

「テレプレゼンスロボット利用における 通信部分の課題に対する検討」

報告書

神戸情報大学院大学

横山輝明

2024 年 3 月

目次

1. 概要	5
1.1. テレプレゼンスロボットの概要	5
1.2. テレプレゼンスロボットと通信の関係	7
2. テレプレゼンスロボットとは	9
2.1. テレプレゼンスロボットの製品事例	9
2.1.1. Double Robotics 社 Double3	9
2.1.2. temi 社 temi V3 / V3C	10
2.1.3. Xandex 社 Kubi	11
2.1.4. iPresence 社 Telepii	12
2.2. テレプレゼンスロボットの利用事例	13
2.2.1. ビジネス分野	13
2.2.2. 教育分野	13
2.2.3. 医療分野	14
2.2.4. 介護分野	14
2.2.5. MICE 分野	14
3. テレプレゼンスロボットと通信	16
3.1. テレプレゼンスロボットの技術構成	16
3.2. 通信に関する問題	18
3.2.1. インターネット接続に対する課題	18
3.2.2. ローカルネットワークにおける課題	20
3.2.3. 携帯電話回線の利用における問題	26
3.2.4. ソフトウェア部における問題	26
4. 通信部分の問題解決への検討	28
4.1. ローカルネットワーク構築における検討	28
4.1.1. インターネットとの接続方法の検討	28
4.1.2. ローカルネットワーク構築部分の検討	34
4.2. ネットワーク監視の検討	45
4.2.1. インターネット接続に対する監視	46
4.2.2. ルータにおける観測	47
4.2.3. ローカルネットワークに対する監視	49
4.2.4. テレプレゼンスロボットに対する監視	50

5. まとめ.....	52
参考文献.....	54

図 1 テレプレゼンスロボットの例 (AVA Robotics, Double Robotics 社 製品)	6
図 2 イベント会場での利用 (著者撮影)	7
図 3 学校での利用 (iPresence 社事例)	7
図 4 Double3 ロボットとサービスへのアクセス画面 (Double Robotics 社)	10
図 5 temi と temi center のマップ管理画面 (temi 社)	11
図 6 kubi ロボットと kubi kart	12
図 7 動く電話 Telepii (iPresence 社)	13
図 8 大規模展示会での利用事例 (iPresence 社)	15
図 9 テレプレゼンスロボットに関わる通信部の構成	16
図 10 Temi ロボットでの対話実験の様子	17
図 11 Temi の WiFi ネットワーク接続の設定の様子	18
図 12 通信利用における主な問題が起こり得る場所	18
図 13 イベント時の通話品質の確認実験	23
図 14 イベント時の通話品質の確認実験 (別時間)	24
図 15 イベント時の WiFi 電波状況の例	25
図 16 イベント後の電波状況	25
図 17 テレプレゼンスロボット向けネットワーク部	28
図 18 スターリンクのアンテナ	31
図 19 ルータからの 2 つの接続を負荷分散して利用する PBR 例	32
図 20 WAN ロードバランサーによる複数のインターネット回線の自動切り替え	32
図 21 Peplink 社 Speed Fusion 技術	33
図 22 Peplink 社ルータ例	34
図 23 テレプレゼンスロボットを収容するローカルネットワーク	35
図 24 WiFi 利用によるローカルネットワークの構築	37
図 25 展示場での WiFi AP 設置例	39
図 26 展示場の様子 (奥行き 72m)	39
図 27 イベント会場での WiFi AP 設置例 (半可搬型)	41
図 28 フジクラ・ダイヤケーブル社 無線 LAN 用漏えい同軸ケーブル (WBLCX)	42
図 29 アンテナ延長ケーブルを利用する方法 [KPWL-0300H]	43
図 30 モバイルルータを用いた携帯電話接続の利用	44
図 31 ネットワーク運用における観測対象	46
図 32 利用可能帯域の計測 (インターネット接続)	47
図 33 smokeping による RTT 計測と可視化例	47
図 34 ルータ上での通信流量の計測例	48
図 35 実験時のルータやインターネット接続の例	49
図 36 ICMP による RTT 時間の計測例	50

1. 概要

著者らは、これまでもテレプレゼンスロボットと呼ばれる、移動型ロボットを利用した遠隔コミュニケーションに関する実験を行ってきた。本稿では、実験などの結果からわかった、テレプレゼンスロボットにおける通信部分の課題や、今後の解決のための検討について報告する。本章では、議論の対象となる、テレプレゼンスロボットと通信の関係と、その課題について概要を説明する。

1.1. テレプレゼンスロボットの概要

テレプレゼンスロボットは、遠隔地に存在する人間のプレゼンス（存在感）や行動を、ロボットを介して仮想的に再現する技術である。テレプレゼンスロボットは移動可能で、カメラやマイク、ディスプレイなどの機器を備え、リモートからの制御を受けて行動する。テレプレゼンスロボットを用いることで、遠隔地のユーザーが物理的にその場に現れているかのような感覚を他の人に提示して、遠隔地のユーザーにとってもその場に参加しているような臨場感を体験できる。

現在では、さまざまなテレプレゼンスロボットが登場している。図 1 は市販されているテレプレゼンスロボットの例である。ロボットとテレビ会議を組み合わせたような外観が特徴で、ユーザーはこのロボットを操作して遠隔地にいるかのように振る舞い、遠隔地の人々とコミュニケーションを図ることができる。ユーザーの顔なども示すことで、ロボットの周辺の人々に対しての存在感を示している。ロボットが移動しながら、投影されるユーザーの姿に周辺からも話しかけるといった体験は、従来のテレビ会議システムにはないものである。2013 年に iRobot が発表した AVA[1]は、遠隔地からの操作によって屋内空間を自由に移動して、現地の人とコミュニケーションをとることができた。AVA はテレプレゼンスロボットの草分けとして、その価値を示したが、高価な製品であり、広く普及するには至らなかった。その後、Double Robotics [2]のような安価な製品が登場し、ビデオ会議や遠隔コラボレーションはより身近なものになった。これらの商品は、ビジネス環境や教育分野で広く受け入れられ、テレプレゼンスロボットの普及に貢献している。



図 1 テレプレゼンスロボットの例（AVA Robotics, Double Robotics 社 製品）

テレプレゼンスロボットは一般にも販売されており、さまざまな利用事例が集まっている。最近では、展示会や学会会場など、特に技術関係のものであればなおさら、こうしたテレプレゼンスロボットを見かけることも珍しくなくなっている。さらに、ビジネス会議、教育、医療診療などでの用途にも利用が始まっている。リモートからロボットを操縦し、そのロボットを介して遠隔地に存在する人物とのインタラクションが可能になる。遠隔地とのコミュニケーションや協力連携を円滑に実施するための手段として、テレプレゼンスロボットは注目されている。テレプレゼンスロボットの開発・販売を手掛ける、iPresence 社 Web ページでも利用事例が紹介されている[3]。



図 2 イベント会場での利用



図 3 学校での利用 (iPresence 社事例)

1.2. テレプレゼンスロボットと通信の関係

テレプレゼンスロボットにとって、遠隔制御や遠隔コミュニケーションは基幹機能である。それらの遠隔地とのやりとりには、通信機能の利用が必須となる。それらの、制御やコミュニケーションの機能は、インターネット上のサービスとして実装されることが一般的であり、テレプレゼンスロボットの利用にはインターネット接続の確保が必要となる。

そして、テレプレゼンスロボットが提供するサービスの品質は通信性能に依存する。通信

品質の低下は、ユーザーの遠隔制御や遠隔コミュニケーションの利用の困難を引き起こしてしまい、ユーザー体験を直ちに悪化させる。テレプレゼンスロボットの十分なサービス提供には、高品質な通信環境の提供が重要な要素となる。

テレプレゼンスロボットによるコミュニケーションでは、移動しながら通信を利用する。その際には、WiFi などの無線通信技術を利用するが、移動に伴いその通信品質は変化する。遠隔制御や遠隔コミュニケーションなど、リアルタイム性が求められるアプリケーションは通信品質の変動に敏感なことが多く、通信品質を確保したまま移動できるような、ネットワーク基盤の用意が重要な課題となる。これは従来型のネットワーク利用である、PC やスマートフォンからの通信利用とは異なる利用形態であり、従来型のネットワークとも異なるネットワーク環境の整備が求められる。

また、他の課題として、テレプレゼンスロボットの利用シーンの特殊性も挙げられる。テレプレゼンスロボットの利用状況として、イベントへの遠隔参加では、その利用環境は混雑状況となることも多い。こうした混雑環境では、そもそも大量の機器からの大量の通信が発生しているという通信環境の混雑であったり、物理的に人が混雑しているなど、無線通信の環境としては厳しい状況となる。

