

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第 4438 号

土木研究所資料

無人化施工新技術カタログ

令和5年 7月

国立研究開発法人土木研究所
技術推進本部先端技術チーム

Copyright © (2023) 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。

無人化施工新技術カタログ

技術推進本部 上席研究員（特命事項担当） 橋本 毅
技術推進本部 先端技術チーム 上席研究員 山口 崇
主任研究員 山内元貴
研究員 鈴木裕敬
専門研究員 遠藤大輔
招聘研究員 油田信一
元研究員 山田 充

要 旨：

土木研究所先端技術チームでは、平成 22 年度～27 年度「主要研究：大規模土砂災害等に対する迅速かつ安全な機械施工に関する研究」および平成 28 年度～33 年度「主要研究：災害発生時におけるロボット技術適用に関する研究」において、主にカメラ映像方式による無人化施工の施工効率改善に向けた基礎的研究や様々な新技術の開発・検証を行ってきた。本書では、それら成果をカタログ的にまとめたものである。

キーワード：無人化施工，遠隔操作，カメラ映像方式，災害復旧，施工効率改善

無人化施工新技術カタログ

目次

1. はじめに	1
1.1. 本書の目的・概要	1
2. 無人化施工の概要	2
3. 無人化施工の課題	5
3.1. 問題点ヒアリング結果	5
3.2. 課題点まとめ	8
4. 無人化施工技術に関する基礎的研究	10
4.1. モデルタスクの開発	11
4.2. 現状の無人化施工における施工効率の確認	14
4.3. 施工効率低下原因の把握	15
4.4. 無人化施工オペレータのカメラ映像活用特性	17
4.5. 建設機械操作時にオペレータが必要としている情報について	19
4.6. 無人化施工建設機械の走破性能	20
5. 無人化施工の課題に対する解決技術	22
5.1. 施工効率向上技術	22
5.1.1. 運転席画像増加技術	24
5.1.2. VR 映像技術	26
5.1.3. アラウンドビューシステム	28
5.1.4. 外部カメラ画像表示技術	30
5.1.5. オペレータ選抜手法	32
5.1.6. 運転席型遠隔操作装置	34
5.1.7. 様々な VR 技術	36
5.2. セットアップ効率化技術	38
5.2.1. HMD 活用システム	40
5.2.2. UAV 活用システム	42
5.2.3. SLAM 活用システム	44
5.2.4. 高機能遠隔操作室	46
5.3. 機種多様性向上技術	48
5.3.1. 半水中遠隔操作型クローラダンプ	50

5.3.2.	中型油圧ショベルと小型油圧ショベルの比較	52
5.3.3.	後付け遠隔操作システム	54
5.3.4.	クイックカプラ	56
5.4.	非常時に備えて決めておくべきルール	58
5.5.	無人化施工技術の伝承について	59
6.	無人化施工実施事例の紹介	60
7.	まとめ	62
8.	参考文献	63

1. はじめに

1.1. 本書の目的・概要

東日本大震災や熊本地震、大型台風など、我が国はこれまで多くの災害に見舞われており、甚大な被害が発生している。災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、被災状況の調査や道路啓開などを迅速に行うことが重要であるが、これらは二次災害の危険性が高く、安全性に配慮しつつ迅速に高効率で施工を行うことは困難な場合が多い。この課題に対する一つの解決策として、遠隔操作が可能な建設機械を用いオペレータは安全な場所から操作を行う施工方法が考えられる。この遠隔操作型建設機械を用いる施工は「無人化施工」とよばれ、1993 年度に雲仙普賢岳噴火後の土石流対策として実施された除石工事を契機に発展し、実用的な工法としてこれまで日本国内で 200 件以上の活用実績を持っている（詳細は 2 章）。

しかしこの無人化施工は、平常時とは異なり災害直後の混乱した現場での運用となるため様々な課題が存在しており、これまで必ずしも迅速かつ円滑に運用されてきたとは言いがたいのが現状である。今後無人化施工を効果的に活用するためには、それら課題の情報とそれらを解決するための新技術の情報を各災害現場にて共有することが重要である。しかしながら、そのような情報をまとめたものはこれまでなく、情報の共有と新技術を活用することができていない。そこで当土木研究所では、まずカメラ映像方式の無人化施工（方式詳細は 2 章参照）を対象として、災害現場にてそれらの情報を参照することが可能なカタログの作成を試みた。以下その概略を説明する。

まず、無人化施工を用いた災害復旧現場における課題点を把握するために、2016 年と 2017 年に災害復旧対応を担当した発注者、施工者等に対しアンケートを実施し、現場にて発生した課題点を収集・整理し、その結果を 3 章にまとめた。このアンケート結果は、現在課題に直面している担当者が、今後無人化施工を行う担当者へ伝えたい事項も多く含まれている。そこで整理する前の生の声もできる限り記載することとした。

次に、各種新技術を研究開発する際に必要となる基礎的研究結果について 4 章にまとめ、3 章でまとめた課題点に対する対策として開発された各種新技術について、5 章にまとめた。これらの新技術は土木研究所で検証されたものだけでなく、各企業等で開発されたものも含まれている。ここで、災害現場はすべて同様な条件下ではなく、またどのような災害が発生するかも事前に予想することは困難であるため、これら新技術がすべての現場における課題を解決できるものではない（この新技術があればどんな災害現場でも大丈夫、というものは存在しない）。そこで、カタログのように各種新技術を一覧的に参照できる構成とし、各技術の特徴（短所も含む）などについて記載することとした。各災害現場にて本カタログを参照することにより、安全・効率的な無人化施工の実施が可能であると考えている。

2. 無人化施工の概要

東日本大震災や熊本地震、大型台風など、我が国はこれまで多くの災害に見舞われており、甚大な被害が発生している。災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧のためには、道路啓開などを迅速に行うことが重要であるが、これらは二次災害の危険性が高く、安全性に配慮しつつ迅速に高効率で施工を行うことは困難な場合が多い。この課題に対する一つの解決策として、遠隔操作が可能な建設機械を用い、オペレータは安全な場所から操作を行う施工方法が考えられる（図-2.1-1）。この遠隔操作型建設機械を用いる施工は「無人化施工」と呼ばれ、1993年度に雲仙普賢岳噴火後の土石流対策として実施された除石工事を契機に発展し、実用的な工法として活用されている^{1)~9)}。遠隔操作型建設機械は海外にも存在するが、いずれも小規模なものであり、それらを用いた大規模な土木施工を行っている事例は海外にはない。無人化施工は日本で生まれた独自の技術であるといえる。



図-2.1-1 無人化施工概略

無人化施工には大きく分けて「直接目視方式」と「カメラ映像方式」の2種類がある。「直接目視方式」はオペレータが遠隔操作する建設機械を直接自分の眼で確認、操作する方法であり、最低でも遠隔操作型建設機械さえあれば施工を開始できるが、直接目視のためオペレータと建設機械の距離が遠いと操作することができず、50m程度が限界である。一方「カメラ映像方式」は、オペレータが直接建設機械を目視することなく、建設機械に搭載したカメラや施工現場を俯瞰で見る位置に設置したカメラ（外部カメラ）などの映像を見ながら操作する方法である。この方法ならば、オペレータと建設機械の距離は操作信号と映像信号の伝達が可能な限り延ばすことが可能となり、理論上は海外からでも操作は可能となる。しかし、遠隔操作型建設機械のみではなく、建設機械搭載および外部映像用の各カメラ、外部カメラを設置するためのカメラ台車あるいはポール・三脚等、映像をオペレータに表示するモニタ類、操作信号や映像信号を伝達する通信設備、オペレータおよび各種機器類を格納できる運転建屋など、通常の土木施工では

使用しない様々な機器，設備が必要となる（表-2.1-1，表-2.1-2）。

表-2.1-1 直接目視方式とカメラ映像方式

直接目視方式	カメラ映像方式
 <p>操作する建設機械および周辺環境を直接見て操作する</p>	 <p>操作する建設機械に搭載したカメラ，およびカメラ台車などに搭載したカメラの映像を見て操作する</p>
<p>距離：～50m 程度</p>	<p>距離：操作信号，映像信号が伝達できる範囲</p>
<p>必要な機材：</p> <ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作型建設機械 	<p>必要な機材</p> <ul style="list-style-type: none"> 遠隔操作型建設機械 カメラ（車載用，外部用） 外部カメラ設置部（カメラ台車など） オペレータに映像を表示するディスプレイ類 運転建屋（オペレータおよび上記機器類を格納） 操作信号，映像信号を伝達する通信機器

表-2.1-2 カメラ映像方式必要資材詳細

カメラ映像方式必要資材	備考
遠隔操作型建設機械	<p>ラジコン建設機械のこと。建設機械メーカーが特殊オプションで販売しているほか、保有しているレンタル業者も有る。台数は非常に少ないため、いざという時に入手が困難。運転席に後付けすることで遠隔操作型に改造できる機器もある (5.3.2 参照)</p>
カメラ	<p>車載カメラ（運転席に設置し、運転席からの映像を撮影する）と、外部カメラ（施工現場を俯瞰する映像を撮影する）の 2 種類が必要。高精細程よいが、通信容量との兼ね合いが重要。車載カメラ映像は、走行する場合は クローラ先端が画像に入っている方がよい (4.5 節参照)。また外部カメラは複数台ある方が便利。</p> 
外部カメラ設置部	<p>外部カメラを施工現場に設置する機器。三脚などでもよいが、施工現場は日々変化し、必要な映像アングルも変化するため、移動できるカメラ用台車を用いることが一般的。災害現場ではこのカメラ台車も遠隔操作が必要となる。遠隔操作油圧ショベルに取り付ける例もある。</p> 
ディスプレイ類	<p>カメラ映像をオペレータに表示するために必要。大きく高精細がよいが、大きすぎるとオペレータの視線移動が大きくなる。23 インチ程度が一般的。</p>
運転建屋	<p>ディスプレイは太陽光によって見えづらくなる、機器・オペレータ風雨からの保護、などから必要。</p>
通信機器	<p>遠隔操作信号とカメラ映像を伝えるために必要となる</p>

3. 無人化施工の課題

3.1. 問題点ヒアリング

無人化施工の課題点を把握するために、実際に無人化施工に携わった関係者を対象に問題点ヒアリングを行った¹⁰⁾¹¹⁾。ヒアリングは、熊本地震、九州豪雨災害などにおいて、無人化施工や UAV 測量などの災害対応を担当した発注者、測量会社、施工会社などに協力をいただき実施した。回答にあたり、これまでの経験から得たすべての災害においての問題点（困ったこと）を自由に記載するよう依頼をした。なお、ここで対象はカメラ映像方式の無人化施工としている。

ヒアリングの結果、発注者および民間企業 5 社から延べ 150 件以上の問題点を収集できた。これらヒアリングの生の声は、課題に直面した技術者たちが後進へ伝えたい事項も多く含まれていると考え、本節では簡単な重複削除および分類を行ったうえで可能な限り記載することとし、次節で整理を行うものとする。

① 施工者の経験不足に関する問題

- ・ 無人化施工の経験が浅い施工者が受注する場合もある。その場合は現場が混乱した。
- ・ 無人化施工の経験がある施工業者を探すのが困難であった。

② 人員の手配に関する問題

- ・ 無人化施工現場経験がある人員の確保が難しかった。昼夜兼行、休日無の現場が多いためさらに困難であった。
- ・ 被災地の写真判読ができる人員の確保が難しい。仕事量が多いためさらに困難であった。
- ・ 無人化施工には効率的な施工計画が必要であり、無人化施工全体のマネジメントする者が必要となるが、人材が不足している。無人化施工に詳しいマネージャがいなかったため、迅速に無人化施工を開始できなかった。
- ・ オペレータが交代する度に、遠隔操作説明をする必要があり、効率が悪かった。
- ・ 地域の業者およびオペレータに無人化施工の知識がなく、無人化施工開始に時間がかかった。操作教育や機械調達を常時から行う必要がある

③ 機器の手配に関する問題

- ・ 遠隔操作型油圧ショベルの調達が困難であった(全国的に台数が少ない)。
- ・ 災害地であるため燃料の調達が困難であった
- ・ 現地で機器が故障した時に、修理に時間を要した。(修理業者、部品等の手配が難しい)
- ・ 一般的な災害対応では、1.0m³以上の油圧ショベルを要求されるが、調達するのに時間がかかった。

- ・ 無線 LAN の調達が困難であった。
- ④ 輸送・移動に関する問題
- ・ 道路および交通機関が寸断されているため、大型重機では現場までたどり着けなかった。小型の遠隔操作型重機があれば早期に作業開始できるのではないか。
 - ・ 元地形がわからず、搬入計画作成に時間を要した。
 - ・ 重機輸送用大型トレーラの調達（運転手含む）が困難であった。
 - ・ 高速道、一般道の通行許可申請に時間を要した。
- ⑤ 作業設備に関する問題
- ・ 運転操作室がないと搭乗運転と比較して、オペレータの作業環境が悪くなる。運転操作室は必要であるが、設営に時間がかかった。
 - ・ 運転操作室がないと日光などによりモニタが見えない。最低でもテント等の操作環境が必要。操作室がよい。
 - ・ 現場が進むにつれ掘削箇所が遠距離になるため、直接目視からカメラによる遠隔操縦への切替が必要となる。その切替をスムーズに行えることが重要である。
 - ・ カメラ車が無いと施工が開始できない。無理に行うと重機近傍での直接目視運転になり、オペレータに重機接触の危険がある。
- ⑥ 労務・安全に関する問題
- ・ 作業員の宿泊地、食事場所、休憩場所などの確保が困難であった。
 - ・ 昼夜兼行、休日無のため、作業員の健康・安全に問題があった。
 - ・ 昼夜兼行、休日無のため、機器の保守に問題があった。
 - ・ 2次災害等に遭遇する危険があった。
- ⑦ 無線通信に関する問題
- ・ 消防、警察、報道など多数の有人ヘリが無秩序に存在。衝突の危険があり、UAV の飛行が困難であった。
 - ・ 消防、警察、報道、無人化施工など複数の電波が混在しており、UAV の飛行や無人化施工に影響がでる危険があった
 - ・ 遠隔操作ショベル、他業者が設置した監視カメラ、センサ類、ドローン等の無線周波数が不明で混信した。
 - ・ 複数台投入すると映像にノイズが入りやすかった。
- ⑧ 機械の多様性に関する問題
- ・ 巨石や流木の除去、土のう設置作業等が多く、バケットタイプの油圧ショベルでは役に立たなかった。バケットのみではなく、ブレーカやグラップルなどに対応した遠隔操作油圧ショベルが必要である。
 - ・ 遠隔操作ショベル 2 台での巨石、立木除去作業は効率が悪かった。運搬に

