



ヘッドマウントディスプレイを用いた遠隔操縦システムの提案と仮想空間における評価

Development and Evaluation of a Remote-Control System Using a Head-Mounted Display in the Virtual Environments

田窪 溪太¹⁾, 上村 圭右¹⁾
Keita TAKUBO and Keisuke UEMURA

1) 防衛装備庁 陸上装備研究所（〒252-0206 神奈川県相模原市中央区淵野辺 2-9-54）

概要：近年、災害現場等の人が立ち入って作業を実施することができない環境における車両、作業装置の遠隔操縦について活発に研究・開発がなされている。本研究では、車両または作業装置の遠隔操縦を想定し、それらを HMD によって操縦するシステムを構築、従来の遠隔操縦方法であるディスプレイによる操縦と比較して、3 次元点群と HMD による操縦システムの利点、改善点を確認する。また、主観的な評価手法である NASA-TLX, Cooper-Harper Rating Scale による評価も実施し、認知負荷等の計測も実施する。

キーワード：ヘッドマウントディスプレイ、遠隔操縦、3 次元点群、主観的な評価

1. 研究背景

災害現場での作業等、人間が立ち入って作業を行うことが危険である場面では、無人車両による対処が求められており、日々研究が進められている。近年では、技術の進歩とともに各種センサの性能の向上と、5G 規格の普及等に見られる通信の伝送量の増加に伴い、各分野では遠隔による機器の操縦の試みが数多くなされている[1,2]。しかし、車両、機器の操縦は依然としてオペレータの技量に大きく依存しており、習熟訓練には多大なコストと時間が必要となる。また、より最適な操縦のためには、操縦対象の状態やその周囲の環境を適切に認識する必要性もある。特に、近年、活発に研究がなされている無人化施工においては、操縦者がディスプレイを見ながら遠隔操縦する場合、作業用車両にオペレータが実際に乗り込んで作業をする場合と比べ、操縦する対象物の周辺環境の認識不足により作業効率が低下することが示唆されている[3]。

一方、近年、HMD(Head Mounted Display)の技術進展やコスト低減により、産業分野で幅広く使用されるようになってきている。そこで本研究では、将来の無人機、作業装置に適用が期待される 3 次元点群と HMD による立体的な環境認識手法を提案し、シミュレータ上で仮想的に遠隔操縦を行うことで検証を実施した。また、今回提案する HMD による遠隔操縦システムについて、ユーザの主観的な指標も取り入れ評価を実施した。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

本研究では、操縦対象から得られる 3 次元点群を、操縦者が HMD で観測し、コントローラによって操縦するシステムを構築した。図 1 に提案システムの概要を示す。

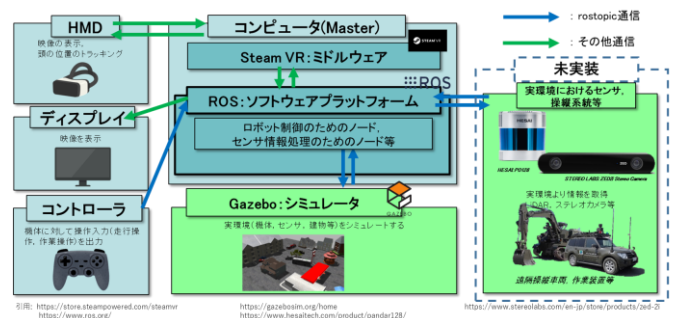


図 1:本システムの構成

車両、機器に取り付けたセンサから得た 3 次元点群を HMD に投影し、操縦者に伝える。操縦者はその情報をもとにコントローラを操縦し、車両、機器を動かす。

なお、本システムはオープンソースのロボット開発ソフトウェアである ROS(Robot Operating System)[4]上のモジュールとして構成されており、センサや操縦信号はノードと呼ばれるソフトウェア単位での通信で実施されている。また、仮想環境は、ROS の標準シミュレータである Gazebo[5]で構築した。

3. シミュレータによる試験

3.1 試験環境

シミュレーションでは、車両の走行と作業装置を模したロボットアームによる作業を想定したタスクを用意し、それぞれの試験においてディスプレイを用いた操縦と、HMDを用いた操縦の2通りの試験を実施した。図2に試験の際の様子を示す。車両及びロボットアームの操縦には無線通信によるゲームパッドを使用した。



図2：試験風景(上：ディスプレイ，下：HMD)

3.2 使用機材

本試験で使用した機材について以下に示す。

- ・試験用コンピュータ
- ・HMD (HTC VIVE Pro Eye)
- ・ディスプレイ (アイ・オーデータ EX-LDGC252STB)
- ・コントローラ (Microsoft Xbox Controller)

3.3 試験条件(車両操縦試験)

