の目視時の視野角に近いカメラを選定した。



Fig.D-10 Camera arrangement

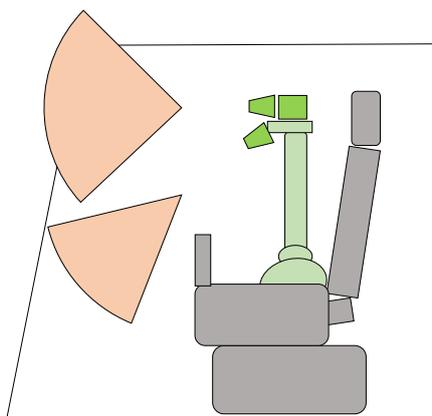


Fig.D-11 Camera arrangement (side-image)

c) モニタ構成

カメラの画角からオペレータの視野角に近似するモニタ構成を検討した。

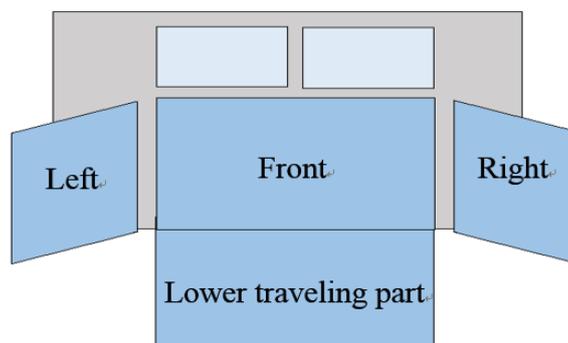


Fig.D-12 Monitor configuration

なお、モニタを具体的に設定するうえで、安定注視野と頭部運動を加味した配置とした。モニタは、Fig.D-12 に示す正面、左右の画面構成とし、左右モニタの配置を検討する上では、Fig.D-13 に示すような正面での視野における補助視野 100°を考慮した配置とした。

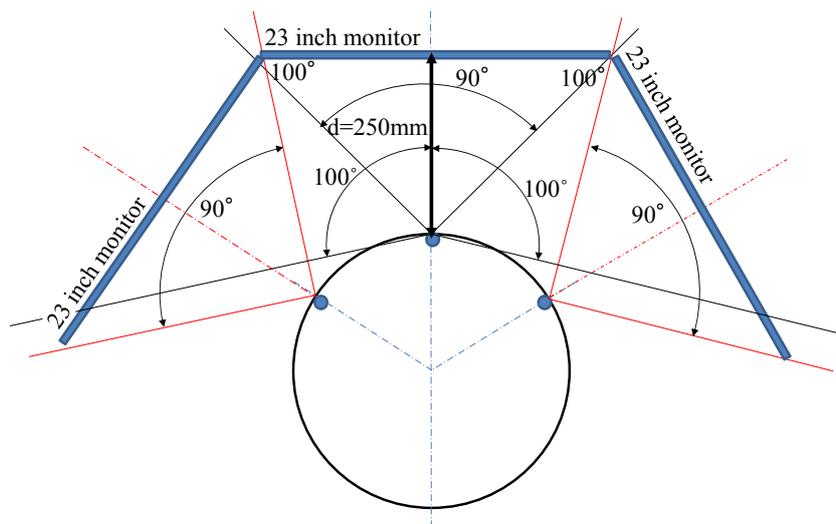


Fig.D-13 Monitor configuration (planar)

また，正面上下の画面構成としては，Fig.D-14 に示す正面の安定注視野  $70^\circ$  と下部の補助視野  $85^\circ$  が確保できる配置とした。

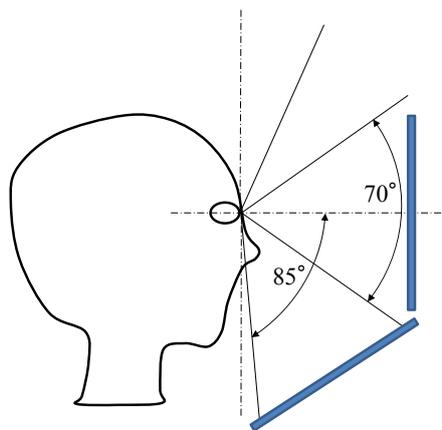


Fig.D-14 Monitor configuration (lateral)



Fig.D-15 Monitor layout

Fig.D-15 に示すモニタの具体的な仕様は、視点までの距離を 250～300mm とし、正面、下部走行、左右、従来の固定カメラ映像 2 箇所 の 6 つのモニタとし、モニタサイズは、全て iiyama 製 23 インチとした。

#### 5-D.2.4.3. 映像送信

Fig.D-10 に示す油圧ショベル操縦席正面・左右・下部走行部の 4 台のカメラに関しては、無線 LAN, 2.4GHz 及び 5GHz のパラレルにより映像データの送信を行った。なお、実験システムでは、先行研究での実験<sup>(1)</sup>と同様に作業効率に影響を与えるような映像遅延は起こっていない。

#### 5-D.2.5. 計測

遠隔操作のためのジョイスティック操作装置によるインターフェースと実際の油圧ショベルの操縦席を模したインターフェース（操縦席型遠隔操作装置）を用いて、実験タスク<sup>(2)</sup>に基づく、Fig.D-3 の流れで、サイクルタイムを計測した。Fig.D-16, 17 に状況を示す。



Fig.D-16 Operation using the conventional remote operation device

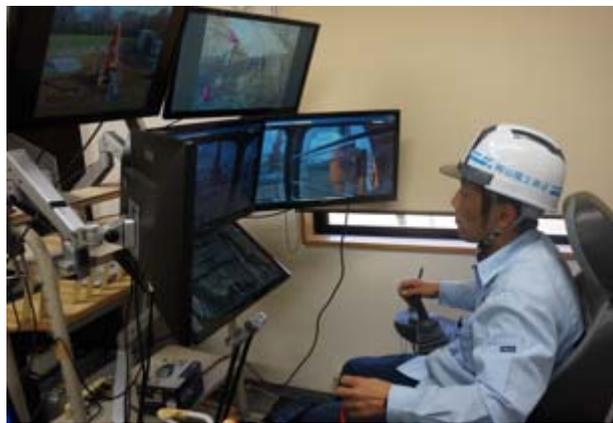


Fig.D-17 Operation with the cabin-type remote operation device

### 5-D.3. 実験結果

オペレータ 10 人の平均サイクルタイムを Fig.D-18 に示す。縦軸は平均サイクルタイム、横軸は試験回数を示しており、遠隔操作装置による結果は、サイクルタイム平均 232.7sec (標準偏差 $\pm$ 7.6) となった。操縦席型遠隔操作装置による操作の結果は、サイクルタイム平均 194.8sec (標準偏差 $\pm$ 9.6) となった。なお、サイクルタイムの平均値は比較的安定している 3 回目以降のサイクルタイムによるものである。

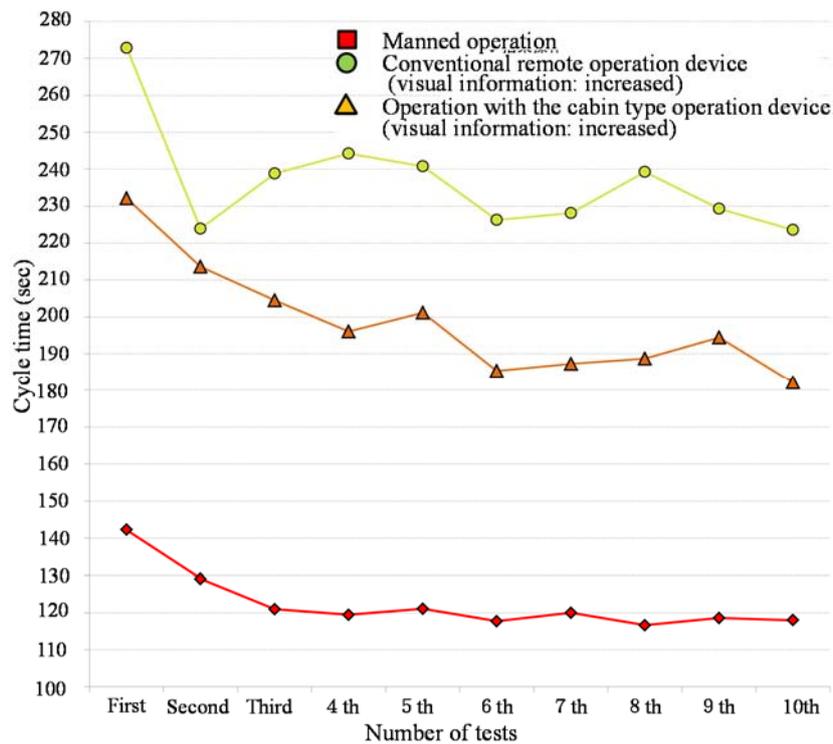


Fig.D-18 Cycle time tendency

#### 5-D.4. まとめ

視覚情報量が従来の遠隔操作システムは、搭乗での操作と比べてサイクルタイムが約 2.3 倍<sup>(1)</sup>であった。

搭乗での操作時に得られる環境情報をオペレータに多く与えることによって作業効率の向上が期待できるのではないかといった推定に基づき、搭乗時に得られる視覚情報量に近づけた今回の実験結果では、搭乗操作の 1.62~1.94 倍のサイクルタイムとなった。視覚情報量を増やすことが作業効率向上に有効であることが確認できた意義は高く、今後、目的とする作業等に応じた適切かつ効果的な視覚情報の提供は、搭乗操作と同様若しくはそれ以上の生産性向上に期待できるものと考えられる。

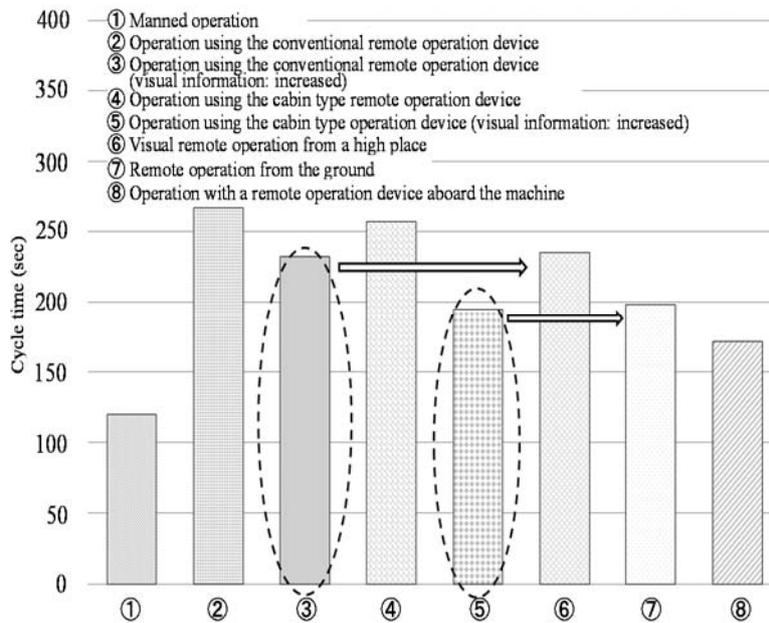


Fig.D-19 Comparison with the 2014 experiment results

さらに、Fig.D-19 に示すように視覚情報量を増やした場合、従来の遠隔操作装置での操作は、先行研究<sup>(1)</sup>で行った Fig.D-20 に示す高所からの対面遠隔操作のサイクルタイムに近い傾向となった。また、操縦席型遠隔操作装置での操作は、先行研究<sup>(1)</sup>で行った Fig.D-21 に示す地上からの遠隔操作のサイクルタイムに近い傾向が見られた。このことから、視覚情報量を増やすことが、作業効率向上に大きく関係していることが示唆される。



Fig.D-20 Visual remote operation from a high place



Fig.D-21 Remote operation on the ground

また、Fig.D-18 と Fig.D-19 に示すように視覚情報量を増やした条件で従来の遠隔操作システムと操縦席型遠隔操作装置でのサイクルタイムを比較してみると、1.2 倍の時間差が見られた。この結果から操作インターフェースの違いによる影響があるものと考えられ、視覚情報以外に操作インターフェースによって作業効率が左右されることが示唆された。

#### 5-D.5. 今後の課題と取り組み

本研究での比較実験によって、視覚情報や操作インターフェースが作業効率向上に関連する因子であることが確認できた。本研究成果は、現場での無人化施工技術の作業効率向上に寄与するほか、今後の研究開発を進めるうえでの基礎データとなるものと考えられる。しかし、現場での使用にあたっては、システムの信頼性や耐久性、コスト面での検討が今後必要だと考えられる。そして、より作業効率を向上させるためには、作業環境に必要となる最適な視覚情報の提供や実現場で容易に活用できる操作インターフェースの開発が必要だと考えられる。更に災害現場では、掘削作業の他に破砕や解体といったシチュエーションも想定されることから視覚情報の他に必要となる聴覚や触知覚といった知覚情報に関する研究が重要となる。

また、オペレータの技量差は、搭乗操作に比べ遠隔操作での個人差が大きいことから、オペレータの技量差といった特性をなくし、安定した作業を確保するための誘導・制御するマシンガイダンス・マシンコントロール技術の向上は重要なものと考えられ、特に災害現場のように、掘削などの作業対象が変化す

る環境下に対応する event-driven な制御機構の研究開発も今後必要な取り組みであるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- (1) 茂木正晴, 西山章彦, 油田信一, 安藤広志, 伊藤禎宣, 藤野健一: 無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価, 第15回 建設ロボットシンポジウム論文集, O-21, 2015.
- (2) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一: 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案, 建設機械施工, Vol.66, No.8, pp.71-79, 2014.
- (3) 畑田豊彦他共著: 眼・色・光--より優れた色再現を求めて--, 社団法人日本印刷技術協会, pp.9, 2007.
- (4) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Akihiko Nishiyama: RESEARCH ON OPERATOR'S MASTERY OF UNMANNED CONSTRUCTION, Proceedings of The 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.540-547, 2013.
- (5) Masaharu Moteki, Kenich Fujino, Takashi Ohtuki, Takeshi Hashimoto: RESEARCH ON VISUAL POINT OF OPERATOR IN REMOTE CONTROL OF CONSTRUCTION MACHNERY, Proceedings of The 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.532-537, 2011.

