

自然災害現場の復旧に供する重機の遠隔操縦システムに関する研究

坂上 祥太郎^{1,a)} 松林 勝志^{1,b)} 山下 晃弘^{1,c)} 佐藤 悠之輔² 岡田 航¹ 瀧島 和則³ 飛鳥馬 翼⁴
古川 敦⁴ 畑本 浩伸⁴ 天下井 哲生⁴ 北原 成郎⁴

概要: VRゴーグルと3自由度モーションベースを用いたスポーツ観戦システム「シンクロアスリート」を応用した重機の遠隔操縦システムを開発したので報告する。重機の操縦者は操縦席目線の360°VR映像・音声・動きにより、車両の座席に座っている状況に近い状態で操縦することができ、VRならではの拡張現実により、工事現場を俯瞰する映像等も確認しながら操縦することが可能である。本報告では、システムの実装、酔いにくくするための映像補正、操作性向上のための遅延対策等と評価について述べる。

1. はじめに

日本では毎年自然災害が数多く発生している。平成25年の広島市土砂災害や平成24年・29年に起きた九州北部豪雨等、大小含め平成22年から令和2年の10年間で平均1476件[1]もの土砂災害が発生している。それらの災害現場においては、二次被害防止のため遠隔操縦の無人重機が使われ始めている。無人重機は災害現場近くに設置された操作室で運転士がディスプレイを見ながら操縦する。

しかし、例えば重機が災害現場で斜面上にあり傾いている場合、重機に取り付けてあるカメラも重機とともに傾いているため、映像を見ただけでは水平あるいは緩斜面であると運転士が誤認識してしまう可能性がある。その結果、意図せず重機が斜面に沿ってずり落ち、最悪、横転等の事故に繋がってしまう危険がある。また重機が段差を超える時や掘削する時の振動や音が伝わらないため、運転士が現場での重機の動作状態を体感できず、操縦が難しいだけでなく異常に気がつかないまま作業を続け、故障等を招く危険もある。これらの理由により遠隔操縦時の作業効率

50-60%に低下する[2]とされている。

そこで、ヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)と3自由度モーションベースを使用したスポーツ体感システム「シンクロアスリート」(開発:東京高専, 図1)[4]を重機の遠隔操縦に応用する。重機に設置した高精細4K全天球カメラからの映像に加え、スマートフォンで測定した加速度(車体の動き・傾き・振動)をオペレータが体感できるようにすることで、重機の運転席での操縦に近い状態で操縦できるシステム[5]の開発を行った。

本稿では、遠隔操縦システムの概要、酔いを低減するHMD映像の角度補正、操縦性に影響を与える遅延の低減手法と評価、仮想ディスプレイを用いた作業効率化について述べる。

2. システム概要

本システムのシステム構成を図2に示す。シンクロアスリートを(株)熊谷組筑波技術研究所の研究室内に設置し、走行試験ヤードの不整地運搬車を遠隔操縦する。車両の加速度を取得し送信を行うスマートフォン(Google Nexus 5X)と映像の撮影・送信を行う全天球カメラ(RICHO Theta Z1)2台を不整地運搬車に取り付けた。全天球カメラは運転席からの視界を提供する操縦室車内、及び周囲の様子を確認する操縦室屋根の二箇所に設置した。スマートフォンは操縦室車内の平らな場所に設置した。遠隔操縦システムと、操作信号と映像・加速度データの送受信は(株)熊谷組で研究・運用されているネットワークシステム[6]を利用した。

¹ 東京工業高等専門学校
National Institute of Technology, Tokyo College, Hachioji,
Tokyo 193-0997, Japan

² 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi
441-8580, Japan

³ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi,
Ishikawa 923-1292, Japan

⁴ 株式会社熊谷組
Kumagai Gumi Co.,Ltd., Shinjuku, Tokyo 162-0821, Japan

a) s20610@tokyo.kosen-ac.jp

b) matsu@tokyo-ct.ac.jp

c) yamashita@tokyo-ct.ac.jp



図 1 シンクロアスリート

Fig. 1 Synchro Athlete.