テレプレゼンスロボットの利用には、こうした状況において、(1) インターネット接続を確保すること、(2) テレプレゼンスロボットが利用するネットワークを用意すること、(3) 時事刻々と変化する通信状況を監視してトラブル原因を把握することなどの、通信ネットワーク関係の対処が必要となる。これらの課題に対して、それぞれ技術的な解決策の提案が重要となる。さらには、このような通信状況下において、安定的な通信を成立させる通信技術やサービス実装の工夫など、通信の上位層においても、トラブルを回避するような機構もまた技術的な課題となる。

今後のテレプレゼンスロボットの普及と利用拡大には、こうした通信部分における課題解決が重要となると考える。著者もテレプレゼンスロボットの提供に関わり、ネットワーク構築や運用を経験してきた。本稿では、著者の経験も含めて、テレプレゼンスロボット利用における通信の課題について整理して、対策案について検討する。

2. テレプレゼンスロボットとは

今日では、多種多様なテレプレゼンスロボットが提供されている。さまざまなテレプレゼンスロボットのなかから、いくつか代表的なものを取り上げて説明する。また、テレプレゼンスロボットの活用方法を示すために、利用事例も紹介する。

2.1. テレプレゼンスロボットの製品事例

さまざまなテレプレゼンスロボットが入手可能となっている。ロボット型で移動を伴うものから、固定設置のものまで、特徴的なものをいくつか紹介する。

2.1.1. Double Robotics 社 Double3

Double Robotics 社は 2013 年から初代 Double ロボットの提供を開始して、製品提供を続けている。それまでのテレプレゼンスロボットと比べて、比較的安価な製品を提供して、テレプレゼンスロボットの市場を拡大した。Double3 は、3 台目の製品である。

図 4 Double3 ロボットとサービスへのアクセス画面 (Double Robotics 社) は Double Robotics 社の Double3 (ダブルスリー) である。ジャイロセンサーでバランスをとりながら移動する二輪型のテレプレゼンスロボットで、遠隔地からでも操作者がその場にいるかのような感覚を提供できる。Double3 はブラウザ (Google Chrome、Firefox、Safari) や iPad や iPhone の専用アプリケーションを通じてアクセス、遠隔操作ができる。ロボットとアプリケーション、共に Double Robotics 社が製造し、滑らかな移動と高度なカメラ機能を備えている。

技術的な仕様としては、9.7 インチの LCD ディスプレイ、13MP カメラなどを搭載。内部には NVIDIA Jetson TX2 プロセッサが搭載され、4GB の LPDDR4 メモリと 16GB eMMC5.1 フラッシュストレージを備えている。通信は 802.11ac 対応 (2.4GHz, 5GHz) の通信インターフェイスと Bluetooth 4.2 を備えている。稼働時間は 4 時間、充電時間は 2 時間となる。



図 4 Double3 ロボットとサービスへのアクセス画面（Double Robotics 社）

2.1.2. temi 社 temi V3 / V3C

temi(テミ)は、AI 音声認識のプラットフォームを採用したスマートロボットである[4]。テレプレゼンスロボット特有の「そこにいる」感覚を実現するため、ユーザーの声や動きを検知して自由に動き回ることができる。temi は利便性を重視し、自動運転技術を備え、自律移動し、指定された場所に移動することができる。

図 5 は temi ロボットと移動時のマップ管理画面である。temi は、10.1 インチの HD LCD ディスプレイ、13MP の高解像度カメラ、960 x 340cd/m2 の高輝度ディスプレイを特徴として実装している。バッテリーは、8 時間の使用が可能で、充電時間は約 3 時間。また、Wi-Fi および Bluetooth 接続をサポートしている。最新の V3 では USB を利用して有線で WiFi や 5G 対応ルーターへの接続を可能としたり、直接 SIM を差し込めるモデルなども提供されており、通信インターフェースの自由度が上がっている。



図 5 temi と temi center のマップ管理画面 (temi 社)

システムの OS は Android で動いており、第三者の開発者が独自にアプリケーションを開発できる SDK も公開されている。temi center というウェブ上での機材やマップを管理するシステムや temi store と呼ばれるアプリのマーケットプレイスも準備されている。temi は、ビジネス環境や個人利用の両方で利用されており、リモートワーカーや家族とのコミュニケーションなどに活用されている。

2.1.3. Xandex 社 Kubi

kubi は、自律移動を不要とする場面で活用できる卓上型テレプレゼンスロボットである。図 6 は kubi ロボットの製品である。kubi は移動はせず、テレビ会議システムに対して「首振り」の機能を提供する。kubi 自体はコミュニケーション機能を持っておらず、iPad と組み合わせて利用する。シンプルなアイデアであるが、安価な構成を実現している。

kubi では、300 度のパンとプラスマイナス 45 度のチルトの遠隔操作機能により、会議中に自然な顔の首振りを実現する。kubi に iPad を載せて利用する。取り外し可能なベースには標準の三脚マウントが備わっており、バッテリー搭載で最大 4 時間の利用が可能である。AC 電源にも対応しており、特定地点へ設置して電源稼働時間を気にせずに利用することもできる。

kubi のユーザーは、シンプルな操作インターフェースを利用して容易に視点を変えることができるため、遠隔の会議への参加時の視点の自由度が上がる。kubi の周辺にいるユーザーは投影された遠隔参加者の顔を見ながら、存在感を感じながらコミュニケーションを

取ることができる。移動式のカートに乗せて利用するなど、工夫した利用も提案されている。kubi は、教室のような特定の環境と場での利用に向いており、教育現場にて児童生徒が遠隔からの学校への通学や授業参加するなどの利用方法にも用いられている。



図 6 kubi ロボットと kubi kart

2.1.4. iPresence 社 Telepii

iPresence 社が提供する、動く電話 Telepii（テレピー）は、身近なスマートフォンを活用して誰でもテレプレゼンスロボット利用体験ができることを実現した小型テレプレゼンスロボットである[6]。テレビ会議部分はスマートフォンを利用することで、小型でシンプルな作りとなり、安価であることが特徴である。

Telepii は、親しみやすいデザイン、且つ手軽に操作できる iOS／Android アプリケーションや小型のフォーム（サイズは H90mm x W70mm x D70mm）であり、ユーザーはテーブルやデスクに置いて簡単に使うことができる。重さはわずか 160g で、持ち運びなども簡易とし、日常のあらゆるシーンで気軽に離れた場所にいる家族や友人との会話をよりリアルに感じさせるテレプレゼンス体験を楽しむことができる。



図 7 動く電話 Telepii (iPresence 社)

2.2. テレプレゼンスロボットの利用事例

著者は iPresence 社と協力して、テレプレゼンスロボットに関わる実験など実施している。iPresence 社による取り組み事例から、テレプレゼンスロボットの活用事例について紹介する[3]。

2.2.1. ビジネス分野

グローバル企業など複数の拠点を持つ企業においては、テレプレゼンスロボットが新たなコミュニケーションツールとして利用されている。遠隔地の顧客との面談やミーティングに使用することで、遠隔会議の利用場面の幅を広げている。

また、管理者が各管理拠点を遠隔から多数拠点到順番にアクセスなどを実施することで、旅費を削減し、時間の効率化を実現している。ある地方の IT 企業の例では、家族の事情で引越しをする必要があったスタッフがロボットを介したリモートワークを実現し、離職を免れたなどの事例がある。

2.2.2. 教育分野

テレプレゼンスロボットは教育の格差を埋める手段として利用されている。例えば、病気やけがで学校を欠席している生徒が、テレプレゼンスロボットを通じてリアルタイムで

授業や様々な学校生活の場面に参加し、教師やクラスメートとのインタラクションを実現できる。実例として、入院している生徒が卒業式や入学式に遠隔参加したり、遠隔でも授業に参加することで出席単位を取ったりもされている。

兵庫県の病院では、入院中の子供たちがテレプレゼンスロボットを使い、科学館のツアーに参加したり、遠隔からの仕事体験などの提供を実現した。

2.2.3. 医療分野

医療分野では、コロナ禍でお見舞いに行けない入院者の家族がテレプレゼンスロボット経由で遠隔お見舞いを実施している。遠隔地や人員が限られている地域での専門医の遠隔診療などでも活用がされている。これにより、遠隔地の医師がリアルタイムで患者とコミュニケーションを取り、看護師にアドバイスをしたり、診断を下すことができる。

2.2.4. 介護分野

高齢者施設ではテレプレゼンスロボットが家族やスタッフ同士のコミュニケーションツールとして使われている。遠くにいる家族が施設にいる高齢者と会話をするために利用したり、施設スタッフが遠隔モニタリングに使用したりしている。