一般的なディスプレイでは把握しづらいと考えられる狭路等の操縦難易度の高いコースを設定した。そのため、日本国内で運転免許を取得する際に、運転者の技量を確かめるために使用される試験コースを活用した。道路交通法施行規則別表第3[6]に基づき、屈折路、曲線路、鋭角及び方向転換セクションを含むコースを作成し、可能な限り素早く、ミスがないように走破することをタスクとした。また、車両モデルについては先行研究である CBRN 対応遠隔操縦作業車両システムで使用した中継車両[7]を元に作成した。図3に試験コースの外観及び表示画面を示す。各セクションの間には、全長 15m の緩衝区域を設け、次のセクションに移るまでに車両の姿勢を整えられるようにした。本試験において、被験者が車両をできる限り迅速かつ、脱輪、切り返しをすることなくゴールまで走行させることを目的とした。また車両については、一般的

なステアリング機構を持つ車両を用意し、車両のルーフ部の四方に4つのRGB-Dカメラを装着した。HMDの視点軸は車両の重心軸に固定されており、視点軸は車両の移動とともに移動する。操縦者は車両の周りを自由に移動しながら、RGB-Dカメラにより取得した車両の周囲を観測できるものとした。

計測項目は、タスク遂行時間、走行軌跡、切り返した回数、脱輪の回数であり、試験実施後、主観的評価及びアンケートを実施した。

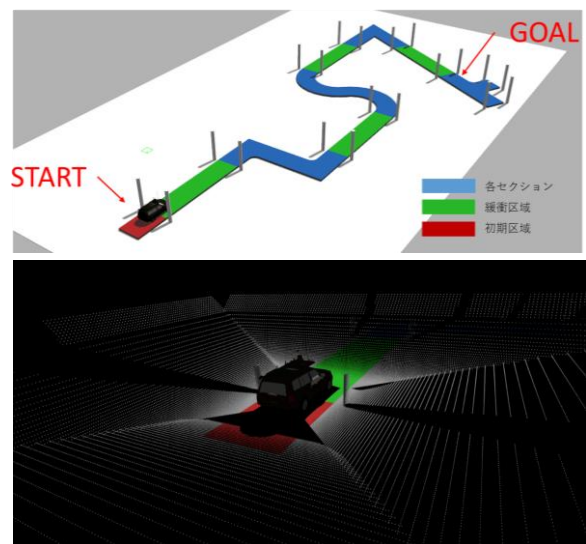


図3：車両操縦試験風景

(上：仮想空間外観，下：操縦者が観測する画面)

3.4 試験条件(ロボットアーム操縦試験)

ロボットアームに取り付けたセンサから得られる3次元点群をもとに、4自由度のロボットアームを操縦し、対象物を移動させるタスクを想定した。図4に、ロボットアームと試験装置の概要を示す。

本試験において、被験者はコントローラによりロボットアームを操縦し、可能な限り素早く、かつロボットアームを目標物以外に接触させないようにしつつ、3つの対象区画からロボットアームの先端を使って目標物を出すことを目的とした。ロボットアームは、Universal Robotics社のUR5のバーチャルモデル[8]を使用し、地表と固定されている部分から数えて1番目のジョイントが鉛直方向の軸周りに回転し、2番目、3番目のジョイントが水平方向の軸周りに回転する。また、1番目のリンクと3番目のリンクに周辺環境を認識するためのRGB-Dカメラを固定した。なお、HMDの視点軸は地面に固定されており、操縦者はロボットアームの周囲を自由に移動しながらロボットアーム、対象物を観測できるものとした。

計測項目は、タスク遂行時間、ロボットアームと目標物以外の物体との接触回数であり、試験実施後、主観的評価及びアンケートを実施した。

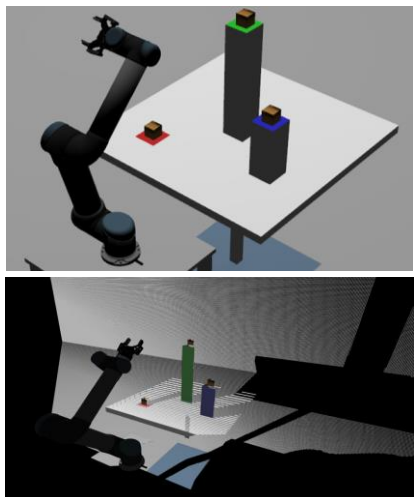


図 4: ロボットアーム操縦試験風景
(上：仮想空間外観，下：操縦者が観測する画面)

4. 主観的評価

本試験では、タスク遂行時間等の客観的指標に加えて、操縦者の主観による主観的評価も実施した。評価手法としてはCooper Harper Rating Scale[9]とNASA-TLX[10]を使用した。

4.1 評価手法 (Cooper Harper Rating Scale)