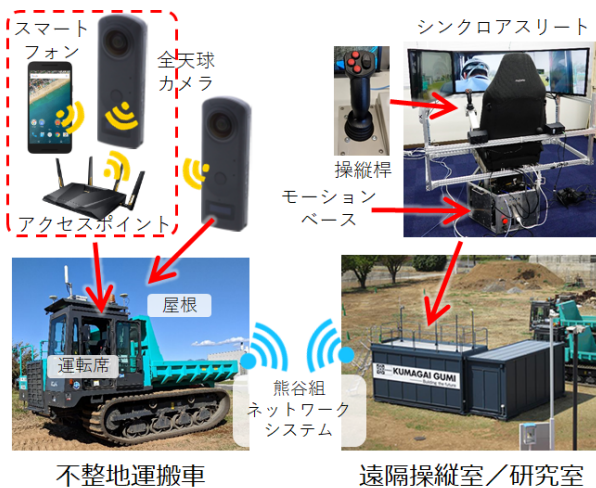


Fig. 2 System configuration diagram.

3. HMD 内映像の角度補正による酔いの低減

3.1 酔いを低減する HMD 映像の角度補正

シンクロアスリートのモーションベースは地球の重力と上下の動きを利用して、車両の加速度を搭乗者に体感させる。モーションベースに取り付けられた座席を前後・左右(ピッチ・ロール)に傾けることで、車両の加速度の方向と重力の方向を一致させ、上下方向の動き(ヒープ)で加速度の大きさを一致させる。HMD は操縦室の座標を基準に搭乗者が顔を向けている方向の視界を提供する。

図 3 に示すように、重機が前方に水平に加速する場合を考える。全地球カメラの前方の映像は①であったとすると、シンクロアスリートでは搭乗者が体感する加速度の方向を地球の重力の方向に合わせるため、座席を後ろに傾け

る。その結果、搭乗者が傾いた分、顔も上を向くことになる。顔に装着された HMD も上を向くため、HMD の映像は②のように見えてしまう。本来①の映像が見えるべきであることから、搭乗者は違和感を感じ酔いの原因になってしまう。また重機が上り斜面にある場合も同様である。そこで、モーションベースの座席の傾き分を②の映像から引き算し補正することで、違和感のない映像に修正する。

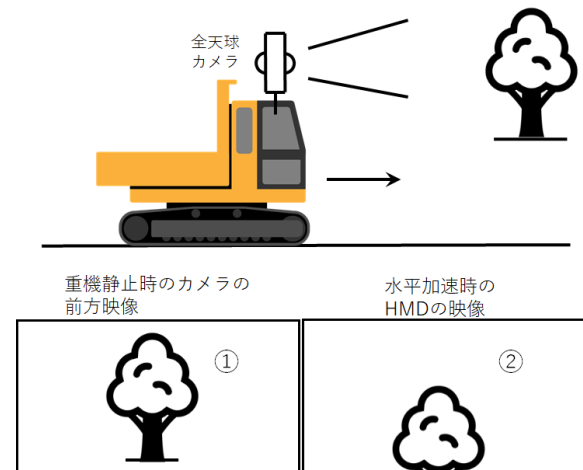


Fig. 3 Angle correction of HMD image.

3.2 座席角度のピックアップ

モーションベースの制御は、動画の再生や、HMD の表示を行うメインコンピュータから、モーションベース制御用マイコンへ各軸の目標値を送信することで行っており、オープンループ制御となっている。各軸の現在位置を

フィードバックしているわけではない。またマイコンでは速度制限や加速度制限をかけ、危険な動きをしないようにモータを制御している。これらのことからメインコンピュータでは座席の傾きを計算することは困難である。そこで装着した物体の位置と角度を正確にトラッキングできる HTC 社の Vive Tracker[3] (図 4) を取り付けることで、座席の傾きをメインコンピュータが検出できるようにした。傾きのデータしか使用しないため、座席上であればどこに取り付けても構わない。



図 4 HTC Vive Tracker
 Fig. 4 HTC Vive Tracker.