## E) 高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作

### 概要

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。その原因の一つには、作業対象に対する視認性の問題があると考えられる。本稿では、映像条件と視認性の関係を踏まえて、高品質映像条件による遠隔操作の作業効率の比較実験、高品質映像を伝送する広帯域の通信環境の提案、について報告する。作業効率実験は、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、映像条件毎のサイクルタイム比較という形で実施した。ここで利用した高品質映像条件は、4K解像度(3840×2160画素)かつ両眼立体(3D)の映像を非圧縮で呈示するものである。また、広帯域通信環境は、光ファイバ通信で用いられる光信号を、変換信号等を介さずに空中伝送するものである。

#### 5-E.1. はじめに

無人化施工における作業効率向上の一手法として、高品質映像環境による方法を試みたので報告する。

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。作業の推進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きた<sup>(1)</sup>。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等を中心に構成される<sup>(2)(3)</sup>。

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割とも言われている<sup>(4)(5)</sup>。このような作業効率の低下は、様々な原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。

本稿では、これらの要因のうち、映像条件の高品質化によって、搭乗状態の作業効率に近づけることを試みる。第2章では、映像条件が作業対象の視認性に与える影響について述べる。第3章では、映像条件による作業効率の差異を、無人化施工の熟達者による操作で比較したので、これについて述べる。第4章では高品質(非圧縮高解像度)映像環境を実現するための映像伝送手法について提案する。

### 5-E.2. 映像条件と土木作業における視認性について

一般に、映像の空間分解能の向上、すなわち高解像度化は、対象の識別精度の向上につながる。例えば、通常の視力検査では、ランドルト環(Cの字)を用いて、視角1分(1/60度)の分解能があれば視力1.0とされている。視力1.0に相当する分解能を画面上に実現する場合、地上アナログテレビ相当の標準解像度映像(水平720画素)では、カメラ側の水平画角は12度より狭める必要がある。Full-HD映像(水平1920画素)では水平画角32度、4K映像(水平3840画素)の場合は水平画角64度である(簡単化のため、解像度以外の光学条件等は考えないものとする)。このような考え方では、広い視野角で標準的な視力相当の映像を提供するには、より高解像度の環境が必要であると言える。

一方で、人間の視覚能力は解像度に対する許容範囲が広いため、分解能と対象の判別能力はリニアな関係にはなく、非常に低い解像度でも情景の判別ができる、とする研究<sup>(6)</sup>もある。とりわけ日常生活空間で見慣れた映像では、経験や知識の影響により、低解像度でも判別が可能と考えられている。しかし、土砂や瓦礫など災害関連の作業対象物は、形状や色調が不定形な物体である。その識別を目的とする場合には、高い分解能によってこれを映像上に再現することが肝要である、と推測される。

同様に、両眼視差による立体視は、対象の奥行方向の距離知覚に有効な手段である。奥行知覚は、両眼視差、運動視差(頭部運動に伴う見え方の変化)、遮蔽(前後関係による見えの有無)、陰影(照明光とカゲの関係)、密度勾配(模様の変化的変化)、絵画的な手掛り(遠近法など)のような様々な手掛り情報を統合的

に利用して行われると考えられている<sup>(7)</sup>。このうち両眼視差では、対象物の前後関係や照明条件のような環境依存性が少ないため、安定的に奥行知覚を得ることができる。土木作業においては、バックホウがバケットやブレーカーを利用する場面など、地面平面上の目標に作業具を接触させる動作は頻繁に行われている。このような作業において、地面平面と作業具の奥行方向の位置関係が明確であれば、動作計画を立てやすく、操作は的確かつスムーズになると考えられる。

実際に、このような作業課題を含む土木作業を観察評価したところ、遠隔操作の熟達者は、搭乗操作とは異なる作業方式を採る傾向が見られている。具体的には、搭乗操作においては、平面目標に対して比較的上方から下方へと作業具を打ち下ろすことが多い。これに対して、遠隔操作の熟達者においては、地面平面に沿って奥行方向に作業具を移動させることで距離を識別する操作が見られる。後者の方法では、車載カメラで対象を斜めに見下す場合、作業具と地面の位置関係が陰影や遮蔽の手掛り情報により少ない誤差で得られる利点がある。しかしながら、地面平面近くを平行移動させる動作には、アームとブームの精緻な連動が必要であり、操作方法への習熟と建設機械の個体差の理解も必要である。これは、遠隔操作時の作業時間が長くなる原因の一つであり、搭乗操作に慣れた作業者が遠隔操作を行う際のハードルの一つになっていると考えられる。

また、視認性について、映像条件を変えて（解像度：水平 480～3840 画素，立体視:2D/3D）土砂平面上に宙づりにされた対象物の奥行距離を判断させた実験<sup>(8)</sup>では、3D 条件では 2D 条件に比べて奥行距離の回答誤差が少なく、高解像度な 3D 条件では回答の分散が小さい傾向が見られた。このような結果から、高解像度かつ立体の高品質な映像を呈示することは、作業具の奥行知覚を助けることができ、これにより作業効率の向上を見込むことができると考える。

### 5-E.3. 高品質映像による遠隔操作実験

高品質な映像環境として、4K 解像度かつ両眼立体の 4K3D 映像を用いた建設機械の遠隔操作実験を試行した。無人化施工の現在環境と試行した提案環境で作業態様を比較検討し、今後の遠隔操作環境開発に対する知見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 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(Fig. E-1)。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。同作業に用いる現在環境は、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映像である(Fig. E-2)。



Fig. E-1 Configuration of Experiments



Fig. E-2 Remote Control Room

### 5-E.3.1. 実験装置

本実験における使用機材類を Table E-1 に示す。現在環境の遠隔操作は、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上方と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。カメラオペレータによる制御は、操作者からの指示もあるが、多くは、作業手順に従い「阿吽の呼吸」で行われる。外部カメラの配置を含む建機側全景を Fig.E-1 に示す。鋼製型枠の設置場所を両側から挟む外部カメラの配置は、これまでの設置作業から効果的な方法として導き出されたものである。

Table E-1 List of main equipment

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6m
マーカー	9個	プラスチック製 赤色円板φ10cm
映像関連: 現在環境		
移動カメラ車A	1台	クローラダンプ(散水仕様)上にカメラ1台を搭載
移動カメラ車B	1台	高所作業車ブーム上にカメラ2台を搭載
建機搭載カメラ	2台	上方視野と下方視野の切り替え式キャビンの屋根上に搭載
映像伝送装置	一式	5GHz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

提案環境側の装置構成を Fig.E-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。建機へのカメラの搭載状況を Fig.E-1 右上枠内に示す。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 24Gbps)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 2frame 以内(60fps 時 33msec 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。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。本実験では有線の光ファイバにより、同信号を伝送した。遠隔操作室側では、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 $\mu$ sec(仕様値)であり、ほぼ無視できる。

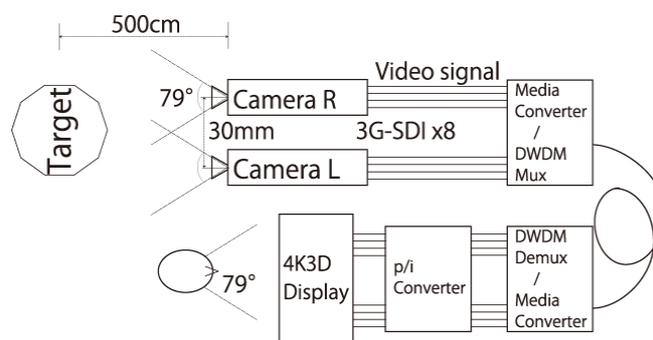


Fig. E-3 Configuration of the 4K3D System

立体映像撮影カメラの設定は、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 3cm とした。本実験では、映像表示側に液晶ディスプレイを利用しており、プロジェクタのように映像を水平方向に移動させて無歪条件<sup>9)</sup>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 5m)とキャビン内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。このため、視

差量の差を削減し、不快感なく立体視できる設定として、レンズ間距離を凡そ3cmとした。

ディスプレイは、58インチサイズのフラットパネル型で、4K解像度のまま立体映像を表示できる情報通信研究機構による試作機である。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、映像表示側4K3Dディスプレイの横幅は約128cmであるので、操縦者の視距離は約78cmとした。これにより、操作者の視野角と撮影画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、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、顎台による固定や操縦者毎の調整は行っていない。

### 5-E.3.2. 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(Fig. E-4 参照)。設置場所のマーカは、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10cm)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点の各マーカ中央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。

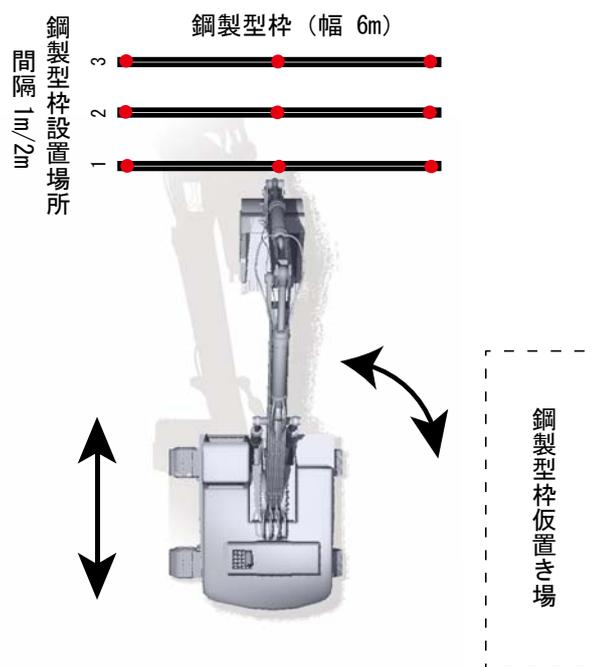


Fig. E-4 Experimental Setup

本実験では、以下の動作フローにおいて設置を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、現在環境での課題実施、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作業現場の操縦者3名である。なお、バックホウによる型枠設置作業への習熟度については、過去に同作業を行っていた A 氏、同作業は今回初めての B 氏、日常的に同作業を行っている 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、操縦者は現在環境には習熟しているものと考え、現在環境終了後に提案環境を実施する順番とした。

### 5-E.3.3. 実験結果と考察

本実験におけるサイクルタイムの比較を行った(Table E-2). サイクルタイムの平均値は、現在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。

Table E-2 Average Cycle Time of the Experiments (単位：秒)

	現在環境	提案環境	提案/現在
設置作業	262.32	194.77	0.74
撤去作業	69.03	56.13	0.81

但し、サイクルタイムの増減比には個人差も大きかったので、個別の状況(Fig. E-5)を以下に述べる。

A氏の設置作業第2試行では、提案環境の作業時間が長い。この試行では、キャビンの右ピラー部にマーカーが隠れてしまい、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、このような現象が生じる。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ような動作が見られた。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、実験前に、マーカーとの距離によって見えなくなることを予め伝えることとした。A氏による設置作業第3試行を含め、A氏B氏ともに履帯移動を含む試行(Fig. E-5 各グラフの※印)では、現在環境と提案環境で作業時間に差がないか、提案環境の方が時間を要している傾向がある。この履帯移動は、設置場所と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。今回の提案条件では、カメラの角度設定上、履帯が映っていなかった。このことは、履帯移動と旋回中の姿勢確認にネガティブな影響を与えたと思われる。また、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かった。これも、履帯移動の速度や方向にネガティブな影響を与えたと思われる。なお、特にA氏の試行では、3試行目での作業時間増加程度が大きいのは、鋼製型枠設置場所間の幅を2m(他2名は1m幅)としていたことが影響していると考えられる。

鋼製型枠設置作業が初めてのB氏については、位置合わせ作業や型枠把持用のアタッチメント操作に若干手間取る傾向が見られた。なお、現在環境の試行回数はカウントミスのため、1回少ない。

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、現在環境で160秒前後、提案環境で70～80秒前後(42%、52%の減少)と1～2試行目間での差が小さい。継続して安定的に結果が出ることが期待される。

本課題において、操作精度を要求される部分は、型枠の設置位置合わせと、型枠アタッチメントの挿入である。型枠設置には、地面平面上のマーカーと型枠の相対位置把握が重要である。地面平面と型枠間に距離がある場合には、両眼視差(立体視)による奥行き知覚が有効であったと考えられる。

また、型枠設置の最終段階では、地面平面と型枠下面を近接させ、地面との接触を避けつつ、3点マーカーによる設置場所との微調整が行われる。このとき、現在環境では、解像度や画面サイズの問題から、1台のディスプレイで型枠全体を参照することはできず、複数の画面を見比べる必要がある。これに対して、広視野角で高解像度な提案環境では、全体を即座に把握できることが有効であったと考えられる。同時に、カメラオペレータによる外部カメラの操作を待つ時間も無くなっており、これも時間短縮に貢献したと考えられる。型枠アタッチメントの挿入では型枠との衝突を避けつつ、適切な高さや角度での挿入が必要となる。奥行き感が把握できることは型枠とアタッチメントの衝突を防ぎ、スムーズに挿入する作業に貢献したと推測される。

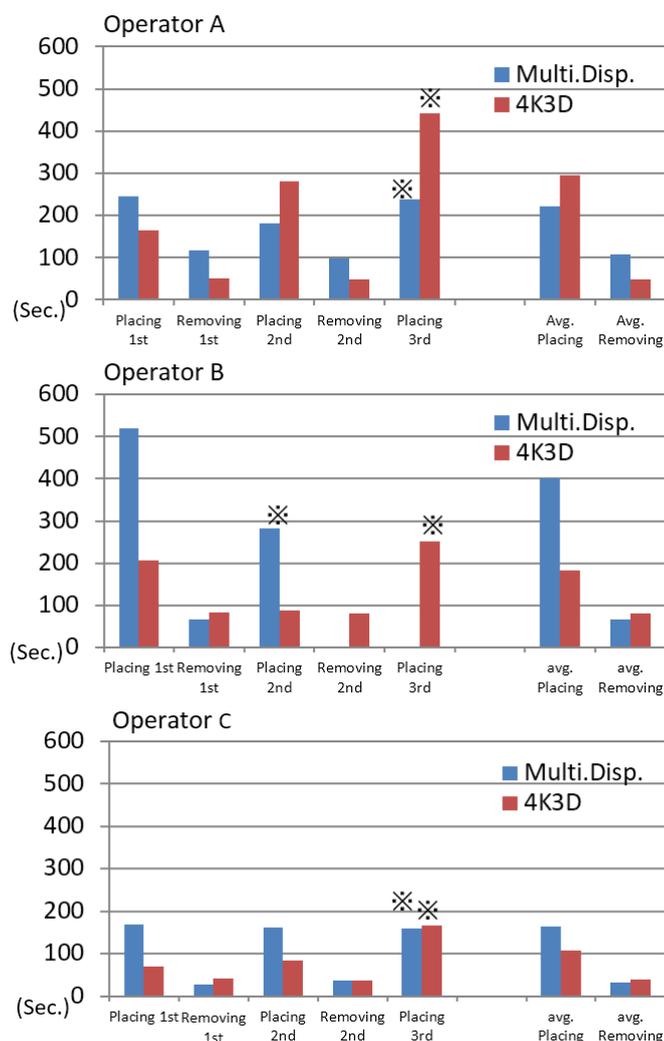


Fig. E-5 Time Required for Task Completion

#### 5-E.3.4. インタビュー

実験実施の翌日、現在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。

- ・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。現在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「(現在環境では)石が四角くなって背景と重なる。(提案環境ではそれがないのが良い)」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。

