

# 無人化施工における任意視点からの連続映像を提供可能な巨人視点インターフェースの開発

○喬 子維（早稲田大学），茂木 匠（早稲田大学），  
水越 勇一（早稲田大学），岩田 浩康（早稲田大学）

## 1. 序論

日本は災害大国であり、オペレータが安全な遠隔地から建設機械を遠隔操作することで復旧作業を行う無人化施工という技術の導入が盛んに行われている[1]。無人化施工はオペレータが二次災害などに巻き込まれるリスクを回避でき、人の立ち入りが困難な災害現場でも作業できるため、安全性と有効性が高いといった長所がある一方で、作業効率が搭乗操作と比較して50%程度まで低下してしまうという課題点がある[2]。無人化施工の作業効率低下の要因として、視覚情報や触覚情報の欠落、操作・映像通信の遅延、電波干渉など多岐にわたるが、その中でも視覚情報の欠落の影響が最も大きいと指摘されている[3]。そこで本研究は無人化施工における不足している視覚情報を補完できる映像提示手法に焦点を当てた。

先行研究として、桐林らは建設機械と小型の無人マルチロータ機を給電ケーブルで接続し、安定的な飛行と外部視点映像の提供ができるシステムを開発した[4]。しかし、このシステムでは専用のカメラオペレータ(マルチロータ機操縦者)が必要であるため、建設機械オペレータが望む映像を適切に提示できない恐れがある。

一方で、橋本らは建設機械の運転席に設置するステレオ魚眼カメラの映像をオペレータのHMDに投影することで、あたかも運転席に座っているような仮想空間をオペレータに提供できるシステムを開発した[5]。しかし、このシステムでは魚眼カメラの球面映像が平面映像に変換され、物体を立体的に捉えることができないことに加えて、画角も搭乗操作時の視界より狭く、死角があるため、建設機械の周辺情報を十分に得るとは限らない。

また、梶田らは人間の視野角をカバーできるように複数のディスプレイを設置し、通常の搭乗操作の環境をなるべく再現するシステムを開発した[6]。しかし、このシステムではオペレータに提示する映像の撮影位置や画角が異なり、空間的に不連続であるため、オペレータが迅速かつ正確に作業環境や建設機械の姿勢を判断するのは困難である。

以上の課題点を解決するため、本研究では専用のカメラオペレータが不要で任意視点からの連続映像を提供可能な巨人視点インターフェースを提案する。

## 2. 提案手法

提案する巨人視点インターフェースの概要を図1に示す。

頭部動作に連動した作業現場の3次元空間上の任意視点からの連続映像をオペレータに提示できる。また、視点移動量のスケールを変換することで、あたかも巨人の目線の映像を見ながらの作業を可能にしている。具体的には、立位では俯瞰的な映像が提示され、一方で、建設機械や障害物など詳細情報が必要な際は、身体を屈めて覗き込むことで、対象に接近した詳細映像を提示できる。

