

令和元年度卒業研究

モーションシミュレータを用いた重機の
遠隔操縦に関する研究

東京工業高等専門学校 情報工学科

制御情報研究室

学籍番号:15077

5J17 坂上 祥太郎

指導教員 松林勝志, 山下晃弘

目次

第 1 章 はじめに	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
1.3 本論文の構成	1
第 2 章 システム概要	2
2.1 システム構成	2
第 3 章 ヒアリング調査	3
3.1 概要	3
3.2 映像の収録	3
3.3 ヒアリング結果	5
第 4 章 筐体の開発	6
4.1 概要	6
4.2 設計	6
4.3 製作	8
第 5 章 プログラムの変更	9
5.1 概要	9
5.2 ストリーミング方式の変更	9
5.3 カメラの 2 台利用	10
5.4 プログラムのリファクタリング	10
第 6 章 実証実験	11
6.1 概要	11
6.2 実験結果	12
6.3 遅延の実験	13
6.4 カメラ内処理による遅延の計測	16
第 7 章 まとめ	18
謝辞	19
参考文献	20

第1章 はじめに

1.1 研究背景

クローラキャリアやバックホウなどの重機の遠隔操縦は、作業の少人数化や人が立ち入ることが難しい場所での作業などに大きく貢献する事ができる。実際に AI と遠隔操縦を活用することにより、操縦室からオペレーター一人で複数台の重機の操縦 [1] や、災害時の緊急対応の実験 [2] も行われている。

遠隔操縦は、現場の状況を重機や現場に設置されたカメラの映像を見ながらコントローラを用い操縦することがほとんどである。しかしこの場合、実際の操縦と異なり重機の傾きや振動をオペレータが体感する事ができない。そのため、急な斜面での操縦の際に重機の横転やオペレータから見えない埋設管の破壊などの事故が起こることがあった。また、遠隔操縦では重機に設置したカメラと重機を俯瞰する映像のみを頼りに作業を行うため、通常の約半分にまで作業効率が低下してしまう [3]。

1.2 研究目的

本研究では、ヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) と小型モーションシミュレータを使用したスポーツ体感システム「シンクロアスリート」を応用し、高精細 4K 全天球カメラを使用した実際の運転と同等の映像と、車体の傾きや振動をオペレータが体感することで、実際の操縦と同等の状態で操縦できるシステムを開発し、安全安心かつ作業効率の高い重機の運用を実現する。

1.3 本論文の構成

「第1章 はじめに」では、本論文の研究背景、研究目的を示す。「第2章 システム概要」では、本システムの概要と構成、システム構成要素を述べる。「第3章 ヒアリング調査」では、オペレータの方に行ったヒアリングの結果を述べる。「第4章 筐体の設計」では、筐体の変更点を示す。「第5章 プログラムの変更」では、プログラムの変更点を示す。「第6章 実証実験」では、制作した本体を用いて実験・評価をする。「第6章 まとめ」では、今後の展望について述べる。

第2章 システム概要

2.1 システム構成

本システムは、リアルタイムに選手とシンクロするスポーツ観戦システム「シンクロアスリート」[4]を元に、筐体・ソフトウェアを変更し、実現する。システム構成図を図1に示す。



図1 システム構成図

本システムでは主にシンクロアスリートの、映像データと動きデータをライブで再生する機能であるリアルアイムモードを応用する。シンクロアスリートと同様に、重機の動きの計測・送信は重機にスマートフォンを設置し、開発した専用アプリケーションを使用し行う。専用アプリケーションでは重機の加速度を計測・送信し、シンクロアスリート本体で受信し同様の加速度を得られるようにモーションシミュレータを駆動させる。映像・音声には全天球カメラと開発した専用プラグインを用いて撮影・送信し、シンクロアスリート本体で受信の後HMD又はディスプレイを用いて表示させる。重機のコントロールや状態確認は先行研究で開発されたシステム[2]をそのまま使用する。

第3章 ヒアリング調査

3.1 概要

システムを開発するにあたって、現行のシンクロアスリートの問題を洗い出す必要がある。そこで、共同研究先である熊谷組のオペレータの方にヒアリングを行った。図2のシンクロアスリートに収録したクローラーダンプの映像と動きのコンテンツを入れ、体験して頂いた。