2.2.5. MICE 分野

東京の展示会の主催企業は、海外バイヤー向けの展示会においてテレプレゼンスロボットを使ったオンラインツアーを実施している。コロナ禍などで海外からバイヤーが渡航できない中、テレプレゼンスロボットを利用することで、世界中から参加者がバーチャルで展示会に参加し、国境を越えたビジネスチャンスを創出している。

また、東京で実施されたオンラインとオフラインのハイブリッド国際学会ではテレプレゼンスロボットを活用した遠隔参加者との交流体験やポスターセッションを実現している。

図 8 は、東京ビッグサイトで開催された展示会での利用の様子である。72m x 144m の会場内に多数のテレプレゼンスロボットを配置して、遠隔からの展示会への参加を可能にした。このような環境で、遠隔地からの参加者も、実際の来場者たちと混在しながら、展示会会場を巡回して、任意のブースに立ち寄る体験をしていた。



図 8 大規模展示会での利用事例 (iPresence 社)

3. テレプレゼンスロボットと通信

本章では、テレプレゼンスロボットによるコミュニケーションや臨場感の提供のために必要不可欠な通信との関係や、通信に関する問題について説明する。

3.1. テレプレゼンスロボットの技術構成

テレプレゼンスロボットとは、ロボット＋リモートコミュニケーションを組み合わせたものであり、動くテレビ会議とも言えるものである。そのリモート関係の機能提供のために通信機能を利用する。テレプレゼンスロボットのサービス部分は、インターネット上のサーバによって提供されており、ロボットからサーバとの双方向の通信を利用する。

図 9 はテレプレゼンスロボットに関わる通信部の構成を表す。サービスへとアクセスするために何らかの方法で、① インターネット接続の確保が必要となる。また、② ロボットが移動する範囲をカバーする、ローカルネットワークも必要になる。ロボットからの通信は、ローカルネットワークを介して、インターネット接続の窓口となるルータで集約される。ルータがインターネット接続の通信を提供する。その他にも、③ テレプレゼンスロボットが携帯電話ネットワークへの通信インターフェイスを持つ場合には、ローカルネットワークを利用せずに、個々のロボットが直接携帯電話ネットワークを介してインターネット接続する方法もある。これらの通信経路により、ロボットはサービスとの双方向の通信を確立する。

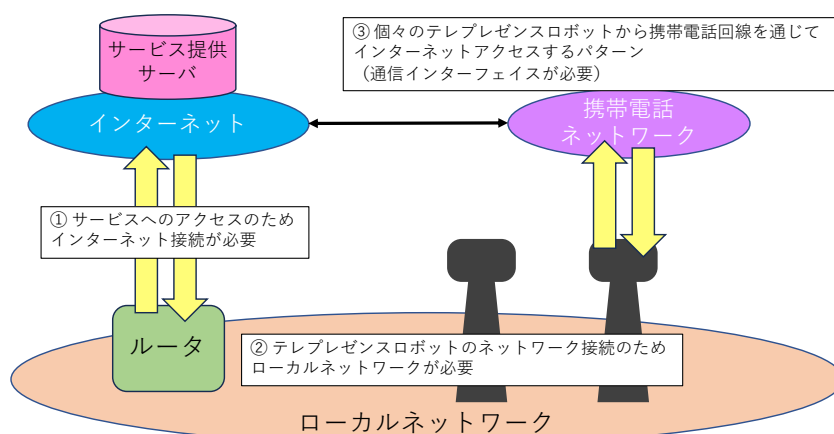


図 9 テレプレゼンスロボットに関わる通信部の構成

テレプレゼンスロボットに搭載された、テレビ会議用のコンピュータ上では遠隔制御や遠隔コミュニケーションを提供するためのアプリケーションが動作する。図 10 Temi ロボットでの対話実験の様子は temi ロボットを利用している様子である。ロボットに組み込まれたテレビ会議アプリケーションを利用して、コミュニケーションを取っている。図 11 は temi ロボットの通信の管理画面である。WiFi 通信の接続先や通信設定などをここで与える。

テレビ会議アプリケーションが、制御信号・音声・動画を伝送するために通信を送受信する。音声や動画の送受信はインターネット上での一般的なテレビ会議系のソフトウェアと同様の動作をしており、サービス提供サーバとの送受信で完結している。通信プロトコル内容は各製品の実装依存であるが、例えば、Temi ロボットでの実験では、動画や音声の送受信に上り／下りのそれぞれで 5Mbps 程度の帯域が必要であった。これは、一般的な Web 会議等でも求められるのと同様である。

実験では、利用可能な帯域の制限やパケットロスを起こしての影響を確認したが、帯域が狭まることで映像や音声途切れ途切れとなり、コミュニケーション品質が悪化した。最悪の場合には、真っ黒な画面で不通状態となり再接続のための手動操作が求められることもあった。通信部分が極端に変動する状況でも、ソフトウェア側処理が安定して動作することや、自動での復帰対応も重要となる。



図 10 Temi ロボットでの対話実験の様子



図 11 Temi の WiFi ネットワーク接続の設定の様子

3.2. 通信に関する問題

テレプレゼンスロボットの利用には、通信ネットワークの準備が必要となる。ここでは、テレプレゼンスロボット向けのネットワーク利用時に発生する問題について説明する。図 12 は、テレプレゼンスロボットの通信利用において、主な問題が起こり得る場所を表す。この整理に分けて説明する。

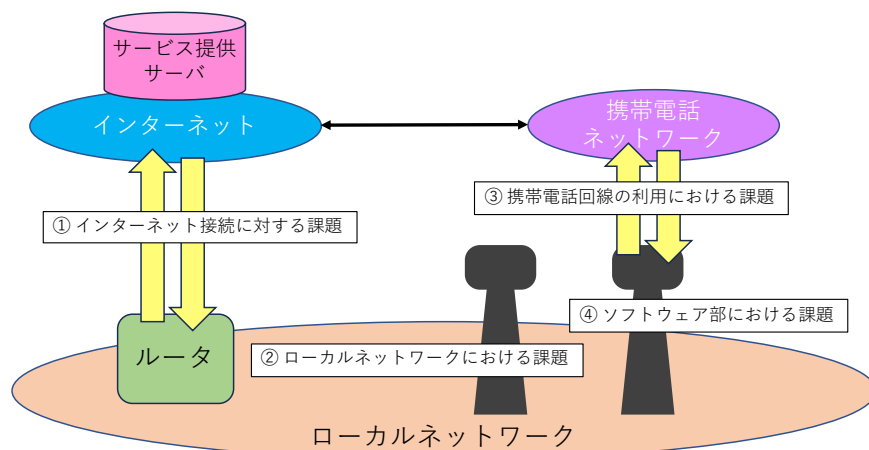


図 12 通信利用における主な問題が起こり得る場所

3.2.1. インターネット接続に対する課題

テレプレゼンスロボットからサービス提供サーバに対するアクセスのために、インターネット接続を用意する必要がある。サービスへの通信はすべてこの接続を通過するため、通信帯域などには十分な通信品質が求められる。

(インターネット接続の帯域不足)

インターネット接続部で起こり得るトラブルとして、帯域不足の発生が挙げられる。複数台のテレプレゼンスロボットの利用や、ローカルネットワークの他ユーザーからの通信の影響を受けて、通信帯域の不足が発生する可能性がある。既存のインターネット接続を利用することも、テレプレゼンスロボット用に別途のインターネット接続を用意することもできるが、いずれの場合も帯域量に余裕を持つことが重要である。特に既存のインターネット接続にて、テレプレゼンスロボット以外の通信と共用する場合には、そうした通信による利用がテレプレゼンスロボットの通信を圧迫しないか、注意が必要である。

また、一般的な商用サービスのインターネット接続回線は、その上流の通信経路上で、複数の利用者回線を集約する[7]。他の回線の通信利用の増加は、利用可能帯域を圧迫する。大規模イベントなどでは、新規に設置した回線であっても周辺利用の影響を受ける可能性がある。予備回線の確保時には、異なる ISP やサービスを用意するなど、分散化を図ることにより冗長性の確保になる。

(インターネット接続の上り帯域不足)

インターネット接続の帯域問題は、上り帯域部分で発生することがある。一般利用者向けのインターネット接続では、上り／下りでの帯域が非対称で提供されているものが多い。これまでの Web 閲覧などの一般的な利用パターンでは、ユーザーから見た上り（アップロード）側には少量のリクエストが送信されて、下り（ダウンロード）側で大量のデータを受信するため、それに合わせたサービス提供となっているためである。テレプレゼンスロボットでは双方向のコミュニケーションを実施するため、上り側の帯域確保が重要となる。