#### ・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。同等の作業精度で、サイクルタイム自体は提案環境により短縮している。しかし、作業の確実性を求める場合は、奥行方向の位置が明確に判断できる横方向外部カメラの役割が大きいものと考えられる。心理面や慣れの問題であるのか、作業効率や仕上がりに直接影響するのかについては、今後の検討課題としたい。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(例:10deg/sec 以下<sup>(10)</sup>)する等の操作者側での対策を含め、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。

#### ・総合的な評価

全体として、現在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，というのが概ねの回答であった。

#### 5-E.4. 高品質映像の無線伝送

3 章の実験は映像伝送を有線で行っているが，作業効率等を考えれば，無線による通信方法の確立が必要である。しかしながら，今回採用した 4K3D 映像の必要伝送速度が 24Gbps であるのに対して，採用されることの多い無線 LAN 規格 802.11j は規格値で 54Mbps と十分ではない。地上デジタル放送のように 1080i 映像を 15Mbps まで圧縮伝送することは可能であるが，圧縮伸張には，その遅延時間や実質的な解像感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はしているが，本稿では，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伝送する手法について，提案する。

##### 5-E.4.1. 光無線通信装置

高速かつ低遅延な無線伝送装置として，光無線通信装置<sup>(11)</sup>を開発している。本装置は，通常，光ファイバ中を通る通信用レーザー光を，直接空間伝送するものである(Fig.E-6)。波長は 1500nm 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。従来は固定局として利用するものであるが，ここでは高速な微動に追従する精追尾高速応答ミラーに，粗追尾用 2 軸ジンバルを加え，移動体との通信を可能とした構成(Fig.E-7)について述べる。



Fig. E-6 Free-space Optical Communication (FSOC) system

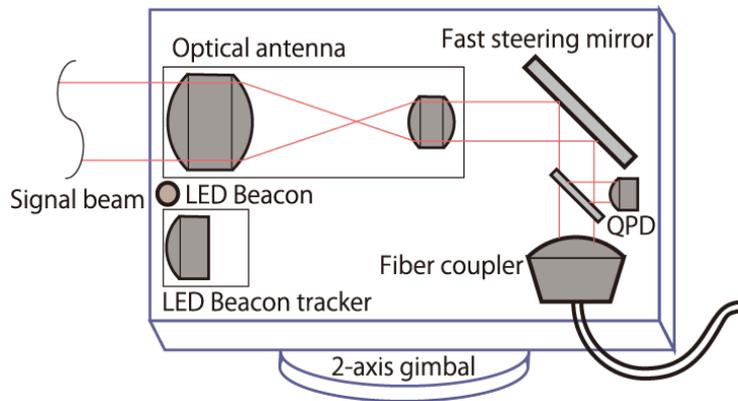


Fig. E-7 Configuration of FSOC system

本装置の特徴を，無人化施工への適用を念頭に以下へ列挙する．

- ・ 低遅延

映像情報の圧縮伸張処理が不要であることと，光ファイバ信号の変換処理が不要であることから，処理遅延が発生しない．空間伝送中の遅延量は，実質的に考慮する必要がない．光ファイバ網に直接接続し，低遅延のまま広域伝送することができる．

- ・ 高速(広帯域)

シングルモード光ファイバに入射可能な光伝送装置なら柔軟に対応できる（波長帯域幅には光学上の制限がある）．波長多重の場合，24Gbps の伝送速度まで試験済み．

- ・複数利用

複数台の同時利用が可能である。無線 LAN 等では電波到達範囲内で同じ周波数帯を使用すると、電波干渉による通信障害等の原因となるが、光無線通信では、ほぼその心配がない。そのため、同一作業範囲で、複数台を利用できる。

- ・伝送経路の影響

伝送系路上の大気ゆらぎにより経路が微動する影響を受けるため、対策が必要である。なお、現行機では、霧や雨の場合、有視界距離であれば、およそ通信可能である。また、光の物理的な遮蔽により通信は途絶するため、頑健化のためには、光無線経路の複数化や、無線通信等の代替経路が必要となる。

- ・追従

本機では、信号光を低損失で伝送するため、ほとんど拡散のないテレセントリック光として発信する。そのため、レンズ開口部に対する僅かな傾きがケラレによる通信途絶に繋がるので、同光を受光レンズ（光アンテナ）へ正確に導入する追従動作が必要となる。

#### 5-E.4.2. 屋外伝送性能評価

光無線通信機を建設機械に搭載した条件での利用可能性について、評価を行った。本機では、大気ゆらぎによる到来角度変動に対応するため、精追尾高速応答ミラーによる補償を行っている。入射光を四分割受光素子(PD)で受光し、その光強度変化によるミラー制御を行っており、その追従範囲は凡そ $\pm 0.5$ 度、同 0.5 度での応答時間は約 2msec である。移動体搭載時には、その動作に合わせて、本機 2 台を正確に対向させ続ける必要がある。今回は、本機光軸に近接して赤外線 LED ビーコンと観察用カメラを設置して相互に移動状況を観察した。追従は、赤外線 LED ビーコンの光軸中心からのズレ量に対する PID 制御で行うこととした。駆動はシリアル通信制御の電動ジンバル(FLIR 製 PTU-D48E)により行う。

実施状況を Fig.E-8 に示す。屋外未舗装敷地にて曇天時に実施した。通信距離は凡そ 90m である。平面の不整地敷地上で、通信方向に直交する全速での前後進と旋回動作中の通信を行った。



Fig. E-8 Experimental Setup

通信状況について、信号光強度を示す Fig.E-9 に示す。平面不整地での走行中の通信については、これを確認することができた。通常走行や作業具運用においては、提案光無線通信装置の適用は可能であると考えられる。一方で、急激な旋回逆転や衝突時の衝撃(5~8G, ~30Hz)での通信途絶と再接続があった。今回利用ジンバルの駆動性能や制御周期による限界が見て取れる。運用可能な環境を拡大するため、追従機構や振動対策の見直しを進めている。これについては今後の課題とする。

現状の性能において、比較的慎重な操作が行われている無人化施工環境の建設機械運用や、外部カメラ車などへの搭載であれば、適用可能な性能であると考えられる。今後、運用可能な建設機械等の拡大、通信経路の遮蔽等に伴う無線 LAN 等副回線とのスムーズな切り替え等、運用上の課題についても、対策を進める。

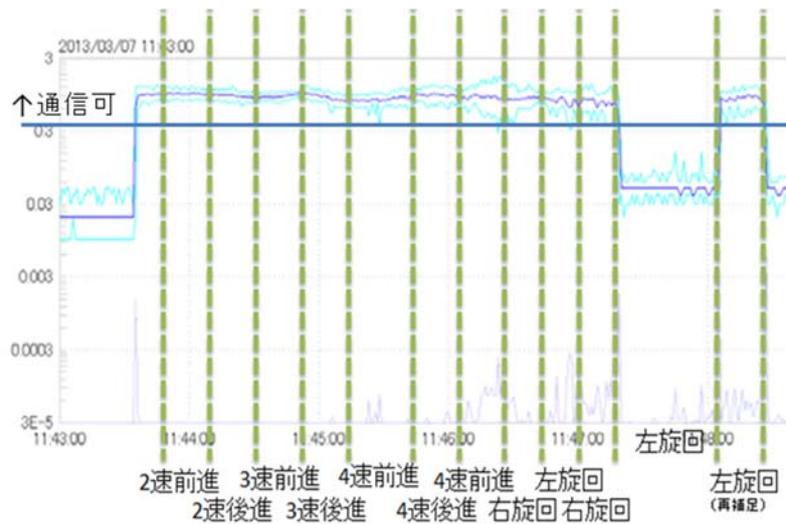


Fig. E-9 Laser Signal Intensity (単位 : dB)

#### 5-E.5. おわりに

無人化施工における作業効率低下の原因の一つに映像条件に起因する視認性の低下があると考えた。そこで本稿では、映像条件と視認性低下の関係を検討し、高品質な映像条件による作業環境での作業効率の変化に関する実験、高品質な映像伝送装置の提案、を行った。

作業効率実験では、高品質映像の提案環境において、設置作業で 74%、撤去作業で 81%とサイクルタイムの減少が確認された。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。被験者インタビューにより、非圧縮、高解像度、広視野角、大画面、両眼立体映像といった要素に肯定的な評価を得られた。一方で、旋回動作時の映像酔いや、俯瞰カメラの必要性といった新たな課題も得た。より効果的な映像環境の構築を進めていく。

また、高品質な映像情報を非圧縮で伝送する仕組みとして、移動体追従に対応した光無線通信装置の提案を行った。24Gbps に達する 4K3D 映像を非圧縮で伝送できる。今後、利用可能性について幅広く検討していく。

## 謝辞

芝浦工業大学の油田信一氏には，本研究の推進にあたり，建設機械施工の技術や現況について多様な助言を頂いた．ここに記して謝意を表す．

雲仙普賢岳での作業効率実験においては，国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所の佐藤保之氏，古賀唯雄氏，杉山光徳氏に様々なご配慮を頂いた．また，株式会社熊谷組の江良耕一氏，飛鳥馬翼氏をはじめ赤松 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．

光無線通信装置の利用や実験に協力を頂いた情報通信研究機構の有本好徳氏に謝意を表す．

## 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) Antonio Torralba, "How many pixels make an image?", Visual Neuroscience, Vol. 26, Issue 01, pp. 123-131. 2009.

- (7) Landy MS, Maloney LT, Johnston EB, Young M., "Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion", *Vision Research*, Volume 35, Issue 3, pp. 389–412, 1995.
- (8) 伊藤禎宣, 坂野雄一, 安藤広志 : 超臨場感技術を用いた建設機械の遠隔操作, けいはんな情報通信フェア 2013, ポスタ発表, 2013.
- (9) 永山 克, 山之上 裕一, 尾藤 峯夫, 棚田 詢, 三橋 哲雄, 元木 紀雄, "3D ハイビジョン撮影における平行法・交差法についての一検討", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 情報・システム (2), pp. 121, 1997.
- (10) Hu S, Stern RM, Vasey MW, Koch KL, "Motion sickness and gastric myoelectric activity as a function of speed of rotation of a circularvection drum", *Aviat. Space Environ. Med.*, Vol. 60, No. 5, pp. 411-414, 1989.
- (11) 有本 好徳, "10Gbit/s 以上の高速大容量を実現した光無線通信装置の大气揺らぎ環境下における伝送特性", 電子情報通信学会論文誌. B, 通信 J96-B(3), pp. 330-338, 2013.

## F) 映像通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデルタスクによる評価

### 概要

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。無人化施工の作業効率を低下させる一因とされる、遠隔操作映像の通信遅延について、その影響の定量的評価を試みたので報告する。同一映像条件で通信遅延時間のみを任意に変更できる遠隔操作環境を構築した。ここでバックホウによる標準的作業を模擬したモデルタスクを利用し、遅延時間毎のサイクルタイムによる比較評価を行った。70msec から 2000msec の通信遅延を設定した作業課題において、遅延時間量に対しておよそ 190 倍のサイクルタイム増加量が観察された。

#### 5-F.1. はじめに

無人化施工における作業効率の低下原因について、通信遅延の側面から、定量的な評価と現象の理解を試みたのでこれを報告する。

災害対応作業の推進と作業員の安全確保の両立を目的として、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。同技術における一つの大きな問題は、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、その作業効率は 5 割とも言われている<sup>(1)</sup>。このような作業効率の低下は、様々な原因から複合的に発生すると考えられ、個別に定量的な評価を行うことは困難であった。

本稿では、作業効率低下の一因とされる遠隔地映像の通信遅延に着目し、これを比較評価する被験者実験を実施したので、これについて述べる。まず、通信遅延の影響のみを評価するため、建機の操作環境や映像環境を共通化した。映像環境としては、画像劣化等による操作性への影響が少ないと考えられる、高精細広視野角の非圧縮映像環境を構築した。また、同映像の通信遅延時間を 1msec 単位で制御可能な遅延制御装置を開発した。被験者実験の作業課題としては、遠隔操作バックホウによる標準的作業を構成要素とし、繰り返し試行可

能なモデルタスク<sup>(2)</sup>を用いることとした。複数の遅延時間条件で作業課題を実施し、サイクルタイムや操縦桿操作の変化に着目した分析を行った。

本稿第2章では、映像機材による通信遅延の発生原因について確認し、遅延量計測方法および通信遅延制御装置について述べる。第3章では、通信遅延と作業効率の関係を評価するための被験者実験について述べる。第4章では、本実験の結果についてサイクルタイムや操縦桿操作の面から考察を行う。

