

7. 自然災害現場の復旧にあたる

遠隔操作式建設機械の操縦性向上に関する研究

東京工業高等専門学校
東京工業高等専門学校
東京工業高等専門学校
(株)熊谷組
(株)熊谷組
(株)熊谷組

○ 瀧島 和則
松林 勝志
山下 晃弘
飛鳥馬 翼
古川 敦
北原 成郎

1. はじめに

自然災害現場での無人化施工は二次災害を防ぐために極めて有効な手段である。オペレータは建設機械の運転室内からの映像と建設機械を俯瞰する映像を頼りに、遠隔操縦室で操作するが、搭乗操作と比較して実際の建設機械の傾きや振動などを把握することが困難である。そのため作業効率が50-60%に低下する¹⁾と言われている。

そこで本研究では、操縦室内にいるオペレータに、建設機械の運転室内からの視界の他、建設機械の傾きや振動・音を提供することで、安全かつ効率の高い運用を目指すことを目的とする。具体的には、東京工業高等専門学校で開発したスポーツ観戦システム、「シンクロアスリート²⁾」(写真1)を応用する。建設機械側に360度カメラとセンサを設置し、運転室内からの映像と音に加え、建設機械の動きを操縦室にリアルタイムに転送する。操縦室では、映像をVRヘッドマウントディスプレイ等に表示し、音を再生すると共に、操縦席が取り付けられたモーションベースで動きを再現する。遠隔操作でありながら、実際に搭乗した状態に近い環境をオペレータに提供することで、効率的かつ、建機を傾斜地などで運用する場合でも安全に遠隔操作できるようにする。

本稿ではシンクロアスリートを用いた遠隔操縦装置と遠隔操縦実験結果について報告する。

2. シンクロアスリートについて

2.1 基本構成

シンクロアスリートは、3自由度モーションベースとヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)を使用したスポーツ観戦システムである。カヌー競技に応用した場合の選手側システム構成を図-1に、観戦側システム構成を図-2に示す。

選手側では、360度カメラとスマートフォンをカヌーに取り付け、選手目線での映像と選手の動き(加速度センサ出力)を撮影・記録する。カヌーに



写真-1 シンクロアスリート

これらを取り付ける場合は、厳密には選手目線ではないが、選手と一緒に二人乗りで競技をしているのと同じ体験ができることになる。例えば、マラソンなどの競技では、頭の上などにカメラを付けることになる。この場合は、選手目線の映像と選手そのものの動きを体験できることになる。ストーリーミングサーバ(スティックPC等)は、後述するリアルタイムモードで使用する。

観戦側では、選手側で記録した360度映像をディスプレイとHMDで再生すると同時に、選手の動きデータにより、モーションベースを駆動する。モーションベースの仕様を表-1に示す。



図-1 選手側システム構成

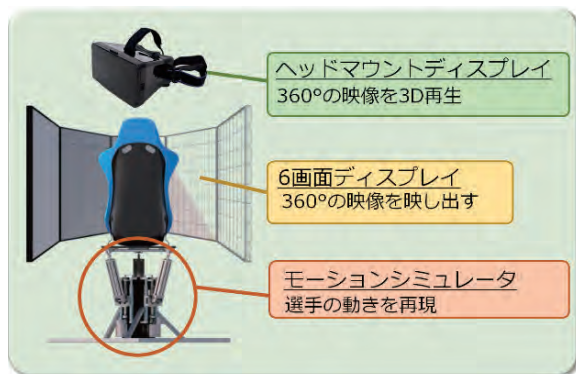


図-2 観戦側システム構成

表-1 モーションベースの仕様

項目	仕様
構造	3軸(鉛直方向並進, ロール, ピッチ) パラレルリンクモーションベース
動力	電動自転車24V300W DCブラシモーター
最大積載量	120kg(搭乗者のみ)
設置床面積	対角600mmの六角形(600mm X 720mm)
機械部のみの重量	35kg
可動域	ピッチ±19.44° ロール±16.61° ヒープ±60mm
周波数特性	制御振幅10mm(±5mm時) 2.2Hzで-6dBの振幅

2.2 リプレイモードとリアルタイムモード

シンクロアスリートはリプレイモードとリアルタイムモードの二通りの使い方がある。リプレイモードはあらかじめシンクロアスリート本体のHDDに記録した映像と動きを再生し、観戦するものであり、リアルタイムモードは、ライブで映像と動きを楽しむことができる。

360度カメラやスマートフォン等をマラソンのペースメーカーに装着し、5G等のネットワーク回線を準備すれば、観戦者はペースメーカーの動きの他、周囲にいる選手の表情や足音まで、ライブで観戦することができる。まさに選手と一体になって競技をしているかのような体験が可能である。

2.3 無人化施工システムへの応用

シンクロアスリートを建機の遠隔操縦に対応させるため、シートをボールチェアから自動車用のシートに変更した。また、操縦ができるようにア



写真-2 ジョイスティックの取り付け



写真-3 ディスプレイの取り付け

ームレストにジョイスティックの取り付け(写真-2)を行った。シンクロアスリートではHMDを使用して映像の再生を行っているが、HMDを長時間着用すると、疲労やVR酔いが発生しやすい。そのため、HMDに加えてディスプレイでの運用もできるように、モーションベースにディスプレイの取り付けを行った(写真-3)。オペレータはディスプレイかHMDのどちらかを選択し操縦する。