図 5 丸の内スポーツフェス 2019
 Fig. 5 MARUNOUCHI SPORTS FES 2019.

表 1 コンテンツ一覧
 Table 1 Contents list.

スポーツ種類	再生時間 [s]	A 人数	B 人数
カヌー	48	113	70
ボブスレー	62	103	49
EV レース	88	35	21
車椅子陸上 400m	72	12	5
スピードスケート (個人)	58	49	26
スピードスケート (団体)	34	5	5
馬場馬術	73	12	13
障害馬術	24	11	6
人数合計	—	340	195

3.3 アンケート調査

HMD に違和感のない映像を表示することで、搭乗者の酔いが軽減できるかどうか、アンケート調査を行った。

2019 年 8 月に東京で開催された「丸の内スポーツフェス 2019」にて、シンクロアスリートの展示依頼があったため、HMD 映像の角度補正を行った筐体 A と、角度補正を行わない筐体 B の 2 台のシンクロアスリートを展示・運用した。シンクロアスリートのリプレイモードにより、あらかじめ用意された各種スポーツのコンテンツを再生し、来場者をランダムに A, B に振り分けた。コンテンツと搭乗人数を表 1 に示す。搭乗後に、タブレットで各種アンケートに答えてもらい、筐体 A で 340 名、筐体 B で 195 名、合計 535 名の方から回答を得た。筐体 B の登場人数が少ないのは、不具合が発生し運用できなかった時間帯があるためである。

アンケートの結果を図 6 に示す。HMD 映像の角度補正を行った結果、約 5.1%の酔いの低減効果が確認できた。搭乗時に背中を椅子に密着させずに座り、腰で椅子の動きを吸収するよう着座していた方も散見されたため、シートベルトなどを取り付け、背中を椅子に密着させて椅子の揺れと顔の揺れが同じになるよう、搭乗者の姿勢を限定した場合は、もう少し効果は高くなると思われる。

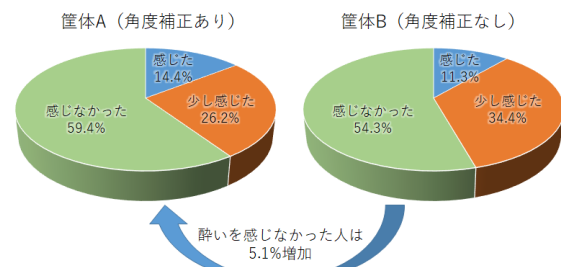


図 6 角度補正の有無による酔いの違い
 Fig. 6 Difference in motion sickness with and without angle correction.

4. 操縦性に影響を与える遅延の低減手法と評価

スポーツ観戦システムとして使う「シンクロアスリート」では、動きと映像を一方向的に享受するだけであるため、映像とモーションベースの動きに大きな時間差がない限り問題にはならない。しかし、遠隔操縦システムとして使う場合は、映像と動きを元に操縦者が重機を遠隔操縦し、その結果である映像と動きの変化を元に更に操作する。そのため遠隔操縦と映像や動きの間に遅延があると操縦性が悪くなり作業効率が低下する。つまり遅延は少ない方が望ましい。遠隔操縦システムの運用実験を開始したところ、最大で 1 秒程度の遅延が発生したため、遅延の低減について検

討を行った。

4.1 遅延の計測

遅延がどの段階で発生しているかを調査する実験を行った。操縦桿を操作してから重機が動くまでの遅延（往路）と、重機が動いてからディスプレイに表示されるまでの映像の遅延（復路）、ネットワーク内の遅延（PING の値）を計測した。映像配信の有無の違いも含め計測を行う。カメラの解像度は、通信量が多い 4K に固定した。

4.1.1 往路の遅延計測

往路実験では、操縦桿のクラクションボタンを押す操作音（ボタンを押す「カチッ」という音）と、実際に鳴った重機のクラクション音を録音することで、遅延を計測した。録音した音声波形を直接観察し、操作音とクラクション音の立ち上がりの時間差を遅延とした。音声のコーデックは 16bit, 44.1kHz, WAV フォーマットである。なお重機とシンクロアスリートの距離は 70m ほどあり、空間を音声伝わる遅延も存在するため、アナログトランシーバをクラクションのホーンの直前と、シンクロアスリート側の録音装置前に設置し、音が空間を伝わる遅延を無視できるようにした。実験の様子を図 7 に示す。遅延は 5 回計測し平均値を計算した。