Cooper-Harper Rating Scale(CHRS)は、テストパイロットなどが航空機の操縦特性（操縦しやすさ）を評価するために使用する一連の基準である。本試験では、試験終了時にフローチャートを使用し、1～10の数値で評価を実施する。低い数値は、操縦しやすいことを示し、数値が大きい程、操作が困難であることを示している。

4.2 評価手法 (NASA-TLX)

NASA-TLX(Task Load Index)とは、タスクの認知負荷（ワークロード）を定量化の手法である。6つの評価項目（精神的な要求、身体的な要求、時間的切迫感、作業達成度、努力、フラストレーション）に対し、対象タスクに対して、一対比較により、評価項目の重みづけ係数を算出し、重みづけ係数による平均値 WWL(Weighted Workload)を算出する。1～100で評価され、数値が大きい程、認知負荷が大きいことを示している。

5. 試験結果

5.1 試験結果 (車両操縦試験)

表 1 に車両操縦試験における定量的評価の結果を示す。

表 1：試験結果 (車両操縦試験)

被験者	計測項目	車両操縦試験 (ディスプレイによる)			車両操縦試験 (HMD ゴーグルによる)		
		1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
A	タスク遂行時間(sec.)	243.9	224.6	230.4	207.3	182.5	172.2
	切り返し回数	11	7	6	4	4	2
	脱輪回数	5	5	4	2	6	4
B	タスク遂行時間(sec.)	475.1	490.1	521.1	453.7	417.3	358.4
	切り返し回数	7	12	10	4	6	5
	脱輪回数	2	4	4	4	4	3
C	タスク遂行時間(sec.)	326.6	346.0	312.1	338.1	291.1	292.9
	切り返し回数	3	3	3	4	5	4
	脱輪回数	3	2	1	3	0	0

5.2 試験結果 (ロボットアーム操縦試験)

表 2 にロボットアーム操縦試験における定量的評価の結果を示す。

表 2：試験結果 (ロボットアーム操縦試験)

被験者	計測項目	ロボットアーム操縦試験 (ディスプレイによる)			ロボットアーム操縦試験 (HMD ゴーグルによる)		
		1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
A	タスク遂行時間(sec.)	373.6	247.7	111.7	303.7	127.8	117.4
	入力回数	629	468	324	868	353	328
	接触回数	1	3	2	1	2	1
B	タスク遂行時間(sec.)	594.6	521.6	484.5	574.3	341.1	178.8
	入力回数	609	586	566	810	581	346
	接触回数	2	2	2	1	3	1
C	タスク遂行時間(sec.)	223.3	256.5	225.9	276.3	167.1	438.7
	入力回数	449	486	495	662	467	990
	接触回数	1	2	4	1	4	1

5.3 試験結果 (各試験における主観的評価結果)

表 3 に各試験における主観的評価の結果を示す。

表 3：試験結果 (主観的評価)

被験者	主観的評価手法	車両操縦試験 (ディスプレイによる)	車両操縦試験 (HMD による)	ロボットアーム操縦試験 (ディスプレイによる)	ロボットアーム操縦試験 (HMD による)
A	NASA-TLX	67	68	84	42
	CHRS	4	3	5	1
B	NASA-TLX	72	68	82	68
	CHRS	4	4	5	4
C	NASA-TLX	53	63	64	51
	CHRS	3	4	5	5

6. 考察

6.1 車両操縦試験及びロボットアーム操縦試験について

主観的評価の結果、車両操縦試験においてはディスプレイ及び HMD による操縦の間に有意な差は見受けられなかった。これは被験者の全員が真上から車両を見下ろす視点で操縦を行っている時間が大半であり、ディスプレイと HMD の差が感じられなかったことが要因だと考えられる。一方、タスク遂行時間や脱輪回数については、ディスプレイよりも HMD によるものの方が良い結果が見られた。同様に、タスク遂行時間も改善された。この理由としては、ディスプレイに比べ、HMD では自分の頭を動かすことによって直感的に視点を変更できるため、視点変更に要する時間が短くなる点、また、立体的に車両位置を把握できるため、コース上の位置、速度感などをより把握できた点が要因として考えられる。

ロボットアーム操縦試験においては、主観的評価の結果、特に NASA-TLX の評価において、一貫して HMD の方が低く、認知負荷が低い傾向がみられた。これはロボットアームの操縦においてはアームと目標物の位置関係を正確に把握する必要があり、その点において HMD による立体視を伴った操縦は有用であったと考えられる。また、タスク遂行時間についても概ね HMD による操縦の方がより短い時間で完了している傾向が見られた。