は遠隔クローラダンプが必要である。

- ・ 通常はゴム履帯であるが、現場ではゴムを外さないと滑ってしまい危険であった。取り外しが容易な構造であるとよい。
- ・ 災害現場であるため不安定な急こう配地盤での作業が必要であったが、通常の遠隔操作機械では非常に苦勞した。そのような環境に適した機械が必要である。
- ・ 災害現場であるため軟弱地盤での作業が必要であったが、通常の遠隔操作機械では非常に苦勞した。そのような環境に適した機械が必要である。

⑨ 施工効率に関する問題

- ・ 搭乗作業に比べて作業効率が低下した。効率を向上させることが必要である。
- ・ 少しでも操作しやすい、あるいは効率的な稼働のための機械としての工夫が必要である。
- ・ 周辺災害現場状況をオペレータが把握できると作業が効率化されると思う。そのような技術が必要である。

⑩ 全体的な指揮系統に関する問題

- ・ 全体的な指揮系統、責任の所在などが明確になっていなかった（指示、命令が多方面からあり、現場が混乱）。
- ・ 機材、人員をどこほどのくらい派遣するかがなかなか決まらず、長い待機時間が発生した。
- ・ 効率的な機材の配置ができなかった。
- ・ 出動要請が多く殺到したが、優先順位を決定する基準が明らかでなかった。

⑪ その他に関する問題

- ・ 災害直後に、道路啓開や河道の確保など早急な対応が求められる場合の出動が増えてきていると感じている。
- ・ 石油協同組合との大規模災害協定を結んでいたため、比較的スムーズに燃料供給できた。

3.2. 課題点まとめ

前節のヒアリングより収集した問題点より，無人化施工の課題として以下 3.2.1 から 3.2.5 の 5 つが挙げられる．これらの課題点を解決するための研究・開発を行うことが，無人化施工を，迅速・安全・効率的に展開するために重要である¹²⁾．5 章では，これら課題点を解決するために研究・開発された技術などについて紹介する．

3.2.1. 施工効率の改善

前節の問題点⑨に対応する．

無人化施工の施工効率は通常施工に比べ低下することが知られている．一般的には 50%から 60%程度と言われており，土木研究所における検証実験では約 45%となっている¹³⁾．無人化施工を効率的に活用するためには，また無人化施工を災害時のみではなく通常施工時にも活用するためには，無人化施工の施工効率を改善することが必要である．

3.2.2. 無人化施工セットアップ迅速化

前節の問題点⑤に対応する．

無人化施工では，建設機械に搭載するカメラ，施工現場を俯瞰で撮影する外部カメラ（カメラ台車），それらを表示するモニタ，無線通信システムなど通常の施工では使用しない様々な機器が必要である．そしてそれら機器の保全と操作するオペレータの安全などから，運転操作室を安全地域に構築し，その中で機器類をセットアップすることが無人化施工開始前に必要である．しかし，災害は周辺の交通環境悪化を引き起こす場合が多く，人員・機材・資材の輸送困難により運転操作部屋および各機器類の構築・設置は困難な場合が多い．またカメラや無線通信などの機器類は，通常施工では使用しないためセットアップには時間を要する場合も多い．これらの課題点を解決し，無人化施工のセットアップを迅速化することが必要である．

3.2.3. 多様な遠隔操作型建設機械の開発

前節の問題点③④⑧に対応する．

災害はどのような場所でなにが発生するかは事前には予測できない．したがって無人化施工もどのような施工を行うかは事前には把握できず，大型のバケット型油圧ショベルがあればすべてうまくいくわけではない．また，遠隔操作型建設機械は台数が少なく，災害時に必要台数を調達することも困難である．そこで，様々な作業が可能な多様な遠隔操作型建設機械の開発を行い，全国で調達を容易にすることが必要である．

3.2.4. 災害時ルール策定の策定

前節の問題点③④⑦⑩に対応する．

災害時は現場が混乱することが多い．その中で施工がスムーズに行えるよう，災害時のルールを平常時から決めておくことが重要である．特に，燃料や補修手段の

確保、高速道や一般道の通行許可申請の簡素化、土木工事、警察、消防、報道など省庁をまたがる機関の連携（無線通信のルールも含む）などを予め決めておくことが必要である。

3.2.5. 無人化施工技術の伝承

前節の問題点①②③⑥に対応する。

無人化施工は特殊な施工方法であり、運転者や現場管理者は通常の施工方法に長けているだけではなく、無人化施工にも十分精通している必要がある。しかしながら、前述のように無人化施工実績は1993年以降で200件程度であり、精通している運転者、管理者共に非常に少ないのが現状である。また、遠隔操作型建設機械においても、通常型に比べ価格が高いことや、災害対応であるため企業のビジネスになりにくい（災害がいつ発生するかわからないため、ビジネス計画が立て難い）ことなどから、同様に台数が非常に少ない。したがって災害が発生した場合、十分な人員と機器類を確保することが非常に難しく、人員の過重労働や工期遅延などが発生している。今後無人化施工を効率的に活用するためには、上記の点を改善することが必要である。

4. 無人化施工技術に関する基礎的研究

本章では，無人化施工の関する様々な研究開発を行う際に必要となる基礎的研究結果について述べる．具体的には下記の項目である．

4.1. モデルタスクの開発

開発した新技術を定量評価するための試験用モデルタスクの開発

4.2. 現状の無人化施工における施工効率の確認

カメラ映像方式無人化施工における施工効率の定量把握

4.3. 施工効率低下原因の把握

カメラ映像方式無人化施工における施工効率低下原因の検討

4.4. 無人化施工オペレータのカメラ映像活用特性

カメラ映像方式無人化施工における，オペレータがカメラ映像をどのように活用しているかの検討

4.5. 建設機械操作時にオペレータが必要としている情報について

油圧ショベルオペレータの操作時視線解析を行うことによる，操作時にオペレータが必要としている情報の検討

4.6. 建設機械の走破性能

無人化施工時に特に問題となる，建設機械走破性能低下に関する検討

4.1. モデルタスクの開発

4.1.1. 開発の目的

無人化施工の課題を解決するための様々な研究開発を行う場合、その研究開発した技術の効果を実際の無人化施工において検証する必要がある。その検証は実際の無人化施工機械を用い、かつ定量的に効果を測定できるものでなくてはならない。しかしながら、実際の建設機械を用いる実験は様々な困難があり¹⁴⁾、そのような検証をおこなうことは容易ではない。

そこで、(国研)土木研究所では、実際の無人化施工機械を用い繰り返し実験が可能なモデルタスクの提案を行った¹⁵⁾。本節ではその概要について述べる。

4.1.2. モデルタスクに必要な要件

建設機械による作業についてモデルタスクを設定する場合、それによる実験の効果と効率を考えると、以下の4つの条件が要求される。

1) 作業の標準性

実際の現場において多くなされる作業にできる限り一致していること。

2) 現実性

作業内容が現場でおこなわれるものから乖離しないこと。また、作業の環境が現場の状況に近いこと。作業内容及び環境条件について、できる限り多くの現場の要素を含み、現場にない作業要素が入り込まないこと。

3) 再現性

同条件での作業が繰り返し実施できること。

4) 容易性


実験に際して準備が簡単であり、1回の作業を要する時間が短く、複数回の作業比較が容易にできること。

本章で提案するモデルタスクは上記4条件を満足することが必要であるが、特に2)現実性と3)再現性は相反することであり、同時に満足することは難しい。すなわち再現性を重視して、各作業要素について全く同じ作業条件での繰り返しを行うことは、実作業に必然的に含まれる各種の外乱を取り除いてしまうことになり、現実的な評価ができなくなる。これらの再現性と現実性を両立させるモデルタスクを提案することが重要である。

4.1.3. 油圧ショベル作業におけるモデルタスクの提案

以上の検討に基づいて、油圧ショベルによる標準的な作業として、主に実現場での掘削積込み作業を想定したモデルタスクのフローを①油圧ショベルが待機場所から作業対象の前まで走行し、②上部旋回体を旋回して対象物に正対し、③アーム・ブーム・バケットを操作して対象物を掴み、④旋回して所定の位置に設置し、⑤再び走行して待機場所に戻る、のように設定した(③④は複数回おこなってもよい)。このモデルは、労働安全衛生法に基づく運転技能講習時に操作訓練するタスクに類

表-4.1-1 固形対象物

	ドラム缶	土嚢	鋼製立方体
			
質量	約 100kg	約 300kg	約 500kg
持ち手高さ	2000mm	2000mm	2000mm
持ち手幅	1200mm	1200mm	1200mm

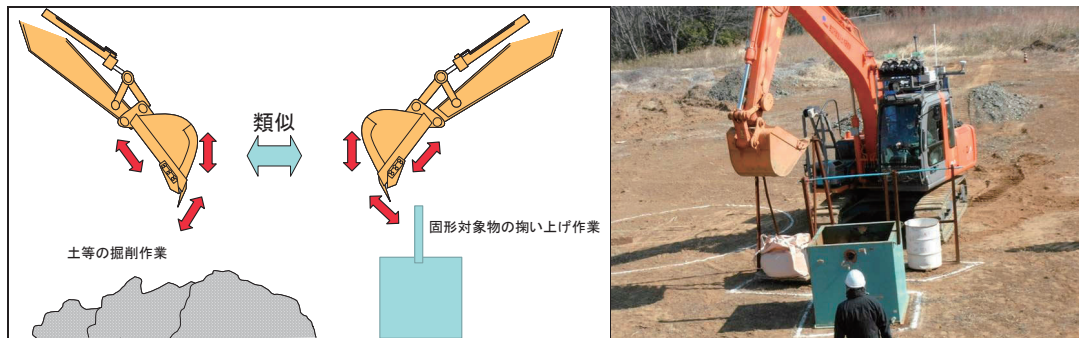


図-4.1-1 固形対象物把持動作

似した動作であり、1)標準性、2)現実性を満足していると考えている。

また、本モデルタスクで掴む対象物は、表-4.1-1 に示す人口の固形対象物とした。本対象物は持ち手として水平に取り付けられた鋼製バーを有し、掘削に類似した油圧ショベルバケットの軌跡にて持ち上げることができる（図-4.1-1）。本対象物を用いることで、2)現実性、3)再現性、4)容易性を満足するようにした。

さらに、このモデルタスクでは油圧ショベルの走行経路は厳格に固定せず、走行後の油圧ショベルの位置は毎回適当にバラツクこととした。それによって、バケット操作に対する環境に適当な変動外乱が与えられることとなり、2)現実性と 3)再現性を満足するものとした。

以上の検討の下に、本モデルタスクでは油圧ショベルの大きな移動を含む一連の作業（モデルタスクⅠ）と、移動には注目せず実験の効率性を重視した作業（モデルタスクⅡ）を設定した。

[1] モデルタスクⅠ：油圧ショベルの不整地走行と複数の固形対象物の移設

油圧ショベルは、まず待機位置より固形対象物が設置されている作業エリアまで走行する。経路途中には図-4.1-3 に示す走行時障害物が接地されており、

油圧ショベルはこの障害物を乗り越えることになっている。

作業エリアに到着後、固形対象物を1つずつ持ち上げ、移設先としてマークされたサークル内へ移設する。全ての固形対象物の移設が完了後、一旦バケットを固形対象物の持ち手から離し、再び各々の固形対象物を初期位置として示された枠内に移設する。

作業終了後油圧ショベルは元の待機場所へ戻り、モデルタスク I が完了する。

[2] モデルタスク II：油圧ショベルの走行と1個の固形対象物の移設

油圧ショベルは、まず待機位置より固形対象物が設置されている作業エリアまで走行する。経路途中には曲線部が設けられている。

作業エリアにはドラム缶のみが設置されており、作業エリアに到着後、ドラム缶を持ち上げ、移設先としてマークされたサークル内へ移設する。移設が完了後、一旦バケットをドラム缶の持ち手から離し、再びドラム缶を初期位置として示された枠内に移設する。

作業終了後油圧ショベルは元の待機場所へ戻り、モデルタスク II が完了する。

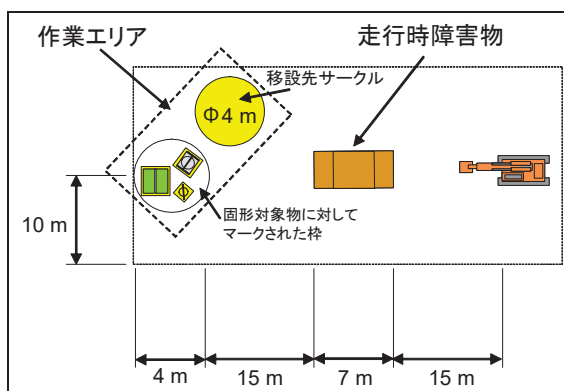


図-4.1-2 モデルタスク I フィールド

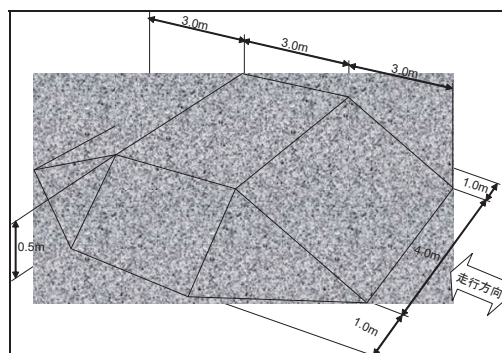


図-4.1-3 モデルタスク I 走行時障害物

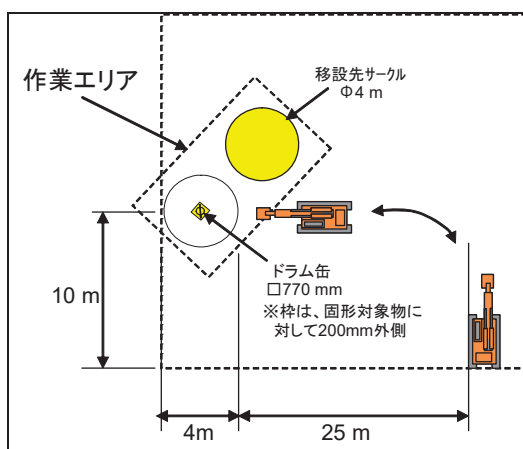


図-4.1-2 モデルタスク II フィールド

4.2. 現状の無人化施工における施工効率の確認

無人化施工を行う際に、通常の搭乗操作に比べてどの程度の施工効率であるかを把握しておくことは重要である。そこで前節のモデルタスクを用い、無人化施工を用いたときの施工効率を、定量的に検証した¹⁶⁾。本節ではその概要について述べる。