表 1 主要なインターネット接続サービスの帯域例である。携帯電話回線など、無線接続は工事不要なため手配は容易ではあるが、多くの場合は上り帯域が制限されていることに注意が必要である。また、利用可能な帯域は最大値を表しており、それを下回ることが多い。無線通信技術では理論最大値を大幅に下回ること多い。複数台のテレプレゼンスロボットを利用する場合には、事前に上り側の帯域の必要量を見積もることや、事前のリハーサル的な試験などの確認が必要である。

表 1 主要なインターネット接続サービスの帯域例

	上り	下り	備考
フレッツ光(1G)	1 Gbps	1 Gbps	上下対称
フレッツ光(10G)	10 Gbps	10 Gbps	上下対称
JCOM NET 1G ケーブル TV	100 Mbps	1 Gbps	サービス例
Docomo 4G	131.3 Mbps	1.7 Gbps	Docomo モバイルルータ SH-54C 利用 理論値であり実効値は下回る
Docomo 5G	1.1 Gbps	4.9 Gbps	Docomo モバイルルータ SH-54C 利用 理論値であり実効値は下回る
スターリンク (衛星通信)	25 Mbps	150 Mbps	サービスプロバイダの公称値

3.2.2. ローカルネットワークにおける課題

テレプレゼンスロボットはサービスにアクセスするための通信インターフェイスを備えており、サービスへのアクセスを確保するために、ロボットが稼働するエリアにおけるローカルネットワークが必要となる。このローカルネットワークは、既設のものを利用することも、新設して利用することが選択になる。利用するローカルネットワークの判断は、(1) 通信性能、(2) コスト、(3) ロボットの通信インターフェイスなどの要件に基づいて、既設利用や新設利用を決める。

ローカルネットワークは、ロボットからインターネットへの通信を中継するために利用される。移動しながらの通信に対応するには無線通信を利用する。利用可能な無線通信技術は、免許不要で低廉化している 802.11 系の WiFi 技術や、ローカル 5G による自営の携帯電話回線などがある。移動しないテレプレゼンスロボットであれば Ethernet ケーブルによる有線接続を利用できる。

(ローカルネットワークの敷設の問題)

ローカルネットワークを敷設する場合には、敷設コストが問題となる。テレプレゼンスロボットの移動に合わせて無線通信の環境を用意するためには、面的なカバーのために多数のネットワーク機器の用意が必要になる。また、移動時の途切れのない通信の実現には、通常のネットワーク環境よりも高密度な機器の設置であったり、エリア内に無線通信を均質

に高品位に届けたりするには高度な設置技術が求められる。

特に、WiFi 技術を利用する場合には、後述する電波干渉や混雑の観点から、通信品質を確保するネットワーク構築は容易ではない。また、WiFi で利用可能な電波周波数帯は法律で厳密に制限されている[8]。WiFi では、大別すると、2.4GHz と 5GHz という二種の周波数帯を利用する。2.4GHz 帯は対応機器は多いが、利用可能なチャンネルが 3 つ程度と少ないため、面的な機器設置ではチャンネルが重なることでの干渉が避けられない。5GHz 帯はチャンネル数も多く、機器設置には適しているが、法律上では屋外での利用が基本的には禁止されているため、利用は屋内に制限される。

ローカル 5G は、WiFi より広域をカバーできる通信基盤の構築技術である。携帯電話回線と同様の高度な通信基盤を自営利用することができる。ただし、その構築や運用には免許が必要であり、機器の設置も電波法に従う必要があり、構築運用は高コストとなる[9][10]。また、ローカル 5G に対応した通信インターフェイスもまだ多くは供給されておらず、今後の発展が期待されている。

(ローカルネットワーク内の帯域不足の問題)

ローカルネットワークでは、通信容量が想定を上回ることによって円滑な利用が阻害される。複数のテレプレゼンスロボットを利用する場合には、複数のコミュニケーション用の通信が発生する。ローカルネットワークを占有利用せず、テレプレゼンスロボット以外の通信も収容する場合には、通信の総量が予想できない。ローカルネットワーク内の利用可能帯域が十分であるか、現在の通信利用量の確認など、ローカルネットワーク内の帯域状況の監視が必要である。

無線通信では、後述するような干渉等による通信性能の低下も発生するため、利用可能帯域は事前に用意していたものを下回ることも多い。ローカルネットワーク内における通信の疎通性なども随時確認することで、通信品質が十分に確保されているかの確認が重要である。

(無線通信における電波干渉の問題)

テレプレゼンスロボットの運用において、最大の問題となるものが、テレプレゼンスロボットの WiFi 接続に対する電波干渉の問題である。無線通信の利用では、電波の干渉などによる性能悪化の問題が発生することがある。WiFi 通信では、誰もがアクセスポイントを設置することができて、アクセスポイント間での利用電波に関する調節機構はないため、電波干渉の問題は頻繁に発生する。WiFi アクセスポイント間が利用する周波数チャンネルが重

なることで、それぞれの通信がお互いに妨害要因として干渉する。この干渉を防ぐには、各アクセスポイントの利用周波数チャンネルが重ならないように指定する。

しかし、WiFi におけるチャンネル数の重なりを完全に解消することは困難である。2.4GHz 帯では、利用可能なチャンネル数は 14 個であるが、WiFi 通信では 22MHz 幅の周波数帯を利用すること、各チャンネルの中心周波数は 5MHz 毎に離れていることから、チャンネル間での利用電波周波数帯の重複を避けるには 5 チャンネル程度離す必要がある。そのため、2.4GHz 帯で利用可能なチャンネル数は 3 チャンネルに留まる。WiFi 通信の送受信可能なエリア内に 3 つ以上のアクセスポイントが存在する状況は容易に起こり得るため、利用チャンネルは必然的に重複する。

WiFi アクセスポイントは非常に安価で、個人でも取り扱いが容易なため、現在では大量のアクセスポイントが周りに存在している。さらに、2.4GHz 帯は電子レンジや Bluetooth など、他機器による利用も頻繁である。2.4GHz 帯で干渉を抑制しながらの利用は、周辺に設置されているアクセスポイントも含めた管理ができない限りは難しい。

表 2 WiFi 5GHz 帯の利用可能な周波数帯については WiFi 5GHz 帯の電波の特徴である。5GHz 帯での WiFi 利用であれば、利用可能なチャンネル数が遥かに多く、規格上の利用可能通信帯域も大幅に広い。2.4GHz と比較して高周波数となるため電波が回折しにくく、障害物による減衰が大きいいため、不要な電波を抑制できて干渉が回避できる。

こうした性質から、テレプレゼンスロボットの WiFi ネットワーク構築には 5GHz 帯の利用が推奨される。しかし、5GHz 帯であっても、近隣に大量のアクセスポイントが存在して、大量の通信が伝送されている状況では干渉の問題が発生する。結局は、近隣の環境次第となる。また、5GHz 帯のうち W52, W53 と呼ばれる周波数帯は原則として屋外利用が禁止されており、屋外でのテレプレゼンスロボット利用において選択できない。また、W56 は W52/W53 に対して新しく許可された周波数帯なので、対応していない通信インターフェイスがあることも注意が必要である。

表 2 WiFi 5GHz 帯の利用可能な周波数帯について

周波数帯	利用可能チャンネル (ch)	屋外利用
W52	36/40/44/48	不可（登録制度）
W53	52/56/60ch/64	不可
W56	100/104/108/112/116/120 /124/128/132/136/140	可能 レーダー検知時は停止

無線通信の利用において、干渉とは異なる問題に「混雑」の問題がある。イベント会場のように人間が多い状況では、アクセスポイントとテレプレゼンスロボットの間を混雑した人が遮ることで電波強度が低下して、通信品質を悪化させる。また、混雑の状況では多くのユーザーが持参するスマートフォンなどの WiFi 機器の集中も起こる。このとき、WiFi 機器からはアクセスポイント探索などのビーコン信号が発信されており、それらの制御信号の送受信も帯域の逼迫や干渉の原因となる。

図 13 は、著者らがイベント利用の実験時にテレビ会議の通話品質を確認した結果例である。イベント期間中の通話品質の観測のために、赤線で示した経路上を数時間毎に定期的に temi ロボットを巡回させながらテレビ会議の品質や可否を確認した。図中のオレンジ色の AP と書かれた 4 つの四角形が AP を表す。青印は通話ができた地点、赤印は動画通話できなかった地点（停止マークは接続ができない状態）を表す。イベント開始前は、全域で通話できるように WiFi AP を設置していたが、イベント時に参加者の入場や通信利用により、電波干渉の影響でこれだけ通信状況は悪化する。