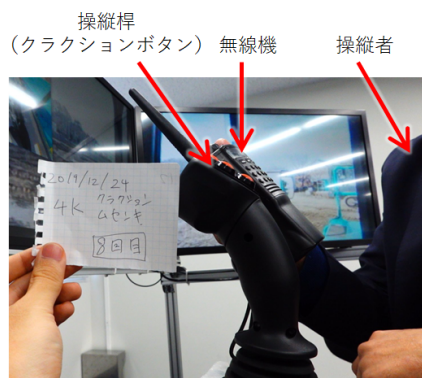


図 7 往路計測実験の様子
 Fig. 7 Measurement of outbound delay.

4.1.2 復路の遅延計測

復路の遅延計測では、時刻を同期させた 2 台のストップウォッチ（スマートフォン）を用いた。一方のスマートフォンを重機運転席のカメラ前に、もう一方のスマートフォンを映像が表示されたシンクロアスリートのディスプレイ横に設置し、ディスプレイとスマートフォンの時間差を計測する。デジタルカメラを用いてディスプレイとスマートフォンを同時に撮影することで、2 台のストップウォッチの時間差を確認した。スマートフォンのリフレッシュレートは 60Hz であることから、分解能は 20ms 程度である。往路と同様、4K 解像度のみ計測した。図 8 は実験の様子である。遅延は 5 回計測し平均値を計算した。

シンクロアスリートのディスプレイに映った重機側ストップウォッチ ← 同期済 → シンクロアスリートが設置されている部屋のストップウォッチ

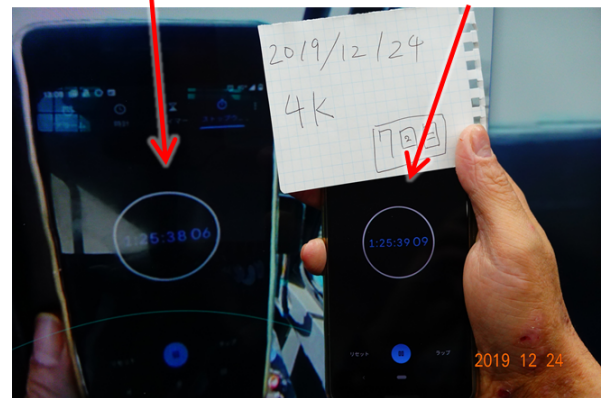


図 8 復路計測実験の様子
 Fig. 8 Measurement of return delay.

4.1.3 ネットワーク内の遅延計測

最後に、ネットワーク内の遅延を確認するために PING の応答時間計測を行った。PING はシンクロアスリートから重機内のカメラに対して送る。他と同様、4K 解像度のみ計測を行った。映像配信をしている時としていない時で、それぞれ 100 回計測を行い平均値を計算した。それぞれの遅延計測結果を表 2 に示す。

表 2 遅延の計測
 Table 2 Result of delay measurement.

計測内容	平均 [ms]	最小 [ms]	最大 [ms]
往路遅延（映像有）	25	20	30
往路遅延（映像無）	30	30	30
復路遅延	925	880	1000
PING 遅延（映像有）	9	3	39
PING 遅延（映像無）	4	3	10

表 2 より、ネットワーク側の遅延よりもカメラ側処理による遅延が支配的ということが判明した。

4.2 カメラ内処理による遅延の計測・評価

カメラ内の処理による遅延を調べる実験を行った。全天球カメラ内では 2 つの魚眼の映像 (Dual Fisheye) から世界地図のように引き伸ばした映像 (Equirectangular) に変換するステッチ処理を行っている。この処理が遅延の主な原因である可能性が高いと考えられるため、まずカメラ内でのステッチ処理の有無・解像度の違いによる遅延を計測する。実験方法は復路遅延の実験と同様である。実験結果を表 3①②④⑤に示す。

