

# 4G 回線を利用したロボット遠隔操作システムの構築

西 正満

鹿児島大学大学院理工学研究科技術部

## 1. 背景

インフラ構造物の点検や探索など、遠隔操作ロボットの活用<sup>[1]</sup>が進んでいる。しかし対象となる場所はローカルネットワーク設備のない場所や広域であることが多く、ロボットからの電波の届く範囲もしくは有線接続の範囲内に操縦者がいる必要がある。そこで、携帯端末で使われている 4G 回線を利用した点検ロボット遠隔操作システム構築の依頼があった。

## 2. 目的

本報告では、WiFi や有線ネットワークがない環境でも遠隔操作が可能な 4G 回線を介したロボット遠隔操作システムの構築を目的とする。ロボットは 4G 電波が利用可能な現地、操縦者はインターネットを介した遠隔地から映像を確認しつつ操作することを想定する。そのためなるべく低遅延であること、ロボット内に搭載するため機材は小型が好ましい。今回は、4G 回線を介した遠隔操作のための映像伝送について報告する。

## 3. 関連技術

遠隔操作のための映像伝送には低遅延が求められる。今回はリアルタイムの映像伝送および通信技術として WebRTC を採用した。WebRTC とは、ブラウザ同士でリアルタイムコミュニケーションを行うための技術である。音声や映像データ、ほか大量のデータを高速に送ることができるよう設計されている。インターネットを隔てた相手と直接やりとりをするために P2P が使われており、TURN/STUN サーバも併用して使用される。

オープンソースとして利用が可能な、株式会社時雨堂が開発している WebRTC 向けシグナリングサーバ Ayame<sup>[2]</sup>とクライアントの Momo<sup>[3]</sup>がある。Ayame は自前のサーバに構築も可能だが、TURN/STUN サーバを組み込んだ無料で利用可能なシグナリングサー

ビスの AyameLabo<sup>[4]</sup>が公開されている。今回はシグナリングサーバに AyameLabo、ロボット側のクライアントに Momo を利用した。

## 4. 使用機材・実験方法

点検ロボットは図 1 のシングルボードコンピュータである RaspberryPi5<sup>[5]</sup>を用いて制御される。また、映像を取得するためのドローン用ジンバルカメラ、車輪駆動のためモータ 2 個および制御用ドライバが搭載される想定である。このロボットを 4G 回線に対応させるため、図 2 に示すメカトラックス社の 4GPi<sup>[6]</sup>を利用した。RaspberryPi の拡張パーツとして取り付け、市販のフリーSIM を使用することで 4G 通信をネットワーク接続として利用できるようになる。



図 1 RaspberryPi5



図 2 4GPi

また、図 3 にシステム全体図を示す。今回実験を行うのは映像伝送についてであるが、AyameLabo はシリアルデータの通信にも対応している。点検ロボットを制御する必要があるため、WebRTC 経由でシリアルデータを受け取り文字列に応じて RaspberryPi 側でモータ・カメラを制御する方針とした。遠隔制御用の PC は AyameLabo へブラウザからアクセスし、受信および操作を行う想定である。

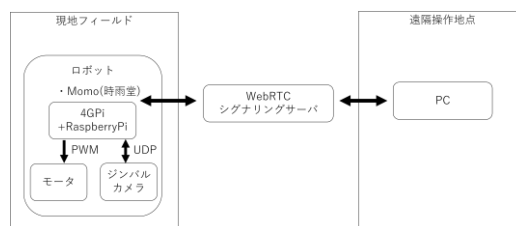


図 3 システム全体図

構築に使用した機材を表 1 に示す。

表 1 使用機材

名称	個数	備考
4G Pi	1	4G 接続用 拡張ボード
Raspberry Pi 5	1	シングルボード コンピュータ
A8 mini	1	ドローン用 ジンバルカメラ

## 5. 実験および結果

### 5.1 映像伝送

実験 1 として、映像伝送の確認を行った。RaspberryPi は 4G 回線のみで接続し、遠隔操作 PC とは WebRTC シグナリングサーバを介して通信している状態である。図 4 に実験環境と、図 5 に映像伝送ができていている様子を示す。



図 4 実験環境 図 5 映像伝送の様子

### 5.2 映像遅延

実験 2 として、カメラに時刻を写し受信側にも同じ時刻を並べて写すことで映像の遅延時間を計測した。その様子を図 6 に、計測結果を表 2 に示す。

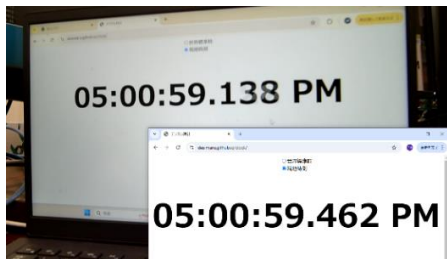


図 6 計測の様子

表 2 計測結果(表記：秒.ミリ秒)

送信側時間	受信側時間	遅延時間
59.138	59.462	0.324
22.422	22.762	0.340
53.333	53.636	0.303
34.780	35.165	0.385
42.255	42.630	0.375

## 6. 考察

4G 回線を用いた遠隔操作のための簡易的なシステムを市販品およびオープンソースの利用によりなるべく低コストに構築した。実験 1 について、比較的遅延な映像伝送が行えることを確認したが、映像伝送の遅延については実験 2 の通り平均 345 ミリ秒であり、計測した全ては 300 ミリ秒台である。遠隔操作の映像遅延に関しては 100 ミリ秒を超えると視覚と操作のズレを感じるとされている<sup>[7]</sup>が、これについては RaspberryPi 側の映像処理が原因や回線速度の限界もあると考えられる。今回の依頼については許容範囲であるが、実際に使用する際の違和感や操作難易度についても検証が必要である。

## 7. 今後の展望

4G 回線を利用した遠隔操作に必要な映像伝送を行うことができた。シリアルデータチャンネルによる制御コマンドの送信は未実装のため、次は遠隔制御の実装および実機への組み込みを行い、実際に遠隔地からの映像受信や操作の検証を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 協栄産業株式会社, インフラ点検ロボットシステム (<https://www.kyoei.co.jp/product/division/robot/inspection.html>)
- [2] 株式会社時雨堂, Ayame (<https://github.com/OpenAyame/ayame>)
- [3] 株式会社時雨堂, Momo (<https://momo.shiguredo.jp/>)
- [4] 株式会社時雨堂, AyameLabo (<https://ayame-labo.shiguredo.app/>)
- [5] Raspberry Pi (<https://www.raspberrypi.com/>)
- [6] MECHATRAX, ラズベリーパイ用 4G(LTE)通信モジュール 4G Pi (<https://mechatrax.com/products/4gpi/>)
- [7] 竹下佳佑, 渡邊幸一, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲, ”レイグジスタンスの研究(第 63 報) -TELESAR3 において許容される通信遅延の検討-, 2010,9, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集”

## 謝辞

本実験および報告を行うにあたって、協力いただいた株式会社エアリアルワークスの肥後社長, 研究室設備をさせて頂いた鹿児島大学工学研究科 鹿嶋雅之准教授に深く感謝いたします。