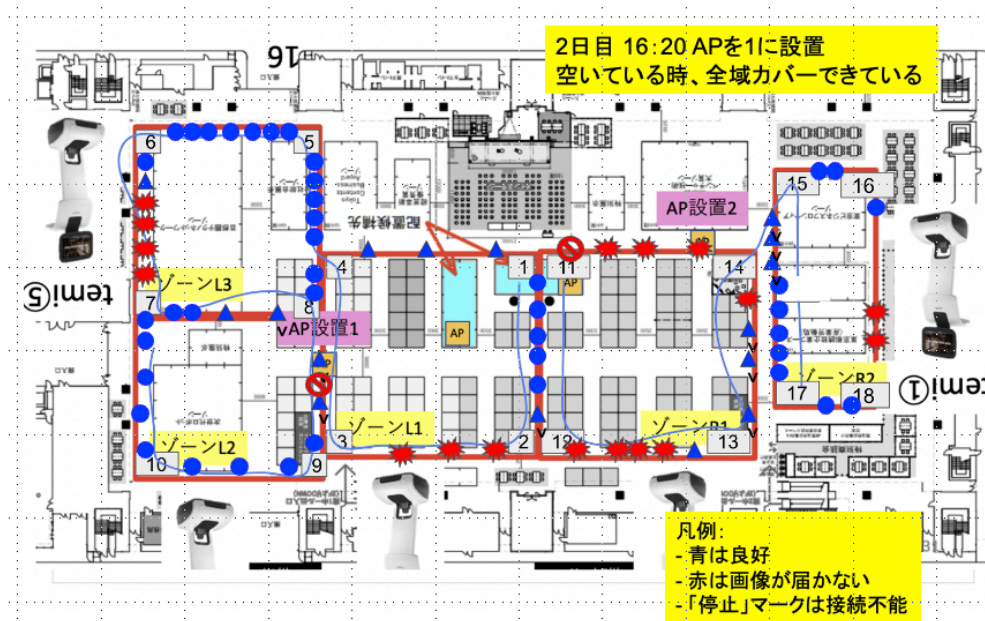


図 13 イベント時の通話品質の確認実験

図 14 は同様の実験を別のタイミングで実施した結果である。2 つの結果を見比べると、

通話品質の悪化する地点は変化していることがわかる。先ほどは通話良好だった地点が悪化したり、通話不調の地点が良好に回復していたりする。このように、会場の人の混雑や、通信利用の混雑によって悪化する地点は大きく変化する。いずれの結果でも、AP からの遠方である隅の通路でも通話良好の結果が出ている。即ち、AP からの電波は十分に全面をカバーできており、通話不調は電波干渉により発生していると考えられる。

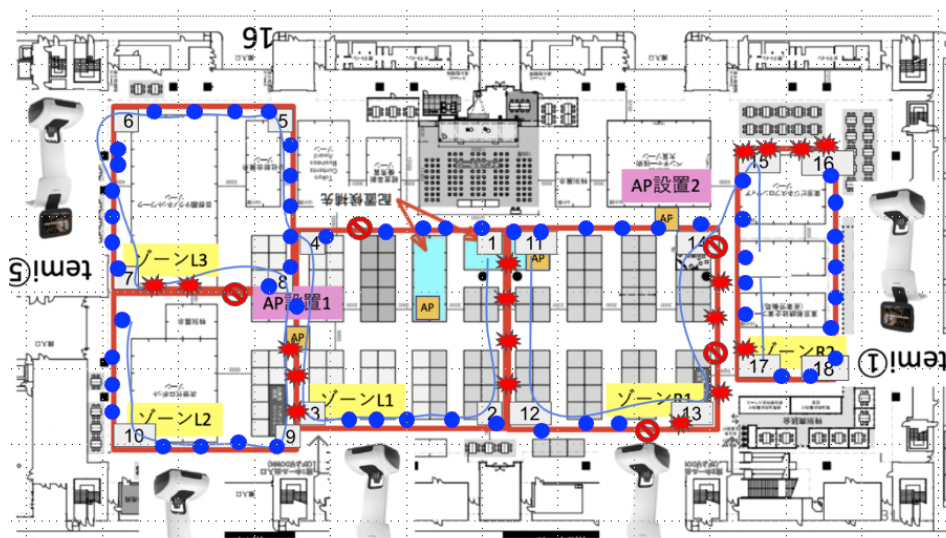


図 14 イベント時の通話品質の確認実験（別時間）

図 15 は、スペクトラムアナライザという機器で観測した WiFi 電波強度の実例である [11]。W52,W53,W56 のそれぞれを黄色枠で囲み、横軸が周波数、縦軸が電波強度を表す。W52 の周波数帯では、電波強度が赤色で示されており、多くのアクセスポイントが存在していて、その周波数帯でたくさんの通信が行われていることがわかる。

このとき、W53 では電波が発信されておらず、混雑がないことがわかる。この混雑状態が通話不調を引き起こしており、このようなモニタリングによって、あらかじめ周辺の電波利用の状況の把握や、混雑の発生を検知することができる。ちなみに、図 16 は、イベント終了後の夜間に同場所で観測した結果である。紫色の結果は、AP 制御信号などの少量の送受信が発生していることがわかる。イベント時間外では、通信の利用もなくなり、電波的には良好な状態となることがわかる。また、WiFi の周波数帯 W53 の上の周波数で、何か強度の強い電波が頻繁に送受信されていることもわかる。このような WiFi 以外の通信も WiFi への阻害要因となる。