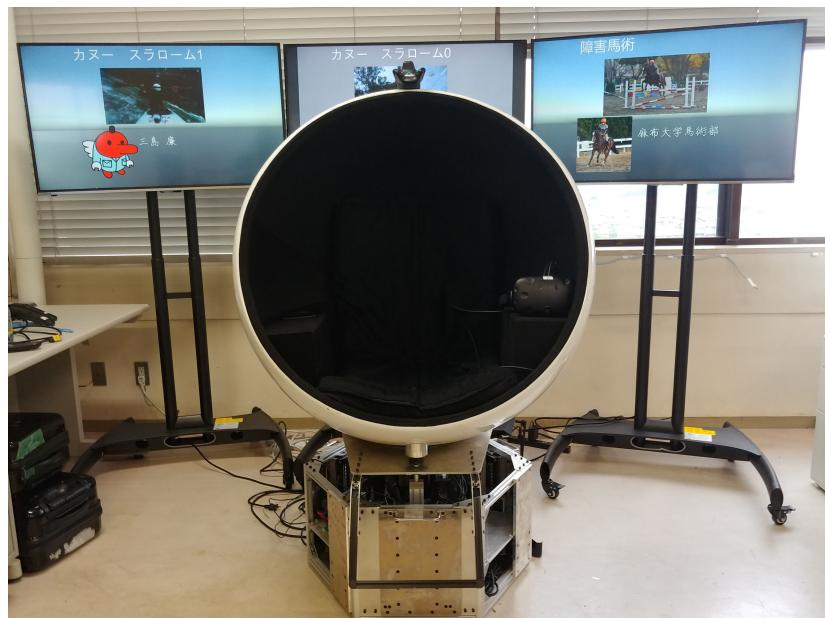


図2 シンクロアスリート

3.2 映像の収録

映像と動きは熊谷組筑波技術研究所内の実験フィールド（図3）で収録した。収録ではクローラーダンプを用い、前進・後退に加え斜面の登り降りや左右に傾いた斜面の走行など、工事現場で想定される一連の動きを再現した。また、全天球カメラは操縦室車内（図4）、操縦室屋根（図5）の二箇所に取り付け、実際の操縦と同じ目線と上方からの見下ろすような視点で体感できるようにした。



図 3 実験フィールド



図 4 車内カメラ



図 5 屋根カメラ

3.3 ヒアリング結果

ヒアリングの結果、「本物の重機とほぼ同じような感覚を得ることができる」と評価をしていただいた。しかし、いくつかの課題の指摘もあった。

3.3.1 座席の問題

丸型の座面は体が安定せず操縦がしづらいことがわかった。現状のシンクロアスリートは防音性・遮音性を高め、臨場感を向上させるため、球状の椅子を使用している。しかし操縦の際は実際に重機に使われているような形状のシートである方が望ましい。

3.3.2 操縦性の問題

HMD では操縦が行い辛いということがわかった。遠隔操縦の際には手元のジョイスティックやボタンなどのコントローラで操縦する。HMD をかぶると、手元のコントローラを見ることができない。また、HMD は 360 度すべての方向を見ることができるという利点もあるが、その反面酔いやすいという欠点もある。遠隔操縦では、長時間オペレータが作業するためなるべく酔いにくくする必要がある。

3.3.3 映像の表示

操縦室屋根で撮影した映像を PinP で表示したところわかりやすく反響を頂いたが、作業時には邪魔な場合もあり切り替えられることが望ましい。

第4章 筐体の開発

4.1 概要

第3章で述べた問題を踏まえ筐体の設計・製作を行った。筐体は拡張性や汎用性を考え、主に20mmx40mmのアルミフレームを使用する。また、設計ではCADソフトウェアSolidWorks 2017-2018を使用する。

4.2 設計

シンクロアスリートは、座席部分を様々なスポーツの座席に変更できるよう設計されている。そこで本システムではシンクロアスリート設計図面の主に座席部分を改変する。具体的には主に以下の点を改変する。

