

無人化施工へのHMDの活用について

橋本 毅¹・山内元貴¹・新田恭士¹

¹ (国研) 土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

災害発生後の被害拡大防止や早期の復旧は二次災害の危険性が高いため、遠方より遠隔操作が可能な建設機械を用いた「無人化施工」が用いられる。一般的に無人化施工では、安全地域に多数のディスプレイやPCを設置した運転室を構築し、オペレータはそこから建設機械の操作を行うが、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る運転室の構築時間の遅延が、迅速な無人化施工の展開に対する課題点となっている。本報では、上記の課題点に対する解決策として、頭部装着型ディスプレイ(以下HMD)の活用を提案し、実際にHMDを用いた2種類のシステム検証実験の結果を述べる

キーワード 無人化施工, 遠隔操作, HMD, VR

1. はじめに

我が国はこれまで地震や火山、台風、津波といった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の災害緊急対応を迅速に行うことが非常に重要であるが、これらの対応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極めて困難である。このような危険箇所での施工では、遠方より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ことで、安全に施工することが可能となる。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年度に実施された「雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験工事」

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¹⁾。

施工現場と安全地域が離れており肉眼で建設機械を操作できない場合、建設機械に搭載されたカメラの映像や建設機械外に設置したカメラの映像などを安全地域に設置したディスプレイに表示し、オペレータはそれらの映像から現場の状況を判断し建設機械の操作を行う(図-1)。この場合、オペレータの労働環境や各種機器の保全などから、一般的には安全地域に運転室を構築することが必要となる。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る運転室の構築時間の遅延が、迅速な無人化施工の展開に対する課題点のひとつとなっている。

本報は、上記の課題点に対する解決策として、頭部装



図-1 無人化施工概要



図-2 頭部装着型ディスプレイ (HMD)



図-3 HMD一式

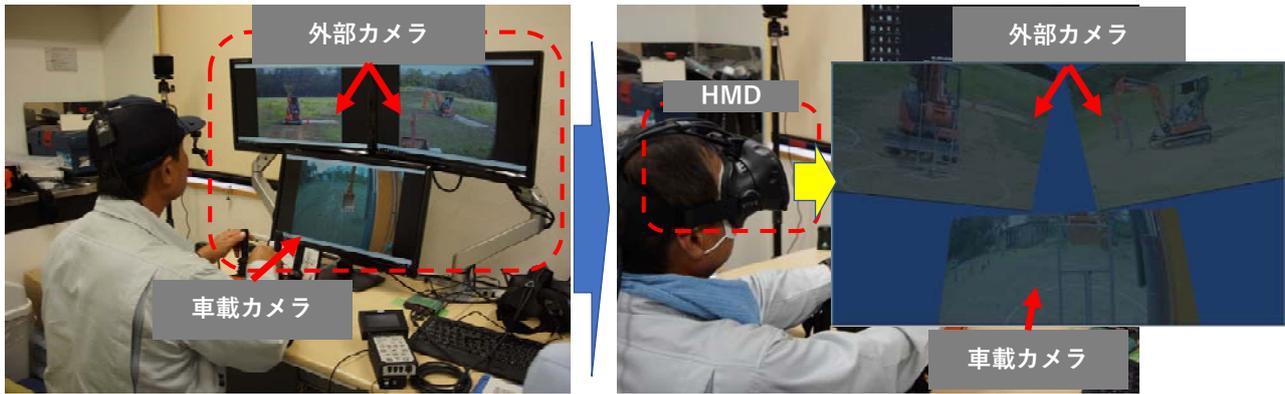


図-4 複数映像表示システム

着型ディスプレイ(以下HMD)の活用を提案するものである。次章にてHMDの有効性を述べるとともに、3章以降に実際にHMDを用いた2種類のシステムの概要と、従来のディスプレイを用いたシステムと比較した施工効率およびオペレータ使用感に関する検証実験の結果を述べる。

2. HMDの有効性

HMDは図-2のように頭部に装着するディスプレイであり、これを利用することにより図-1に示したディスプレイ類をすべて省略することが可能となる。またHMDそのものはコンパクトで軽量(本研究で使用したHTC社製VIVEの場合一式約3kg、図-3)であるため、可搬性に優れており、多数のディスプレイに比べると災害現場へ容易に到着できる利点がある。さらにディスプレイのように机や架台、広い場所を必要としないため広い運転室が必要なくなり、場合によっては乗用車内から操作をすることも可能となる。したがって、HMDの活用は災害地域への迅速な無人化施工の展開に有効であるといえる。

上記利点を実現する具体的なシステムとして、本研究では「複数映像表示システム」「VRシステム」の2種類のシステムを提案・開発した。それぞれの概要および検証実験について次章以降に述べる。