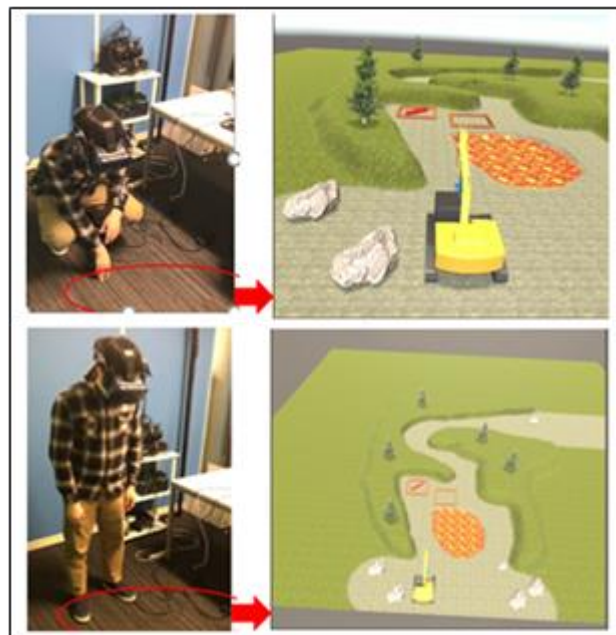


図1 巨人視点インターフェースの概要

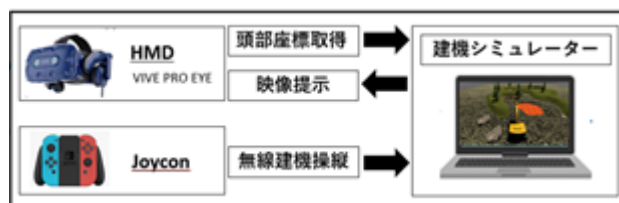


図2 提案手法効果検証における実験環境の全体構成

## 3. 実験

開発した巨人視点インターフェースの効果検証を行うための、実験環境の全体構成を図2に示す。

提案する手法の有効性を検証するため、定量的評価が容易なVRシミュレータを用いて、無人化施工

における従来の複数画角映像を同時に複数のディスプレイに表示し、提示するマルチディスプレイ提示手法(図3)との比較実験を行った。

### 3.1 実験環境

HMD は両眼視差の原理に基づいて、左右の目に視差像をそれぞれの眼前小型ディスプレイで直接提示することで立体視することができる[7]。一方で、2D 映像しか提示できない従来のマルチディスプレイと比較実験を行うため、本研究では両眼視差の影響を排除するため、HMD の中に仮想のディスプレイを設置して映像提示を行った。

Joy-Con は無線通信を通して建設機械を操作するコントローラーである。本研究では移動中も持ち運びながら操作できる Joy-Con を用いる。Joy-Con と建設機械の動作対応を図4に示す。

また、オペレータが身体的な疲労から、真に欲している映像を得られる視点とは異なる妥協した高さからの提示映像のまま操作してしまうことを緩和するため、視点の高さを手元のボタン操作で変更できる機能も Joy-Con に備えた。これによってオペレータは視点変更のために身体的疲労の大きい、無理な姿勢をすることなく操作することができる。



図3 マルチディスプレイ



図4 Joy-Con と建設機械の動作対応図

### 3.2 実験条件

本実験で行わせるタスクは、移動作業、マニピュレーション作業、複合作業の計3種類に分けられる。さらに、移動作業とマニピュレーション作業についてそれぞれ単純なタスクと複雑なタスクを用意した。それぞれのタスクを行う環境を図5に示す。

単純な移動作業では初期位置から赤色のゴールラインを完全に通過するようにクローラ移動を行わせる。複雑な移動作業では障害物を接触しないよう、かつ橋から落下しないようにクローラ移動を行わせる。また、障害物に接触した際は、オペレータに警告音がフィードバックされる。

単純なマニピュレーション作業(手先作業)では把持対象物としての赤色の丸太をグラップルを用いて把持し、配置場所となる空の枠内まで運搬し、可能な限り正方形の枠の中心に配置することを目標とする。複雑なマニピュレーション作業では把持・運搬・配置の一連の流れを4回行わせる。なお、マニピュレーション作業に関しては単純な作業でも複雑な作業でも移動操作を禁止とした。

複合作業では障害物に接触しないように把持作業が可能な地点まで移動した後、グラップルで丸太を把持し、障害物を避けながら配置作業を行うタスクを1セットとし、1回の施工で2セットのタスクを行わせる。

被験者は重機操作未経験の8名を対象とした。実験フロー(図6)として、まず、被験者にVRシミュレータにおける建設機械の操作を習熟してもらうために習熟タスクを実施した。そして、慣れの影響を低減させるため試験の順序を変えて2つのグループ