4.2.1 椅子の変更

体をホールドしない以前の丸型の椅子から、体をしっかりとホールドする自動車運転用の椅子(図6)に変更する。



図6 自動車運転用の椅子

4.2.2 筐体へのディスプレイの取り付け

HMDは360°見ることができるが、コントローラを目視することができない。また、システムの前にディスプレイスタンド等用いてディスプレイを設置し使用すると、

座面が傾いているときにディスプレイが相対的に回転してしまい、操縦が難しくなることが考えられる。そのためディスプレイ三台を筐体の可動部分に取り付け、椅子と一緒に動かし、違和感のないディスプレイを使っての操縦も可能にする。

4.2.3 コントローラの設置

操縦の際にはコントローラが必要である。実際の重機と同等のコントローラ(図7)を左手アームレストに設置した。それにより乗り降りの障害にならず、且つ操縦が行いやすくする。



図7 コントローラ

以上の改変を施し、強度・操縦性等を考慮し設計した(図8)。



図8 CADを用いた設計

4.3 製作

設計した図面を元に製作した。部材の加工は東京高専の工場にて作成した。図 9 が製作した筐体である。



図 9 製作した筐体

ディスプレイを筐体の可動部分に 3 台設置するため、元のシンクロアスリートに比べ大きくなってしまった。そのため、ディスプレイ・座面等がついている部材と PC・モーションシミュレータが内蔵されている部材と切り離し運搬することを前提とした作りになった。また重心が前方に偏ってしまったため、電源遮断時に座面を水平に保つことができなくなってしまい、長期間使用しない間は、モーションシミュレータに使用されているバネ等の劣化を防ぐために、水平に保つ支えが必要になった。ディスプレイとアルミフレームの固定には適する物が市販されていなかったため 3D プリンタで自作を行った。

第5章 プログラムの変更

5.1 概要

重機の遠隔操縦に適するよう、プログラムにも変更を施した。開発環境を以下に示す。

- OS : Microsoft Windows 10 Pro
- プロセッサ : Intel Core i7-7700k
- メモリ : DDR4 16GB
- GPU : NVIDIA GeForce GTX 1070

5.2 ストリーミング方式の変更

遠隔操縦では、映像を見ながら操縦するため、より高いリアルタイム性・高画質が求められる。熊谷組研究員の意見ではおよそ 300ms 程までには遅延を短くする必要がある。そこで遅延を低減させるために、従来の MJPEG を利用した動画ストリーミング方式からよりリアルタイム性の高い WebRTC に変更した。また同時に、カメラを従来の「Richo Theta S」から「Richo Theta Z1(図 10)」に変更し 4K の解像度まで画質を高めることにした。



図 10 使用するカメラ

カメラの変更を行ったことにより、動画の送信ソフトウェアをカメラに内蔵させることができるようにになった。そのため送信用のスティック PC が不要となり、簡素なシステムで構築できるようになった。

5.3 カメラの2台利用

運転席内のカメラだけでは、後方の確認が難しい。そのため、運転室外の後方側にもう一台カメラを設置し、後方の確認が行いやすいようにした。

カメラを複数台設置するにあたり、カメラの映像を切り替える必要がある。後方を確認しながら作業をおこなう場合は後方のカメラを利用したほうが作業が行いやすい。そのため、HMD が後方を向いたときに自動で映像が切り替わるようにした。又、前方を観る場合には車内カメラのほうがより実際に近いため、車内カメラに切り替わる。

5.4 プログラムのリファクタリング

シンクロアスリートプロジェクト 2016 年当初から同じソースコードを使いまわしており、プログラムが煩雑になっていた。また、使用しているゲームエンジン「Unity」のバージョンが 2017.2.0f3 と古く最新のライブラリが使えないことや、バグの存在など開発が難しくなっていた。そのため今後の開発を踏まえ、最新の長期サポートバージョンである Unity2018LTS へのリファクタリングを行った。それに伴い以下の点を改善した。

5.4.1 動画再生ライブラリの変更

2016 年当初は Unity の標準ライブラリを用いて 360 度動画を再生させることができないため、外部のライブラリを用いて再生していた。外部のライブラリは可読性を落とし、プロジェクトの容量を増加させる原因になっていた。又、ボブスレー競技など動きの激しい映像の場合、フレーム落ちが多く発生していた。そこで、Unity のバージョン変更とともに標準ライブラリでの再生が可能になったため、標準ライブラリを用いた再生に移行した。