4.2.1. 実験概要

実験は前節で開発したモデルタスクⅡを活用し、搭乗操作、直接目視方式遠隔操作、カメラ映像方式遠隔操作にての各モデルタスク完了時間（サイクルタイム）を比較した。オペレータは日常的に建設機械操作を行っているが無人化施工は行ったことがないオペレータとし、搭乗操作およびカメラ映像方式遠隔操作は15名、直接目視方式遠隔操作は10名とし、それぞれ10回ずつモデルタスクⅡを実施した。直接目視方式は、地上からと死角が少ない高所からの2通りとした。またカメラ映像方式の映像は、図-4.2-1に示すように、車載カメラ1台と外部カメラ2台の映像とし、外部カメラの位置は図-4.2-2に示す位置とした。



図-4.2-1 カメラ映像方式遠隔操作

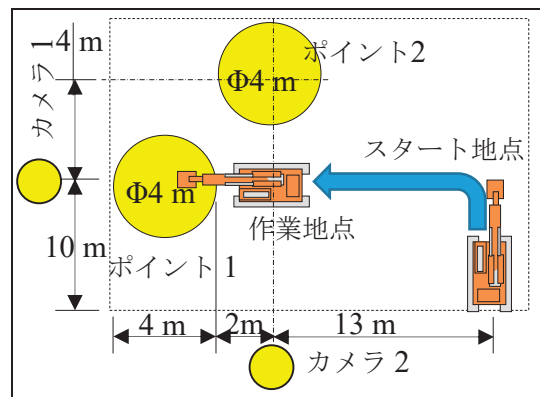


図-4.2-2 モデルタスクⅡ実施状況

4.2.2. 結果と施工効率の推定

各オペレータの本番サイクルタイムを平均すると、カメラ映像方式遠隔操作の施工効率は通常施工の約45%程度であった。

カメラ映像方式の無人化施工については、土木研究所における同様の実験¹⁷⁾¹⁸⁾でも、同等な結果となっており、本実験条件における無人化施工の施工効率は約45%程度であると推測できる。

また一方、一般的（実際の無人化施工現場での言い伝えなど）でもカメラ映像方式無人化施工の施工効率は約50%程度と言われており、上記の結果はほぼ妥当であると言える。

4.3. 施工効率低下原因の把握

前節で無人化施工における施工効率，特に災害現場で多く用いられているカメラ映像方式の施工効率が通常施工に比べより低いことがわかった。無人化施工の普及を促進するためには，その施工効率を改善することが必要であり，そのためには施工効率低下原因を明確にすることが重要である。そこで，カメラ映像方式遠隔操作において施工効率が低下する原因を調査した¹⁹⁾。本節ではその概要について述べる。

4.3.1. 実験概要

搭乗操作と図-4.3-1 に示すようなカメラ映像方式遠隔操作との相違点は大きく分けて下記の3点となる。



図-4.3-1 カメラ映像方式遠隔操作

- 1) 周辺状況把握のための視覚情報の相違
 搭乗操作時：建設機械運転席からの直接目視にて周辺状況を把握する
 遠隔操作時：車載カメラ映像および外部カメラ映像をモニタを通して見ることによって周辺状況を把握する
- 2) 操作インターフェース（以下操作IF）の相違
 搭乗操作時：建設機械運転席に設置されている操作レバーにて操作する
 遠隔操作時：遠隔操作用ジョイスティックコントローラ（JS）にて操作する
- 3) 体感情報の相違
 搭乗操作時：機体の傾き，振動，エンジン音などを体感できる
 遠隔操作時：上記情報を得ることができない

表-4.3-1 実験時操作環境条件

実験条件	① 搭乗	② 搭乗+HMD	③ 操作室+HMD+運転席型	④ 操作室+ディスプレイ+運転席型	⑤ 操作室+ディスプレイ+JS	
操作IF	運転席レバー	運転席レバー	運転席レバー	運転席レバー	JS	
視覚情報	運転席から直接目視	カメラ映像 (HMD)	カメラ映像 (HMD)	カメラ映像 (ディスプレイ)	カメラ映像 (ディスプレイ)	
体感情報	有	有	無	無	無	
	↑ 視覚情報の相違		↑ 体感情報の相違		↑ 画像表示の相違 (HMD or ディスプレイ)	
			↑ 操作IFの相違			

そこで実験では、搭乗操作環境から遠隔操作環境へ向けて、表-4.3-1 に示すように上記の相違点を一つずつ変化させていき、各条件でモデルタスクⅡを行いそのサイクルタイムを比較することで施工効率低下原因の把握を行った。なお、実験環境を一つずつ変化させることを実現するために、実験では図-4.3-1 の3つのディスプレイを同等の大きさ、位置に見えるように設定したHMD（Head Mounted Display：図-4.3-2）と、運転席型遠隔コントローラ（図-4.3-3）を使用した。

オペレータは、日常的に油圧ショベルの運転を行っているが無人化施工の経験はない4名とし、各条件においてモデルタスクⅡを練習2回、本番5回の計7回を行い、本番のサイクルタイムを計測した。

4.3.2. 結果と施工効率の推定

実験結果から、モデルタスクのような油圧ショベルによる掘削作業では、以下の点が推測できた。

- (1) 無人化施工時の施工効率低下の大きな要因は「周辺状況把握のための視覚情報の相違」「操作IFの相違」の2つであり、この2つでは「周辺状況把握のための視覚情報の相違」の方が施工効率への影響が若干大きいと考えられる。
- (2) 「体感情報の相違」「画像表示の相違」は施工効率低下の大きな要因ではない。

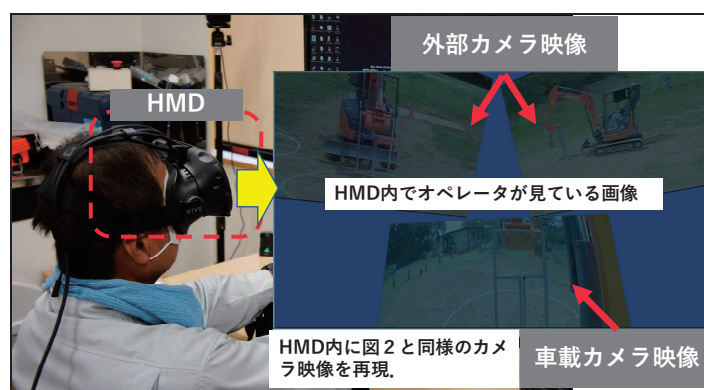


図-4.3-2 HMD システム

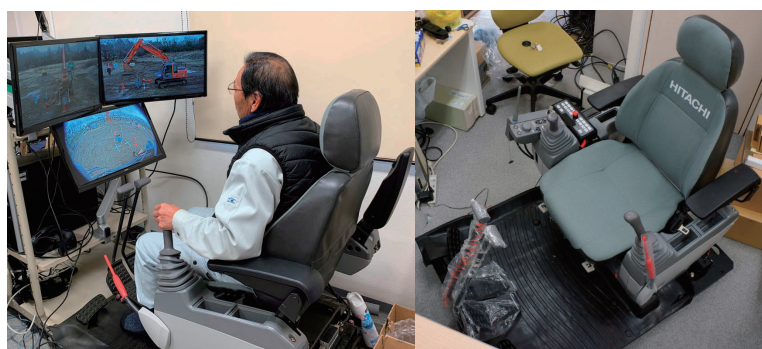


図-4.3-3 運転席型遠隔コントローラ

4.4. 無人化施工オペレータのカメラ映像活用特性

前節で無人化施工時の施工効率低下の大きな要因は「周辺状況把握のための視覚情報の相違」「操作IFの相違」の2つであり、特に視覚情報の影響の方が若干大きいことが判明した。また、先行研究²⁰⁾により、遠隔操作時作業時間は搭乗操作時に比べオペレータによってばらつきが大きいこと、すなわち遠隔操作が得意なオペレータと不得意なオペレータが存在することが明らかになっている。そこで、カメラ映像方式遠隔操作において無人化施工が得意なオペレータと不得意なオペレータのカメラ映像の活用方法に相違があるかを調査した²¹⁾。本節ではその概要について述べる。

4.4.1. 実験概要

日常的に油圧ショベルを運転しているが、遠隔操作は行った経験が無いオペレータ10名にて、カメラ映像方式遠隔操作でのモデルタスクⅡを練習4回、本番5回行い、本番のサイクルタイムを計測した。また実験中にオペレータにはアイマークカメラを装着してもらい、視線計測も行った。

4.4.2. 実験結果と視線特性の推測

まず、サイクルタイム結果から、オペレータ10名の内、遠隔操作が得意なオペレータと不得意なオペレータをそれぞれ2名ずつ選抜した。

そしてその4名の視線解析から、図-4.4-1に示す3つのカメラ映像の視線停留時間をそれぞれ算出し、実験5回における視線停留時間割合の平均をまとめた。その結果を図-4.4-2, 4.4-3, 4.4-4に示す。

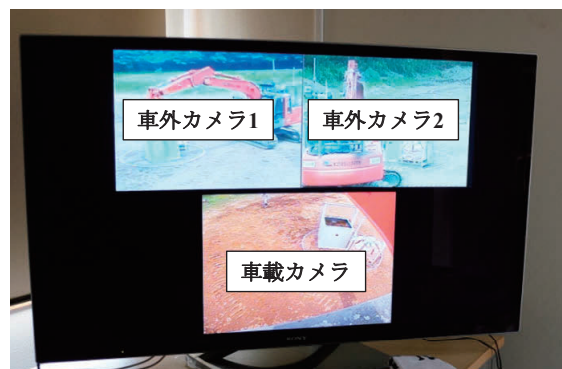


図-4.4-1 カメラ映像

図-4.4-2, 4.4-3, 4.4-4によると、走行、運搬にかかわらず、不得意オペレータの方が得意オペレータに比べ車載カメラ映像を見ている時間割合が大きいことがわかる。これは、不得意オペレータは操縦するときに必要な車体周辺状況の把握を車載カメラ映像に頼る割合が大きいものに対して、得意オペレータは車載カメラ映像のみではなく車外カメラ映像も含めた複数の映像から情報を得ていると考えられる。十分な車体周辺情報を得るためには、車載カメラ映像のみではなく社外カメラ映像も利用する必要があるが、不得意オペレータは見慣れない映像である社外カメラ映像を有効に使用できないのではないかと考えられる。

また、走行時と運搬時を比較すると、すべてのオペレータにて走行時は運搬時に比べ社外カメラ映像を見ている時間割合が少ない。これは、走行時は車体周辺状況を確認する事がカーブ時など限られた場面ではしか必要ないため、直線走行時などは

どの映像を見ていてもよく、直感的に見慣れている風景である車載カメラ映像を見ているのではないかと考えられる。

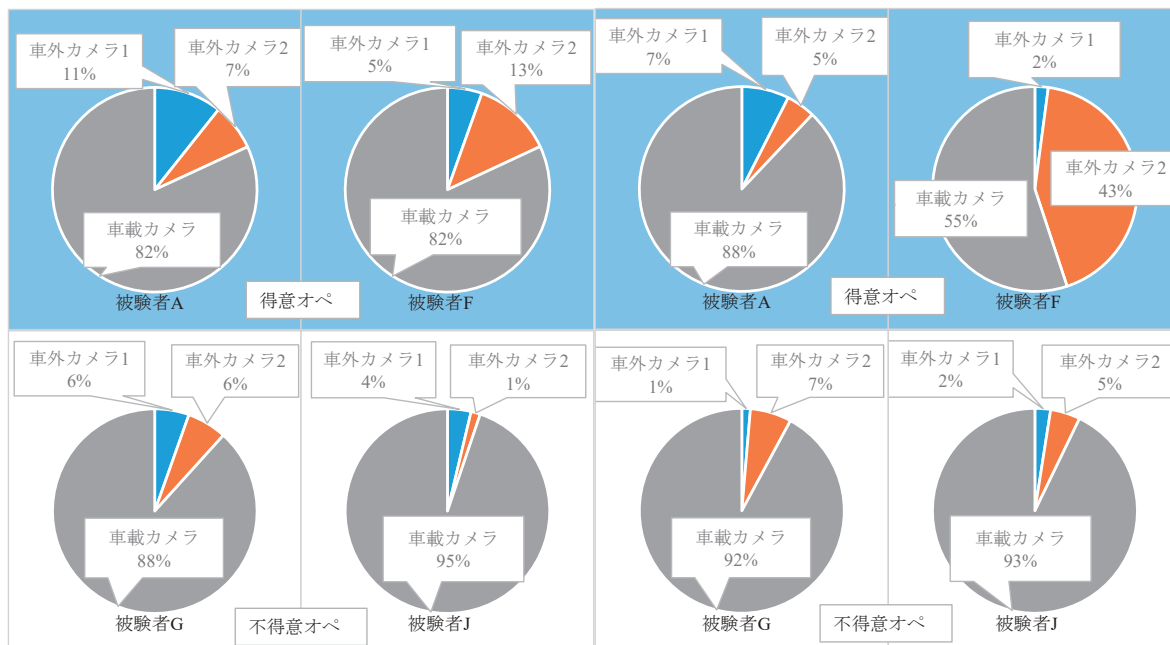


図-4.4-2 視線停留時間割合（往路走行）

図-4.4-3 視線停留時間割合（復路走行）

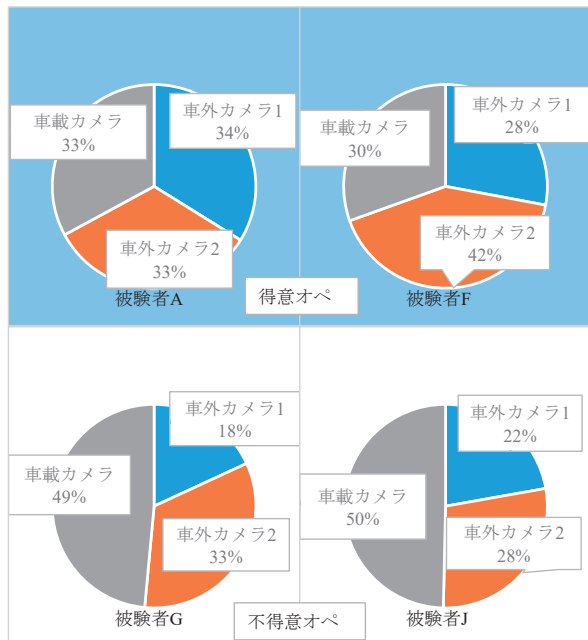


図-4.4-4 視線停留時間割合（作業）

4.5. 建設機械操作時にオペレータが必要としている情報について

4.3.節で無人化施工時の施工効率低下の大きな要因は「周辺状況把握のための視覚情報の相違」「操作IFの相違」の2つであり、特に視覚情報の影響の方が若干大きいことが判明した。そこで、視覚情報としてオペレータがどのような情報を必要としているかを調査するため、通常搭乗操作で油圧ショベルを操作したときの視線解析を行った²²⁾。本節ではその概要について述べる。