## 5-F.2. 遠隔操作における映像通信遅延

本稿が想定する映像通信装置による遅延の発生原因と、比較実験実施のための通信遅延制御装置について述べる。

### 5-F.2.1. 映像通信の遅延原因

遠隔操作環境を構成する各映像機器上の遅延発生原因についての模式図と、撮影処理のタイミング図を Fig. F-1 に示す。

多くの映像機器では、画面単位の映像記録用フレームメモリを内蔵している。ここに1画面分の映像データを蓄積してから、高画質化のための画像処理や、情報圧縮の処理、情報表現形式の変換処理等が行われ、次の画面情報取得時に処理結果が出力される。これらの処理は、撮影周期や投影周期(フレームレート)をベースに実行されるため、多くの映像機器では、最短で1~2フレームの処理待機遅延が発生する。例えば、カメラとディスプレイで2フレームずつの遅延がある場合、フレームレートが60fpsの機材では、通信経路上の遅延が全くない場合でも、合計66.67msecの遅れが発生している。なお、画像処理の省略や、1画面分の画像蓄積を待たずに情報処理を開始することで、遅延時間を1フレーム以下に短縮する機材も開発されている。このような、低遅延化機材は、家庭用ゲーム機などのリアルタイムコンテンツを表示するディスプレイ側には多いが、カメラ側にはあまり存在しない。一般には、民生用映像機器での遅延短縮には、高フレームレート機材の利用が簡易的である。例えば、機材遅延4フレーム相当の場合、30fpsでは133.33msecの遅延があるが、120fpsでは33.33msecへと短縮できる。本実験では、一般的な60fpsの機材を利用している。

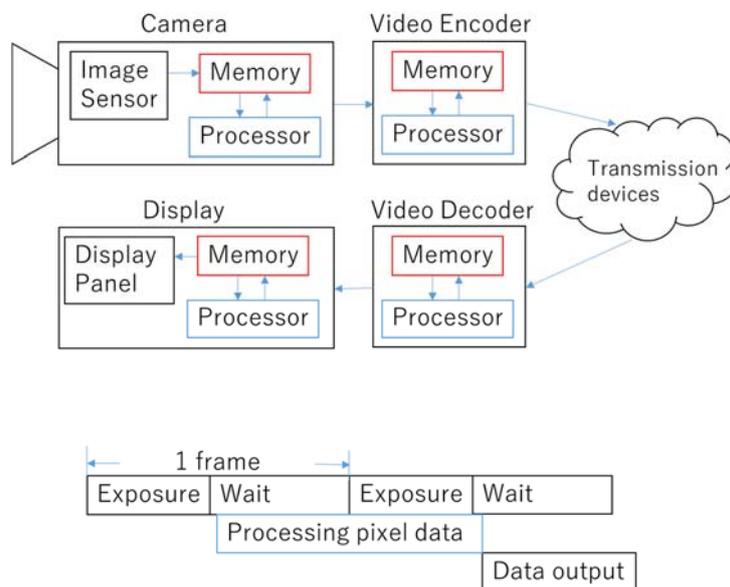


Fig. F-1 Image processing schematics and timing diagrams

通信経路上の遅延については、衛星通信等の超長距離条件を除き、信号の伝播時間が問題になることは多くない。通信経路では、狭い通信帯域に対応させる情報圧縮の処理や、伝送プロトコルへの対応処理、中継機器の再送処理などに起因するシステム的な遅延が多くを占める。例えば、IP 伝送の場合、具体的には、データシリアルライズやプロトコルスタックの処理、エラー検出やデータ再送などの通信品質に応じた処理、ルーティングやスイッチングによる中継の処理、などがそれぞれ存在する。IP 中継機器の基本的な処理遅延量は大きくはない。高性能な製品の packets 処理時間は 1msec 未満であることが多い。一方で、不安定なネットワーク環境等に起因する packets のロスや再送といった、中継プロトコルに拠る処理は、数 msec から数十 msec と、比較的大きな遅延原因となり得る。

多くの映像通信環境で、最も多くの遅延時間を占めるのは情報圧縮処理である。用途や方式に依存するが、遅延時間は、およそ 10msec から 1sec を超えるものもある。情報圧縮効率が高いフレーム間予測符号化技術(例えば MPEG)などは、原理的に、一定数のフレームをバッファするため、処理遅延がさらに数フレーム分増加する。一般には、より狭い通信帯域幅で送れるように、高い圧縮を行うほど、遅延時間は増加する傾向がある。

遅延時間毎の作業効率を比較評価する本実験では、通常の映像機器を直結し

た条件にほぼ相当する，最短 70msec の遅延時間を始めとして，比較的帯域幅が広い無線 LAN 環境による伝送を想定した 300msec の遅延条件を設定した．これらに加えて，比較的帯域幅が狭い無線 LAN 環境を想定した 700msec 条件，公共 BB などのより狭い帯域幅での通信を想定した 1000msec 条件，更に衛星通信環境を想定した 2000msec 条件，の計 5 条件を設定することとした．

### 5-F.2.2. 通信遅延の測定環境と生成制御環境

今回実験環境において，撮影時点から投影時点までの映像通信所要時間を正確に計測するため，2 系統のフォトトランジスタと 1 台のオシロスコープを利用する方法を用いた．模式図，回路図，画面写真を Fig.F-2 に示す．映像機材側は，カメラで LED 光源の明滅を撮影し，これをディスプレイに投影している．カメラ側の LED 光源とディスプレイ上の LED 映像付近の 2 カ所には，フォトトランジスタを設置し，明暗変化を電圧出力の変化としてオシロスコープで観察する．電圧変化の時間差から，マイクロ秒未満の精度で遅延の計測が可能である．

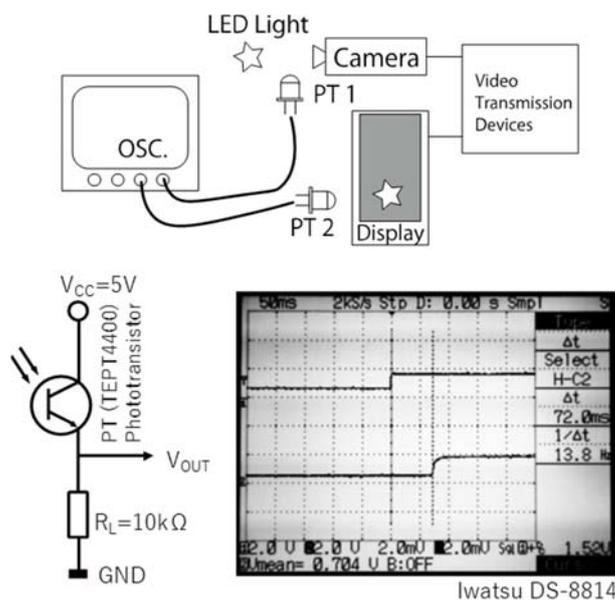


Fig. F-2 Schematics of delay analyzer

本実験に使用するカメラとディスプレイを直接接続した場合，および遠隔操作のための光ファイバ(全長 300m)等を経由した場合の両方で，実測平均

70msec (66~74msec) と、同等の所要時間が確認された。3G-SDI 信号とレーザー光の変換・復元に要する時間は、合計で約 0.1 $\mu$ sec(仕様値)であり、今回実験条件では無視できることが確認された。なお、実測による所要時間の幅は、カメラ側の露光周期と、LED の点灯タイミングのズレに起因する。

この低遅延映像通信環境をベースとして、様々な通信環境を想定した実験を実施するため、遅延時間を任意に変更する遅延制御装置を開発した。装置の構成を Fig.F-3 に示す。映像遅延制御装置は、4 系統の SDI 信号を収録・再生可能な PCIe カード 2 枚 (Blackmagic Design 製 DeckLink Quad) を搭載したパソコン (CPU:XeonE5-2690 Dual, OS:CentOS5) と、独自のソフトウェアにより構成した。装置内では、任意時間分の映像フレームをメモリバッファに記憶し、設定した遅延時間のタイミングでこれを出力している。現状では 60p 映像信号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 映像として処理している。但し、装置内処理時間を要するため、映像通信環境全体の最短遅延時間は約 300msec となり、これを超える任意の遅延時間を msec 単位で設定することができる。環境全体の遅延時間は、通信遅延測定環境により確認した。

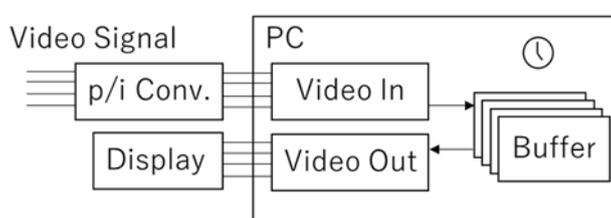


Fig. F-3 Configuration of video delay system

## 5-F.3. 作業効率評価実験

### 5-F.3.1. 実施概要

本実験の目的は、映像通信遅延が作業効率に与える影響を比較評価することにある。

バックハウによる標準的な作業は、土砂掘削作業である。しかし、作業対象

物が土砂などの不定形物であると、実験試行毎に作業内容が変化し、定量的な比較評価ができない。そこで、土砂掘削相当の動作を固形対象物に対して行い、動作課題の繰り返し安定性を高めた、モデルタスク<sup>(2)</sup> (5-F.3.3 実験課題参照) を用いることとした。

遠隔操作環境においては、通信遅延以外の要因を排除する必要がある。まず共通の映像環境として、搭乗者視点で広視野角の非圧縮高精細な映像環境を準備した。低解像度の映像では、被験者の経験や知識の影響が大きいことが知られている<sup>(3)</sup>。搭乗に近い映像を提示することで、そのような個人差の影響を可能な限り減らすこととした。また、映像通信遅延量については、これを任意に設定可能な映像遅延制御装置を開発、利用した。

遠隔操作環境を利用した事前実験から、遠隔操作技能及び習熟には、個人差が大きいことが分かっている。本実験では、土木研究所による遠隔操作の被験者実験に参加経験があり、一定の操作技能を有すると判断された、日常的な業務にバックホウを使用する作業員の中から、8名を被験者とした。被験者のバックホウ作業経験は、およそ6年～25年である。

### 5-F.3.2 実験環境

本実験の主要な使用機材を Table F-1 に示す。建機関係機材は、土木研究所所有の遠隔操作バックホウ（日立建機製 ZX120）と、モデルタスク作業対象物（ドラム缶型, Fig.F-5 左下）を利用した。

Table F-1 List of main equipment

機材名	台数	備考
建設機械		
遠隔操作バックホウ	1台	日立建機製ZX120
作業対象物	1個	ドラム缶型
映像通信装置		
建機搭載4Kカメラ	1台	搭乗席に設置
映像伝送装置	一式	光ファイバ方式
映像遅延装置	一式	
4Kディスプレイ	1台	56インチ

映像装置の構成を Fig.F-4 に示す。カメラは、Sony 製 PMW-F55 1 台を使用した。JIS 規格(JIS A 8315)による小柄運転員の着座時搭乗者視点に準拠し、カメラ位置は着座面からおよそ 70cm の高さに設置した。建機へのカメラ搭載状況を Fig.F-5 上に示す。レンズは、水平画角 79 度(仕様値)の CarlZeiss 製 CP.2 15mm/T2.9 とした。カメラは、3G-SDI 規格 1080p60 信号 4 系統により 4K 解像度(3840x2160)の非圧縮映像を出力する。この同軸出力は、メディアコンバータ(Lynx 製 OTX1842)によりシングルモード光ファイバ上のレーザー光に変換する。これを波長多重化装置(CubeOptics 製 DWDM-MUX)により合成し、1本の有線光ファイバケーブルにより伝送した。遠隔操作室側では、波長分離装置(CubeOptics 製 DWDM-DEMUX)とメディアコンバータ(Lynx 製 ORX1802)により 3G-SDI 同軸信号に復元する。映像遅延最短の 70msec 条件では、この 3G-SDI 出力をディスプレイに直接接続する。他の遅延条件では、映像遅延制御装置を経由して、ディスプレイに接続する。

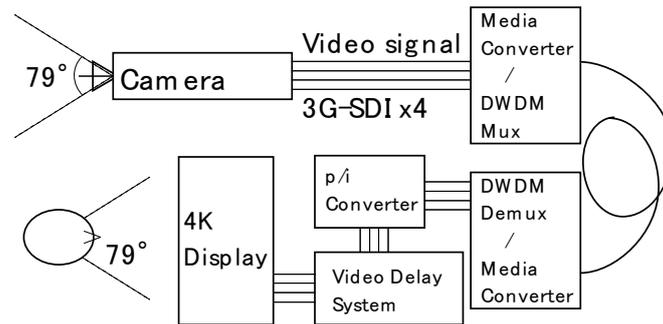


Fig.F-4 Configuration of video system



Fig. F-5 Video camera and remote control environment

映像表示には、56インチサイズのフラットパネル型4Kディスプレイ（アストロデザイン製DM-3410）を用いた（Fig.F-5 下右参照）。撮影側レンズの視野角は水平79度、映像表示側ディスプレイの横幅は約124cmであるので、操縦者の視距離は約75cmとした。これにより、操作者の視野角と撮影画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、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、顎台による頭部固定や操縦者毎の調整は行っていない。なお、今回実験の映像中に、履帯は映っていない。これは、搭乗席視点での遠隔操作において、履帯移動の効率低下につながるということがわかっている<sup>(4)</sup>。今回は同一映像条件による比較であるため、特段の対処はしていない。より広い視野映像の提供は今後の課題である。

被験者による遠隔操作は、屋外実験場敷地内に遠隔操作環境を模擬したプレハブ遠隔操作室を設置し、同室内に設置したディスプレイとリモコン装置により行った（Fig.F-5 下図参照）。遠隔操作室と建機稼働エリアは隣接しているため、映像遅延量に関わらず、エンジン音や稼働音はリアルタイムで聞こえてしまう。そこで、被験者は耳栓型イヤホンで一定音量の音楽（歌詞は無い）を聞きながら操縦することとした。これにより、エンジン音や稼働音は、ほぼ聞こ

えない状態となった。但し、バケットと作業対象物の衝突や、作業対象物の落下など、大きな衝撃は振動として地面越しにリアルタイムで感じられた。このため、衝突後の復帰操作などは、完全な遅延環境より素早く行われている可能性がある。

また、映像伝送用の光ファイバケーブルは、実験補助者により建機の一定距離後方から保持することとした。このため、実験実施時の巡回方向には制限がある。これについては、実験開始時に教示するものとした。巡回方向の間違いによる作業遅れなどは無かった。

### 5-F.3.3. 実験課題

今回遠隔操作の実験課題は、「モデルタスク 2<sup>(2)</sup>」とした。モデルタスクは、バックホウによる遠隔操作の作業効率評価の方法論として、土木研究所により提案されたものである。土砂の掘削や放土に相当する動作を固定対象物に対して行う。