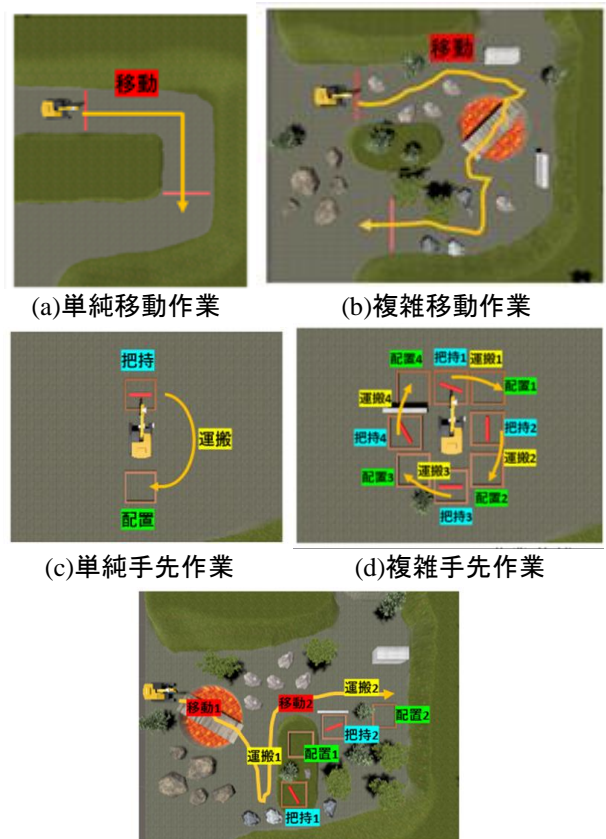


図5 実験タスク



に分けて評価実験を行った。1つのグループは従来のマルチディスプレイ提示手法で5種類のタスクをそれぞれ1回行った後、提示したジャイアトビューでタスクを行った。もう1つのグループは逆の順番でタスクを行った。また、複雑な移動作業、複雑なマニピュレーション作業、複合作業の後にNASA-TLXを用いて認知負荷を計測した。

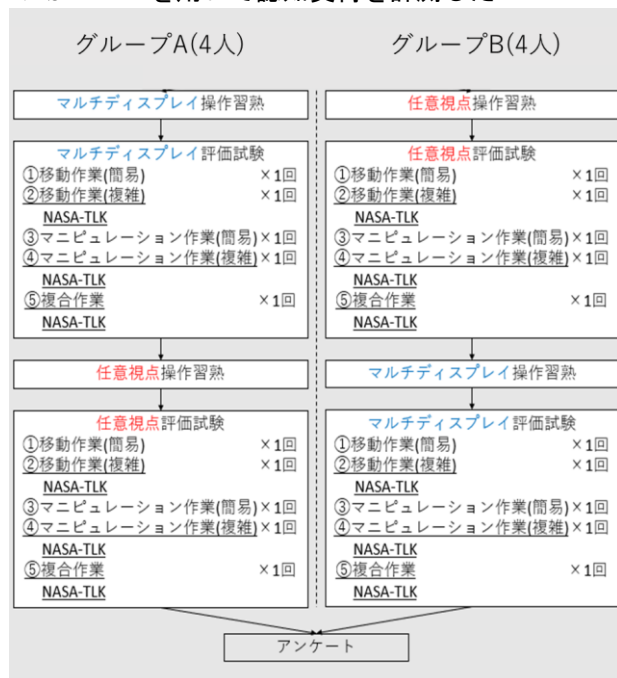


図6 実験フロー

### 3.3 実験結果と考察

#### 3.3.1 作業時間

各タスクの作業時間を図7に示す。Wilcoxonの符号付順位和検定を用いた結果、複雑な移動作業と複合作業において有意差が確認されたが、単純な移動作業、単純なマニピュレーション作業と複雑なマニピュレーション作業において有意差が確認できなかった。

複雑な移動の作業時間は有意に低減できたが、単純な移動の作業時間に差は見られなかった要因について考察する。図5(a)に示すように単純な移動では障害物が一切なく、直進と90°の方向転換のみである。対して図5(b)に示すように複雑な移動では多数の障害物を避けたり、狭い経路を通過する必要がある。つまり、単純な移動作業では被験者に要求される操作精度が低かった一方で、複雑な作業では要求される操作精度が極めて高かったと考えられる。そのため、従来のマルチディスプレイにおいて単純な移動作業では1つの映像のみから必要な情報を獲得し操作可能であるが、複雑な移動作業では複数の映像を見比べて情報を獲得し統合する必要があったため、その分作業時間が長くなったと考えられる。しかし、提案する巨人視点インターフェースを用いると、複数のディスプレイを見比べたり、頭の中で情報を統合する必要がなくなると考えられる。以上から、要求精度が高い移動作業にとって提案する手