4.5.1. 実験概要

経験年数15年のオペレーター一人に油圧ショベルを用いて、のり面造成、障害物除去、掘削などの作業と、狭隘部走行、坂道登坂などの走行をしてもらい、その時の視線をアイマークカメラを用いて記録した。

4.5.2. 実験結果と必要情報の推測

作業の代表として掘削時の視線解析結果を図-4.5-1に、走行の代表として狭隘部走行時の視線解析結果を図-4.5-2に示す。

図-4.5-1, 4.5-2より、以下の点が判明した。

- ① クローラで移動している「走行」と、停止してアーム等の部位を動作させている「作業」では、視線特性が異なる。
- ② 「作業」での主な注視対象物は、「バケット」「ハンドリング中の土」「掘削地点」であり、視線はフロントガラス内右寄りに集中する傾向がある。
- ③ 「走行」の主な注視対象物は「前方地表面」「バケット」「クローラ先端」であり、視線はフロントガラス内に比較的均一に分布する傾向がある。

以上より、無人化施工時にオペレータが必要な視覚情報が推測される。車載カメラ、外部カメラ映像はこれらの情報が得られるよう設置する必要がある。

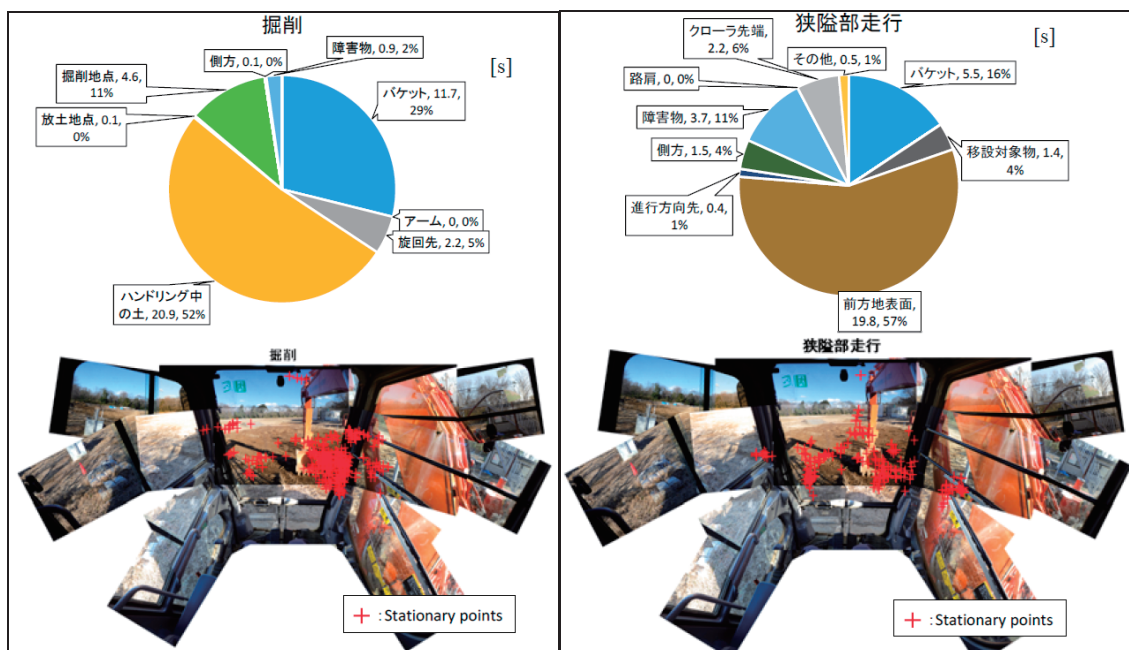


図-4.5-1 視線停留時間割合（掘削時）

図-4.5-2 視線停留時間割合（狭隘部走行時）

4.6. 無人化施工建設機械の走破性能

建設機械がぬかるみ等で走行不能状態（以下「スタック」と呼ぶ）に陥る事は、施工時における重大な事故であり、可能な限り防がなくてはならない。特に無人化施工において、建設機械が危険地域内でスタックした場合、その救出作業は極めて困難である。無人化施工機械のスタックは絶対に避けなければならないシビアアクシデントであるといえる。本節では建設機械のスタック防止における注意すべき事項と、危険性の判定手法について述べる。

4.6.1. スタックを防止するために注意すべき事項

一般的にスタックは、車両の推進力（牽引力）が推進抵抗を下回ったときに発生する。すなわち、スタックを防止するためには建設機械の牽引力と推進抵抗について検討すればよいことになる。

そこで、まず履帯を装着した建設機械における牽引力の変化を、実験にて測定した²³⁾。実験は建設機械にロープを付け、その他端を固定し、ロープを引っ張る形で走行トルク徐々に上昇させ、スリップするまでのロープにかかる張力を牽引力として測定した。以上の実験を陸上と水中で行った結果を図-4.6-1に示す²³⁾。

図-4.6-1より、スリップ発生後は牽引力が低下するため、スタックを防止するためにはスリップ直前の最大牽引力を発揮するよう注意をすればよいことがわかる。また、水中地盤では陸上地盤に比べ最大牽引力が低く、スリップ発生後の牽引力低下量も非常に大きい。そのため、地すべりや天然土砂ダムなどの水災害現場では、災害復旧作業を行う建設機械がスタックする危険性がより高いこともわかる。

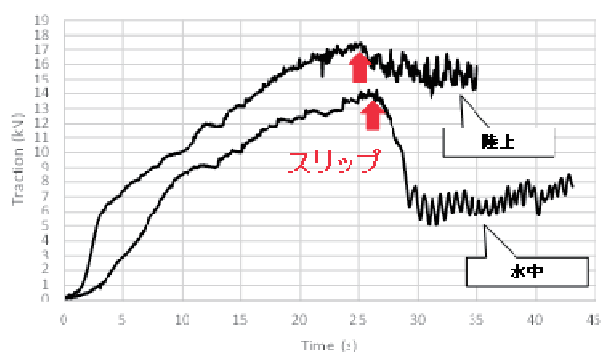


図-4.6-1 陸上地盤と水中地盤の車両牽引力の比較

一方 Bekker によると、建設機械の推進抵抗は排土抵抗 R_b と締固め抵抗 R_c が主とされており、排土抵抗 R_b は車両の沈下量 Z に、締固め抵抗 R_c は、沈下係数 k_c 、 k_ϕ および沈下指数 n といった建設機械の沈下量に起因する因子が影響している²⁴⁾。すなわちスタックを防止するためには建設機械の沈下量に注意をすればよいことがわかる。特に、極めて軟弱な地盤では車両沈下量が著しく増加し、車両の底面が地盤に接触することがある（図-4.6-2）。その場合、履帯にかかる荷重が減少し、結果的に牽引力が減少する²⁵⁾（図-4.6-3）。このことから、車両底面が地盤に接触してしまうことは極力避けなければならない。



図-4.6-2 車両底面が地盤に接触した状況

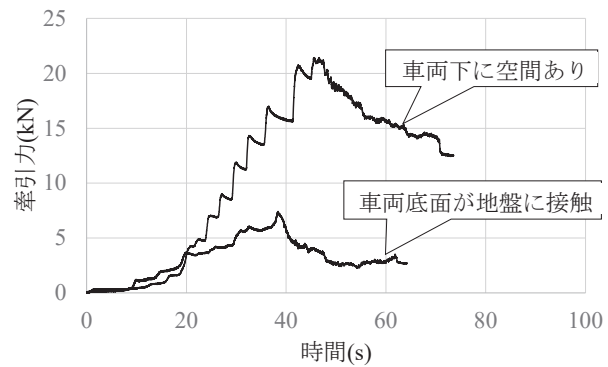


図-4.6-3 車両底面の地盤接地有無の牽引力の比較

4.6.2. スタック危険性の判定手法

上記の検討で、スタックの危険性を判定するためには、建設機械のスリップ直前の最大牽引力と沈下量を定量的に把握すればよいことがわかる。しかしながら両者を現場で定量的に推定できる手段はいまのところ存在しない。

現在一般的な車両走行性に関する判定手法として、コーペネトロメータを用いたコーン指数があり、建設機械の機種毎に走行可能な値が提示されている²⁶⁾(図-4.6-4、表-4.6-1)。また、コーン指数 200 前後で建設機械底面が地盤に接触する場合があることもわかっており²⁵⁾(図-4.6-5)，コーン指数による判定が可能である。

しかし、コーペネトロメータは災害現場で迅速に容易に計測するには難しい場合も多い。今後テラメカニクス分野の研究の進捗による、容易で精度の高いスタック判定手法の構築が求められている。



図-4.6-4 コーンペネトロメータによる測定

表-4.6-1 建設機械の走行に必要なコーン指数

種類	接地圧 (kN/m ²)	コーン指数 qc (kN/m ²)
超湿地ブルドーザ	15~23	200 以上
湿地ブルドーザ	22~43	300 以上
普通ブルドーザ (15t 級)	50~60	500 以上
普通ブルドーザ (21t 級)	60~100	700 以上
スクレープドーザ (超湿地型)	41~56 (27)	600 以上 (400 以上)
被けん引式スクレーパ (小型)	130~140	700 以上
自走式スクレーパ (小型)	400~450	1000 以上
ダンプトラック	350~550	1200 以上

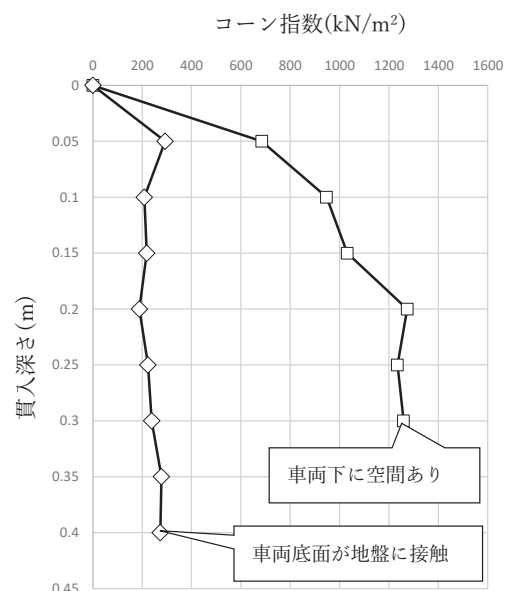


図-4.6-5 車両底面の地盤接地有無とコーン指数の関係 (小型バックホウ)

5. 無人化施工の課題に対する解決技術

本章では、3章にて把握したカメラ映像方式の無人化施工における課題点に対する対策として開発された各種新技術についてまとめた。ここで、災害現場はすべて同様な条件下ではなく、またどのような災害が発生するかも事前に予想することは困難であるため、これら新技術がすべての現場における課題を解決できるものではない（この新技術があればどんな災害現場でも大丈夫、というものは存在しない）。そこでカタログのように各種新技術を一覧的に参照できる構成とし、各技術の特徴（短所も含む）などについて記載した。

5.1. 施工効率向上技術

- 5.1.1. 運転席画像増加技術
- 5.1.2. VR映像技術
- 5.1.3. アラウンドビューシステム
- 5.1.4. 外部カメラ画像表示技術
- 5.1.5. オペレータ選抜手法
- 5.1.6. 運転席型遠隔操作装置
- 5.1.7. 様々なVR技術

表-5.1-1 施工効率向上技術一覧表 (詳細は次ページ以降参照)

	長所	短所	必要機器 (従来無人化施工に加えて)	省略できる機器・作業 (従来無人化施工から)	施工効率 (従来無人化施工に比べて)
5.1.1. 運転席画像増加技術	機体周辺環境の把握がより容易となる	カメラ, ディスプレイ, 通信容量が増加する.	追加カメラ, 追加ディスプレイ.	なし	0~12%程度改善
5.1.2. VR 映像技術	運転者の臨場感が増加する	VR 酔いが起こる. 通信容量が増加する.	ステレオ魚眼カメラ, 大容量通信機器.	外部カメラとその設置作業	0~10%程度改善
5.1.3. アラウンドビューシステム	機体周辺環境の把握がより容易となる	専用処理システムが必要. アラウンドビューのみでは作業できない	映像処理システム	外部カメラとその設置作業	同程度
5.1.4. 外部カメラ画像表示技術	外部カメラ映像の活用が促進される	専門カメラオペレータが必要 外部カメラ画像が小さくなる	映像処理システム	なし	同程度
5.1.5. オペレータ選抜手法	新たな機器等では不要で施工効率を大きく改善できる	事前に選抜作業が必要	なし	なし	27%程度改善
5.1.6. 運転席型遠隔操作装置	慣れた IF で操作ができる	運転席型遠隔操作装置が必要	運転席型遠隔操作装置	なし	15~30%程度改善
5.1.7. 様々な VR 技術	オペレータの臨場感が向上する	専用遠隔操作装置が必要	専用遠隔操作装置	不明	不明

5.1.1. 運転席画像増加技術

概要：

現在、遠隔操作時の車載カメラは1台であり、その映像は運転席から正面を水平約90°、垂直約60°程度の画角にて表示されているのが一般的である（図-5.1-1）。この映像は、人間の視野角に対し非常に狭いため、遠隔操作が搭乗操作に比べ施工効率が劣る原因の一つではないかと考えられる。

そこで、図-5.1-2、図-5.1-3 に示すように車載カメラを1台から4台に増やし、人間の視野角をカバーできる画像装置を開発した。



図-5.1-1 一般的な画像表示（車載カメラ1台）



図-5.1-2 搭載した車載カメラ4台

図-5.1-3 画像表示（車載カメラ4台）

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 運転席からの映像情報が増加し，機体周辺環境の把握がより容易となる．
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ カメラ，ディスプレイが増加する ・ 通信容量が増加する ・ 設置の仕方にもよるが，運転席に設置した場合，搭乗操作が不可能になる
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ カメラ（+3台），ディスプレイ（+3台） ・ 通信帯域が不足するならば，別個通信システム
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>モデルタスク（4.1節参照）にて施工効率を確認．従来無人化施工に比べ12%程度改善．</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 本開発による4画面は実績なし． ・ 上下2カメラを機体に設置し，ディスプレイ1台を用い，オペレータがフットスイッチで切り替えるシステムが，雲仙などで実績あり．
<p>関連論文，関連資料</p> <p>1) 茂木，橋本，梶田：操縦装置と画像システムによる油圧ショベル遠隔操作の作業効率改善，土木技術資料，Vol.58，No.9，pp18-21，2016．</p>