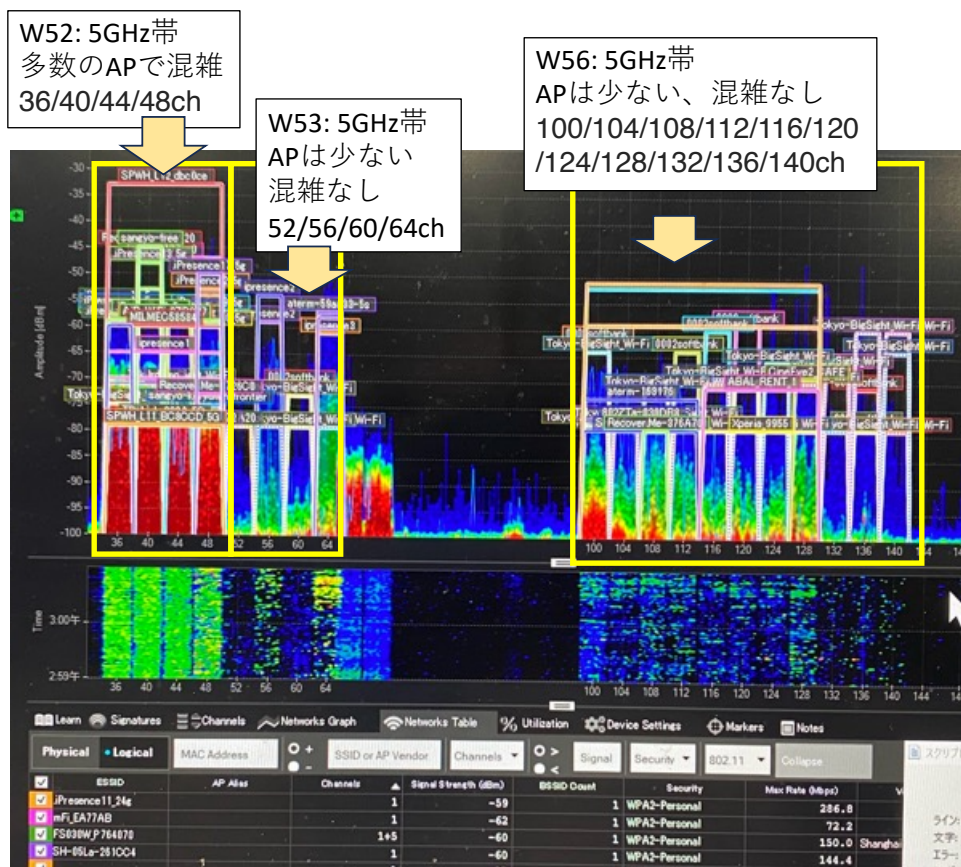


図 15 イベント時の WiFi 電波状況の例

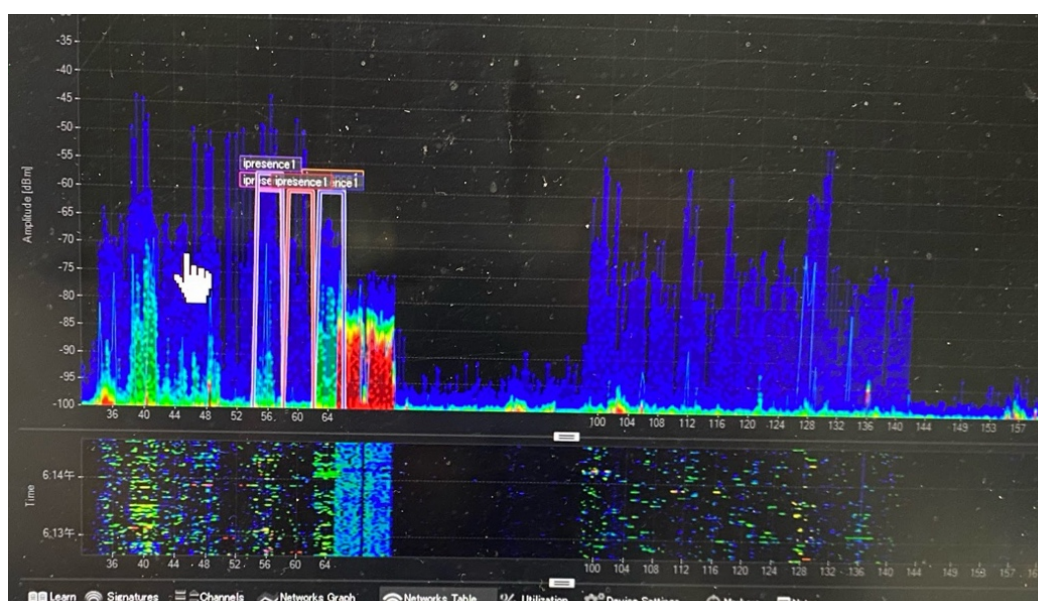


図 16 イベント後の電波状況

(通信インターフェイスに関する制約)

ここまでで説明したように、ローカルネットワークの構築にはさまざまな通信技術が利用可能で、それぞれに得失を持つ。ある通信技術を利用するためには、テレプレゼンスロボットがその通信技術に対する通信インターフェイスを備えている必要がある。テレプレゼンスロボットの種類によっては、通信インターフェイスの交換ができないものもある。そのため、利用可能な通信技術が制限されることもある。

3.2.3. 携帯電話回線の利用における問題

他のインターネット接続の方法として、テレプレゼンスロボットのそれぞれが携帯電話回線の通信インターフェイスを用いて、ネットワーク接続する方法が考えられる。自前での構築運用が不要で、通信事業者の通信基盤を利用できる。このような接続形態では、先述したローカルネットワーク部分に関する多くの問題を回避することができる。特に、敷設コストは不要で、電波干渉の問題を避けることができる。

一方で、それぞれの通信インターフェイス毎にコスト負担がかかることから、稼働台数によっては敷設コストを上回る可能性がある。また、稼働台数が増えた際に、局所的に大量の通信を送受信することが携帯電話回線側の通信基盤の逼迫を引き起こす可能性もある。そうした際の対応は通信事業者次第となる。

テレプレゼンスロボットを直接に携帯電話回線に接続するには、ロボットが携帯電話回線へ接続する通信インターフェイスを備えていないと利用できない。先述のテレプレゼンスロボットの通信インターフェイスの制約により、必ずしもいつでも可能な選択ではない。

3.2.4. ソフトウェア部における問題

テレプレゼンスロボットが備えている、ソフトウェア部分において問題が生じることがある。移動に伴う通信品質の変動は、時には通信断も引き起こす。ネットワークの実験環境を用意して、意図的に帯域制限やパケット破棄率や通信遅延を変化させてみた際には、テレプレゼンスロボットが通信断から復帰しないといった事象にも遭遇した。

著者らの実験では、テレプレゼンスロボット用の WiFi ローカルネットワークへスマートフォンで接続して、移動しながら Zoom を利用するテストも実施した。Zoom によるテレビ会議は安定的に継続することができて、継続性や再接続など、体感的な評価であるが、テレプレゼンスロボットのテレビ会議よりも障害耐性に優れているように感じた。Zoom は市場

規模も大きく、さまざまな改良が施されているのかもしれないが、ソフトウェア改良には向上の余地があるとも考える。また、こうしたテレビ会議の品質や障害耐性の性能を客観的に評価するために、通信品質だけでなく、通話品質や通話体験を測る実験方法を定める必要性もあると考える。

4. 通信部分の問題解決への検討

本章では、テレプレゼンスロボットにおける通信部分の問題を解決するための方法について検討する。図 9 テレプレゼンスロボットに関わる通信部の構成で示した整理に沿って、ネットワーク構築段階における通信手段の選定から、運用上の工夫など、考察する。

4.1. ローカルネットワーク構築における検討

テレプレゼンスロボットが稼働するエリアを対象にして、ローカルネットワークの構築が必要となる。ローカルネットワークの構築において問題となる事項への対策について検討する。図 17 は、テレプレゼンスロボット向けのネットワーク全体像とローカルネットワークの位置付けである。このネットワークは、大きく分けて、① ルータからインターネットへの接続と、② テレプレゼンスロボットからインターネット接続を提供するルータまでの接続の 2 つの区間に分けて、考えることができる。この 2 つはそれぞれ独立して設計・構築できる。本稿でも、それぞれ検討する。

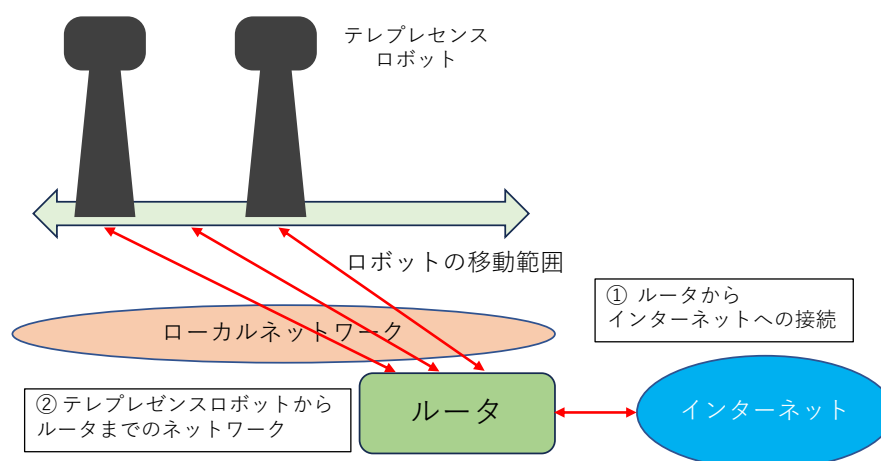


図 17 テレプレゼンスロボット向けネットワーク部

4.1.1. インターネットとの接続方法の検討

インターネットとの接続は、テレプレゼンスロボットとサービス側をつなぐ重要部分であり、通信性能の確保が求められる。インターネット接続には、(1) 現地の既設回線の利用、(2) 新規回線を用意して利用、(3) 携帯電話回線の利用がある。それぞれ、通信性能やコスト面でメリットとデメリットがある。

(1) 現地の既設回線の利用

現地にすでにインターネット接続回線がある場合には、その利用を考えることができる。回線新設のコストが不要なことがメリットである。一方で、通信性能は利用する回線に依存するため、期待する性能（利用可能帯域、安定性など）が十分に確保されるのかは事前の検証が必要である。

上り／下りのそれぞれの利用可能帯域の検証や、実際の利用台数を想定した負荷試験などが考えられる。また、既設回線の場合は現地でのテレプレゼンスロボット以外の常用利用がある可能性がある。そうした利用からテレプレゼンスロボットの通信が影響を受けないか、反対にそうした常用利用へ影響を与えないかの確認も必要である。

インターネット接続部分は既設のものを利用しつつ、ローカルネットワーク部分は新設するといった組み合わせも技術的には可能である。ローカルネットワーク部分については、状況や要望に合わせて、別途検討する。

(2) 新規に回線を用意して利用

求める通信性能を確保するため、現地のその他の通信とテレプレゼンスロボットの通信を分離するためには、インターネット接続回線を新規に用意する方法がある。求めるサービスが現地で展開されているのか、現地の建物等へサービスを引き込めるのかなどの制約はあるが、通信性能の確保の観点からはメリットある選択肢である。その代わり、サービス調達の手間やサービス費用、現地との交渉や確認など、サービス手配と利用のためにさまざまなコストが発生する。

(フレッツなどの FTTH サービス利用)

インターネット接続回線として、性能確保の観点からもっともよいサービス選択肢はフレッツ回線などの FTTH による固定回線の利用である。固定回線であるため、利用場所の建物等への工事や調整などが必要になるが、上り／下りに十分な通信性能を持っており、環境や費用が許すのであれば、一般的に利用可能な通信サービスとして最良の選択となる。

フレッツ等のサービスも通信経路を他者通信と共用利用する、ベストエフォート型のサービスであることには注意が必要である。利用可能な通信帯域や通信品質について、運用時にも定期的な確認をすることはトラブル原因の把握に有効である。

(携帯電話 (4G/5G) 回線の利用)