■ マルチディスプレイ ■ 提案手法

(N=8, Wilcoxon Signed-Rank Test,  $t: p<0.1$ ,  $*: p<0.05$ )

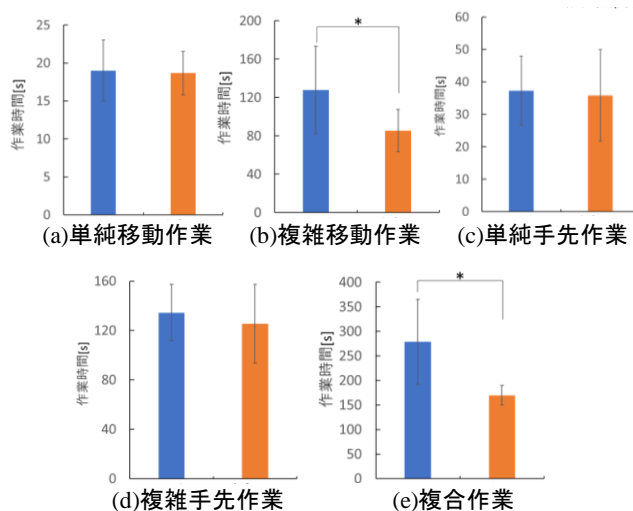


図7 作業時間

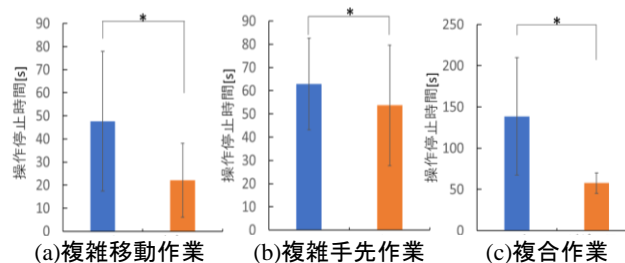


図8 操作停止時間

法により提供された任意視点からの映像が効果的だと考えられる。

次に、複雑なマニピュレーションの作業時間が低減できなかった要因を考察する。提案するインターフェースの視点移動の自由度が非常に高い点の特徴である。そのため、マニピュレーション作業を行う際に公的な画角を瞬時に見つけることが出来ず、不要な視点移動や非効率的な視点移動が生じることで作業時間が低減できなかったと考えられる。

#### 3.3.2 操作停止時間

複雑な移動作業、複雑なマニピュレーション作業と複合作業における操作停止時間の結果を図8に示す。Wilcoxonの符号付順位和検定を用いた結果、全ての作業において有意差が確認された。

提案するインターフェースにより能動的な視点移動ができ、かつ連続映像を提示可能なため、被験者が必要としている情報を瞬時に獲得でき、探索する時間が短縮されたため、操作停止時間が低減できたと考えられる。

#### 3.3.3 誤接触回数・配置誤差

複雑な移動作業と複合作業における移動中の誤接触回数の結果を図9に示し、複雑なマニピュレーション作業と複合作業における配置誤差の結果を図10に示す。配置誤差とは、配置先である正方形

ボックスの中心と実際に配置された丸太の中心位置のずれである。ボックスと丸太の中心間の距離のみを測定し、回転角度は考慮しない。結果として、誤接触回数と配置誤差において有意に低減したことが確認され、提案するインターフェースを用いることにより作業精度が向上する可能性が示唆された。

