

WebRTC を活用した低遅延遠隔操作システムの構築及び評価

Construction and evaluation of low-latency remote control system using WebRTC

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏

ロボットの遠隔操作における WebRTC による映像伝送の有用性検証のため、WebRTC と ROS による遠隔操作システムを構築し、映像伝送における遅延時間の評価実験及び映像伝送にかかる CPU の負荷評価実験を行った。WebRTC を用いることで遅延時間が短くなり、CPU の負荷も低減できることを確認した。これにより、WebRTC による映像伝送がロボットの遠隔操作に有用であると示すことができた。

Key words: WebRTC、遠隔操作、ロボット

1. 緒言

遠隔操作ロボットは災害対応、インフラ点検、医療及びサービス業といった様々な分野での活用が期待されている。特に最近では危険な場所での作業や労働現場の人手不足、コロナ禍による対人行動の制限などの問題を解消するため、遠隔操作ロボットの開発が盛んに行われている。

遠隔操作の課題の一つとして映像伝送等の遅延がある。認知心理学の研究では、数百ミリ秒の遅延により運動主体感が著しく低下するといわれている¹⁾。一方、自動運転システムでオペレータによる遠隔操作を行う場合、映像伝送の遅延時間の許容値は、時速 10[km]の場合、800[ms]とされている²⁾。

低遅延な通信を実現する技術として WebRTC (Web Real Time Communications) がある。WebRTC は映像や音声などのデータをブラウザ上でリアルタイムに送受信できる技術である。Peer to Peer (P2P) という通信方式によりリアルタイム通信を実現しており、Web 会議システムに使用されている。

本研究では、ロボットの遠隔操作における WebRTC による映像伝送の有用性検証のため、WebRTC と Robot Operation System (以下、ROS³⁾)による遠隔操作システムを構築し、映像伝送における遅延時間の評価、映像伝送にかかる CPU の負荷評価及び遠隔操作実験を行った。

2. 実験及び結果

2. 1. 環境構築

実験用の小型ロボットと制御用 PC を VPN で接続し、映像や制御信号などのデータの送受信をすることで遠隔操作が可能な環境を構築した。ロボットは株式会社アールティ社製 Jetson Nano Mouse⁴⁾を用いた。

映像伝送を行うための WebRTC 環境構築には株式会社時雨堂が開発した WebRTC Native Client Momo⁵⁾を用いた。これは Jetson や Raspberry Pi などのエッジコンピュータに WebRTC 環境を構築できるオープン

表 1 開発環境

	制御用PC	ロボット搭載PC (Jetson nano)
OS	Ubuntu18.04LTS	
CPU	Core i7-9700	Quad-core ARM A57
GPU	GeForce GTX1650	Maxwell
メモリ	32GB	4 GB
フレームワーク	ROS - melodic	



図 1 制御 PC とロボットの外観

ソースのソフトウェアである。また、ロボットの操作には、ROS のパッケージである `raspimouse_ros_examples/joystick_control`⁶⁾を用いた。小型ロボットに搭載されている小型 PC (jetson nano) と作業用 PC を ROS の分散処理機能により同期させることで遠隔操作を可能としている。開発環境を表 1 に示す。ロボットの外観を図 1 に示す。今回使用したロボットは約 2.5 [km/h] で走行が可能である。

小型ロボットと制御用 PC の接続は別の研究事業で開発した VPN 装置⁷⁾を用いた。本装置は SoftEther VPN⁸⁾を用いてネットワーク環境を構築している。制御用 PC 側は光ファイバーによるインターネット接続サービスを利用した有線通信によるネットワーク環境とし、小型ロボット側はモバイルルータを利用した無線通信によるインターネット接続環境としている。ネットワーク環境のイメージを図 2 に示す。