5.1.2. VR 映像技術

概要：

無人化施工オペレータの臨場感を向上させるため、建設機械運転席にステレオ魚眼カメラを設置し、その映像を平面処理し HMD の両眼にそれぞれ投影することで、あたかも運転席に座っているような立体視をオペレータに提供するものである。

また、本システムでは死角はあるが建設機械周辺状況をほぼ把握できるため、外部カメラの省略が可能となり、セットアップの効率化にも有効である。



図-5.1-4 VR システム



図-5.1-5 ヘッドマウントディスプレイ内の映像

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ オペレータの臨場感が増加し，あたかも運転席に着座している感覚が得られる． ・ 機体周辺環境の把握がより容易となる． ・ 外部カメラ設置が不要となる． ・ ヒアリングにて高評価を示すオペレータも多い（極端に低評価もある．VR酔いが原因）
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 通信容量が増加する ・ 本システムのみでは作業は困難．車載カメラが必要
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 専用の画像処理システム ・ 通信帯域が不足するならば，別個通信システム
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 外部カメラとその設置作業
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>モデルタスク（4.1節参照）にて施工効率を確認．従来無人化施工に比べ10%程度改善．</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 雲仙普賢岳における検証実験を実施 ・ 九州・四国技術事務所における災害訓練（無人化施工訓練）の教材として採用
<p>関連論文，関連資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 橋本，山内，新田：無人化施工の迅速展開に向けた頭部装着型ディスプレイの活用について，土木技術資料，Vol.61，No.12，pp24-27，2017. 2) 加藤，木下，西田，橋本，山田：HMDを用いた臨場型遠隔映像システムの開発その1. 基本性能検証，第74回土木学会年次学術講演会，pp.VI346-VI347，2019. 3) 木下，西田与志雄，加藤，石田，橋本：HMDを用いた臨場型遠隔映像システムの開発その1.作業効率の比較検証，第74回土木学会年次学術講演会，pp.VI348-VI349，2019. 4) 山内，橋本：無人化施工の迅速展開を目的としたHMD映像表示システムの提案，建設機械施工，Vol.72，No.7，pp78-81，2020.

5.1.3. アラウンドビューシステム

概要：

建設機械の周囲を囲むように複数のカメラを建設機械上に設置し、これらの映像を変換処理することによって建設機械を仮想的に上空から眺めたような画像を生成し、オペレータへ提示するものである。（自動車アラウンドビューシステムと同様）

また、本システムでは建設機械周辺状況をほぼ把握できるため、外部カメラの省略が可能となり、セットアップの効率化にも有効である。



図-5.1-6 アラウンドビューシステム

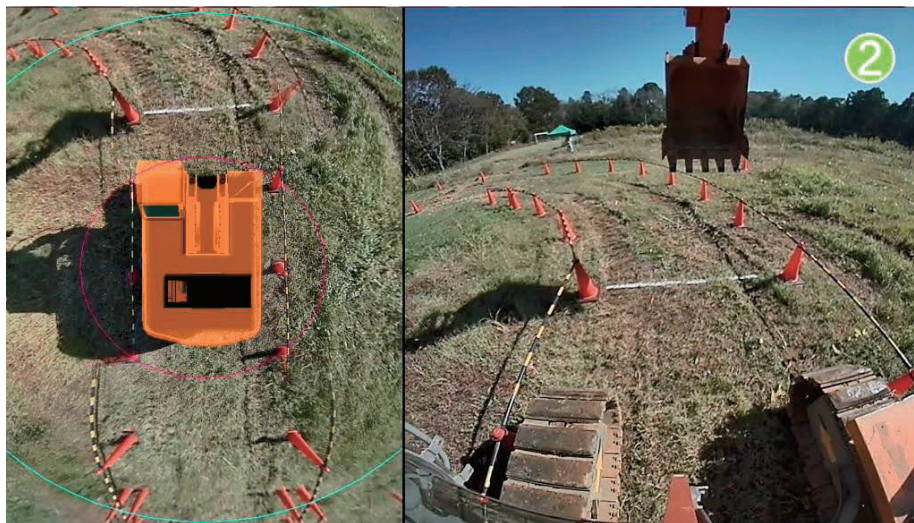


図-5.1-7 オペレータへの映像（車載カメラ映像も併せて表示する）

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 機体周辺環境の把握がより容易となる. ・ 外部カメラ設置が不要となる. ・ 特に狭隘部走行時に有効と感じるオペレータもいる
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ VR酔いが起こる. 酔いによりオペレータによっては操作ができなくなる. ・ 通信容量が増加する ・ 設置の仕方にもよるが, 運転席に設置した場合, 搭乗操作が不可能になる
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ステレオ魚眼カメラ（+2台） ・ 専用の画像処理システム ・ 通信帯域が不足するならば, 別個通信システム
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 外部カメラとその設置作業
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>従来無人化施工に比べ同程度.</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 雲仙普賢岳における検証実験を実施
<p>関連論文, 関連資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 佐藤貴亮ら：無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発, 日本機械学会論文集, vol.81, No.823, pp14-31, 2015. 2) 橋本, 山田, 新田, 野末, 上原：遠隔操作建設機械への俯瞰映像システムの導入について, ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019, 1P2-D09, 2019.

5.1.4. 外部カメラ画像表示技術

概要：

4.4節より、遠隔操作において車載カメラ映像のみでは機体の周辺状況を十分把握できないため、必要に応じて（機体と対象物との距離調整を行う場合など）外部カメラ映像を活用することが、遠隔操作時の施工効率を向上させるために有効であることが判明している。本技術は、外部カメラ映像を、見るべきタイミングで振動させたり、大きさや位置を変更させたりすることで、オペレータの視線を誘導し必要な情報を提示できる新たなインターフェースシステムである。

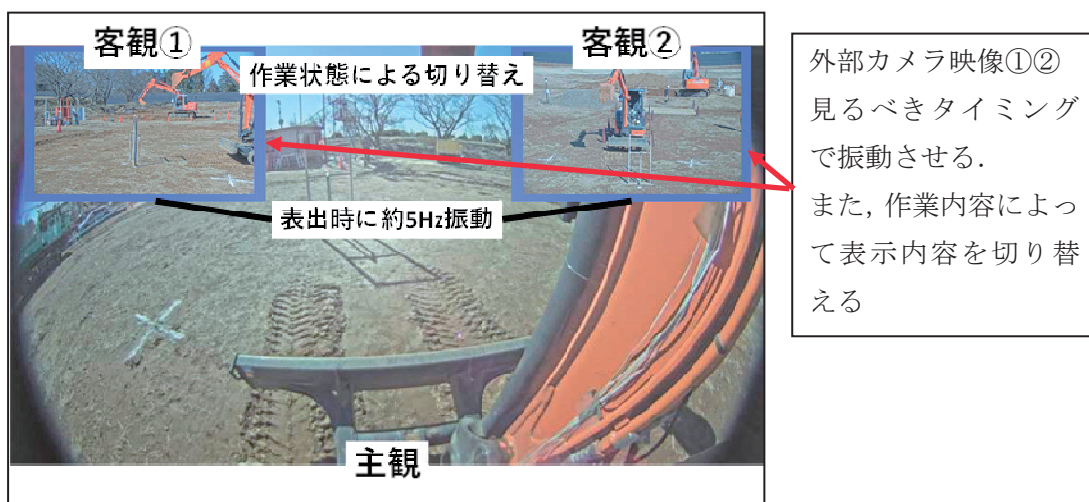
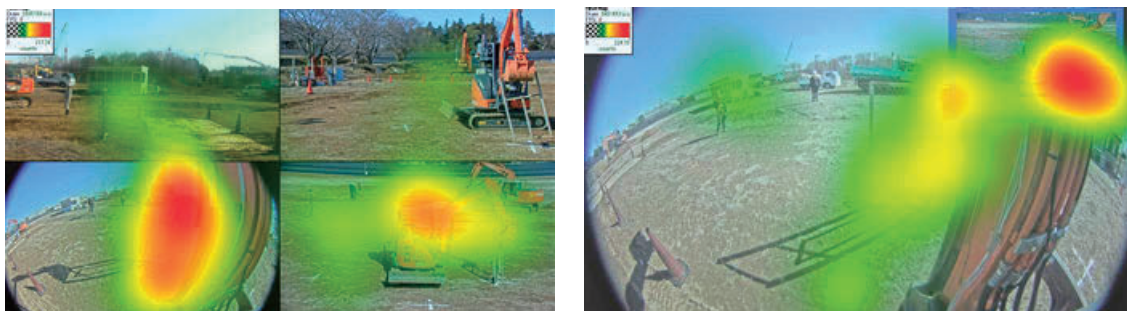


図-5.1-8 新インターフェースシステム



従来インターフェース視線解析結果

新インターフェース視線解析結果

(赤い部分が注視が多い箇所)

図-5.1-9 オペレータ視線解析結果

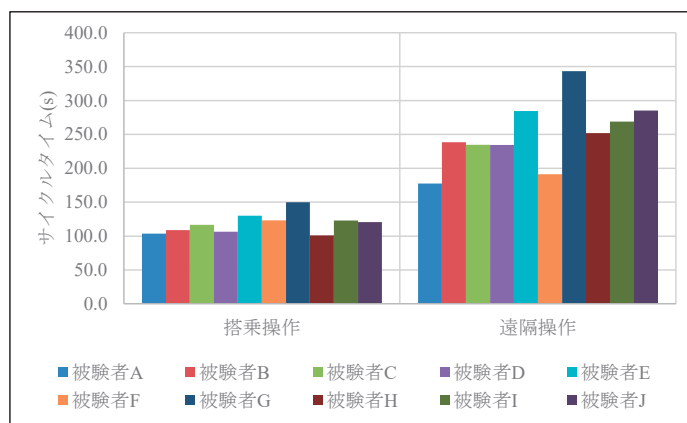
(新インターフェースにより外部カメラへの視線誘導が行えた)

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> 外部カメラ映像の活用が促進され、機体周辺環境の把握がより容易となる。
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> 専門カメラオペレータが必要。映像の切替等は現在人間が行っている システムの都合上、外部カメラ映像が比較的小さくなる
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> 専用の画像処理システム
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> なし
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>モデルタスク（4.1節参照）にて施工効率を確認。従来無人化施工に比べ同程度。</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> なし
<p>関連論文、関連資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 佐藤，亀崎，仁内，菅野，岩田：重機遠隔操作者の視線を作業状態に応じた映像に誘導可能な映像提示手法の構築，第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，pp1667-1670，2018. T.Moteki, Z.Qiao, Y.Mizukoshi, H.Iwata: A Study on the Construction of a Visual Presentation Method that Can Prevent Cognitive Tunneling in Unmanned Construction, 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021), pp.598-604, 2021. 茂木，喬，水越，岩田：無人化施工における認知的視野狭窄を防止可能な視覚提示手法の構築に関する研究，第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，3AI-05，2021.

5.1.5. オペレータ選抜手法

概要：

4章参考文献7)などの先行研究により、搭乗操作時に比べカメラ映像式遠隔操作時のサイクルタイムには大きなばらつきがあることが解っている。これは遠隔操作が得意なオペレータと不得意なオペレータが存在していることを示している。もしこの両者を事前に容易に判別することができれば、得意なオペレータのみを施工現場に派遣することができ、無人化施工の施工効率を改善させることが可能になる。そこで、容易に無人化施工が得意なオペレータを判別する手法を検討した。



熟練オペレータ 10 名にてモデルタスク (4.1 節参照) を行った結果、搭乗操作に比べカメラ映像式遠隔操作はオペレータの差が大きい。

図-5.1-10 オペレータ 10 名によるモデルタスク II の結果 (搭乗操作とカメラ映像式遠隔操作)

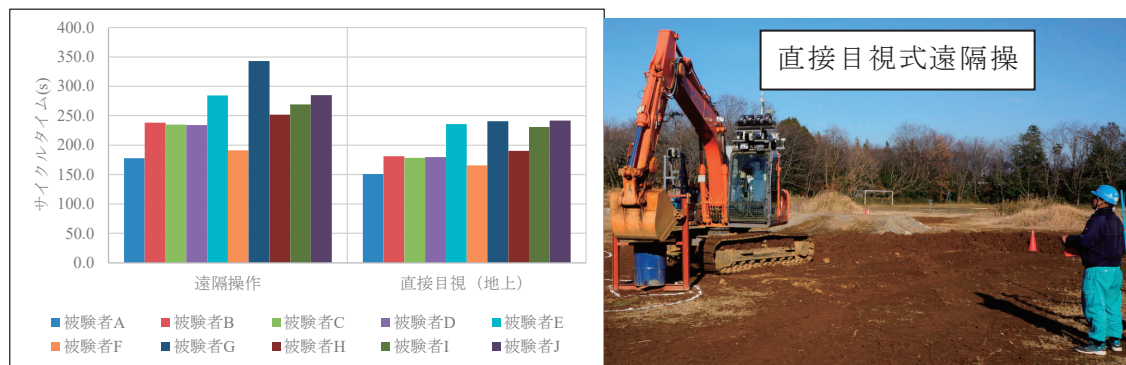


図-5.1-11 オペレータ 10 名によるモデルタスク II の結果 (カメラ映像式遠隔操作と直接目視式遠隔操作)

カメラ映像方式遠隔操作と直接目視式遠隔操作のオペレータの傾向は似ている (相関係数 0.91) 。したがって、直接目視式遠隔操作を事前に行うことでカメラ映像式遠隔操作が得意なオペレータを選抜できる。

長所： <ul style="list-style-type: none"> ・ 新たな機器等は不要で施工効率を大きく改善できる
短所： <ul style="list-style-type: none"> ・ 事前に選抜作業が必要
必要機器（従来無人化施工に加えて）： <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
省略できる機器・作業（従来無人化施工から）： <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
施工効率（従来無人化施工に比べて）： モデルタスク（4.1 節参照）にて施工効率を確認。従来無人化施工に比べ 27%程度改善
災害現場投入実績： <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
関連論文，関連資料 1) 藤野健一，橋本毅，油田信一，建山和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究，土木学会論文集F3，Vol.74，No.1，pp.11-17，2018.

