

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 プログラムの改良	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 原因調査	13
6.4 問題の対策	17
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 プログラムの改良」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、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用いる。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改造すべき内容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インストールし、体験して頂いた。

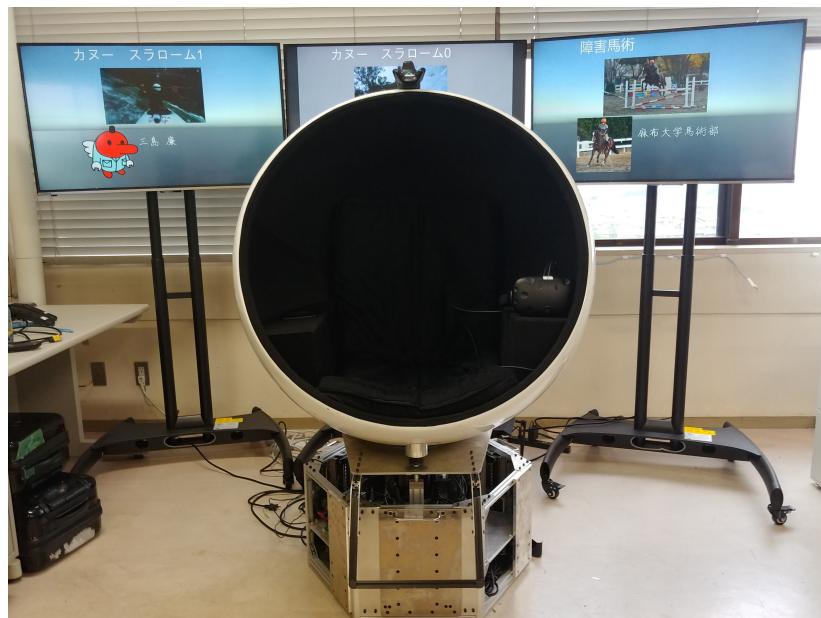


図2 シンクロアスリート

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及び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

体験後、ヒアリングをしたところ「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。

(1) 座席の問題

丸型の座面は体を預ける姿勢になり操縦には向かないとの意見があった。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。

(2) 操縦性の問題

HMD を装着すると外部の景色が見えないため、操縦が難しくなる可能性があるとの意見があった。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（図 7）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。HMD の中にコントローラの状態を表示することも可能ではあるが、それを実際に手にもつことはできないため、実装するのは意味がない。また、これらの問題はある程度操縦のなれによって解決すると思われる。

(3) 酔の問題

若干酔を感じたとの意見を頂いた。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、その反面人によっては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。

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を元に座席部分の改良をする。これらの改変を施し、強度・操縦性等を考慮し設計した(図8)。具体的には主に次の点を改良する。

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操縦すると、コントローラは目視できるが、座面が傾いた際に操縦者自身も同じように傾くため、床に設置されたディスプレイは相対的に回転している形に見えてしまう。そのため、動きと視界のちぐはぐが発生し操縦に違和感を及ぼすことが考えられる。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、且つ操縦を行いやすくする。



図 7 コントローラ

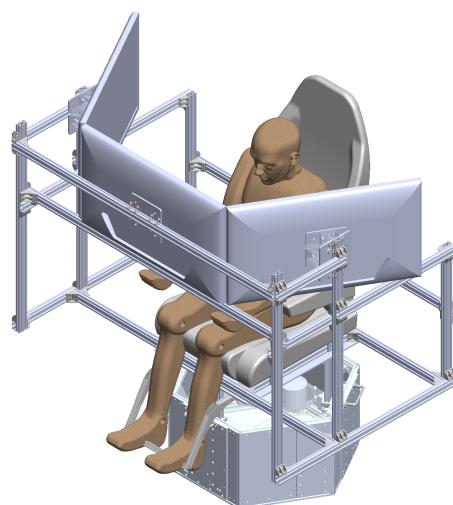


図 8 CAD を用いた設計

4.3 製作

設計した図面を元にシステムを製作した。部材の加工は東京高専の工場にて行った。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、重心が前方に偏ってしまい、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った。そのため、モーションシミュレータに使用されているバネの劣化を防ぐために水平に保つ支えを作成し、長時間使用しない間等に使用する。

左右のディスプレイはアルミフレームに対し 30° 傾けて固定する。固定には適するスペーサーが市販されていなかったため 3D プリンタを用いて作成した(図 10)。

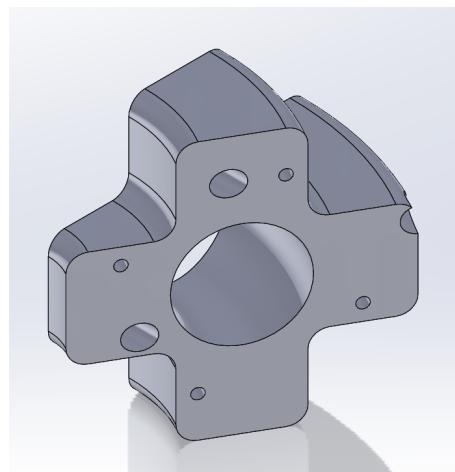


図 10 設計したスペーサー

第5章 プログラムの改良

5.1 概要

重機の遠隔操縦に適するよう、プログラムの改良を施した。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 11)」に変更し 4K の解像度まで画質を高めることにした。