インターネット接続には携帯電話回線の利用も考えられる。無線通信であるため工事

が不要なメリットがある。いくつかの事業者からは固定回線の代替手段としてサービス提案されている。しかし、携帯電話の通信可能なエリアでないと利用できず、電波強度などによっては十分な性能がでないこともある。加えて、上り／下り帯域が非対称なサービスであることが多く、多くのテレプレゼンスロボットを収容するには上り帯域は不足する可能性がある。

その他にも、ベストエフォート型のサービスであり、理論値通りの性能が出るとは限らないこと、時間帯によっては通信事業者側での混雑に起因する性能低下が起きるなどの問題もあり、安定して高性能を維持できるとは限らない。複数回線を用意して、分散利用するなどの工夫が必要となる。

(衛星回線の利用)

スターリンク社から、安価な衛星通信サービスが提供されるようになり、インターネット接続の手段として選択肢のひとつとなっている。図 18 スターリンクのアンテナはスターリンク社の衛星通信用アンテナの利用の様子を撮影したものである。個人でも運べるサイズで、電源があればどこでもインターネット接続することができる。機器費用や回線費用も高価ではなく、携帯電話回線と同程度での利用が可能であり、利用の比較検討の対象となる。

メリットやデメリットも携帯電話と同様である。しかし、通信可能なエリアは圧倒的に広域となる。そのため、中山間地や離島などになると、有力な選択肢となり得る。著者らの体験からは、携帯電話よりも性能変動は少なく、安定して一定の通信品質を保つと感じている。しかし、スターリンク社のサービスも上りの利用可能帯域は公称 15Mbps ということで、多くの台数からの利用では帯域不足が発生する可能性がある。留意事項として、通信エリアはほぼ無制限にどこでも利用可能であるが、アンテナから北向きに上空への視界を確保する必要があるため、都市部など、障害物が多い環境での設置の制約になることが挙げられる。



図 18 スターリンクのアンテナ

（その他：複数のインターネット接続の複合利用）

その他に、特殊なインターネット接続の確保の技術として、複数のインターネット接続を組み合わせる方法がある。

1つは、ローカルネットワーク構築技術と連携して、複数のインターネット接続にテレプレゼンスロボットからの通信を振り分けする、通信の負荷分散手法である。負荷の分散には、ローカルネットワーク自体を物理的に分割したり、テレプレゼンスロボットの発信元 IP アドレスに基づいて利用するインターネット接続を切り替えたりなどの方法がある。このような切り替えを実現するには、Policy Based Routing (PBR) などの特別な機能に対応したルータを利用する[12]。図 19 は PBR 機能の動作イメージである。PBR 機能を用いた特別なルーティング設定により、ロボットのそれぞれを別途のインターネット接続へと切り替えて利用できる。

同様の技術に、WAN ロードバランサーがある。図 20 はロードバランサーの動作を表す[13]。ローカルネットワークからの通信を複数のインターネット接続（図中 ISP1, ISP2）に自動的に振り分けて利用する。各インターネット接続の疎通確認も実施するため、インターネット接続が切断された場合にも残ったインターネット接続で通信を継続できる。負荷分散と冗長経路の確保ができる。

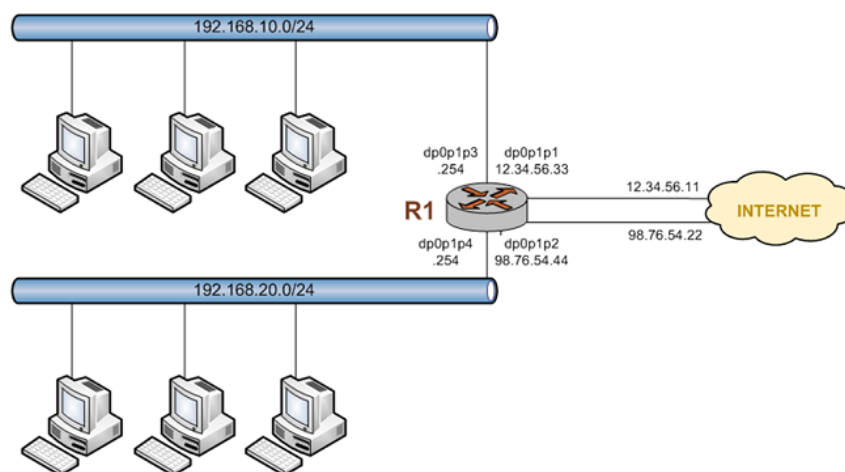


図 19 ルータからの 2 つの接続を負荷分散して利用する PBR 例

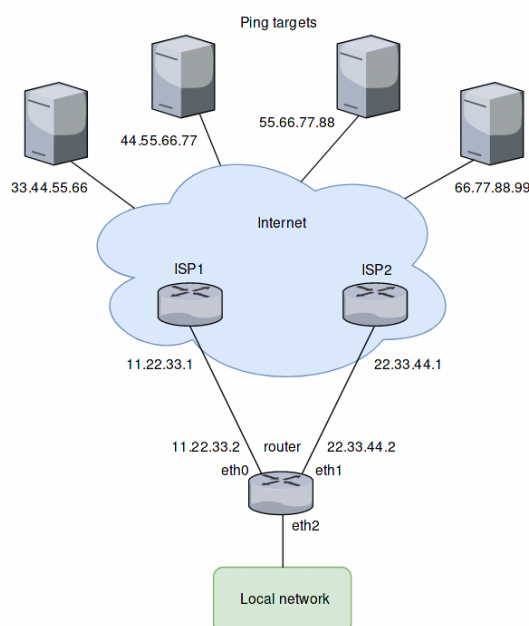


図 20 WAN ロードバランサーによる複数のインターネット回線の自動切り替え

PBR や WAN ロードバランサーでは、テレプレゼンスロボットから発信されるビデオ通話の単位で通信を振り分ける。通話単位での振り分けなので、ロボット 1 台毎にどちらかのインターネット接続を利用する。通話よりも細かな単位での通信の振り分け技術として、インターネット接続の複数を束ねて利用する、ボンディングという機能の利用がある。ボンディング機能では、複数の通信リンクに通信パケットを振り分けて送受

信することで、複数の通信リンクを仮想的に 1 つの通信リンクであるかのように利用する。この機能は、現地側のルータからインターネット上にある通信集約のサーバまで、複数の異なるインターネット接続を介した通信を確立して、利用することで実現する。

これにより、複数のインターネット接続の通信帯域をまとめて利用できて、片方のインターネット接続においてパケット破棄などが起きた場合にも備えることができる。Peplink 社のルータ[14]や Speedify 社の PC 向けサービス[15]など、製品化されているものも存在するため、インターネット接続の帯域をどうしても確保したい場合や、通信リンク上でのパケット損失への対策として、こうした製品の利用の余地はある。

図 21 は、Peplink 社の独自技術である Speed Fusion という機構の説明である。この機能を利用することで、現地側に設置した Peplink 社ルータから、インターネット上の FusionHub と呼ばれるサーバの間で、複数のインターネット接続を集約した利用を提供する。図中では、MPLS と DSL という接続を組み合わせているが、この部分として、これまでに説明したインターネット接続手段を複数で組み合わせる利用できる。

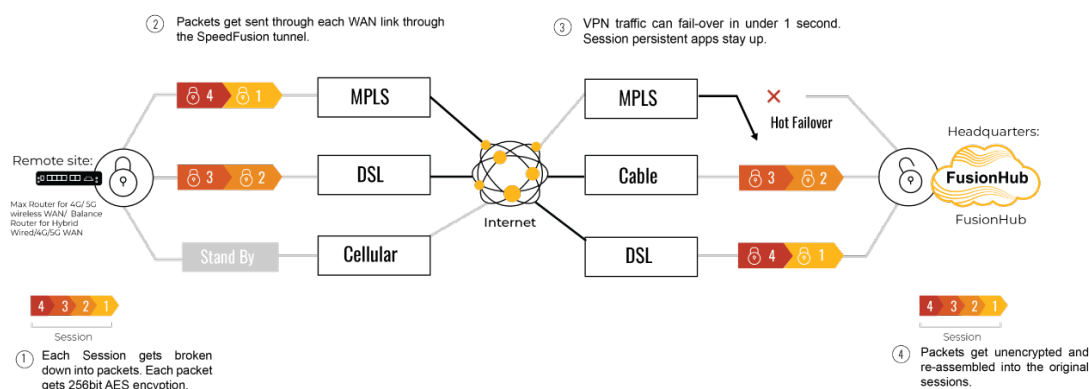


図 21 Peplink 社 Speed Fusion 技術

特に携帯電話回線では、インターネット接続を測定通信会社の一社だけに依存すると、その通信会社の通信回線に混雑が発生するなどある場合に大きな問題となる。ボンディングにて、複数の異なる通信会社の携帯電話回線を組み合わせることで、片方の回線でのパケット破棄や混雑などに対しても備えることができる。