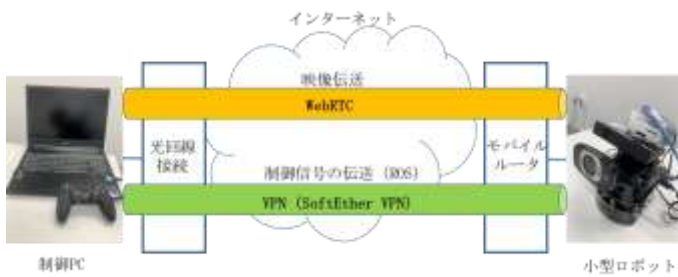


図2 ネットワークのイメージ



図3 遅延時間の評価実験

2. 2. 映像伝送における遅延時間の評価

WebRTC を用いて映像を送信し、受信するまでの時間を計り、遅延の評価を行った。動作中のストップウォッチを小型ロボットのカメラで撮影し、その映像を構築したネットワークを介して制御用 PC へ伝送した。現表示時間と伝送先の表示時間を比較し、遅延時間を求めた。現表示画面と伝送先の表示画面を並べてビデオカメラで1分間撮影し、動画からランダムに20か所抽出してそれぞれ求めた遅延の平均を遅延時間とした。実験の様子を図3に示す。実験は640×480、960×720、1280×720（ハイビジョン）及び1920×1080（フルハイビジョン）の4つの解像度で行った。比較対象としてWebRTCを使用せず、映像を生データのまま直接送る場合と画像を一度圧縮して送る場合の2つの形式で同様に遅延時間を求めた。

結果を図4に示す。図4中のエラーバーはそれぞれの最大値と最小値である。また、WebRTCの結果の詳細を表2に示す。どの解像度においてもWebRTCを用いた場合が、3つの伝送形式の中で最も遅延時間が短い結果となった。解像度1920×1080の生データを伝送した際は動作が停止してしまい測定不能という結果となった。WebRTCの遅延は評価した中で最も大きい解像度である1920×1080で映像伝送した場合でも280[ms]であった。

更に、それぞれ伝送した際のフレームレートを測定した結果を図5に示す。WebRTCで伝送した場合が最も高い結果となった。

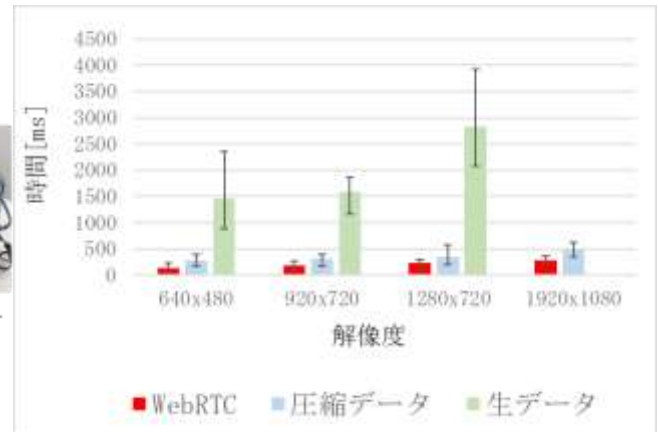


図4 遅延時間の評価結果

表2 WebRTCによる映像伝送の遅延時間

		遅延時間[ms]		
		平均	最大値	最小値
解像度	640x480	140	240	70
	920x720	190	260	110
	1280x720	230	300	120
	1920x1080	280	360	230



図5 フレームレートの評価結果

2. 3 CPUにかかる負荷の評価

解像度1920×1080の映像を、WebRTCを使用した場合とWebRTCを使用しない場合それぞれ2分間送信し、その時のCPUの使用率を計測した。結果を図6に示す。小型ロボットに搭載されているCPU（表1）はCPUが4つあり、図6の値はそれぞれの使用率の合計である。WebRTCを使用しない場合の使用率は約300[%]に対し、WebRTCを使用した場合は約150[%]であった。同じ解像度の映像を伝送する場合でもWebRTCを使用した方がCPUにかかる負荷が少ないことが分かった。