モデルタスク 2 の実施環境を Fig. F-6 に示す。待機場所から作業対象物の前まで走行し、対象物の移設作業(A→B, B→A)を行い、再度待機場所へ走行する。実施手順の詳細を Fig.F-7 に示す。

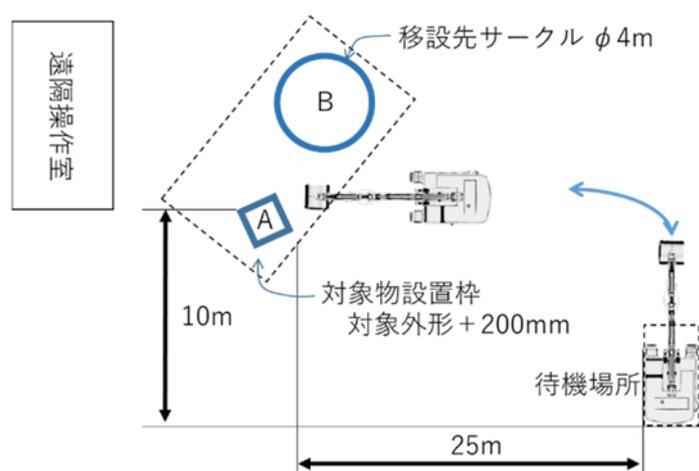


Fig. F-6 Configuration of model task 2

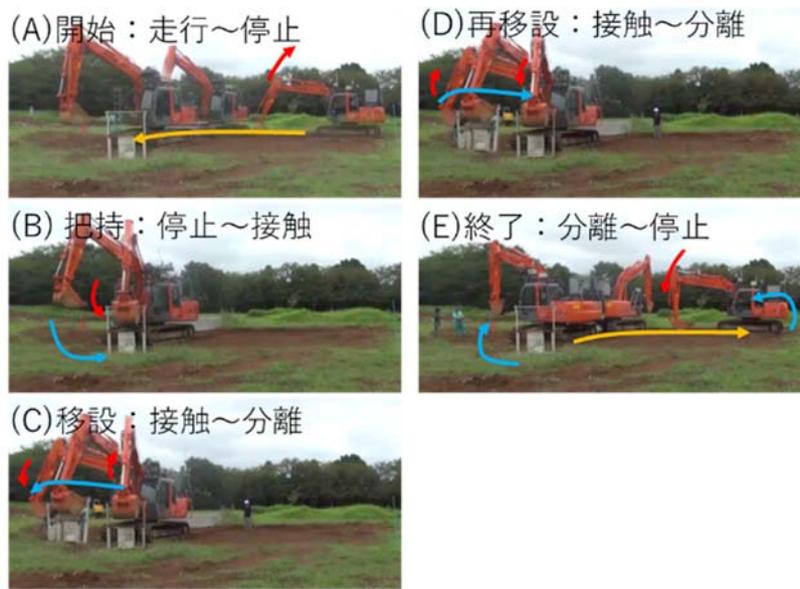


Fig. F-7 Procedure of model task 2

本実験では、このモデルタスクを、以下の各条件で実施することとした。

- (1) 屋外直視条件
- (2) 屋内遠隔映像条件, 遅延時間 70msec
- (3) 屋内遠隔映像条件, 遅延時間 300msec
- (4) 屋内遠隔映像条件, 遅延時間 700msec
- (5) 屋内遠隔映像条件, 遅延時間 1000msec
- (6) 屋内遠隔映像条件, 遅延時間 2000msec

条件毎の試行回数は5回とした。この試行回数は、既存研究<sup>(2)</sup>から、同課題での習熟による作業時間の安定化が見られる回数である。実験の実施は、作業課題の教示、屋外直視条件での課題実施、屋内遠隔映像条件での課題実施、の順番で行われた。屋外条件では、被験者は任意の場所で操作できると教示している。実際の被験者立ち位置は、建機前方～側方付近が多かった。屋内遠隔映像条件は、遅延時間 70msec から 2000msec へ遅延量が増加する順番で実施した。一般に、操作課題では学習効果による被験者動作の習熟や時間短縮の影響が見込まれる。対応策としては課題実施順序のランダム化が一般的である。しかしながら、今回課題では、事前実験の結果から、学習効果の個人差が大きいことが予想され、被験者数も限られていることから、適切なサンプルサイズが確保できない。そこで、一方向的に課題難度が高くなる順番で試行することと

した。被験者の習熟による時間短縮よりも実験課題の難度上昇による時間延長が大きく現れれば、学習効果の程度によらず、遅延時間の影響の有無を容易に判別できると考える。

各課題実施後には、課題の印象を回答するアンケートを実施した。項目は、「操作の難易度」（簡単に感じる～不可能と感じる）及び、「作業効率の低下」、「操作の危険性」、「映像の遅れ」（全く感じない～とても感じる）であり、それぞれ1から7の数値を選択して回答することとした。回答値の基準は、搭乗作業時を1とすることとした。また、実験実施中の印象変化に応じて、回答値を事後修正可能とした。なお、「映像の遅れ」は屋内条件のみの項目である。

#### **5-F.4. 結果と分析**

##### **5-F.4.1. 結果概要**

本実験の遅延時間条件毎のサイクルタイムの変化を Fig.F-8 に示す。遅延時間の増加に従い、サイクルタイムおよび誤差範囲が増大していることがわかる。

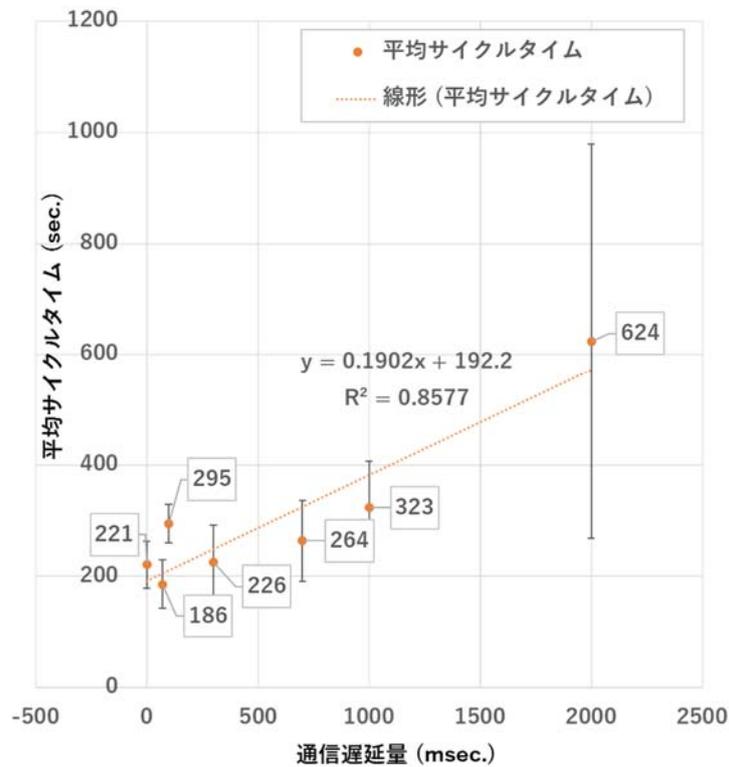


Fig. F-8 Correlation between cycle time and delay time

サイクルタイムの線形近似を図上に破線で示す。直線近似式は(1)、決定係数は(2)である。

$$y = 0.1902x + 192.2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.8577 \quad (2)$$

この近似式から、例えば 50msec の通信遅延は、モデルタスク 2 において、約 10sec のサイクルタイム増加につながっていると言える。限定的な被験者数と誤差を伴う結果ではあるが、ミリ秒単位の通信遅延から秒単位のサイクルタイムへと、およそ 190 倍の増加につながっていることが示されている。

本実験結果のうち、例外的事例について付記する。被験者 A~H のうち、被験者 A の屋外直視条件については、作業対象物をモデルタスク 1<sup>(2)</sup>相当の 3 個としていたため、集計対象から除外した。被験者 F の遅延時間 2000msec 条件については、本人申告と実験者判断により、危険のため試行 1 回のみで終了とした。実験期間中の機材故障による代替品利用のため、被験者 F,G,H の遅延時

間 70msec 条件は 98msec での実施となった。なお、Fig.8 では直視条件を遅延 0msec とし、70msec と 98msec を分けて表記している。

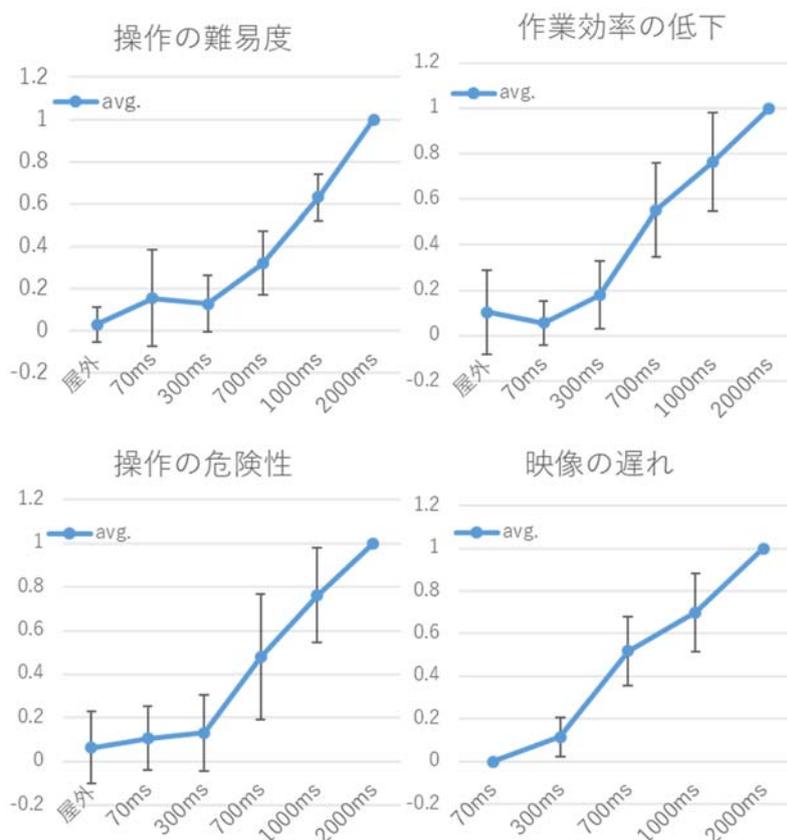


Fig. F-9 Results of Questionnaires

課題毎に回答されたアンケート結果を Fig.F-9 に示す。各項目の数値は、最小値を 0，最大値を 1 となるよう正規化したものである。結果から、遅延時間が増えるほど、作業効率は低下し、作業は困難に、かつ危険性も高いと感じていることが分かる。

一方で、作業効率の低下については、屋外条件と 70ms 条件での逆転が見られる。屋外条件では、走行や把持などの動作段階に応じて、バケットや作業対象物を適切に視認するため、操作者の歩行移動が行われていた。この点について、搭乗時と同等の視点映像を参照して作業できる遠隔操作環境が、若干ポジティブに評価されたものと思われる。また、操作の難易度については、70ms 条件と 300ms 条件での逆転が見られる。70ms 条件が初回の遠隔映像条件である

ことを考えると、同条件への習熟程度の差が、印象評価に影響しているのではないかと考えられる。

#### 5-F.4.2 作業内容による遅延時間の影響について

実験状況の観察から、履帯走行やバケット操作などの動作種別によって、遅延時間の影響に差異が見られた。そこで動作種別毎の影響評価を行う。

一般に、複数動作の分類には困難が伴う。バックホウ作業においても、各駆動部を連携し、連続的に動かすことが多く、記録映像からこれら動作要素を抽出することは困難である。例えば、習熟した作業員においては、土砂の掘削～旋回～放土の作業では、掘削中の旋回開始、旋回中の放土開始、が見られることが多い。これとは逆に、未習熟な作業員や困難な課題においては、意図が不明瞭な動作が散見され、意味的な分類にも困難がある。そこで本実験の動作分析においては、比較的明瞭な作業の境界として、作業員による動作順序の入れ替わりが少ない、履帯移動の終了や、バケットと作業対象物の接触や分離、を用いることとした(Fig.F-7 参照)。

動作種別毎の遅延量の影響を Fig.F-10 に示す。この図は、作業時間平均について屋外条件を 1 とした比で表している。「(A)開始」「(E)終了」フェーズにおいては、屋外条件に比べて遅延時間 2000msec でも、作業時間は 2 倍に届かない。これに対して、「(B)把持」「(C)移設」「(D)再移設」では、2 倍強から 4 倍弱に至っていることがわかる。「開始」や「終了」フェーズを占める主な動作内容は、持続的な履帯移動であり、頻繁なりモコン操作は行われない。これに対して、「把持」、「移設」、「再移設」では、ブーム、アーム、バケットの各作業装置を作動させるため、頻繁なかつ複合的なリモコン操作が行われる。また、履帯走行に比べて、作業対象物を目標とする操作では、動作の許容範囲が狭い。このような操作の複雑性や操作入力の回数が、通信遅延時の作業効率悪化に影響していると考えられる。

ごく単純化するならば、遅延環境下での建機の駆動精度は、作動速度×遅延時間量で規定される。このため許容範囲が狭い動作に対応するには、作動速度を落とす、作動量を予測する、といったコストが発生し、作業効率の悪化や作業負荷が生じていると考えられる。また、油圧駆動系の作動量は操作量に対してリニアではないため、作動量の予測は困難であり、作動速度は一定以下にで