3. 提案システム1「複数映像表示システム」

(1) 複数映像表示システム概略

カメラ映像を介して無人化施工を行う場合、一般的には建設機械運転席付近に設置したカメラ(車載カメラ)と、建設機械周辺状況を把握するため作業地域全体を俯瞰でとらえるカメラ(外部カメラ)の映像を見てオペレータは操作を行う。この手法は「雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験工事」にて確立され、現在では主流となっているものである。本章で提案する複数映像表示システムは、これらの映像の配置、大きさをほぼ同等にHMD内部に再現し、オペレータに表示するもの

表-1 複数映像表示システム検証実験オペレータ

	年齢	経験年数
A	38	20
B	35	10
C	34	10
D	34	10
E	30	15
F	32	10
G	31	15
H	46	20
I	39	15
J	57	30

である²⁾(図-4)。この方法の場合、カメラ、通信機器などは従来機器をそのまま流用することができるため、比較的システム構築が容易である。

(2) 検証実験概要

複数映像表示システムと従来のディスプレイを用いたシステム(以下従来システム)との、施工効率およびオペレータ使用感に関する比較・検証実験を行った。実験は茂木らが提案した³⁾モデルタスクを用いて行うものとした(詳細は参考文献3)参照)。参加したオペレータ10名を表-1に示す。各オペレータは従来システムを用いた操作、および複数映像表示システムを用いた操作をそれぞれ10回ずつ行い、モデルタスクにかかる時間(以下サイクルタイム)を計測した。

(3) 実験結果

10名それぞれの4回目以降のサイクルタイムを平均したものを図-5に示す。ここで4回目以降のサイクルタイムを採用したのは、モデルタスクに対するオペレータの「習熟度」の影響を排除するためである。また、各オペレータにおけるサイクルタイムの差異が有意であるかを調べるためにt検定を行い、有意確率pが0.05より小さい場合は有意差があるとし、グラフに★印を追記した。

図-5によると、10名中3名のオペレータでは従来システムと複数映像表示システムを用いた場合のサイクルタイム差に有意差があるとはいえないが、残り7名のオペレータにはサイクルタイムに有意差があり、すべて複

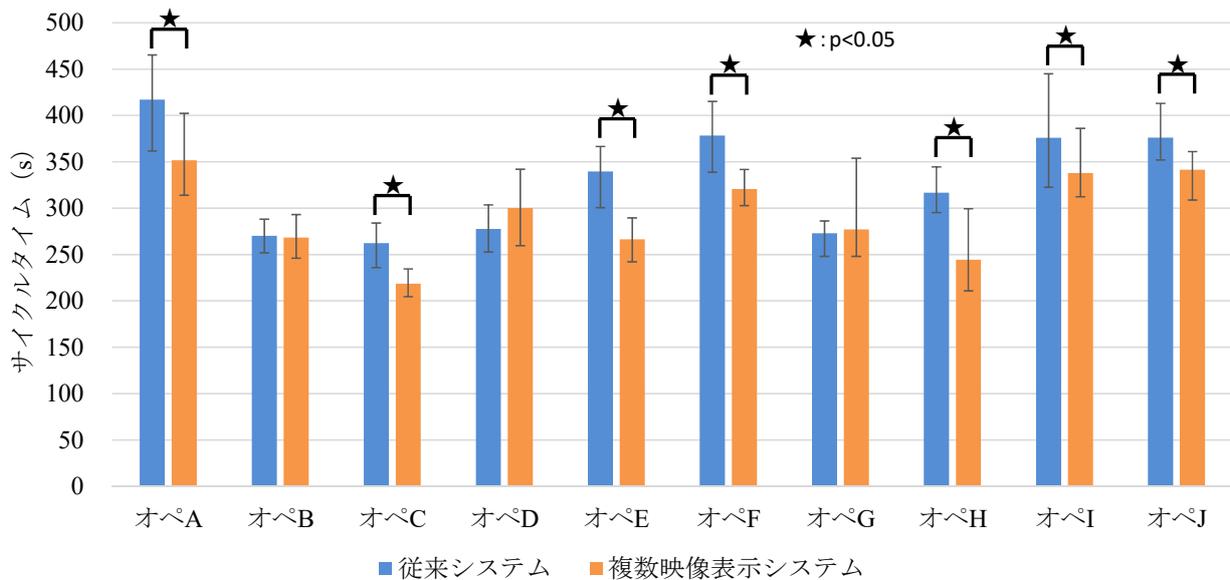


図-5 複数画像表示システム検証実験サイクルタイム



図-6 VRシステム概略図



図-7 VRシステムHMD内部映像

数画像表示システムのサイクルタイムの方が短い、すなわち施工効率が高いことがわかる。このことから、複数画像表示システム用いた場合の施工効率は従来システムと同等以上であるといえる。

また、実験後オペレータの複数画像表示システムを使用した感想を調査した。その結果、操作のやりやすさに関する感想では、10名中2名から「操作しやすい」、1名から「操作しにくい」残り7名は「あまり変わらない」との回答があり、操作のやりやすさに関しては、複