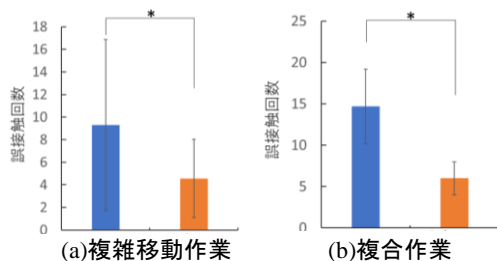


図9 誤接触回数

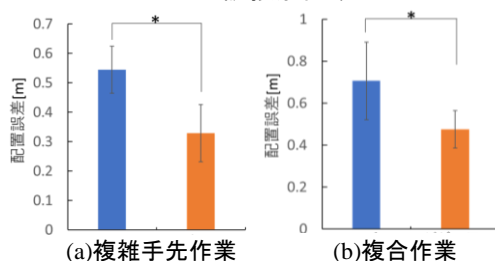


図10 配置誤差

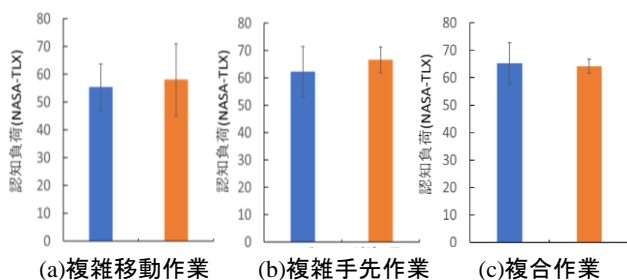


図11 認知負荷

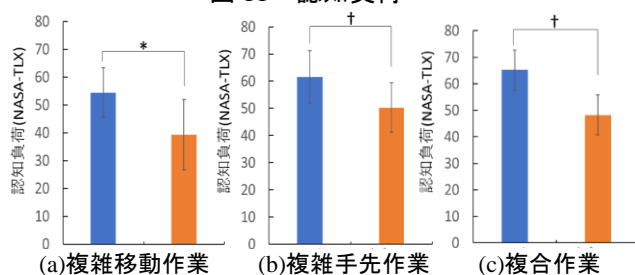


図12 身体的要求を除いた認知負荷

### 3.3.4 認知負荷

図11に複雑な移動作業、複雑なマニピュレーション作業と複合作業における認知負荷の結果を示す。いずれの作業でも認知負荷が有意に低減できなかった。これは提案するインターフェースでは、能動的な視点移動を実現するために、被験者は作業状態に応じて歩き回ったり、腰を屈めたりする必要があるため身体的な負担が大きいためと考えられる。一方で、マルチディスプレイでは頭を回転する必要が

なく、座った状態で操作できるため身体的な負担が小さい。

巨人視点インターフェースにより身体への負担は大きくなるが、図12に示すような身体的要求を除いたNASA-TLXの得点より、作業に対する精神的な負担を軽減させられる可能性が示唆された。

## 4. 結論

本研究では、無人化施工の作業効率を向上させるために、頭部動作に応じた任意視点からの連続映像を提供できる巨人視点インターフェースを提案した。提案した手法の有効性を確認するため、従来のマルチディスプレイによる映像提示手法との比較実験を行った。その結果、提案手法によりオペレータが作業現場の状況を容易に把握でき、移動作業と複合作業の作業効率を改善できることが確認された。また、提案手法はカメラオペレータが不要で、建機オペレータが能動的に視点移動でき、必要としている情報を瞬時に獲得できるため、操作停止時間、誤接触回数と配置誤差の低減が可能になる。

今後の課題として、無人化施工では長時間の作業が要求されるが、提案手法による身体的負担が大きく、長時間の作業に不向きである。そのため、身体的負担の更なる低減を実現できる手法を考案する必要がある。また、実際の無人化施工現場で提案手法を運用するため、HMDを用いたドローンの制御手法を検討していく。

## 参考文献

- [1] 茂木 正晴, 山元 弘: “無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動”, 計測と制御, vol. 55, no. 6, pp. 495-500, 2016.
- [2] 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. 47-50, 2013.
- [3] 山口崇, 吉田正, 石松豊: “遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査”, 土木学会第59回年次学術講演会, p. 373, 2004.
- [4] 桐林星河, 葉師川楓, 五十嵐傑, 永谷圭司: “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 2018, p. 2, 2018.
- [5] 橋本毅, 山内元貴, 新田恭士: “無人化施工へのHMDの活用について”, 土木研究所 技術推進本部, p. 2, 2019.
- [6] 梶田洋規, 伊藤禎宣, 橋本毅: “無人化施工技術における生産性向上に向けた取組み”, 土木技術資料, vol. 59, no. 1, p. 33, 2017.
- [7] 斎藤英喜, 岸本大海: “ヘッドマウントディスプレイによる立体視についての研究”, モバイル学会シンポジウム, pp. 23-30, 2010.