きない、といった建機仕様上の制約も、遅延環境への対応を困難にしているものと考えられる。

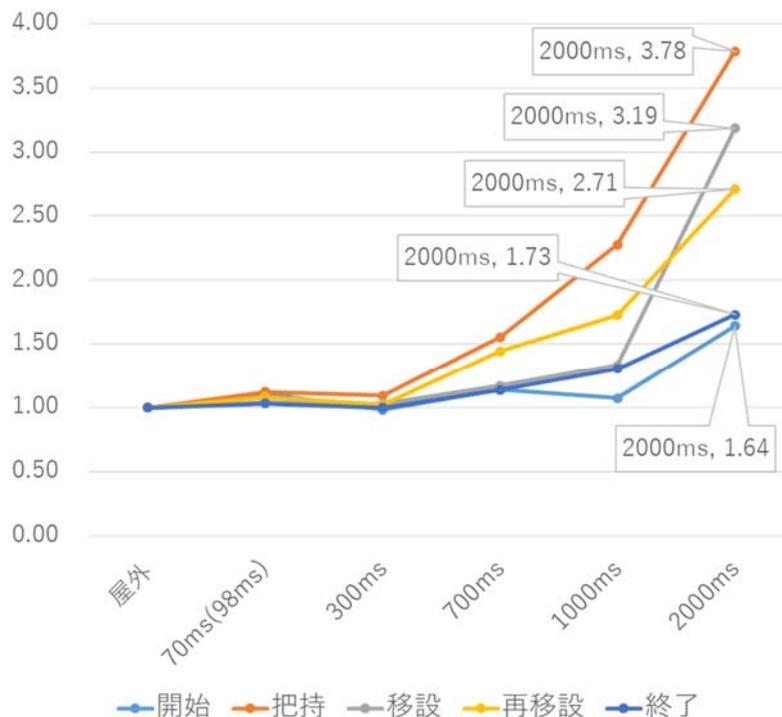


Fig. F-10 Normalized work time

Fig.F-10において、屋外直視条件、70msec(含む98msec)条件、300msec条件には、ほぼ変化がないように見える。この点について、より詳細に確認するため、3条件(但し98msec条件を除いた)の実作業時間をFig.F-11に示す。Fig.F-11左グラフから、「(B)把持」「(C)移設」「(D)再移設」のように操作の複雑性があり、操作入力の頻繁な作業では、70msecと300msecの条件に若干の差異があらわれている。但し、Fig.F-11右表で確認できるように、標準偏差は大きな結果である。

また、屋外直視条件と70msec条件では、同程度か、若干遠隔操作での作業時間短縮が見られる。これらの作業は、建機を起点として、バケットと作業対象物の位置関係の理解が要求される。屋外直視条件で建機前方や側方から視認する場合、見た目と操作の方向に心的回転が必要であり、操作のミスや、操作方向の意識的な確認といったコストが必要とされる。搭乗者視点の映像はそれらのコストが不要という利点がある。この点が、作業時間短縮につながった可

能性がある。被験者による「操作の難易度」についてのアンケート結果でも、屋外直視より 70msec 条件の方が難易度は低いと回答されているので、被験者の印象としても同様であったものと考えられる。

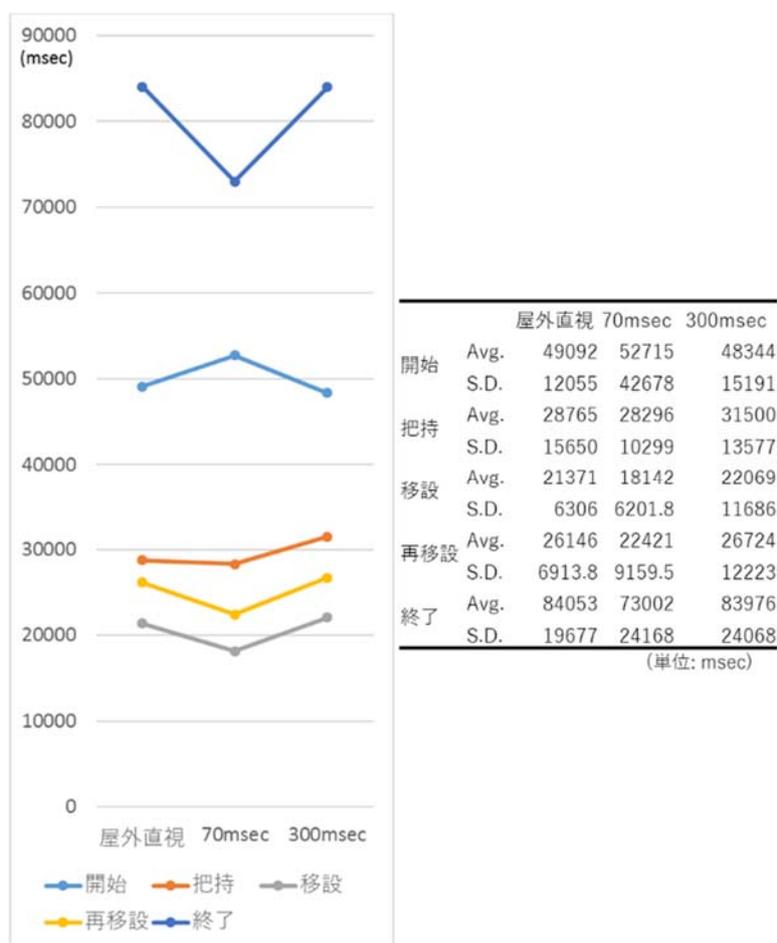


Fig. F-11 Low-latency settings and work times

### 5-F.4.3. 遅延時間と操縦桿操作

前項では、搭乗環境で通常想定されるような、頻繁かつ複合的な操縦桿操作が、遅延時間の増加による影響を受けやすい可能性について言及した。そこで、遅延時間による操縦桿操作の変化について計測を試みた。

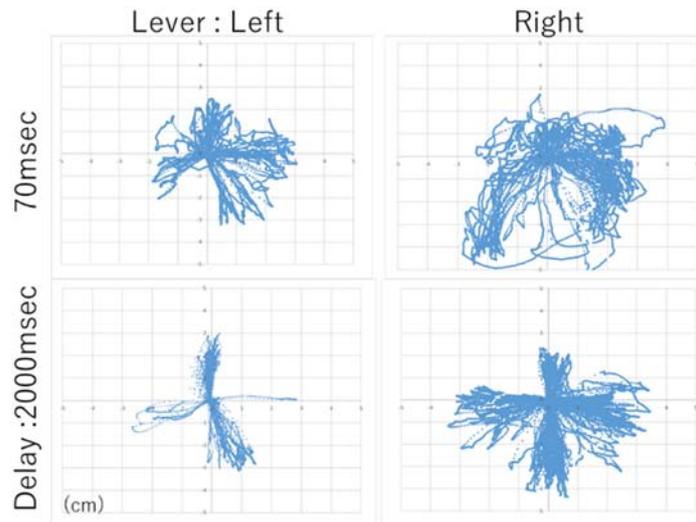


Fig. F-12 Motion of the levers

モデルタスク 2 を基本とする被験者作業課題を別途実施した。操縦桿操作上の差異を明確化するため、作業対象物の個数のみ、モデルタスク 1<sup>(2)</sup>相当の 3 個とした。操縦桿の動作計測には、光学式モーションキャプチャ装置 (NaturalPoint 社製 OptiTrack) を利用した。記録周期は 200fps、記録誤差は 1mm 未満である。操縦桿軸上のマーカー位置を操縦桿の操作平面に変換した図を Fig.F-12 に示す。これは被験者 H による、遅延時間 70msec(上段)と 2000msec(下段)の結果である。

図を一見して、遅延時間が多い条件では、操縦桿の縦横軸上の操作が多く、斜め方向動作、つまり 2 系統の駆動部の同時操作が少ないことが分かる。操縦桿縦横軸からの最短移動量平均(全実験時間中)は、70msec 条件時で左操縦桿 0.228、右操縦桿 0.492 であるのに対して、2000msec 条件時で左操縦桿 0.096、右操縦桿 0.168 であった。遅延時間が多い条件では、複合動作が半分～1/3 程度になっていることがわかる。

多くの建機の操縦では、複数の油圧系統を同時に作動させると、油圧低下による作動量の変化が起こる。この作動量変化は、作動の方向や、負荷の状況に応じて変わるため、予測の難度は高い。遅延量が多い条件では、より作動を単純化することで、予測可能性を高めているのではないかと考えられる。

## 5-F.5. お わ り に

本稿では、建機の遠隔操作性に映像通信の遅延量を与える影響について、定量的に評価することを試みた。映像条件や操作環境を共通化し、通信遅延量のみ可変とする遠隔操縦環境を構築した。同環境において、遠隔操作バックホウの作業効率を定量評価する、モデルタスク2を作業課題とした被験者実験を実施した。70msecから2000msecの通信遅延を設定した本実験の範囲において、通信遅延量とサイクルタイムの関係を直線近似できる可能性が示唆された。同時に、モデルタスクを構成する動作種別によって、通信遅延の影響に差異があることも示された。操作入力が高頻度であり、動作の許容範囲が狭い状況において、遅延の影響がより大きい傾向が見られた。

このような通信遅延時の操作性について、操縦桿操作を記録した。特徴的な差異として、通信遅延時の複合動作の減少が見られた。通常、複合動作は作業効率を高める一手段である。しかし、油圧変化による作動量変化へ対応する操作量の調整が必要であり、操作の難度は高い。通信遅延に伴う複合動作の減少は、作動予測が比較的容易な操作戦略を採ることで、予測精度を高め、調整の必要を減らし、作業効率を高める意図があると考えられる。

今回実験で観察された現象、すなわち、高頻度な操作入力時の作業効率低下、操縦桿の複合操作の減少などから、通信遅延による作業効率低下には、操作量に対する作動量予測の困難性に、その一因があると考えられる。

このため、通信遅延が避けられない場合の作業効率向上には、作動量予測を助ける補助的情報を提示するといった方法ほか、操作量と作動量を直線対応させるといった方法も考えられる。これらの改善の提案については、今後の検討課題としたい。

## 参 考 文 献

- (1) 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳, "超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察－雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要", 第13回建設ロボットシンポジウム, 2012.

- (2) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一, "油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案", 建設機械施工, Vol. 66, No. 8, pp.71-79, 2014.
- (3) Antonio Torralba, "How many pixels make an image?", Visual Neuroscience, Vol. 26, Issue 01, pp. 123-131. 2009.
- (4) 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, "高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作", 第15回建設ロボットシンポジウム, (O-43), 2015年.

## G) 建機の遠隔操作環境へ適用する移動体用広帯域光無線通信装置の

### 開発

#### 概要

無人化施工において、建設機械の遠隔操作者は、建機の搭乗者視点映像や作業空間の俯瞰映像などを参照しながら作業を進める。同作業においては、映像品質や通信遅延が、作業効率に影響を与えていると考えられている。理想的な、高い映像品質と少ない映像遅延を実現するための装置として、移動体用光無線通信装置を開発し、その評価を行ったので、これについて報告する。

#### 5-G.1. はじめに

建設機械の遠隔操作環境を支える映像通信装置として、移動体搭載型の光無線通信装置を開発し、その運用評価を実施したので報告する。

大規模災害等への対応作業における危険防止のため、建設機械を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。無人化施工現場における大きな課題の一つに、作業効率の低下という問題がある。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割とも言われている<sup>(1)</sup>。

作業効率低下の一因として、映像環境の差異を考えることができる。筆者等が行った評価実験では、現行の無人化施工環境に対して、映像環境を広視野角・高解像度(4K)・非圧縮・両眼立体視とすることで、2割強の作業時間短縮を実現することができた<sup>(2)</sup>。しかしながら、同環境の映像伝送は、24Gbpsの広帯域通信を実現するため、有線の光ファイバケーブルによって建設機械と遠隔操作室を接続しており、可用性に難がある。

本稿では、有線光ファイバケーブルと同等の通信帯域を確保する無線接続方法の一案として、移動体への搭載を可能にした光無線通信装置を開発したので、これについて述べる。また、バックホウによる標準的作業を構成要素とし、繰り返し試行可能なモデルタスク2<sup>(3)</sup>による運用評価を行ったので、これについて報告する。

## 5-G.2. 空間光通信技術

本通信装置が用いる空間光通信(Free-Space Optical Communication)技術について概説する。本技術は、高速変調された高指向性のレーザービームにより、無線通信を行うものである。応用先としては、高層ビル間のネットワーク接続や近距離人工衛星間の通信など (Fig.G-1 参照) , 相対位置の変化が少ない事例が想定されている。

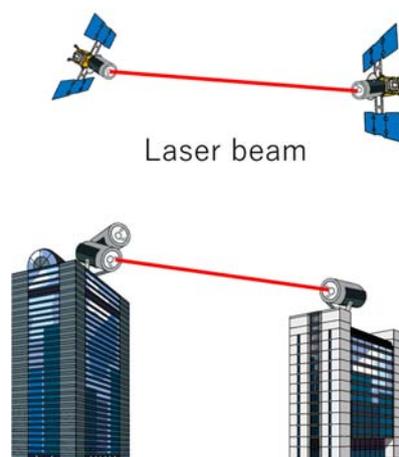


Fig.G-1 Application examples of FSOC

無線 LAN などの電波を利用する通信装置と比較して、レーザー光線を利用する本装置の特徴について記す。

まず、光線は電波に比べて波長が短いため、原理的に伝送量の大容量化が可能である。

また、高指向性光線を利用し、信号が拡散しないため、近接して複数装置を設置できる。電波利用の場合は、電波到達範囲内の同一周波数帯の利用は、電波障害の原因となり得る。このため、電波到達範囲と使用周波数帯によって、作業環境全体で伝送可能な情報量に上限が設定される。指向性光線利用の場合は、任意に装置を増設することで、伝送量を増やすことが可能である。

同様に、高指向性光線は拡散による信号強度の減衰が少ないため、低消費電力で効率的に伝送可能である。これは、電力条件が制限される移動体への搭載に適している。また、電波利用時と異なり、フレネルゾーン (送受信点間の見通し線周囲の空間) の確保が不要であり、伝搬路付近の障害物による多重波干

渉などの問題が生じない。このため、装置設置場所には比較的柔軟に対応できる。

一方で、光線経路上の障害物による遮蔽には直接的な影響を受けるため、通信空間を確実に保持する必要がある。

同時に、送受信機間の光線経路を精密に対向させ続ける必要がある。現状の応用例が、ビル間や人工衛星間の通信であるのは、送受信機間に遮蔽物が無いことや、静止状態に近い設置条件のためでもある。