(株)熊谷組にて研究・運用されているネットワーク対応無人化施工システム²⁾ではIP(インターネットプロトコル)を使用し映像の配信、建機の操縦を行っている。シンクロアスリートでもIPを使用し、LAN経由で映像と姿勢データの配信を行っているため、ネットワーク設定を調整するだけで、そのまま適用可能である。

3. リプレイモードでの再生実験

オペレータにより遠隔操縦された不整地運搬車に360度カメラとスマートフォンを取り付け、映像と姿勢データを記録し、オペレータにリプレイモードで体験していただいた。

3.1 撮影・姿勢データ収集

(株)熊谷組技術研究所内走行試験ヤードで検証に使用した不整地運搬車を写真-4 に示す。この不整地運搬車の運転席に、写真-5、写真-6 に示すようにスマートフォンと 4K 画質の 360 度カメラ (RICOH THETA V) を取り付け、映像と動きデータを記録する。ヤード内にある高さ 1m 程度の山に対して、次の 4 つの走行パターンで走行し、記録を行った。

- ① 山に正面から直進して、上って下る。その後、バックで同様に上って下り、元の位置へ戻る。
- ② 山に正面から直進して、上って下る。180 度その場で方向転換し、山を上って下りる。
- ③ 山の左側面を直進し、建機が左に傾いた状態で山を上って下りる。その後バックで、同じルートをバックして元の位置へ戻る。
- ④ 山の右側面を直進し、建機が右に傾いた状態で山を上って下りる。その後バックで、同じルートで元の位置へ戻る。

3.2 再生実験

運転席内に設置した 360 度カメラで撮影した映像を写真-7 に示す。

遠隔操縦を実際に行ったオペレータに、シンクロアスリートのリプレイモードで、映像と動きを体験していただいたところ、運転席にいるときの感覚によく似ているとの意見をいただいた。

4. リアルタイムモードでの操縦実験

ネットワーク対応無人化施工システムとシンクロアスリートのリアルタイムモードを使用して、不整地運搬車の遠隔操縦実験を行った。

4.1 システム構成

RICOH THETA V と比べ、解像度は変わらないが、撮像素子の変更でより高画質になった、RICOH THETA Z1 (以下、Z1) に 360 度カメラを変更した。

また、Z1 は加速度センサを内蔵し、ストリーミング配信も安定しているため、Z1 で映像と姿勢データを記録・配信できるソフトウェアを新たに開発した。これにより、スマートフォンとストリーミングサーバを使用せずに、映像と姿勢データをライブ配信可能になる。

写真-5 で示したカメラの取り付け治具では剛性が低く、遠隔操縦中にカメラが振動するので、取り付け治具も変更した (写真-8)。さらに、無線 LAN でしか接続できない Z1 を LAN に接続するため、アクセスポイントを不整地運搬車の運転席内に設置している。

4.2 不整地運搬車の操縦実験結果

写真-9 に遠隔操縦中の様子を示す。ジョイスティックで不整地運搬車の操縦をしている。システムの安定した稼働が確認できた。



写真-4 使用した不整地運搬車



写真-5 360度カメラの取り付け



写真-6 スマートフォンの取り付け

(株)熊谷組の社員の方 5 名に、ディスプレイでの視聴と HMD での視聴のそれぞれの場合で遠隔操縦をしていただき、次の意見や感想を得た。

- ① 360 度カメラを 2 台用意して HMD 表示の工夫ができると良い。運転席前方の映像以外に、運転席後方や定点カメラからの映像を見たい。
- ② 操作感覚は実際に操作している感覚に近いと

感じた。もう少し細かい振動もあると臨場感を感じられるのではないかと。

- ③ 画質が悪く、路面状況が認識しにくい。そのため遠隔操縦している車両の位置がわかりづらい。坂が見えづらいためどの程度傾いているのか把握しづらい。
- ④ HMD ではディスプレイよりリアルに体験でき、画質も良いように感じた。ただし、酔いを感じた。HMD を付けるとジョイスティックが見えないため倒す向きがわかりにくく、不整地運搬車をまっすぐ走らせにくく感じる。

5. 今後の改良方針

いただいた意見をもとに、次の改良を進めていく。

①に対しては、運転席内部のカメラだけでなく、定点カメラや運転席後方のカメラの映像を HMD やディスプレイで表示できるようにする。

②については、細かい振動も再現することで臨場感が増すと考えられるので、再現する揺れの大きさを変更できるようにソフトウェアを改良する。

③では、画質が問題になっている。現在はネットワーク帯域と映像遅延の理由から 2K 画質でのライブ配信を行っている。Z1 自体は 4K でのライブ配信に対応しているのでソフトウェアの改良により遅延を減らし、4K でのライブ配信を行う。

④では、HMD 着用時にジョイスティックが見えない問題があるので、HMD 内でジョイスティックを表示するなどの方法が考えられる。

今後はこれらの改良を進め、建機の遠隔操縦の効率の向上を図る。

参考文献

- 1) https://jpn.nec.com/press/201802/20180215_01.html (2019年7月30日参照)
- 2) 松林 勝志・山下 晃弘：3自由度モーションベースの制御とカヌー競技への応用，研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS)，2018-CDS-22，pp.1~7，2018
- 3) 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



写真-7 360度カメラの映像(前方のみ切り出し)



写真-8 360度カメラの取り付け



写真-9 遠隔操縦中の様子