5.4.2 プロジェクトの容量の削減

プロジェクトには現在使用されてないソースコードや画像等が多く存在していた。そのため、現在使用していない画像、ソースコード等を削除した。又、冗長なコードや C#コーディング規約に沿っていないコードの修正等を行った。それにより、プロジェクトの容量は 1.54GB から 154MB へと大きく削減させることができた。又、実行ファイルも○○ MB から○○ MB へと削減させることができた。

その他、細かいバグやレイアウト等の修正を行った。

第6章 実証実験

6.1 概要

熊谷組筑波技術研究所でクローラーダンプを用いて実験を行った。実験はヒアリング時の実験と同様に、熊谷組筑波技術研究所内の実験フィールドで行った。全天球カメラは操縦室車内と操縦室屋根後方に設置した(図11)。加速度を計測・送信するスマートフォンは操縦室車内の平らな場所に地面と平行に置いた(図12)。送信に用いるLANは重機を遠隔操縦するために整備されたLANを使用した。システム本体は実験室内に設置し、同様のLANに接続した(図13)。



図11 設置したカメラ



図12 設置したスマートフォン

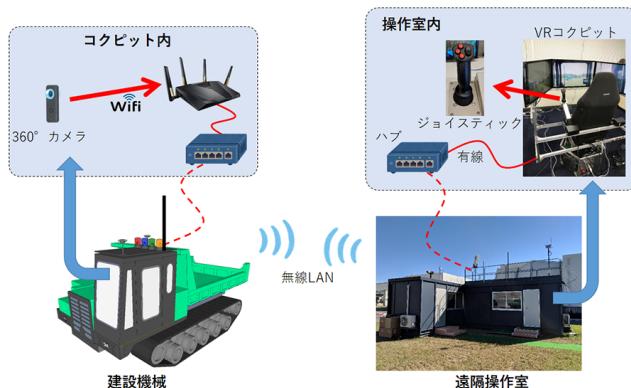


図 13 ネットワーク構成

6.2 実験結果

実験では熊谷組のオペレータの方に、実際に操縦をしていただいた（図 14）。その結果、「本物の重機とほぼ同じような感覚で操縦をすることことができた」「後方にもカメラが有るため、普段では見ることができない後方を確認しながら操縦をすることができる所以扱いやすかった」との評価をいただいた。しかし、次の課題も見つかった。

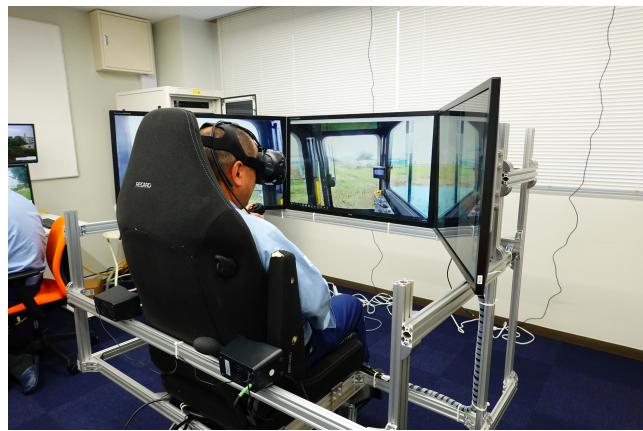


図 14 実験の様子

6.2.1 遅延の問題

ストリーミング方式を WebRTC に変更したが、約 1 秒もの映像の遅延が発生し操縦が難しかった。そこで全天球カメラの解像度を 4K から 2K に変更してみたところ、遅延が短くなり 4K に比べ操縦性が大きく向上した。しかし、2K の解像度では画像が荒く斜面や障害物の形状が把握しづらくなってしまった。