図 11 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。一方、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、車内カメラを利用したほうが良い。そのため、HMD が前方・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。

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のプログラムは 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、バグの存在などにより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、細かいバグやレイアウト等の修正に加え、次の点を改善した。

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かったため、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わ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 238MB から 62MB へと削減させることができた。

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12)。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設置した(図13)。送信に用いるLANは研究所内LANを使用した。又、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14)。



図12 設置したカメラ



図13 設置したスマートフォン

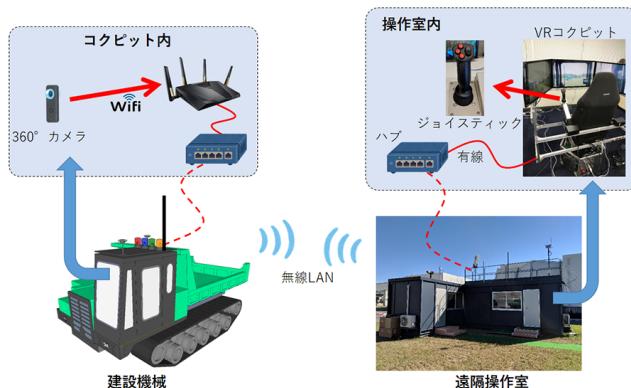


図 14 ネットワーク構成

6.2 実験結果

6.2.1 オペレータの方の評価

実験では熊谷組のオペレータの方に、ライブモードで実際に重機の操縦をしていたいた（図 15）。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ので扱いやすかった」との評価をいただいた。その他、「遅延が特に 4K では大きく操縦しづらい」、「解像度によって遅延が異なるため、2K・4K を簡単に切り替えられるようにして欲しい」、「重機のエンジン始動時にカメラに接続できなくなるため、自動で復帰をしてほしい」との意見を頂いた。

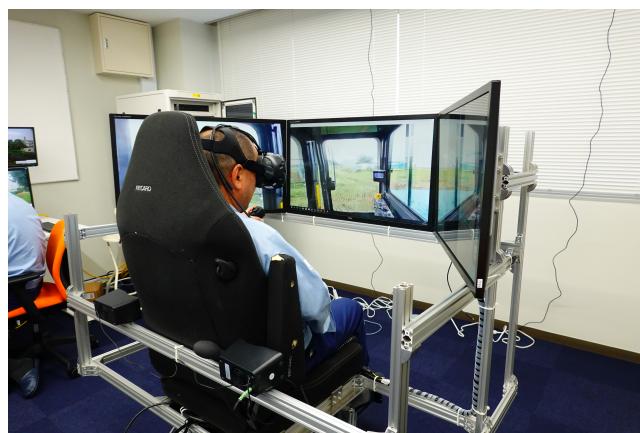


図 15 実験の様子

6.3 原因調査

6.3.1 遅延の原因特定

遅延の原因について調査するために、実験を行った。実験ではコントローラ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(往路)、ネットワーク内のPINGの値を計測した。

(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解像度のみによる実験である。

実験ではコントローラのクラクションボタンを押す操作音から重機のクラクション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もスマートフォンに近づける。トランシーバによる遅延は、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16は実験の様子である。

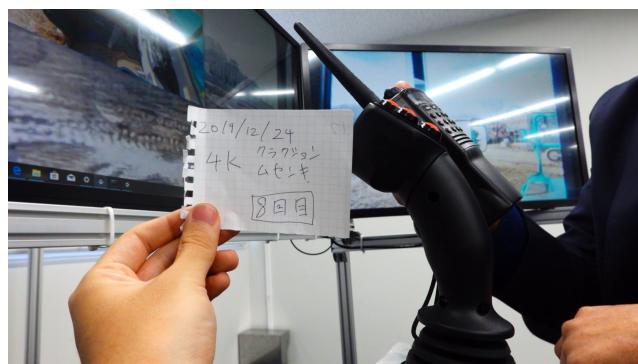


図16 往路計測実験の様子

(2) 復路の計測

実験では時刻を同期させ表示させた2台のストップウォッチ(スマートフォン)を用い行った。一方のスマートフォンを重機のカメラ前に設置し、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一枚に撮影し時間差を確認する。スマートフォンの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20ms程度である。往路と同様、4K解像度のみ計測した。計測は5回行った。図17は実験の様子である。



図 17 復路計測実験の様子

(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送る。計測は100回行った。往路と同様、4K解像度のみの計測した。図18は実験の様子である。