ステッチ処理をなくすことにより、4K の解像度の場合 1054ms あった遅延が 412ms まで小さくなった。ステッチ処理をしないわけにはいかないので、その処理をメインコンピュータで行った結果を表 3③⑥に示す。4K の場合、

②③の比較から、メインコンピュータでのステッチ処理は98ms程度であることがわかった。

以上の結果より、ステッチ処理をメインコンピュータで処理することにより、約0.5秒の遅延短縮が可能である。そこでステッチ処理をカメラ側でなくメインコンピュータで処理するように改良し、遠隔操縦実験を実施した。(株)熊谷組の社員に、①と③の場合それぞれで操縦をしてもらったところ、「PC側ステッチ(③)の方が遅延が少なく明らかに操縦しやすい」、「両者の画質の違いはわからない」との評価を頂いた。

表 3 映像遅延の計測

Table 3 Camera delay measurement experiment.

	計測内容	平均 [ms]	最小 [ms]	最大 [ms]
①	4K/カメラ側ステッチ	1054	1000	1100
②	4K/ステッチ無	408	300	500
③	4K/PC側ステッチ	500	400	660
④	2K/カメラ側ステッチ	412	332	668
⑤	2K/ステッチ無	369	269	584
⑥	2K/PC側ステッチ	372	370	380

5. HMD 内仮想ディスプレイ

シンクロアスリートを 사용하지ない通常の遠隔操縦システムでは、重機の外にカメラを設置・固定し、重機が映し出された複数カメラの俯瞰映像を見ながら操縦している。シンクロアスリートでは運転席に座った状態と同じ映像を提供するが、それに加え俯瞰映像やバックミラー（不整地運搬車は構造上運転席から後方を見ることができない）の代わりとなる映像を HMD に映すことで、死角を減らし、周囲の状況を把握しやすくてできることから、操縦性の向上が期待できる。そこで、HMD 内に外部カメラの映像等を表示できるよう改良を行った。

5.1 システム構成

遠隔操縦システムでは、工事現場に複数設置されたネットワークカメラからの映像信号を遠隔操縦室内でコンピュータが受け取り、HDMI 出力としてビデオマトリックススイッチャーに出力している。映像切替担当者は操縦者の意向に従いビデオマトリックススイッチャーを操作し、ディスプレイに表示される映像を切り替えている。そこで、ビデオマトリックススイッチャーからの映像をビデオキャプチャを用いてメインコンピュータに取り込み、HMD に表示することにし、さらにメインコンピュータとビデオマトリックススイッチャーを同一 LAN に配置することにより、メインコンピュータからビデオマトリックススイッチャーを操作し、ネットワークカメラを操縦者自身で切り替えられるようにした。

図 9 が構成図である。

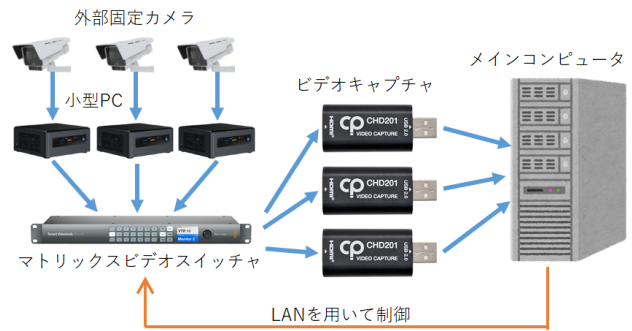


図 9 HMD 内仮想ディスプレイのシステム構成

Fig. 9 System configuration of virtual display in HMD.

仮想ディスプレイが表示されている HMD 内の VR 映像を図 10 に示す。仮想ディスプレイ内に、不整地運搬車の右方向に設置された固定カメラからの映像が表示されており、車両右側の映像が映し出されている。この仮想ディスプレイは搭乗者が自由な位置に設置することができ、任意の大きさに拡大縮小することができる。重機の窓枠上部や側面など視界の妨げにならない位置に設置し、確認したいときだけ見るということも可能である。



図 10 HMD 内仮想ディスプレイ

Fig. 10 Virtual display in HMD.