6.2.2 安定動作の問題

重機は仕様上エンジン始動時に一瞬電源が落ちてしまう。そのため、搭載されている Wi-Fi アクセスポイントの再起動がかかりネットワークが切断されてしまう。その際に全天球カメラ側の映像送信アプリケーションが異常終了してしまう問題が発覚した。また、解像度の切り替えやカメラのネットワーク設定の変更の際にソースコードを変更してビルドし直す必要があり、実際の運用では問題があることがわかった。遠隔操縦ではネットワークの切断や予期しないエンジンストップなどが起きる可能性があるため、安定動作を実現する必要がある。

6.3 遅延の実験

遅延がどのようなものかを検証するために、実験を行った。実験ではコントローラー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、それがディスプレイに表示されるまでの映像の遅延(往路)とネットワーク内の PING の値を調査を行った。

6.3.1 往路の計測

映像の配信ありなしでの違いも含め計測を行う。当初は解像度による違いも含め計測をする予定であったが、実験のミスにより 2K 解像度での実験が行えなかつたため 4K 解像度飲みによる実験である。

実験ではコントローラーのクラクションボタンを押す音から実際のクラクションの音が聞こえるまでの時間を計測し遅延を測る。音声をスマートフォンのボイスメモアプリケーションで収録し、音声ファイル内の 2 つの音の立ち上がりを波形で確認し遅延を求める。音声のコーデックは 16bit44.1kHz WAV である。コントローラから重機までは距離があるため、クラクションの音は FM トランシーバーを介して聞く。音声の遅延をなるべく短くするため重機からトランシーバー間はなるべく距離を近づける。同様に受信側のトランシーバーもスマートフォンに近づける。トランシーバーによる遅延は、原理上無視できるほど小さいものなので考慮しない。計測は 5 回行った。図 15 は実験の様子である。

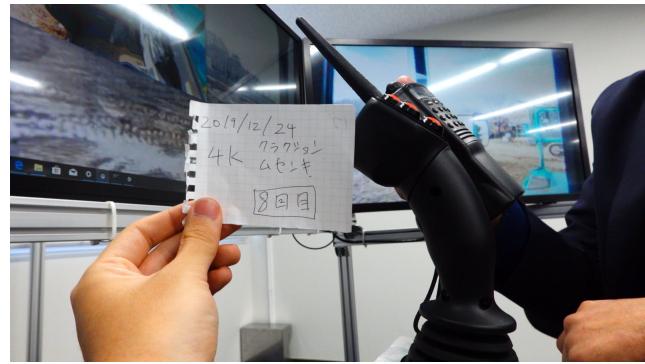


図 15 往路計測実験の様子

6.3.2 復路の計測

実験では 2 台の時刻を同期させ表示させたストップウォッチを用い行った。一方のスマートフォンをカメラ前に設置し、もう一方のスマートフォンを映像が表示されたディスプレイの横に設置し、ディスプレイとスマートフォンの時間差を計測する。計測にはカメラを用いてディスプレイとスマートフォンを撮影し時間差を見る。スマートフォンはリフレッシュレートは 60Hz であり、ストップウォッチは最小桁が 10ms のため、分解能は約 20ms である。往路と同様実験のミスにより 4K 解像度のみの計測となった。計測は 5 回行った。図 16 は実験の様子である。



図 16 復路計測実験の様子

6.3.3 PING の計測

ネットワークの混雑状況を確認するために PING の計測も行う。PING はシンクロアスリートから重機内のカメラに対してを計測する。計測は 100 回行った。往路と同様実験のミスにより 4K 解像度のみの計測となった。図 17 は実験の様子である。