5.1.6. 運転席型遠隔操作装置

概要：

4.3.節より，遠隔操作時の施工効率低下原因の一つは，操作 IF の相違にあることが解っている．そこで，油圧ショベル運転席と同じ椅子・操作レバーを持った遠隔操作装置を開発した．本装置によりオペレータは搭乗操作時と同じ感覚で遠隔操作が可能となり，施工効率改善につながる．

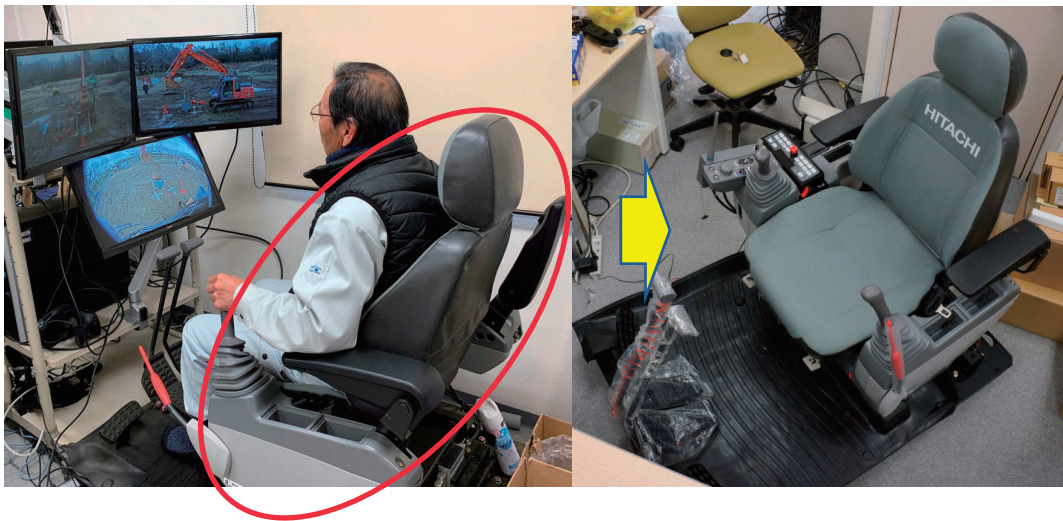


図-5.1-12 運転席型遠隔操作装置

長所： <ul style="list-style-type: none"> 慣れたインターフェースで操作ができる
短所： <ul style="list-style-type: none"> 専用遠隔操作装置が必要
必要機器（従来無人化施工に加えて）： <ul style="list-style-type: none"> 運転席型遠隔操作装置
省略できる機器・作業（従来無人化施工から）： <ul style="list-style-type: none"> なし
施工効率（従来無人化施工に比べて）： モデルタスク（4.1 節参照）にて施工効率を確認。従来無人化施工に比べ 15~30%程度改善
災害現場投入実績： <ul style="list-style-type: none"> なし
関連論文，関連資料 1) 茂木，西山，油田，安藤，伊藤：無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価，建設ロボットシンポジウム，O21-1，2015.

5.1.7. 様々な VR 技術

概要：

これまで紹介した技術のほかにも、遠隔操作時の臨場感を向上させ、施工効率の改善を図る技術がいくつか研究・開発されている。ここでは、建設機械の傾斜、振動、音などをオペレータにフィードバックさせる技術について紹介する。



図-5.1-13 体感装置付運転席¹⁾



図-5.1-14 無人化施工 VR 技術²⁾

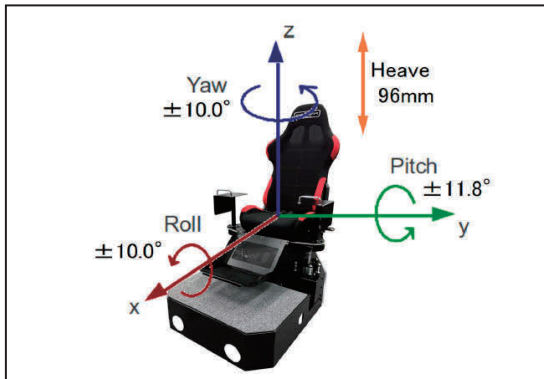


図-5.1-15 モーションシミュレータシート³⁾



図-10 双腕操作用インタフェースイメージ

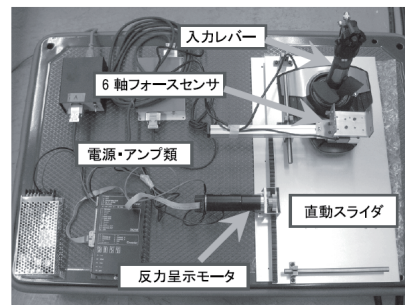


図-5.1-16 力入力型インターフェース⁴⁾

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設機械の傾斜，振動，音などをオペレータにフィードバックさせることにより，オペレータの臨場感が向上し，施工効率改善への効果が期待できる
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 専用遠隔操作装置が必要
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 専用遠隔操作装置
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 不明
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>不明</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
<p>関連論文，関連資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 古屋，栗生，清水：3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」，大林組技術研究所報，No.76，2012. 2) 無人化施工VR技術の開発，熊谷組WebSite， https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2019/pr_20191115_1.html，2022/3/3閲覧 3) 伊藤，辻，栗田，佐伯，山崎：座席振動フィードバックを用いた油圧ショベル遠隔操作システム，JSME Conference on Robotics and Mechatronics，2A2-B03，2018. 4) 平林：水中建設機械のマニピュレータ化と操作インターフェース，建設の施工規格，Vol.63，No.10，pp53-57，2011.

5.2. セットアップ効率化技術

5.2.1. HMD 活用システム

5.2.2. UAV 活用システム

5.2.3. SLAM 活用システム

5.2.4. 高機能遠隔操作室

表-5.2-1 セットアップ効率化技術一覧表 (詳細は次ページ以降参照)

	長所	短所	必要機器 (従来無人化施工に加え)	省略できる機器・作業 (従来無人化施工から)	施工効率 (従来無人化施工に比べて)
5.2.1. HMD 活用システム	ディスプレイ, 運転建屋が不要となり, セットアップ時間が短縮される	オペレータによっては HMD 装着に不快感がある	HMD と画像処理 PC	ディスプレイ類, 運転建屋	同程度
5.2.2. UAV 活用システム	外部カメラ設置が不要となる. 視点を自由に選択することが可能	有線給電用に開発された UAV とヘリパッドが必要. 現段階では UAV オペレータが別個必要. 強風の場合, UAV が飛行できない.	有線給電用に開発された UAV とヘリパッド	外部カメラとその設置作業	同程度
5.2.3. SLAM 活用システム	障害物や傾斜などの機体周辺環境の把握が可能となる. 外部カメラ設置が不要となる. 夜間でも適用可能	LiDAR や専用ソフトウェアが必要 人間が判断するためには慣れが必要	センサ (LiDAR など) 専用の画像処理システム	外部カメラとその設置作業	同程度
5.2.4. 高機能遠隔操作室	運転建屋設置時間が短縮される	現状の技術で設定されているため, 新技術への対応は難しい	なし	運転建屋設置時間が短縮される. 従来 5~10 日 → 1~3 日	同程度

5.2.1. HMD 活用システム

概要：

従来無人化施工時には、オペレータの労働環境や各種機器の保全などから安全地域に運転建屋を構築するが、災害現場等で迅速に運転建屋を構築することは困難である場合も多い。そこで、ディスプレイの代わりに HMD を用いることで、ディスプレイや運転建屋そのものの設置を不要とすることが可能となり、無人化施工の迅速展開に効果的である。

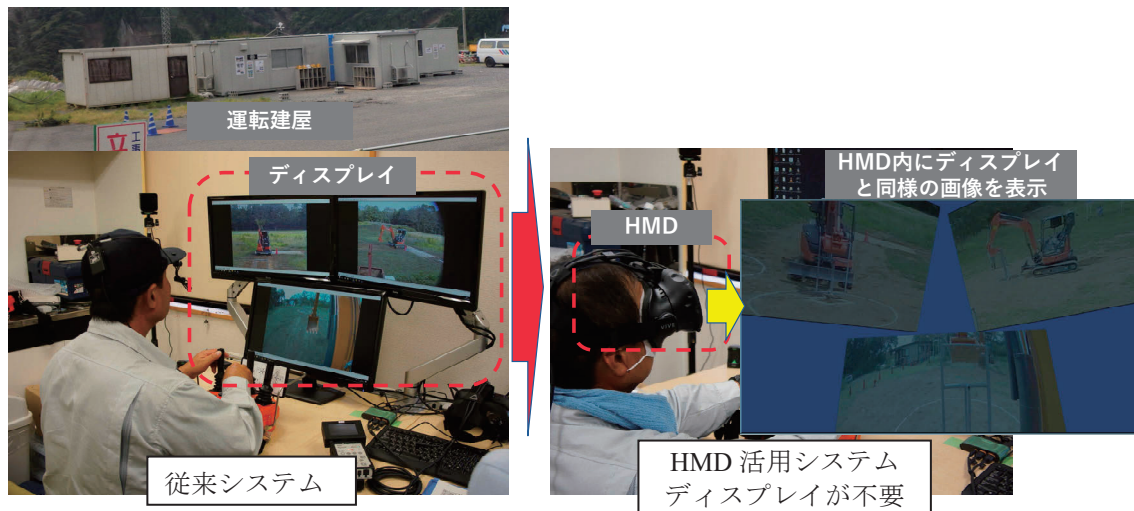


図-5.2-1 従来システムと HMD 活用システム



図-5.2-2 HMD を乗用車内で活用
(運転建屋も不要)

長所： <ul style="list-style-type: none"> ・ ディスプレイ，運転建屋が不要となり，セットアップ時間が短縮される
短所： <ul style="list-style-type: none"> ・ オペレータによっては HMD 装着に不快感がある
必要機器（従来無人化施工に加えて）： <ul style="list-style-type: none"> ・ HMD と画像処理 PC
省略できる機器・作業（従来無人化施工から）： <ul style="list-style-type: none"> ・ ディスプレイ類 ・ 運転建屋
施工効率（従来無人化施工に比べて）： モデルタスク（4.1 節参照）にて施工効率を確認．従来無人化施工に比べ同程度．
災害現場投入実績： <ul style="list-style-type: none"> ・ なし．
関連論文，関連資料 1) 橋本，山内，藤野，油田：無人化施工における HMD を用いた画像表示システムの効果について，第 18 回建設ロボットシンポジウム，O3-1，2018. 2) 山内，橋本：無人化施工の迅速展開を目的とした HMD 映像表示システムの提案，建設機械施工，Vol.72，No.7，pp78-81，2020.

5.2.2. UAV 活用システム

概要：

2 章等で述べているように、無人化施工では外部カメラを設置し機体周辺情報を得ることが必要である。しかし、災害現場で外部カメラを設置することは困難である場合も多く、迅速な無人化施工の展開においては課題となる場合もある。そこで、長時間飛行できる有線給電型の UAV とヘリパッドを開発し、遠隔操作建設機械の機体周辺情報取得を可能にした。

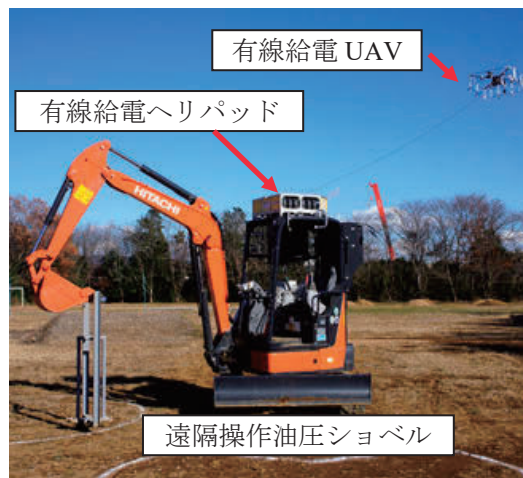


図-5.2-3 有線給電 UAV とヘリパッド



図-5.2-4 UAV からの映像（視点を自由を選択することが可能）

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> 外部カメラ設置が不要となる. 視点を自由に選択することが可能 ヒアリングにて高評価を示すオペレータも多い
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> 有線給電用に開発された UAV とヘリパッドが必要 現段階では UAV オペレータが別個必要 強風の場合，UAV が飛行できない
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> 有線給電用に開発された UAV とヘリパッド
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> 外部カメラとその設置作業
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>モデルタスク（4.1 節参照）にて施工効率を確認．従来無人化施工に比べ同程度．</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> なし
<p>関連論文，関連資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 薬師川，桐林，永谷：マルチロータ機による無人建設機械の撮影を目的とした有線給電ヘリパッドの開発と評価，第 34 回日本ロボット学会学術講演会，3C3-04，2016. 2) 桐林，薬師川，五十嵐，永谷，橋本，山内，藤野：無人化施工機械の遠隔操縦支援を目的とした空撮映像の評価，ロボティクスメカトロニクス講演会，2A1-K01，2018.