数画像表示システムは従来システムとおおむね同等と考えられる。

一方装着感に関する感想では、10名中6名から「HMDが重い、窮屈、暑い」などの回答があった。HMD本体質量は約500gと軽量ではあるが、オペレータは通常顔面に装置を装着することはほとんどないため、HMDが大きな違和感を引き起こしていると考えられる。この点は今後の課題であると言える。

4. 提案システム2「VRシステム」

(1) VRシステム概略

本章で提案するVRシステムは、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⁴⁾(図-6, 7)。この方法の場合、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である。しかし、ステレオ魚

眼カメラを使用しているため建設機械～運転者間の無線通信容量が大きく、さらにその通信を低遅延で行いたいため、本システムでは専用無線（5GHz帯無線）を左右それぞれのカメラに使用している。その結果、通信容量は約1.5Gbps×2台、通信システムのみでの遅延時間は約9msとなった。

(2) 検証実験概要

VRシステムと従来システムとの、施工効率およびオペレータ使用感に関する比較・検証実験を3章と同様にモデルタスク³⁾を用いて行った。参加したオペレータ5名を表-2に示す。

(3) 実験結果

3章と同様に5名それぞれの4回目以降のサイクルタイムの平均値、および有意確率pが0.05より小さくなったオペレータに★印を追記したものを図-8に示す。

図-8によると、5名中4名のオペレータでは従来システムとVRシステムを用いた場合のサイクルタイム差に有意差があるとはいえないが、残り1名のオペレータにはサイクルタイムに有意差があり、すべてVRシステムのサイクルタイムの方が短い、すなわち施工効率が高いことがわかる。このことから、VRシステム用いた場合の施工効率は従来システムと同等以上であるといえる。

また、実験後オペレータにVRシステムを使用した感想を調査した。その結果、操作のやりやすさに関する感想では、5名中4名から「操作しやすい」、1名から「操作しにくい（VR酔いをおこした）」との回答があり、操作のやりやすさに関しては、VRシステムは従来システムとおおむね同等と考えられる。しかしVR酔いに関しては今後の課題であると言える。

一方装着感に関する感想では、5名全員から「HMDが重い、窮屈、暑い」などの回答があった。3章と同様にこの点も今後の課題であると言える。

5. まとめ

災害発生地域への迅速な無人化施工の展開を目標として、HMDを活用した無人化施工システムの提案を行った。HMDの有効性を整理したところ、HMDの活用は迅速な無人化施工の展開に効果的であることが確認できた。

また、HMDを活用した具体的なシステムとして、「複数映像表示システム」「VRシステム」の2種類のシステムを提案・開発し、従来システムと比較した施工効率およびオペレータ使用感に関する検証実験を行った。その結果、両システムともに施工効率は従来システムと同等以上、操作のやりやすさも従来システム

表-2 VRシステム検証実験オペレータ

	年齢	経験年数
K	49	0
L	34	10
M	30	15
N	22	1
O	34	10

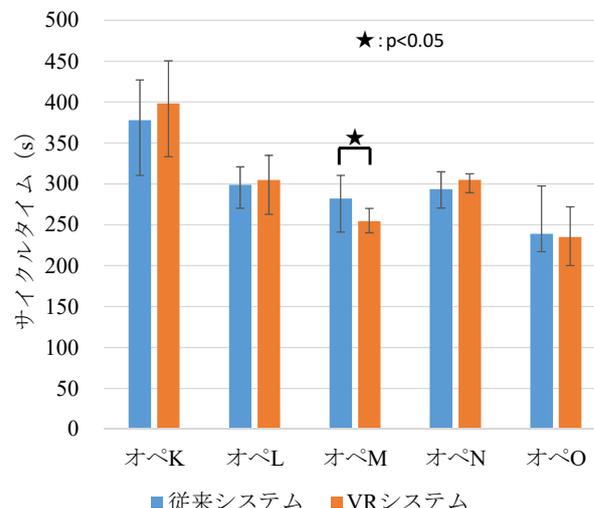


図-8 VRシステム検証実験サイクルタイム

とおおむね同等であることが判明した。一方、「HMDが重い、窮屈、暑い」という装着感や、VRシステムにおけるVR酔いに関しては今後の課題であることも判明した。今後さらなる研究を行っていきたい。

なお、本研究では、複数映像表示システム、VRシステムの比較検証は行っていない。両システムはどちらが優れているといったものではなく、現場の状況に応じて使い分けられるべきと考えている。

また、本VRシステムは大成建設(株)にて開発されたものを使用し、検証実験は大成建設(株)と土木研究所との共同研究にて実施したものである。

参考文献

- 1) 新田恭士：災害復旧に貢献する無人化施工技术，土木技術，Vol. 67, No. 4, pp. 16-23, 2012.
- 2) 山内元貴、橋本毅、藤野健一：HMDを用いた遠隔操作型油圧ショベルの視覚提示システムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会2018、2A2-A04、2018.
- 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，Vol. 66, No. 8, pp. 71-79, 2014.
- 4) 加藤崇、木下勇人、西田与志雄、橋本毅、山田充：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.