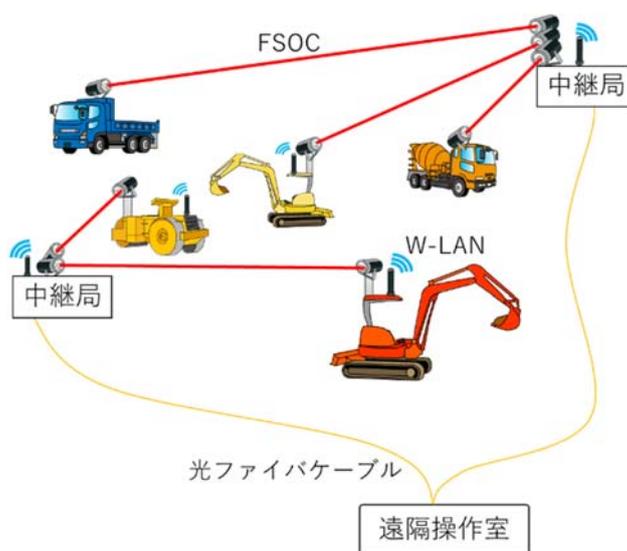


Fig.G-2 Example of video transmission configuration with FSOC

このような特性を持つ装置を、建設機械のような移動体に搭載し、安定的に運用するためには、移動に対応するため追従機構を備えることと、遮蔽に対応するための複数回線化や無線によるバックアップ接続などが必要である。運用状況を想定したイメージを Fig.G-2 に示す。本想定を実現する最初の段階として、移動に対応して送受信機間の光線経路を精密に対向させ続ける追従機構について実装し、その評価を行った。

今回、提案する空間光通信装置は、情報通信研究機構にて開発された光無線通信装置<sup>(4)</sup>と、新たに開発された移動体追従機構から構成される。

光無線通信装置は、外部から入力された光信号を、そのまま空間伝送するための光学系を主とした、パッシブ型伝送装置である。伝送信号に対する情報処理を行わないため、本機内部では実質的に遅延が生じない。また、処理系が不要であるため、比較的装置の小型化が容易である。入力光信号としては、

1500nm 帯レーザー光線とシングルモード光ファイバを利用する民生機器を接続し、汎用的に利用することができる。

しかしながら、本装置は固定設置しての利用を目的に開発されたため、移動体を追従する機構は備えていない。但し、大気ゆらぎによる到来角度変動に対応するため、高速応答ミラーによる補償は行っており、その追尾範囲は凡そ1度、応答時間は約2msec（0.5度追尾時）である。今回、移動体対応のため追従機構を新たに開発し、追従範囲を大幅に拡大することで、建機搭載を可能とした。

### 5-G.3. 建機搭載実験

#### 5-G.3.1. 実験課題：モデルタスク実施中の映像伝送

建機には、作業状況に応じた様々な動作が想定し得る。ここでは、動作測定一般化と繰り返し試行が可能な、土木研究所により提案されたモデルタスク2に準拠することとした。同タスクにて、作業中の建機を提案通信装置の移動局、遠隔操作室を固定局とし、移動局から固定局への映像伝送を行う。実験では、同作業中の通信に異常が無いことを確認する。

モデルタスク2の実施状況を Fig.G-3 に示す。今回実験装置の設営都合上、文献<sup>(3)</sup>とは移動距離の寸法等が若干異なる。実験使用機材は、土木研究所所有の遠隔操作型バックハウ（日立建機製 ZX120）と、モデルタスク作業対象物（ドラム缶型）である。

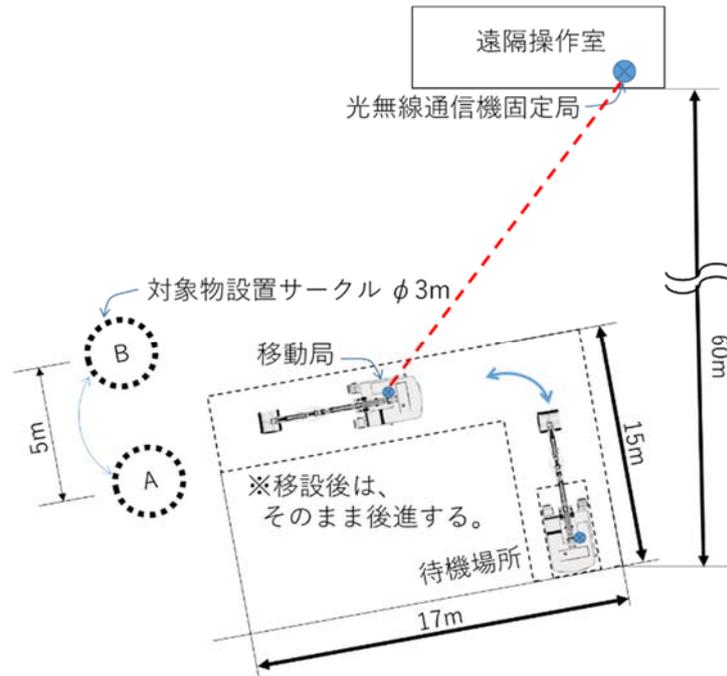


Fig.G-3 Configuration of model task 2

実施手順は、以下の通りである。

1. 待機場所から作業対象物の前まで履帯走行し、停止。
2. 作業対象物を設置サークル A から B へ移設、B から A へ移設。
3. 作業対象物前から待機場所へ履帯走行し、停止姿勢。

文献<sup>(3)</sup>のモデルタスク 2 においては、作業対象物の移設（手順 2）後、180 度旋回してから待機場所へ履帯走行し、待機場所で再度旋回して停止姿勢をとる。今回実験においては、他の実験機材等の遮蔽物の都合上、旋回せずに履帯走行を行うこととした。なお建機の遠隔操作は、遠隔操作室内からの目視により、実験者が行った。

### 5-G.3.2. 機材構成

実験機材の構成を Fig.G-4 に示す。追従機構と光無線通信装置は、独立に制御される。また追従機構の移動局側と固定局側も、制御系は独立に動作する。

追従機構は、光無線通信装置の光アンテナ（レンズ）間を精密に対向させ続けることを目的としている。移動局側の移動や振動は、任意の建機動作や路面状態などに因って無秩序的に起こるため、この追従動作を予測制御することは困難である。このため今回は、相手側光アンテナ位置の観測とジンバルの制御を高速に実行し、追従を実現することとした。移動方向の観測周期とジンバルの駆動能力によって、追従性能を向上させることができる。

対向側光アンテナの位置を示す装置としては、ビーコン LED を利用することとした。位置精度は、追従用カメラのレンズ画角と画面解像度に依存する。使用カメラ(Ximea 社 MQ003MG-CM)の画面解像度は水平 648pix 垂直 488pix であり、レンズ画角は固定局側を水平 3.214deg, 移動局側を水平 9.621deg とした。このため、位置分解能は固定局側で 0.005 deg./pix., 移動局側で 0.015 deg./pix.となる。移動局側は、作業や加振による広い駆動範囲が予想されるため、やや広めの画角を設定している。

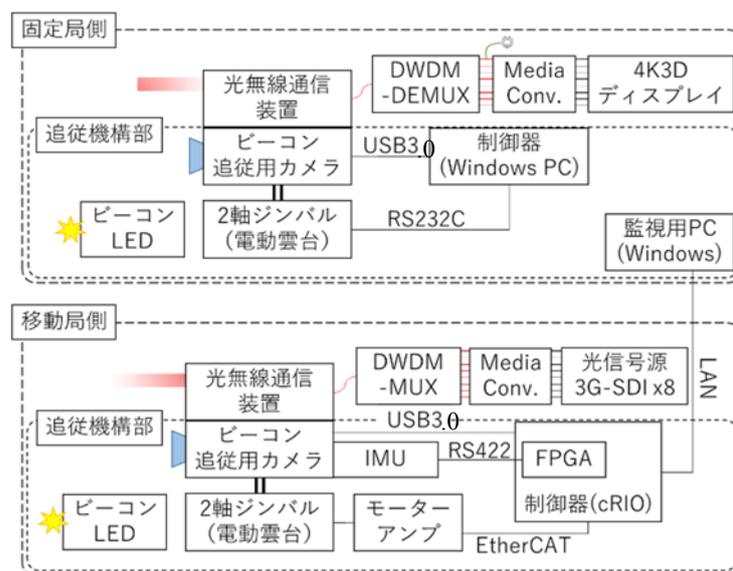


Fig.G-4 Configuration of experimental devices

追従用カメラは、光アンテナと近接（レンズ中心間距離 約 6 cm）して設置し、光軸方向を一致させている。カメラ画面（Fig.G-5 参照）上でのビーコン光の位置変化量から移動方向を算出し、これを補償するよう 2 軸ジンバルを駆動することで、光無線通信装置の相互追従を実現する。

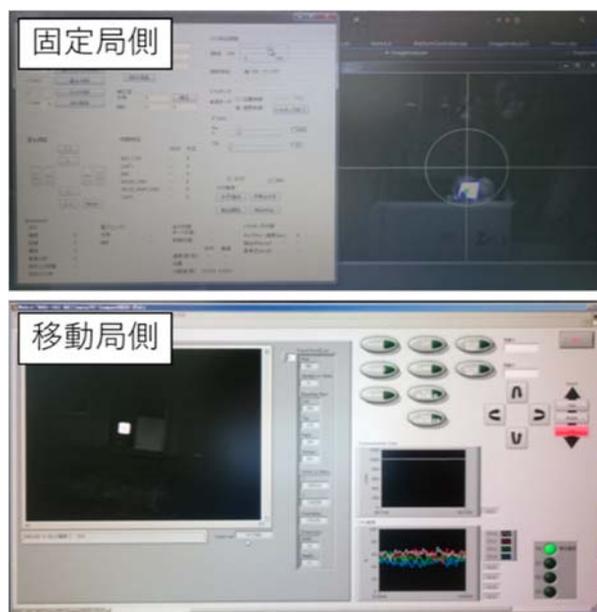


Fig.G-5 Screenshots of control deck

追従動作は、光無線通信機の通信接続が手動設定で成立した時点で、そのビーコン光位置を初期位置として、実行を開始する。なお、画面上のビーコン光の位置変化量と駆動角度の比は、追従動作開始前に値を設定している。ジンバルを任意の角度に駆動し、画面中ビーコンの位置変化量から、縦横軸それぞれの比を求めて、固定値を設定するものであり、レンズ歪みなどの影響は無視している。また、今回実験においては、光アンテナ間の距離変化が大きくないという前提である。

固定局側と移動局側の追従機構には、仕様に若干の差異がある。仕様の概略を Table G-1 に示す。固定局側は、商用電動ジンバル(FLIR 製 PTU-D48E)を利用する（既発表<sup>(2)</sup>装置を改変）。これは、移動局に利用した場合、駆動周期と駆動トルクの不足から、追従性能に難があった。

Table G-1 Specification of devices

	固定局側	移動局側
撮影装置	Ximea 社 MQ003MG-CM (USB3.0 カメラ)	
撮影周期	100fps (実質 90fps 前後)	250fps
画像処理	PC (Windows, Core i7)	NI 社 cRIO-9034
IMU	なし	Sensoror 社 STIM-300
駆動装置	FLIP 社 PTU-D48E	Yaswaka 社 SGDVR90, SGMJV-01ADAH701
駆動周期	100 commands per second	1000 commands per second

そこで移動局側は、従来装置の画像処理系と駆動系の見直しを行った (Fig.G-4 制御器相当)。まず、制御周期の高速化と安定化を行った。Windows PC 利用の従来装置では、設計上の制御周期 100 control cycle per second(cps)に対して、稼働は 100~90cps 前後と不安定であった。そこで画像処理から駆動指令を含む処理のリアルタイム性を高めるため、FPGA や A/D, EtherCAT などの必要処理系と I/O を備えるリアルタイムコントローラ (NI 社 CompactRIO) を用いることとした。

また、駆動トルク不足の解消のため、水平垂直の 2 軸に AC サーボモーター (定格出力 100W, 定格トルク 0.318 N・m) を用いることとした。あわせて、応答速度が高速かつ EtherCAT 接続可能なモーターアンプを利用し、駆動指令周期を毎秒 1000 回と高速化した。

画像取得周期は 400fps への高速化を予定していたが、画像取得プロセスにハードウェア仕様上の問題が生じたため、250fps で取得することとした。手動にて初期設定されたビーコン光輝点領域の重心位置を追従する処理を行っている。

移動局側は、ジンバル水平面直下に加速度計 (IMU) を設置し、3 軸の加速度を毎秒 1000 回計測した。制御周期毎秒 1000 回のため、250fps の撮影速度では、4 回中 3 回は画像を得られない。この時、加速度情報を用いて、これを補償するジンバル駆動を行うこととした。

これら機材の設置状況を Fig.G-6 に示す。固定局側の光無線通信機は遠隔操作室内に設置した。設置時のレンズ（光アンテナ）地上高は 1.3m である。移動局側の光無線通信機は建機上に設置した。設置時のレンズ地上高は 2.8m である。固定局と移動局間の距離は、約 40～60m である。移動局側の設置状況を Fig.G-6 下段に示す。通信範囲を最大限確保するには、キャビン上など遮蔽物の少ない場所に設置すべきである。しかしながら、既存の搭載機材等の都合上、ブーム後方の、土木研究所による実験機材固定用アングル材上に固定することとした。このため、既設置機材に遮蔽されない、通信可能な最大旋回角度は 100 度前後となる。タスクの実施においては、待機場所や作業場所での 180 度旋回は行わず、履帯での前後進により移動することとした。



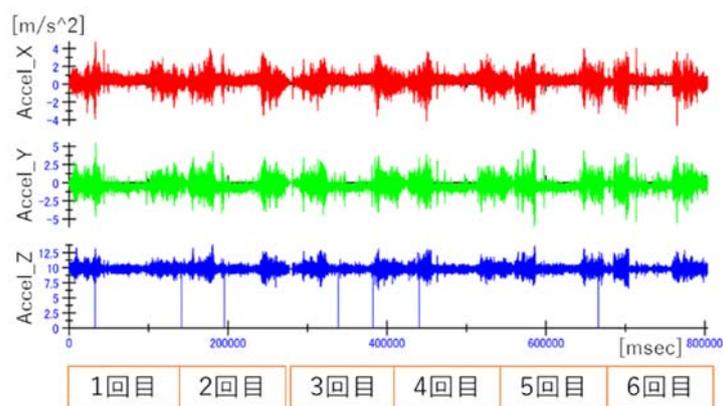
Fig.G-6 Mobile and fixed station settings