5. 2. 3. SLAM 活用システム

概要：

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) とは、移動中にカメラやレーザスキャナ等で取得した周辺環境情報から、事前に地図が与えられていなくても自己位置特定と周辺の地図作成を同時に行うことができる技術のことであり、市販の掃除ロボット「ルンバ」等に採用されている。本技術を無人化施工の建設機械に適用することにより、外部カメラがなくても建設機械周辺状況の把握が可能となる。また、SLAM にて使用するセンサにレーザスキャナを選択することにより、夜間など光学カメラが使用できない環境でも周辺状況把握が可能となる利点も持っている。



図-5.2-5 SLAM システムを搭載した遠隔操作型油圧ショベル

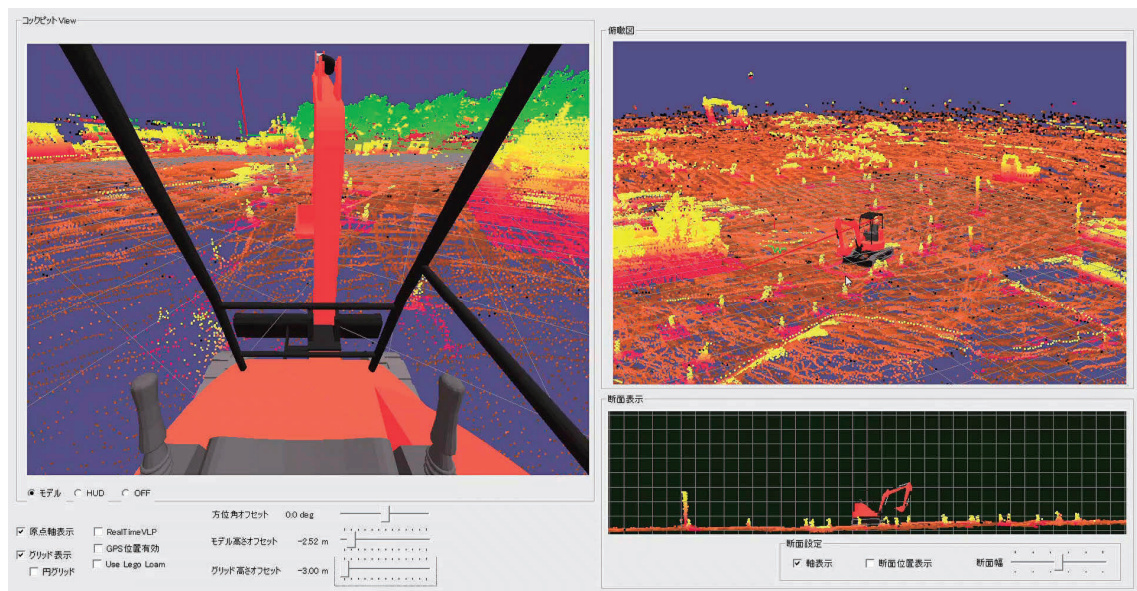


図-5.2-6 SLAM 映像

<p>長所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 障害物や傾斜などの機体周辺環境の把握が可能となる. ・ 外部カメラ設置が不要となる. ・ 夜間でも適用可能である
<p>短所：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ LiDAR や専用ソフトウェアが必要 ・ 人間が判断するためには慣れが必要
<p>必要機器（従来無人化施工に加えて）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ センサ（LiDAR など） ・ 専用の画像処理システム
<p>省略できる機器・作業（従来無人化施工から）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 外部カメラとその設置作業
<p>施工効率（従来無人化施工に比べて）：</p> <p>同程度</p>
<p>災害現場投入実績：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
<p>関連論文，関連資料</p> <p>1) 別井，木内，岸，橋本，遠藤，山内，緒方，藤澤，橘，板谷，石川： LiDAR SLAMを用いた建設機械の遠隔操縦の検討，ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021，2P2-A04，2021.</p>

5.2.4. 高機能遠隔操作室

概要：

災害現場に設置する運転建屋は、ディスプレイやPCなどの各種機器およびそれらと遠隔操作建設機械、カメラ台車などを結ぶ通信設備が必要である。これらの設置やセットアップには大きな時間が必要であり、迅速な無人化施工の展開の課題となる。そこで、上記必要な機器類を予め設置済の運転室を用意し、現地での設置時間を短縮できる運転室（遠隔操作室）が開発された。本運転室は現在3棟まで拡張することも可能である。

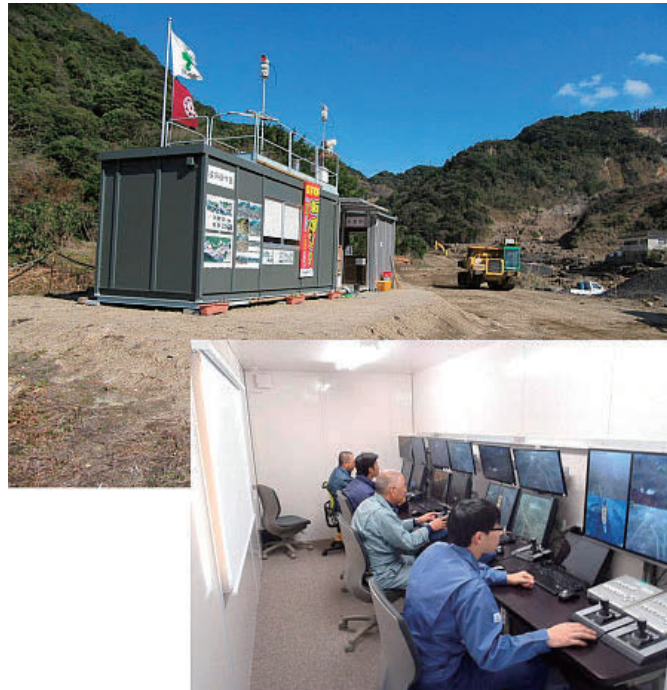


図-5.2-7 高機能遠隔操作室

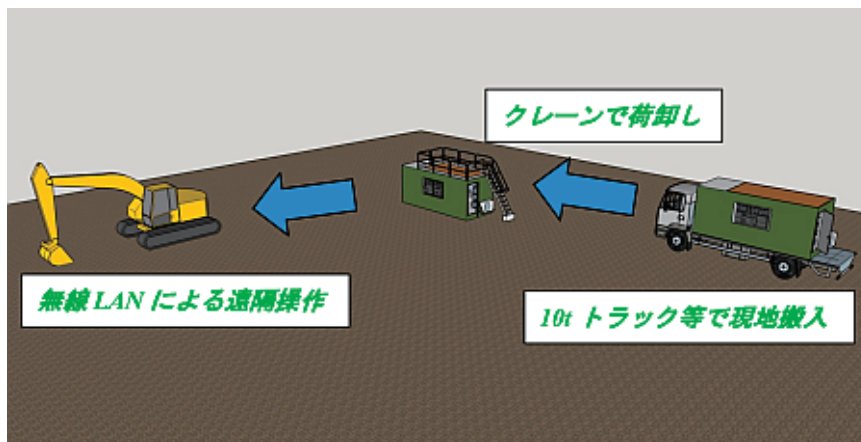


図-5.2-8 運用イメージ

長所： <ul style="list-style-type: none"> ・ 運転建屋設置時間が短縮される
短所： <ul style="list-style-type: none"> ・ 現状の技術で設定されているため，新技術への対応は難しい
必要機器（従来無人化施工に加えて）： <ul style="list-style-type: none"> ・ なし
省略できる機器・作業（従来無人化施工から）： <ul style="list-style-type: none"> ・ 運転建屋設置時間が短縮される．従来 5～10 日かかっていたものを 1～3 日で可能
施工効率（従来無人化施工に比べて）： 同程度
災害現場投入実績： <ul style="list-style-type: none"> ・ 鹿児島県大隅地区，熊本県阿蘇大橋地区などで実績あり
関連論文，関連資料 1) 無人化施工における高機能遠隔操作室の開発，熊谷組WebSite， https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2016/pr_160324_1.html ，2022/3/3閲覧

5.3. 機種多様性向上技術

5.3.1. 半水中遠隔操作型クローラダンプ

5.3.2. 中型油圧ショベルと小型油圧ショベルの比較

5.3.3. 後付け遠隔操作システム

5.3.4. クイックカプラ

表-5.3-1 機種多様性向上技術一覧表（詳細は次ページ以降参照）

	長所（特徴）	短所
5.3.1. 半水中遠隔操作型クローラダンプ	<ul style="list-style-type: none"> 最大水深：2m（水深2mまで入水が可能） 積載重量：10t 最大速度（水中）：10.0km/h 搭乗操作・遠隔操作が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 運転席も浸水するため、ウェットスーツ等が必要
5.3.2. 中型油圧ショベルと小型油圧ショベルの比較	<ul style="list-style-type: none"> 幅：1.74m 高さ：2.48m 機械質量：3.5ton ブレード付 トラック等で輸送可能 モデルタスク（4.1 節参照）にて施工効率を確認、従来無人化施工に比べ40%程度、12ton 油圧ショベルと同等 	<ul style="list-style-type: none"> 大規模な施工は大型油圧ショベルにかなわない
5.3.3. 後付け遠隔操作システム	<ul style="list-style-type: none"> 様々な汎用機械を比較的容易に遠隔操作型に改造できる 	<ul style="list-style-type: none"> 取付不能な機種もある 取付後搭乗操作ができなくなるシステムもある（できるものもある）
5.3.4. クイックカブラ	<ul style="list-style-type: none"> 油圧ショベルのツールを人の手を介さずに交換加工 1台で様々な作業に対応できる 	<ul style="list-style-type: none"> 取付不能な機種もある

5.3.1. 半水中遠隔操作型クローラダンプ

概要：

近年は、津波災害、集中豪雨災害などが頻発しており、出水域での無人化施工が求められる事例も多い。1～2m程度の推進で作業を行うには、水中用に特殊改造した建設機械が必要となり、油圧ショベルではこれまで開発されてきた実績がある。しかし運搬機械は開発されておらず、しかたなく油圧ショベルのみで施工を行ってきた。次世代無人化施工技術研究組合では、本課題を解決すべく、半水中遠隔操作型クローラダンプを開発した。



図-5.3-1 半水中遠隔操作型クローラダンプ (2号機)



図-5.3-2 河川工事での運用 (水深約 2m)

長所（特徴）：

- ・ 最大水深：2m（水深 2m まで入水が可能）
- ・ 積載重量：10t
- ・ 最大速度（水中）：10.0km/h
- ・ 搭乗操作・遠隔操作が可能

短所：

- ・ 運転席も浸水するため、ウェットスーツ等が必要

災害現場投入実績：

熊本県球磨川における浚渫工事にて実験を実施

関連論文，関連資料

- 1) 次世代無人化施工技術研究組合：遠隔操作による半水中作業システムの開発について，建設マネジメント技術，No.11，pp29-32，2018.

5.3.2. 中型油圧ショベルと小型油圧ショベルの比較

概要：

現在入手できる遠隔操作型油圧ショベルは、12ton クラス以上の機種がほとんどである。しかし災害現場においては小型の機種が望まれる場合もある。しかしこれまで小型遠隔操作油圧ショベルに関する研究や災害現場投入はあまりなされていない。そこで、3ton クラスのミニショベルを遠隔操作型に改造し、モデルタスクにて施工効率の検証を行った。



図-5.3-3 遠隔操作型小型油圧ショベル



図-5.3-4 モデルタスクⅡ（4.1節参照）実施時

長所（特徴）：

- ・ 幅：1.74m
- ・ 高さ：2.48m
- ・ 機械質量：3.5ton
- ・ ブレード付
- ・ トラック等で輸送可能
- ・ モデルタスク(4.1節参照)にて施工効率を確認. 従来無人化施工に比べ40%程度. 12ton油圧ショベルと同等

短所：

- ・ 大規模な施工は大型油圧ショベルにかなわない

災害現場投入実績：

- ・ なし

関連論文，関連資料

- 1) 突発的な自然現象による土砂災害の防災・減災技術の開発：国立研究開発法人土木研究所 平成28年度研究開発プログラム報告書，2016.
- 2) 突発的な自然現象による土砂災害の防災・減災技術の開発：国立研究開発法人土木研究所 平成29年度研究開発プログラム報告書，2017.

5.3.3. 後付け遠隔操作システム

概要：

現状、遠隔操作型建設機械の普及台数は著しく少なく、必要な時に十分な台数が入手できない。そこで通常の建設機械に後付けして遠隔操作を可能とするシステムが、様々な企業にて開発されている。



図-5.3-5 ロボ QS¹⁾

(IHI 検査計測・フジタ, ほか)



図-5.3-6 DOKA ROBO²⁾

(カナモト・富士建・アスラテック, ほか)

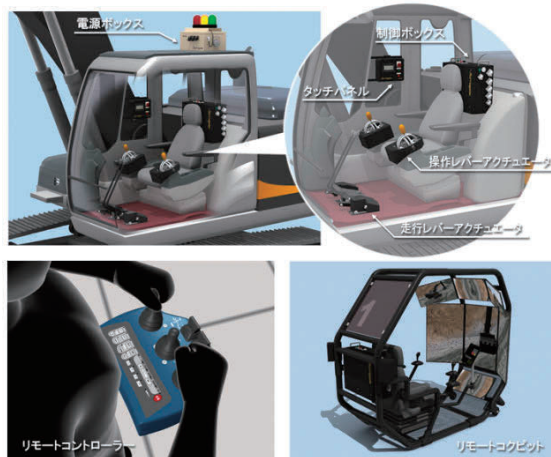


図-5.3-7 サロゲート³⁾

(大林組・大裕)



図-5.3-8 アクティブロボ SAM⁴⁾

(コーワテック)

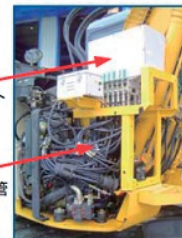


図-5.3-9 ModelV⁵⁾
(ARAV)

パイロット圧制御の
パワーショベルに取付出来ます



ーシステム取付例ー



HRC
バルブユニット

車輻側油圧配管

図-5.3-10 HRC システム⁶⁾
(西尾レントオール)

長所：

- ・ 様々な汎用機械を比較的容易に遠隔操作型に改造できる

短所：

- ・ 取付不能な機種もある
- ・ 取付後搭乗操作ができなくなるシステムもある（できるものもある）

災害現場投入実績：

- ・ 有（詳細は各企業資料参照）

関連論文，関連資料

- 1) ロボQS, IHI検査計測WebSite, <https://www.iic-hq.co.jp/products/08/03.html>, 2022/3/3閲覧
- 2) DOKA ROBO, 富士研WebSite, <https://fjk-co.jp/dokarobo>, 2022/3/3閲覧
- 3) XAURS-EQ (サロゲート), 大祐WebSite, <http://taiyu-corp.com/products02/surrogate/>, 2022/3/3閲覧
- 4) 無線遠隔操作で建機運転が可能, コーワテックWebSite, <https://www.kowatech.co.jp/products/sam/>, 2022/3/3閲覧
- 5) ModelV, ARAVWebSite, <https://www.remotecontrol.arav.jp/modelv/>, 2022/3/3閲覧
- 6) HRCシステム, 西尾レントオールWebSite, https://ict.nishio-rent.co.jp/rental/detail_4382/, 2022/3/3閲覧

5.3.4. クイックカプラ

概要：

3章でも述べたが、災害時は様々な条件が発生するため、作業する油圧ショベルのアタッチメントは1種類では済まない場合が多い。そこで現地で容易にアタッチメントを交換できるクイックカプラが様々な企業にて開発されている。特に、油圧配管まで人の手を介さずに行えるクイックカプラ（下記の2機種）は災害現場に有効である。



図-5.3-11 油圧オートカプラ¹⁾（コマツ）



図-5.3-12 オイルクイック油圧ショベル用²⁾（オイルクック）

長所：

- ・ 油圧ショベルのツールを人の手を介さずに交換加工
- ・ 1台で様々な作業に対応できる

短所：

- ・ 取付不能な機種もある

災害現場投入実績：

- ・ 有（詳細は各企業資料参照）

関連論文，関連資料

- 1) 油圧オートカプラ，コマツカスタマーサポートWebSite,
https://kcsj.komatsu/lp/auto_coupler/, 2022/3/3閲覧
- 2) Oil Quick油圧ショベル用，オイルクイックジャパンWebSite,
<https://www.oilquickjapan.com/>, 2022/3/3閲覧