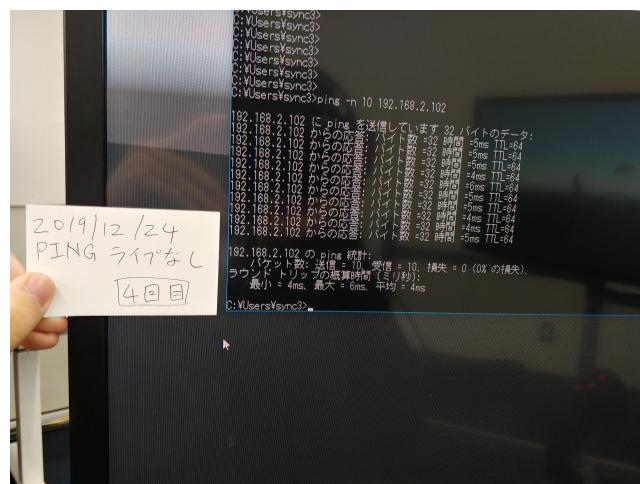


図 18 PING 計測実験の様子

(4) 実験結果

実験結果を表1に示す。

表1 遅延計測実験の結果

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

単位: ms

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。

6.3.2 カメラ内処理による遅延

(1) 遅延の計測

カメラ側処理による遅延を調べるために、実験を行った。全天球カメラ(Theta Z1)内では2つの魚眼の映像(図19)から世界地図のように引き伸ばした映像(図20)に変換する前処理を行っている。この処理が遅延の原因であると仮設を立て実験を行う。実験ではカメラ内での前処理の有無・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19 処理前の映像



図20 処理後の映像

(2) 実験結果

結果を表 2 に示す。

表 2 カメラ内処理による遅延計測実験の結果

実験名	平均値	最小値	最大値
4K/前処理有	1054	1000	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

単位 : ms

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。

よって、カメラ側ではなく、リソースに余裕のある PC 側で前処理を行うことで処理の遅延を減らせるはずなので、今後検討する。

6.3.3 アプリケーション異常終了の原因特定

エンジン始動時のシステムの状態を観察をすると、電源が一時遮断されていることがわかった。これは重機の仕様で、それにより Wi-Fi アクセスポイントの再起動が行われてしまう。その際にネットワーク切断によって、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いることがわかった。

また、アクセスポイントとの接続が切断されると、30 秒後自動的に外部のアクセスポイントを使用するクライアントモードから、カメラ自身がアクセスポイントになるアクセスポイントモードに切り替わってしまうことがわかった。そのため、アクセスポイントが起動してもカメラがネットワークに再接続することができない。

6.4 問題の対策

6.4.1 解像度の切替

解像度によって遅延の差が大きかったため、解像度の切り替えを簡単に行えるようにした。具体的にはカメラのアクセス先 URL を 2K・4K それぞれ用意し、アクセス先を変えることで可能にした。また、シンクロアスリート側の設定画面に切り替えボタンを設置し、簡単に切り替えが行えるようにした(図 21)。

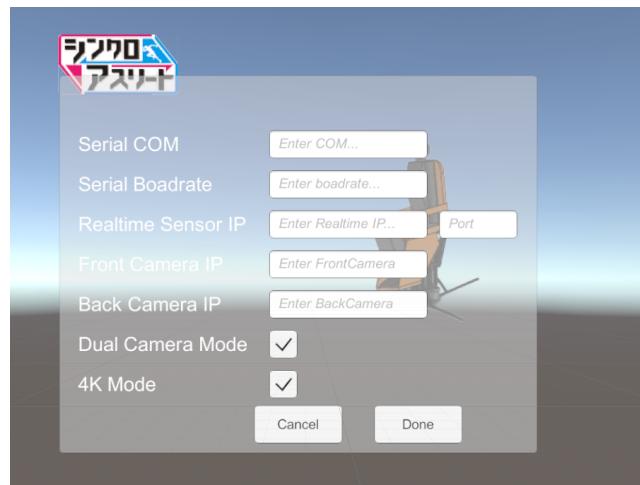


図 21 設定画面

6.4.2 Wi-Fi モードの対策

カメラの開発会社である RICHO に問い合わせたところ、ネットワークモードが自動で切り替わるには仕様であり変更できないことがわかった。そのため、1秒ごとにネットワークモードを確認し、アクセスポイントモードになっている場合に自動的にクライアントモードに変更するプログラムを作成しカメラ内で実行した。

6.4.3 異常終了の対策

ネットワーク切断時や解像度変更時にアプリケーションが異常終了してしまう不具合が発生した。これらの問題はカメラのドライバ周りのエラーが多く、対策が難しい。そのため、エラー発生時に自動的にアプリケーションを再起動するようにし、恒久的な動作ができるようにした。

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遠隔操縦をすること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、その他研究員の皆様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の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瀧島先輩には、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。瀧島先輩なしではこの卒論を完成させることはできなかつたでしょう。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)