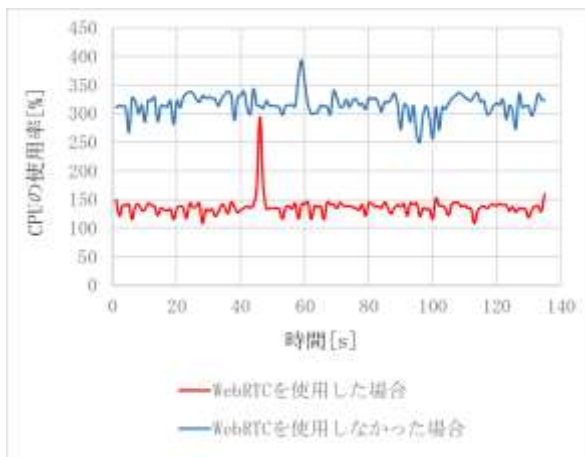


図6 CPUの負荷評価結果

2. 4 遠隔操作実験

小型ロボットを郡山市にあるハイテクプラザ本部に配置し、南相馬市にある南相馬技術支援センターから遠隔操作する実験を行った。小型ロボットから離れた場所に目標物を置き、遠隔地から映像を見ながら操作し、目標物に接近した。この時の解像度は1920×1080とした。WebRTCを用いて映像伝送を行った場合では遅延も認識されず映像を見ながら操作することができた。WebRTCを用いずに映像伝送を行った場合は、映像が停止する、制御信号が送信できないといった問題が生じ遠隔操作することができなかった。遠隔操作実験の様子を図7に示す。

3. 考察

遠隔操作システムを構築し、WebRTCを用いて郡山-南相馬間で小型ロボットの遠隔操作実験を行った際、特に遅延を感じることなく操作することができた。遅延時間の評価ではWebRTCの遅延は1920×1080で映像伝送した場合でも遅延が280[ms]であった。自動運転で遠隔操作を行う場合、映像伝送の遅延時間の許容値が、時速10[km]時には800[ms]とされていることから、ロボットを時速10[km]以下で移動させる操作にはWebRTCによる映像伝送は有用であると考えられる。また、CPUの使用率においてもWebRTCを用いた方が、負荷が小さいことが分かった。ロボットを操作する際、限られたリソースの中で様々な作業を行うことから、WebRTCを使用した場合、CPUの負荷が低減できることは有用であると考えられる。

今後、遠隔操作システムを開発していく際には遠隔操作時の定量定期評価や他ロボットへの適用などが課題である。

4. 結言

本研究では、WebRTCとROSによる遠隔操作システムを構築し、映像伝送における遅延時間の評価及び映像伝送にかかるCPUの負荷評価を行った。



図7 遠隔操作実験
(左) 南相馬 (右) 郡山

遅延時間の評価実験では、WebRTCの遅延は評価した中で最も大きい解像度である1920×1080で映像伝送した場合でも280[ms]であった。どの解像度においてもWebRTCを用いた場合が、最も遅延時間が短い結果となった。CPUの負荷においてもWebRTCを用いた方が、負荷が小さいことが分かった。

ロボットを時速10[km]以下で移動させる場合、WebRTCによる映像伝送は有用であると示すことができた。今後は、遠隔操作のコースを設定し、到達時間やコースと移動した軌跡の差を確認するなど操作性の定量的評価を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 浅間 一 “ロボットの自律性”. 学術の動向 2020年 25巻 5号 p. 5_28-5_29
- 2) 水島知央, 他 “遠隔型自動運転システムにおける遠隔操作時の映像遅延が操舵の操作に与える影響の評価”. 自動車技術会論文集 50巻 3号 p. 970-976
- 3) “ROS.org | Powering the world's robots”. OpenSource Robotics Foundation. <http://www.ros.org/>, (参照 2023-2-9) .
- 4) <https://rt-net.jp/products/jetson-nano-mouse/>. (参照 2023-2-9)
- 5) <https://github.com/shiguredo/momo> (参照 2023-2-9) .
- 6) https://github.com/rtnet/raspimouse_ros_examples#joystick_control. (参照 2023-2-9) .
- 7) 太田悟, 他 “ロボットビジョン技術を搭載したドローン実演機の試作とRTFでのフィールド実証(第1報)”. 福島県ハイテクプラザ, 2022
- 8) ”SoftEther VPN プロジェクト ウェブサイト”, <https://ja.softether.org/> (参照 2023-2-9) .