試験の結果、特にロボットアームの操縦において、HMD を用いた遠隔操縦システムは、環境認識、特に物体の位置関係を把握可能なことから、非常に有望な技術だと考えら

れる。

6.2 HMD による操縦について

HMD による情報提示方法では、アンケートの結果、被験者にいわゆる VR 酔いの症状があったことが分かった。これは特に車両操縦試験の際に見られ、自動車等の移動する乗り物に固定されている視覚情報と体の感覚との不一致による発生する不快感であり、動揺病であると考えられる。[11]。特に画面の大きなディスプレイや HMD は視覚のほぼすべてを覆うためその傾向がより強くなる[12]。

本試験において、車両試験の場合は、タスク遂行時間、切り返し回数、脱輪回数といった性能指標が向上しているにもかかわらず、NASA-TLX や CHRS による主観的評価指標によると操縦性が悪化していることが確認された。一方、ロボットアーム操縦試験では、主観的評価手法においても操縦性の改善が見られた。これについて、まず、車両操縦試験の場合、3D 空間に投影される点群は、車両に取り付けられたセンサから得られた情報を基に構成されるため、車両座標系に投影される。そのため、車両が移動すると点群もそれに従って移動し、被験者は視覚からの情報により自分が移動する車両に乗っているように認識するが、実際は静止した状態で操縦を行っているため、被験者は酔いを感じたと考えられる。一方、ロボットアーム操縦試験においては、アンケートの結果、「HMD を使用するとロボットアーム操縦試験ではアーム先端と目標物の位置関係が分かりやすい」という意見もあり、ロボットアームを操縦する場合では、HMD の利点を感じられたことが原因と考えられる。

6.3 コントローラについて

本試験では、車両操縦試験において車両を操縦するためのコントローラとして一般的であるハンドル、アクセル、ブレーキを模したコントローラではなく、両手で保持して使用するゲーム用のコントローラを使用した。これは、HMD を装着し、動き回っている状態でも操縦を可能とするためであるが、本コントローラの使用経験がなく、ゲームに不慣れな被験者は、当初操縦に苦勞する様子が見られた。本事象は被験者がコントローラでの操縦に習熟すれば解消されることが考えられるが、より容易に操縦できるコントローラを設計することも課題として考えられる。

7. 結論

本研究では無人機の遠隔操縦のための情報提示方法について、HMD による情報提示システムを構築し、車両の操縦やロボットアームの操縦についてシミュレータを用いて検証を行い、主観的評価手法等により有用性の検証を行った他、技術的課題点を抽出した。

HMD による情報提示システムを構築し、本システムについて、車両を操縦する場合と、作業装置を想定したロボットアームを操縦する場合について、シミュレータを用いて検証実験を行った。検証実験では、ディスプレイを用いる場合と、HMD を用いる場合について行い、それぞれ

比較検討を行った。比較検討の中では、操縦入力や車両軌跡等の計測データに加え、Cooper-Harper Rating Scale と NASA-TLX などの主観的評価手法を用いて、被験者の主観的な評価も行った。車両走行試験及びロボットアーム操縦試験のいずれの検証試験においても、HMD によって操縦対象と目標物との位置関係を正確にかつ立体的に把握できたことが、より最適な操縦動作につながったことを確認した。

参考文献

- [1] 古屋, 建設機械の遠隔施工における 5G の導入 無人化施工における新しい挑戦, July 2018, Vol. 70, No. 7, p. 40-44
- [2] 新田他, 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-, 建設ロボットシンポジウム論文集, September 2012, Vol. 13, p. 41-51
- [3] 藤野他, 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(土木情報学), 2018, Vol. 74, No. 1, p. 11-17
- [4] ROS.org, “ROS Documentation”, ROS Wiki, <http://wiki.ros.org/Documentation>
- [5] GazeboSim.org, “About Gazebo”, gazebosim.org, <https://gazebosim.org/about>
- [6] “昭和三十五年総理府令第六十号道路交通法施行規則別表第三(第三十二条関係)” https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=335M50000002060_20221001_504M60000002054
- [7] 重松他, CBRN 対応遠隔操縦作業車両システムの研究, 第 15 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予稿集, 2014, 3E3-4
- [8] Github.com, “Github - utecrobotics/ur5:UR5 Robot with a Robotiq gripper”, github.com, <https://github.com/utecrobotics/ur5>
- [9] G.E. Cooper et al., The Use of Pilot Rating in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities, April 1969, NASA TN D-5153
- [10] S.G. Hart et al., “Development of NASA-TLX(Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, HUMAN MENTAL WORKLOAD, North-Holland, Elsevier Science Publisher B.V. 1988, p. 139-183
http://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/downloads/Hart_Staveland_ORIGINAL_1.pdf
- [11] 岩田, 設計技術シリーズ VR 実践講座 HMD を超える 4 つのキーテクノロジー, 科学技術出版株式会社, September 2017, p. 129
- [12] 清水他, 広視野立体画像の提示画角と姿勢制御系における空間認知機構, ITE Technical Report, September 1995, Vol. 19, No. 46, p. 7-12