外部カメラ以外にも、車両の屋根後方に設置されたカメラで後方の映像を表示したり、工程表や施工図面などを表示することも可能にし、使い勝手を向上させた。仮想ディスプレイは現在 5 枚まで表示できる。

5.2 実験・評価

走行試験ヤードにおいて実験を行った結果、操縦者の方から「様々な視点を確認しながら操縦することができるため、以前に比べ操縦がしやすい」、「俯瞰映像があるため今まで入り込めなかった狭い場所に入り込むことができた」との評価を頂いた。また設置位置については「カーナビのように右下等に小さく表示させるのが使いやすい」との意見も頂いた。

また、従来のディスプレイによる表示と仮想ディスプレイでの表示について、遅延の差を計測した。ストップウォッチの映像をマトリックススイッチャーに入力し、従来

のディスプレイと仮想ディスプレイに表示させ写真を取ることで調べたところ、遅延は 100ms 程度であった。

6. まとめ

3 自由度モーションベースと HMD を用い、実際の重機に搭乗している感覚で操作できる遠隔操縦システムの開発を行った。

モーションベースに取り付けられた座席の傾きに合わせ、HMD 内の映像の角度補正を行うことで、搭乗者の酔いを低減させた。また、遠隔操縦システムを使って操縦する場合の映像の遅延の主な原因が、カメラ内のステッチ処理であることを特定し、メインコンピュータでその処理を行うことで、約 1 秒あった遅延を約 0.5 秒まで小さくすることができ、操縦者から「遅延が少なく操縦しやすい」との評価を得た。さらに重機周囲の固定カメラからの俯瞰映像や屋根後方に設置されたカメラからの後方の映像、工程表や図面などを HMD の VR 映像上に仮想ディスプレイとして表示することで、使い勝手を向上させた。

参考文献

- [1] 内閣府政策統括官(防災担当): 令和 3 年防災白書 (online), 入手先 (http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/pdf/r3_all.pdf) (2021.07.28).
- [2] 日本電気株式会社 (online): KDDI、大林組、NEC 国内初! 「5G」、4K3D モニターを活用した建機の遠隔施工に成功 (online), 入手先 (https://jpn.nec.com/press/201802/20180215_01.html) (2021.07.28).
- [3] HTC Corporation: VIVE Tracker(online), 入手先 (<https://www.vive.com/jp/accessory/vive-tracker/>) (2021.07.30).
- [4] 松林勝志, 山下晃弘, 富平準喜, 佐藤悠之輔, 瀧島和則, 本間朗, 吉川千里: 3 自由度モーションベースの制御とカメラ競技への応用, 2018-CDS-22, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS) (2018).
- [5] 瀧島和則, 松林勝志, 山下晃弘, 飛鳥馬翼, 古川敦, 北原成郎: 自然災害現場の復旧にあたる遠隔操作式建設機械の操作向上に関する研究, 令和元年度「建設施工と建設機械シンポジウム」(2019).
- [6] 野村真一, 北原成郎, 坂西孝二: 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災害対策工事, 平成 29 年度「建設施工と建設機械シンポジウム」(2017).

正誤表

該当箇所	誤	正
著者名	坂上 祥太郎 ^{1,a)} 松林 勝志 ^{1,b)}	坂上 祥太郎 ^{1,a)} 松林 勝志 ^{1,b)}
	山下 晃弘 ^{1,c)} 佐藤 悠之輔 ²	山下 晃弘 ^{1,c)} 佐藤 悠之輔 ²
	岡田 航 ¹ 瀧島 和則 ³	岡田 航 ¹ 瀧島 和則 ³
	飛鳥馬 翼 ⁴ 古川 敦 ⁴	飛鳥馬 翼 ⁴ 古川 敦 ⁴ <u>竹下 嘉人⁴</u>
	畑本 浩伸 ⁴ 天下井 哲生 ⁴	畑本 浩伸 ⁴ 天下井 哲生 ⁴
	北原 成郎 ⁴	北原 成郎 ⁴