## 5-G.4. 実施結果

モデルタスク 2 を連続で 6 回実施（途中、ログ保存のための休止がある）し、通信接続維持を確認できた。実施結果について、以下に記す。

### 5-G.4.1. 建機動作記録

実験実施中の建機動作状況を示すため、IMU（Sensoror 社 STIM-300）により計測された加速度の時系列変化を Fig.G-7 に示す。記録条件は、サンプリングレート 1000 samples/sec、ローパスフィルタ -3dB frequency to 16Hz であり、X 軸は建機左舷方向（固定局側とおおよそ逆方向）、Y 軸は建機前方向、Z 軸は建機下方向を示す。あわせて各軸の最大値、最小値、平均値、レンジを表に示した。各軸の方向におよそ  $7.5\sim 11.5\text{m/s}^2$  のレンジでの加速度入力観測された。また、Fig.G-7 上図から、各作業の初期と末期に行われる履帯旋回時の加速度が大きいことが分かる。



	Accel_X	Accel_Y	Accel_Z
最小値	-4.625	-6.061	6.353
最大値	4.729	5.415	13.828
レンジ	9.354	11.476	7.474
平均	0.390	-0.323	9.789

[m/s<sup>2</sup>]

※ 取得ミス値 (Accel\_Zが0) について、Accel\_Xと Accel\_Yは0、Accel\_Zは9.8、として計算した。

Fig. G-7 Accelerometers data of the backhoe

## 5-G.4.2. 光信号強度計測

今回実験距離における 4K3D 映像の空間伝送を 4K3D ディスプレイで確認し、光信号強度測定点 (Fig.G-4 ©印) にて、光信号強度を計測したので、Table G-2 に示す。

Table G-2 Specification of devices

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8
Power [dBm]	-5.6	-5.6	-5.7	-5.3	-6.3	-6.6	-5.7	-6.4

非圧縮で 4K3D 映像を伝送するため、3G-SDI 規格の電気信号 8ch をメディアコンバータ (Lynx 社 OTX1842) と Video SMPTE SFP(Eoptolink 社 EOLS-1630-28XXD Series)にて、光信号に変換している。同変換は、波長 1551.72nm～1557.36nm を使用しており、これを DWDM-MUX(CubeOptics 製 DWDM-MUX)により 8 本から 1 本の光ファイバへ収束し、光無線通信装置へ導入する。光波長に幅があることから、レンズ収差の影響による光信号の減衰が心配されたが、本計測では、その影響は観測されなかった。

光無線通信装置の内部では、光信号強度を常時記録することができる。しかしながら、同機能は、1ch 分の信号強度記録を想定したものであるため、今回の DWDM8ch を合計した信号強度では、計測上限を超えてしまい、光強度の変化を記録できない。

そこで、映像信号にかわり疑似光信号を送出して、信号強度変化を記録することとした。本来、映像伝送は移動局側から固定局側への一方向通信によって行われる。疑似光信号は、Fig. G-8 に示すように往復経路とし、その終端側の光信号強度を計測する。往復経路の通信を確認することで、3G-SDI のような一方向通信規格だけでなく、HDMI などの双方向通信のある伝送規格の有効性も確認できる。疑似信号光源は +5dBm, 3mW 出力とした。

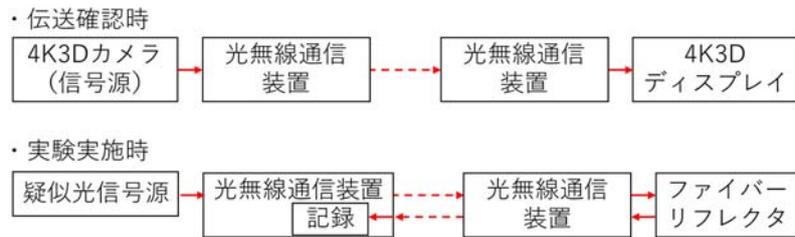


Fig. G-8 Optical intensity measuring method

実験実施期間の光強度変化を Fig.G-9 に示す. 1dBm の安定的な光信号強度を確認することができた. なお, 作業各回の最初と最後に, 若干の信号強度低下が見られる. 待機場所付近を走行時の現象であることから, 焦点距離の変化に伴う強度変化と考えられる. 焦点距離変化への自動対応については, 今後の課題としたい.

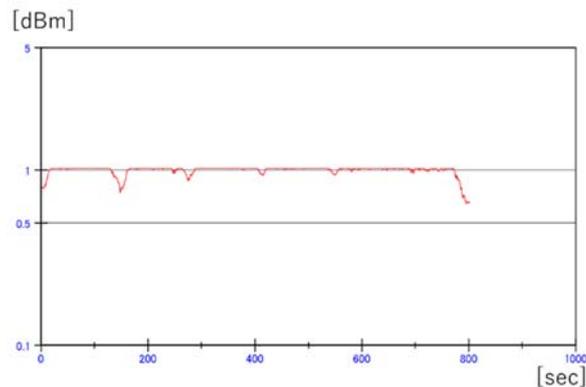


Fig. G-9 Optical signal intensity

#### 5-G.4.2. ビーコン追尾状況

移動局側追従機構の稼働状況を示すため, ビーコン追従用カメラ中の目標座標(X,Y)の変化を Fig.G-10 に示す. 図から, 建機の振動状況と同様に, 履帯旋回動作時の追従ズレが多く見れる. 一方で, 直線走行時や作業対象物把持に伴う旋回時には, 大きな追従ズレはなかった. 最大の追従ズレ量は, 0.689 deg.であった.

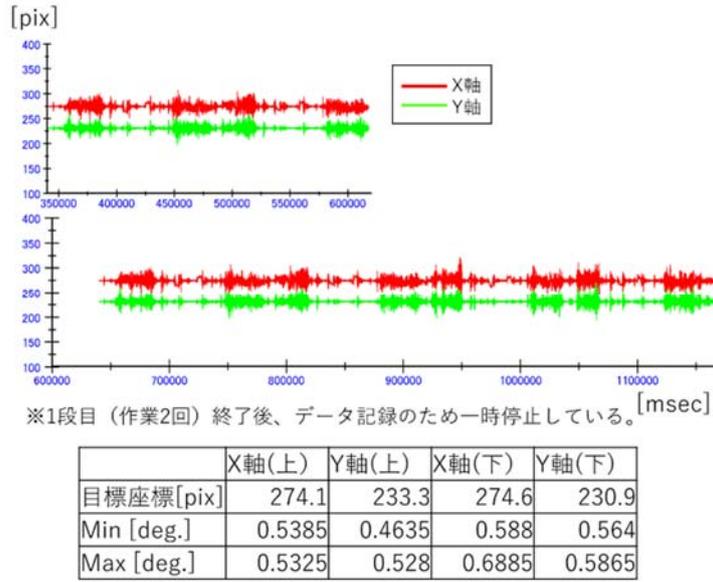


Fig.G-10 Deviation from the target beacon (mobile)

固定局側追従状況の稼働状況も、Fig.G-11 に示す。最大の追従ズレ量は、0.235 deg.であった。

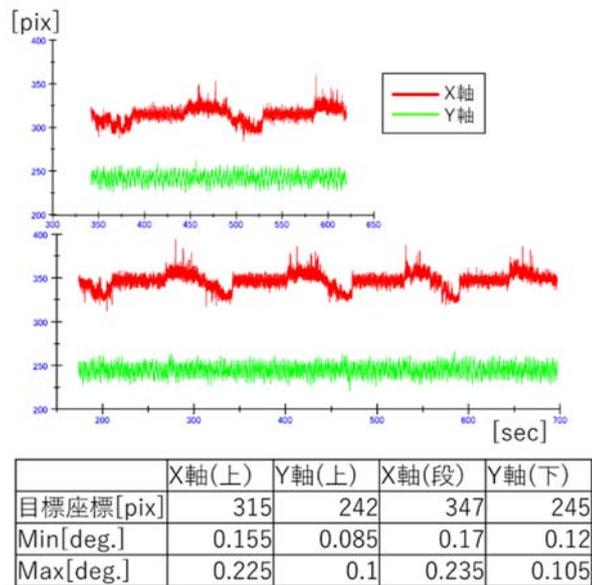


Fig.G-11 Deviation from the target beacon (fixed)

移動局，固定局ともに許容範囲内での追従と通信を確認することができた。

## 5-G.5. おわりに

建設機械の遠隔操作者において、作業効率に好影響を与えると考えられる、高い映像品質と少ない映像遅延を実現する通信環境として、移動体対応型の光無線通信装置を提案した。非圧縮 4K3D 映像を伝送する 24Gbps の広帯域通信装置であり、民生品 1500nm 帯レーザー光通信モジュールを利用することができる。本装置を遠隔操作バックホウに搭載して、履帯走行や模擬的掘削作業を伴う標準的作業である、モデルタスク 2 を繰り返し実施した。結果として、同作業中の通信実現と動作状況を確認することができた。

これにより技術的な適用可能性は確認されたと考える。しかしながら、実運用にあたっては、光無線通信装置の調整自動化、バックアップ回線を含む弾力的運用環境の構築、装置の小型軽量化、などの課題が残る。また、より困難な移動体条件での運用も今後の課題である。

## 参 考 文 献

- (1) 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳, "超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察－雲仙普賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要", 第 13 回建設ロボットシンポジウム, 2012.
- (2) 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, "高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作", 第 15 回建設ロボットシンポジウム, (O-43), 2015.
- (3) 茂木正晴, 油田 信一, 藤野 健一, "油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案", 建設機械施工, 一般社団法人日本建設機械施工協会誌, Vol. 66, No.8, pp. 71-79, 2014.
- (4) 有本 好徳, "10Gbit/s 以上の高速大容量を実現した光無線通信装置の大気揺らぎ環境下における伝送特性", 電子情報通信学会論文誌. B, 通信 J96-B(3), pp. 330-338, 2013.

## 6. ま と め

従来、作業効率の定量的評価が困難であった建設機械の遠隔操作を対象として、定量評価の技術と手法を開発した(5-A章)。これを実践的に利用し、遠隔操作環境において作業効率が影響を受ける操作環境因子の分析を行った(5-B, C, D章)。いくつかの実験を経て、映像環境や通信遅延の影響を確認することができた(5-E, F章)。

これらの実験結果を踏まえ、映像環境の高度化や通信遅延の解消のための研究開発を行った。同開発環境を利用した遠隔操作実験を実施し、作業効率の向上を確認することができた(5-G章)。

本共同研究において実施した実験や評価手法は、いずれも実用的なフィールドへの適用を企図したものである。しかしながら、実用場面での運用には至っていない。この点については、今後の課題である。また、本研究においては、映像環境を主な対象としたため、操作系の通信遅延や操作精度についての議論は行わなかった。殊に低遅延の環境下においては、操作系の影響が相対的に大きくなる様子が観測されており、この点についての検討は今後の課題である。

## 7. 研究成果

### 対外発表

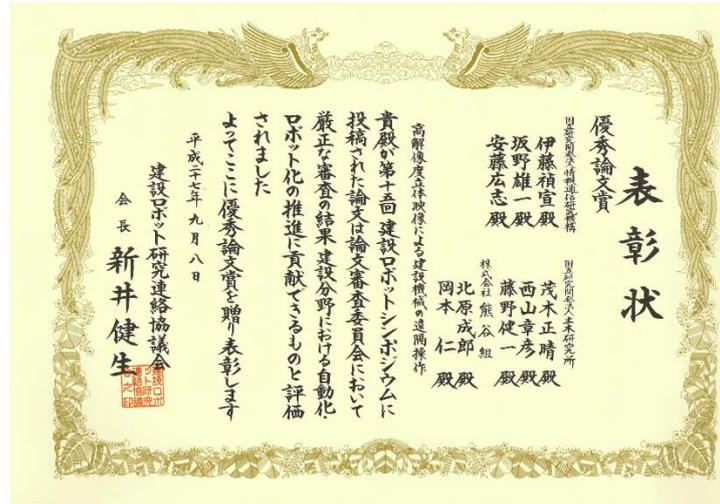
- (1) 西山章彦 (土木研究所), 茂木正晴 (土木研究所), 藤野健一 (土木研究所), 油圧ショベル無人化施工の遠隔操作と搭乗操作における操作者視点の比較に関する研究, 第 14 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), pp. 63-70, 2014 年 08 月 28 日.
- (2) 茂木正晴 (土木研究所), 西山章彦 (土木研究所), 油田信一 (芝浦工業大学), 安藤広志 (情報通信研究機構), 伊藤禎宣 (情報通信研究機構), 藤野健一 (土木研究所), 無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価, 第 15 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), O-21, 2015 年 09 月 07 日.
- (3) 西山章彦 (土木研究所), 茂木正晴 (土木研究所), 藤野健一 (土木研究所), 操作方式の違いによる油圧ショベル無人化施工の作業動作解析, 第 15 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), O-23, 2015 年 09 月 07 日.
- (4) 伊藤禎宣 (情報通信研究機構), 坂野雄一 (情報通信研究機構), 茂木正晴 (土木研究所), 西山章彦 (土木研究所), 藤野健一 (土木研究所), 北原成郎 (熊谷組), 岡本仁 (熊谷組), 安藤広志 (情報通信研究機構), 高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作, 第 15 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), O-43, 2015 年 09 月 07 日.
- (5) 茂木正晴 (土木研究所), 西山章彦 (土木研究所), 橋本毅 (土木研究所), 藤野健一 (土木研究所), 油田信一 (芝浦工業大学), 油圧ショベルの遠隔操作における視覚及び操作系インターフェースの違いによる作業効率の向上について, 第 16 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), O6-4, 2016 年 09 月 01 日.
- (6) 伊藤 禎宣 (情報通信研究機構), 藤野健一 (土木研究所), 安藤広志 (情報通信研究機構), 映像通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデル

タスクによる評価, 第 16 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM),  
O6-1, 2016 年 09 月 01 日.

- (7) 伊藤 禎宣 (情報通信研究機構) , 藤野健一 (土木研究所) , 安藤広志 (情報通信研究機構) , 建機の遠隔操作環境へ適用する移動体用広帯域光無線通信装置の開発, 第 16 回 建設ロボットシンポジウム論文集(CD-ROM), P2-3,  
2016 年 09 月 01 日.

## 受賞

- (1) 第15回 建設ロボットシンポジウム優秀論文賞、高解像度立体映像による建設機械の遠隔操作.



- (2) 第16回 建設ロボットシンポジウム優秀論文賞、映像通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデルタスクによる評価.





---

共同研究報告書  
Cooperative Research Report of PWRI  
No.489 December 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754