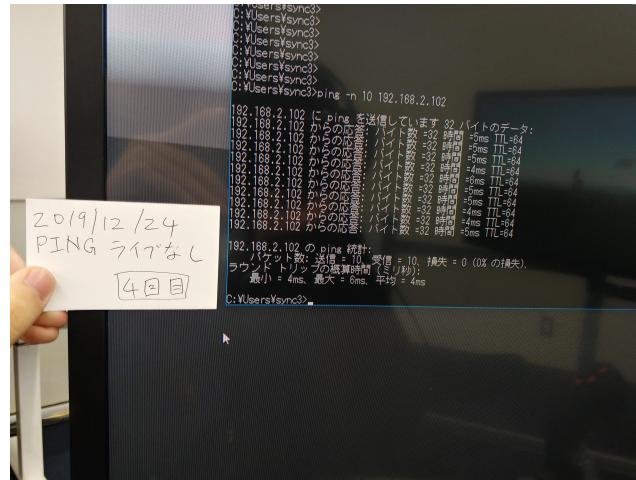


図 17 PING 計測実験の様子

6.3.4 実験結果

上記の実験を行い表 1 にまとめた。単位は ms である。

実験名	平均値	最小値	最大値
往路遅延 (映像配信あり)	25	20	30
往路遅延 (映像配信なし)	30	30	30
復路遅延	925	880	1000
PING 遅延 (映像配信あり)	9	3	39
PING 遅延 (映像配信なし)	4	3	10

表 1 遅延計測実験の結果

この結果から、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わかる。

6.4 カメラ内処理による遅延の計測

6.4.1 概要

カメラ側処理による遅延を調べるため、研究室で再度実験を行った。全天球カメラでは2つの魚眼の映像から世界地図のように引き伸ばした映像に変換する処理を行っている。この処理が遅延の原因であると仮設を立て実験を行う。実験ではカメラ内の前処理の有無・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。



図 18 処理前の映像



図 19 処理後の映像

6.4.2 実験結果

上記の実験を行い表 2 にまとめた。単位は ms である。

実験名	平均値	最小値	最大値
4K/前処理有	1054	100	1100
4K/前処理無	408	300	500
2K/前処理有	412	332	668
2K/前処理無	369	269	584

表 2 カメラ内処理による遅延計測実験の結果

前処理をなくすことにより 4K の解像度の場合約半分にまで遅延を抑えることができる。また前処理をなくすと 2K・4K の遅延の差が大きく縮まる事がわかった。

第7章 まとめ

本研究では、小型モーションシミュレータを使用したスポーツ体感システム「シンクロアスリート」を応用し、実際の操縦と同等の状態で操縦できるシステムを開発した。開発では筐体・ソフトウェアに改良を加え実現させた。改良した点は以下の通りである。

- 座席の変更
- ディスプレイの取り付け
- コントローラの設置
- ストリーミング方式の変更
- カメラの2台利用
- プログラムのリファクタリング

また、開発したシステムを使用し実際の重機を用いて、実証実験を行った。実証実験では「本物の重機とほぼ同じような感覚で操縦をすることができた」との評価を頂いたが映像の遅延と安定動作に問題があることが判明した。そこで遅延の実験を行ったところ、カメラ内の前処理に大きな遅延がかかっていることが判明した。

今後の展望では、カメラ内の前処理を負荷に余裕のあるコンピュータ上で行い遅延を解決することや、実際の運用での安定動作のためにソフトウェアを改良することなどが挙げられる。

謝辞

今回、このシステムを開発するにあたってご指導ご協力を頂いた松林教授、山下准教授に感謝の意を表します。又、実験フィールドの使用やヒアリング・実証実験の際にご協力いただいた熊谷組の飛鳥馬様、北原様、その他研究員に感謝の意を表します。RICOH の宇佐美様、戸田様には Theta のプラグインについて的確なアドバイスを頂きました。心より感謝申し上げます。研究室の仲間、特に共同で研究を進めた滝島先輩には、感謝の念が耐えません。日々多くのアドバイスとお手伝いを頂きました。滝島先輩なしではこの卒論を完成させることはできなかっただろう。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 株式会社 熊谷組, AI 制御による不整地運搬車（クローラキャリア）の自動走行技術の開発（オンライン）, 入手先
⟨https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2019/pr_20190404_1.html⟩ (参照 2019-7-4).
- [2] 株式会社 熊谷組, 無人化施工における高機能遠隔操作室の開発 災害時の緊急対応を可能にする移動式遠隔操作室, 入手先
⟨https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2016/pr_160324_1.html⟩ (参照 2019-7-4).
- [3] 日本電気株式会社, 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, 入手先
⟨https://jpn.nec.com/press/201802/20180215_01.html⟩ (参照 2019-7-4).
- [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ヌー競技への応用, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム, Vol.9, No.3, pp.1-9 (2019)