5.4. 非常時に備えて決めておくべき事項

3章で述べたように、災害時は現場が混乱することが多い。その中で施工がスムーズに行えるよう、災害時のルールを平常時から決めておくことが重要である。本節ではその決めておくべき事項を一覧表にまとめた。

決めておくべき事項	概要
無人化施工機器の確保方法	5.3.3 で述べたように無人化施工機器の普及台数は著しく少ない。非常時に調達できるよう取り決めておく
無人化施工オペレータの確保方法	上記と同様に無人化施工を行えるオペレータも非常に少ない。人材育成も含め平常時から手を打っておく
燃料・修理・補修手段の確保方法	災害時の燃料調達、機械修理・補修がスムーズに行えるよう取り決めておく。業者との災害協定なども有効
高速道や一般道の通行許可申請方法	災害時は簡素化される場合もある。平常時から問い合わせ先などを明確にしておく
非常時指揮系統の確認	災害時は現場が最も混乱するため、連絡窓口の一本化など、現場に負担をかけない仕組みが必要
土木工事、警察、消防、報道など省庁をまたがる機関の連携方法	災害現場での有人・無人ヘリの飛行や無線帯域の重複などで混乱が起こる。事前に取り決めが必要。 無線については、取り決めをしてもトラブルが起こる確率が高いため、非常時連絡先をお互いに確保しておく。

5.5. 無人化施工技術の伝承について

無人化施工は特殊な施工方法であり、運転者や現場管理者は通常の施工方法に長けているだけでなく、無人化施工にも十分精通している必要がある。しかしながら、前述のように無人化施工実績は1993年以降で200件程度であり、精通している運転者、管理者共に非常に少ないのが現状である。また、遠隔操作型建設機械においても、通常型に比べ価格が非常に高いことや、災害対応であるため企業のビジネスになりにくい（災害がいつ発生するかわからないため、ビジネス計画が立て難い）ことなどから、同様に台数が非常に少ない。したがって災害が発生した場合、十分な人員と機器類を確保することが非常に難しく、人員の過重労働や工期遅延などが発生している。

この課題を解決する手段として、「産業競争力懇談会²⁷⁾」や「建設ロボット技術に関する懇談会²⁸⁾」では、無人化施工の訓練や新技術の実証試験などが可能な「無人化施工試験フィールドの創設」や、「研究開発を伴った試験工事の実施」などが提言されている。今日まで、雲仙普賢岳における一連の砂防工事が上記試験フィールドの実質的な代替として機能してきているが、今後は行政、研究機関、企業などが連携した、恒久的な試験フィールドの構築が、さらなる無人化施工技術の発展には急務であるといえる。（国研）土木研究所としても、本試験フィールドの構築に積極的にかかわっていききたい。

6. 無人化施工実施事例の紹介

本章では、無人化施工による応急対応工事が実施された近年の事例について紹介する。

(1) 阿蘇大橋地区における斜面防災対策工事²⁹⁾

平成 28 年 4 月 28 日に発生した熊本地震により、阿蘇大橋地区における大規模な斜面崩壊が発生した。当該地区では、斜面上部に多量の不安定土砂が残存しており、地震や降雨等でさらなる崩壊を引き起こす恐れがあった。そこで、国土交通省九州地方整備局による直轄砂防災害関連緊急事業として、2次災害を防止しつつ安全に工事を行うために無人化施工技術を駆使した阿蘇大橋地区斜面防災対策工事が実施された。

本工事では、崩壊現場での土留盛土工(幅 300m、高さ 3m、天端幅 5m)に加え、崩壊斜面頭部の不安定土砂の除去(約 1.7 万 m³)を実施した。

第 4 世代型の無人化施工を採用し、5GHz 無線 LAN、25GHz 高速無線アクセスシステム、光ファイバーケーブル、LAN ケーブルによるネットワークシステムを構築し、カメラ映像や建設機械の操作信号、ガイダンスシステムの情報を建設機械、建機オペレータ間の双方向通信を確立した。

発災直後の平成 28 年 5 月 5 日には 4 台の建設機械、6 台の作業用固定カメラの導入、遠隔操作室の設置を完了し、無人化施工システムの運用を開始した。その後、設備の増強を図り、崩壊現場から 1km 程度離れた位置に遠隔操作室の設置、14 台の建設機械と 21 台の作業用固定カメラを導入し、より規模の大きい無人化施工システムの運用を平成 29 年 6 月に開始した。

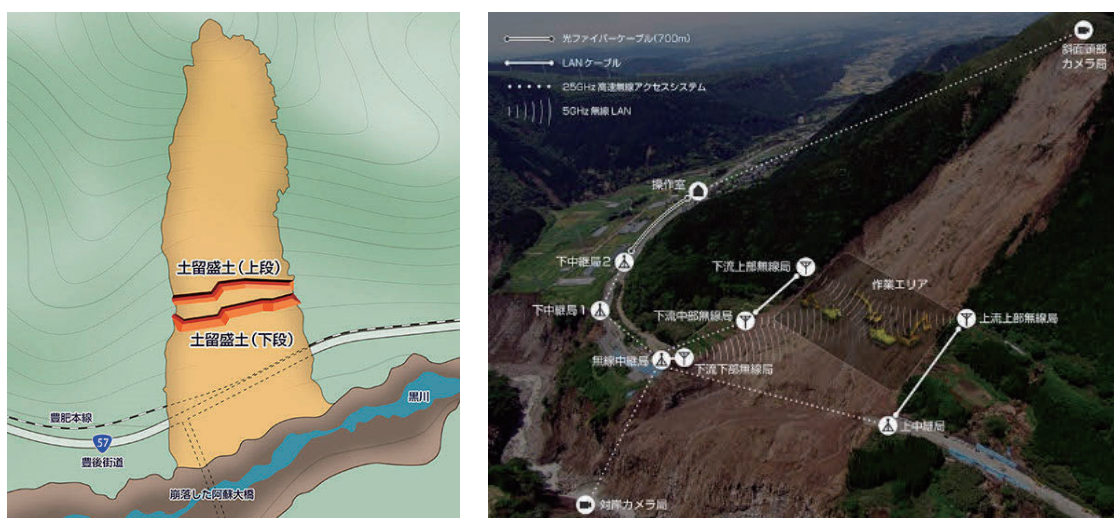


図-6.1-1 阿蘇大橋地区における斜面防災対策工事概要³⁰⁾

左：工事概要、右：対策工事におけるネットワーク構成

(2) 赤谷地区における3号砂防堰堤工事³¹⁾

平成23年台風12号により、紀伊半島において大規模な斜面崩壊が発生し、崩落土砂による河道閉塞が多数形成された。河道閉塞の侵食、決壊による下流域への甚大な土砂・洪水氾濫災害を引き起こす恐れがあった。同年9月16日より災害対策・復旧工事に着手しており、今なお工事が進められている。

赤谷地区における、2次災害を防止しつつ工事を実施するために無人化施工が活用されており、本節では、発災直後の対応ではないものの、継続して災害対応工事として進められている赤谷3号砂防堰堤工事について紹介する。

本工事では、2020年2月着工、2022年3月竣工予定であり、掘削工、地盤改良校、堰堤本体部材設置、堰堤本体ソイルセメント打設、埋戻し等を実施し、3号砂防堰堤を築造するものである。工事エリアは、大規模崩落地に近く(図2左)、立入規制区域内となるため、出水期間中の施工は無人化施工および自動化施工により実施した。

掘削工は、最大15台のバックホーおよびクローラダンプによる無人化施工を導入した。砂防堰堤下流側へのコンクリートブロック設置、ソイルセメントの敷き均し、転圧作業において、それぞれ1台の油圧ショベル、ブルドーザ、振動ローラを用いて自動化施工を導入した。(図2左)コンクリートブロックの設置では、ブロックに貼り付けたARマーカを、油圧ショベルに搭載したカメラにより視認することで、ブロックの位置と向きを正確に把握し、ブロックの把持と設置を正確に行った。また、ソイルセメントの敷き均し、転圧は、工事請負業者が開発した次世代の建設生産システムA4CSEL³³⁾を導入して実施した。



図-6.1-2 3号砂防堰堤工事概要

左：赤谷地区の工事区域概要³²⁾ 右：無人化施工・自動化施工の概要³¹⁾

7. まとめ

本書は、カメラ映像方式の無人化施工を対象として、災害現場にて課題点を解決する新技術の情報を参照することが可能なカタログの作成を試みたものである。

無人化施工における課題点を3章にまとめ、それら課題点に対する対策として開発された各種新技術について、5章にまとめた。とくに5章ではカタログのように各種新技術を一覧的に参照できる構成とし、各技術の特徴（短所も含む）などについて記載しており、災害現場にて本カタログを参照することが容易な構成とした。本書が安全・効率的な無人化施工の実施への一助となることを期待している。

2章で述べたように、無人化施工には直接目視方式とカメラ映像方式の2種類があり、直接目視方式は主に災害直後の緊急対策に、カメラ映像方式は主に緊急対策後の応急復旧に活用されている。これまでの研究開発では、カメラ映像方式に関するものが多く、本書でもカメラ映像方式に関する新技術のみを取り上げている。しかしながら直接目視方式は災害の規模によらず活用されるものであり、今後基礎的研究や課題解決のための新技術開発が行われることが必要である。（国研）土木研究所でもそれらに関する取り組みを行っていききたい。

8. 参考文献

- 1) 藤野健一：無人化施工の現状と展望--技術開発状況と今後の展開について，建設機械，Vol.39，No.3，pp.1-6，2003.
- 2) 山元弘：建設工事における無人化施工，建設マネジメント技術，No.349，pp17-22，2007.
- 3) 古澤正紀：無人化施工に見る技術開発の歴史，NETIS プラス，No.2，2011.
- 4) 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.
- 5) 古屋 弘, 栗生 暢雄, 清水 千春：3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」，大林組技術研究所報，No.76，pp.1-10，2012.
- 6) 植木睦央, 猪原幸司, 北原成郎：「無人化施工」による災害復旧と今後の取り組みについて，建設マネジメント技術，No.421，pp45-53，2013.
- 7) 北原成郎：日本の災害から生まれた無人化施工技術，土木学会誌，vol.106，No.4，pp.60-62，2021.
- 8) 吉田桂治：5G を用いた無人化施工の高度化について，土木施工，vol.62，No.1，pp.30-31，2021.
- 9) 建設無人化施工協会 WebSite：<http://www.kenmukyou.gr.jp/>,2022年3月3日アクセス.
- 10) 橋本毅，藤野健一，梶田洋規，油田信一：“災害発生時における無人化施工等の運用に関する課題点について”，第72回土木学会年次学術講演会，pp1389-1390，2017.
- 11) 橋本毅，藤野健一，梶田洋規，油田信一：“無人化施工の運用に関する課題点と今後の無人化施工機器の開発方針について”，第73回土木学会年次学術講演会，pp1431-1432，2018.
- 12) 橋本毅，新田恭士：災害時の応急復旧に求められる技術について，ロボット学会誌，Vol. 38，No. 3，2020.
- 13) 藤野健一，橋本毅，油田信一，建山和由：無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究，土木学会論文集F3，Vol. 74，No. 1，pp. 11-17，2018.
- 14) 藤野健一，橋本 毅，山田 充，山内元貴，油田信一：建設機械による実機実験法に関する考察，JCMA 査読論文，Vol.71，No.12，pp75-81，2019.
- 15) 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”， JCMA 査読論文，Vol.66，No.8，pp. 71-79,2014.
- 16) 茂木正弘，西山章彦，油田信一，安藤広志，伊藤禎宣：無人化施工における各種遠隔操作による作業効率評価，建設ロボットシンポジウム，O21-1，2015.
- 17) 茂木正晴，藤野健一，西山章彦：無人化施工と有人施工における作業性の比較実験報告，建設施工と建設機械シンポジウム，pp.39-42，2013.
- 18) 橋本毅，梶田洋規，藤野健一，茂木正晴，油田信一：油圧ショベル遠隔操作における施工効率について，建設機械，Vol.53，No.6，pp.53-58，2017.
- 19) 橋本 毅，山内元貴，山田 充，油田信一：無人化施工における施工効率低下要因の検討，JCMA 査読論文，Vol.71，No.12，pp75-81，2019.
- 20) 茂木正晴，藤野健一，油田信一：無人化施工におけるヒューマンインターフェース

- の作業効率評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 6, pp. 426-429, 2015.
- 21) 藤野健一, 橋本毅, 油田信一, 建山和由: 無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究, 土木学会論文集 F3, Vol.74, No.1, pp.11-17, 2018.
 - 22) 山田充, 梶田洋規, 藤野健一, 橋本毅, 西山章彦: 無人化施工における車載型カメラ高度化のための基礎的研究, 建設ロボットシンポジウム, O3-3, 2017.
 - 23) 山田ら: 水中地盤での履帯走行に関する基礎的研究, テラメカニクス第 39 号, pp73-79, 2019.
 - 24) テラメカニクス研究会: 履帯の設計工学—履帯設計と性能予測の基礎—, pp33-35, 2000.
 - 25) 山田: 高含水地盤における車両牽引力の測定実験, テラメカニクス第 41 号, pp.41-44, 2021.
 - 26) 日本道路協会: 道路土工要領 (平成 21 年度版), p287, 2009.
 - 27) 産業競争力懇談会: “災害対応ロボットと運用システムのあり方最終報告付録 無人化施工システムに関する提言”, 2013.
 - 28) 建設ロボット技術に関する懇談会: “建設ロボット技術の開発・活用にむけて”, 2013.
 - 29) 野村 真一, 北原 成郎, 坂西 孝仁: 最新の無人化施工技術と i-Construction で挑んだ阿蘇大橋地区斜面防災対策工事, 平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム, pp11-16, 2017.
 - 30) 熊谷組阿蘇大橋斜面防災対策工事 HP(<http://www.kumagaigumi-aso.com/>), 2022 年 3 月 3 日アクセス.
 - 31) 古江 智博, 江口 健治: 災害現場における国内初の砂防堰堤自動化施工, 赤谷 3 号砂防堰堤工事 (特集 気候変動に備える流域治水の推進)--(復旧関係). 土木施工, Vol63, No.2, pp88-91, 2022.
 - 32) 国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 HP(<https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/map/3.html>), 2022 年 3 月 3 日アクセス.
 - 33) 三浦悟. 建設機械の自動化を核とした土木施工システムの変革. 鹿島技術研究所年報 Annual report, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, Vol.63, pp15-24, 2015.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4438 July 2023

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