著者らもテレプレゼンスロボットの実験にて、図 22 の Peplink 社製のルータを利用したことがある。そのときは問題なく稼働した。ただし、この実験環境では帯域の拡大の効果は強く体感することはなかった。テレプレゼンスロボットからのリアルタイム性の

強い通信に対して、パケット順序が維持できているか、パケット損失への耐性など、今後の実験により、検証したい。

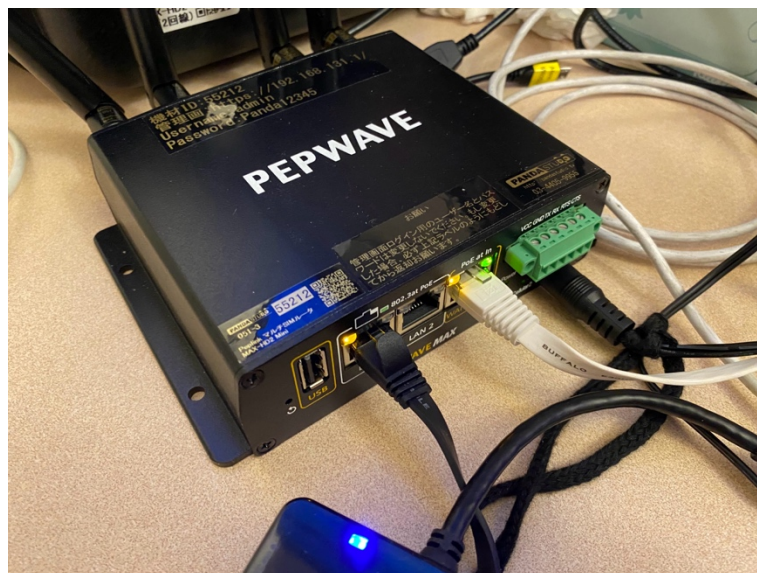


図 22 Peplink 社ルータ例

4.1.2. ローカルネットワーク構築部分の検討

携帯電話回線にて個々のテレプレゼンスロボットを直接ネットワークへと接続する場合を除いて、多くの場合では、テレプレゼンスロボットが活動するエリアをカバーするローカルネットワークが必要になる。図 23 は、ローカルネットワークの役割を表した図である。ローカルネットワークとは、テレプレゼンスロボットの移動範囲をカバーする通信基盤であり、テレプレゼンスロボットに対して、インターネットへの接続を提供するために利用される。

ローカルネットワークには、(1) 既設の通信基盤の利用や、(2) 通信基盤を新設して利用するという選択肢がある。ローカルネットワークの構成技術には、取り扱いの容易さから、WiFi 技術を利用することが多いが、ローカル 5G など、新たな技術も登場して利用可能となっている。また、ローカルネットワーク構築において、利用可能な新規の WiFi 技術や関連技術も登場している。さまざまな技術の選択の可能性があるが、一方で、テレプレゼンスロボット自体の通信方式に従う必要があるという制約もある。

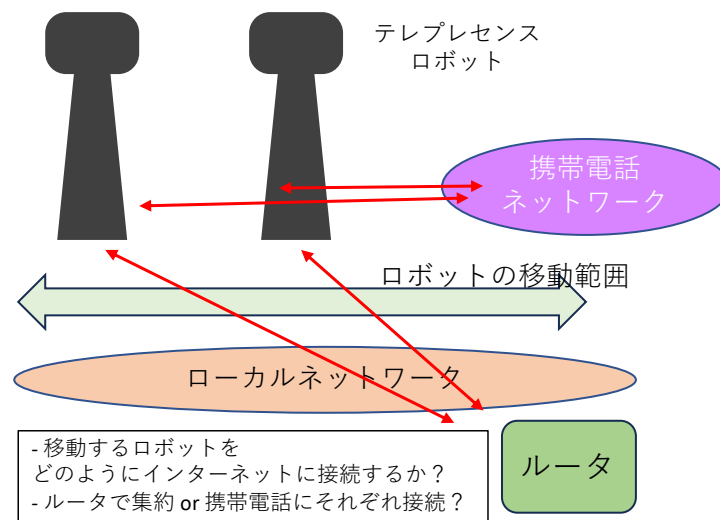


図 23 テレプレゼンスロボットを収容するローカルネットワーク

(1) 既設の通信基盤の利用

既設の通信基盤の利用では、対象エリアに既に用意されている通信基盤を利用する。既設の通信基盤としては、一般的には WiFi 環境が用意されていることが多い。有線 LAN の通信基盤を借用して、WiFi アクセスポイントを後から設置するような複合利用もできる。

他には、テレプレゼンスロボットの通信インターフェイスが携帯電話回線に対応している場合には、対象エリアをカバーする携帯電話回線を利用することも選択肢となる。近年では、一部の実験的な施設等で、ローカル 5G などの自営携帯電話回線が用意されていることもある。

既設の通信基盤の利用では、ネットワーク敷設のコストが発生しないという利点もあるが、テレプレゼンスロボットのサービス品質の確保が困難だという問題がある。そのため、通信品質の事前確認や、サービス提供期間中の通信状況の定期確認が重要となる。これらの確認により、安定してサービスを提供できる、台数やエリアを定めておくこと、サービス提供中のトラブル原因がテレプレゼンスロボットに起因するものなのか、既設のローカルネットワークが原因のものなのかの区別が可能となる。

既設の通信基盤の多くはテレプレゼンスロボットの利用を想定していないため、一般的には、台数やエリア範囲などは小規模での実施向けと言える。

(通信品質の事前確認の重要性について)

通常のローカルネットワークは、テレプレゼンスロボットのような移動しながらの利用は想定していないため、十分な通信品質にて全面をカバーできていないことがある。そのため、想定する移動エリア内において事前に通信品質を確認するリハーサルを実施することで、提供できるサービス内容を検証することが重要である。

- ◇ 実際の稼働台数に近い状況での試験、想定エリア内を移動させながらの確認で、実態に近い検証ができる
- ◇ ユーザー役の設定と模擬会話によりユーザー体験の評価ができる
- ◇ 移動や会話の状況を指定するシナリオを作成すると定量評価できる
- ◇ 困難であるが、人や利用機器の混雑状況を再現にて、よりリアルな状況の確認ができる（経験上から、トラブルの多くの要因は混雑であることが多い）

実際の提供時の混雑状況の再現や、サービス評価のための評価項目がユーザー主観となること、サービス評価手順が定型化や自動化されていないことなど、事前確認も限定的であり、高コストとなってしまう。

(既設回線の利用における注意について)

利用時の他者利用がある場合は、帯域不足や混雑状況になることが多い、可能であればテレプレゼンスロボットが占有利用できるような措置も重要である

(2) 通信基盤を新設して利用

テレプレゼンスロボットの多くは WiFi 技術を利用しているため、用意するローカルネットワークは WiFi 技術を利用することが多い。通信インターフェイスに制約がなければ、WiFi 技術のなかでも、より新しいものの利用やローカル 5G などの携帯電話の自営ネットワーク利用などの可能性が広がる。

WiFi によるネットワーク構築のための技術要素は登場しているが、テレプレゼンスロボット向けのネットワークのためには、利用エリアの全域に対して、高品質な通信環境の提供が求められる。また、無線通信の利用には、周辺の既設の通信基盤やその利用者に起因する外来要因の干渉も避けることができない。テレプレゼンスロボット向けのネットワークには、こうした困難を考慮した構築が重要となる。

(WiFi 技術の利用)

WiFi 通信の送受信にはアクセスポイント (AP) が利用される。テレプレゼンスロ

ボット向けの WiFi 整備が従来のものと異なる点は、(1) テレプレゼンスロボットの移動に合わせて面的に途切れないカバーが必要となる、(2) 各 AP のそれぞれに対する通信負荷は小さい（ロボットの数はあまり多くなく、デバイスの密度は高くない）という特徴がある。各 AP が処理する通信量は多くないが、面的にカバーしないといけないということで、薄くひろくのカバーが求められる。一方で、電波干渉に備えての一定の強度や冗長性も求められる。コストや電波干渉の観点からも、多過ぎず、少な過ぎない配置が必要になる。

図 24 は、ローカルネットワークにおける接続を WiFi で提供する場合の例である。テレプレゼンスロボットの移動範囲を、複数の WiFi AP でカバーしている。各 WiFi AP からルータまでの配線も必要となる。テレプレゼンスロボットから WiFi AP までの区間の WiFi 接続は、電波干渉や混雑など、さまざまな影響を受ける部分であり、この WiFi 接続の通信品質を安定させることが重要となる。

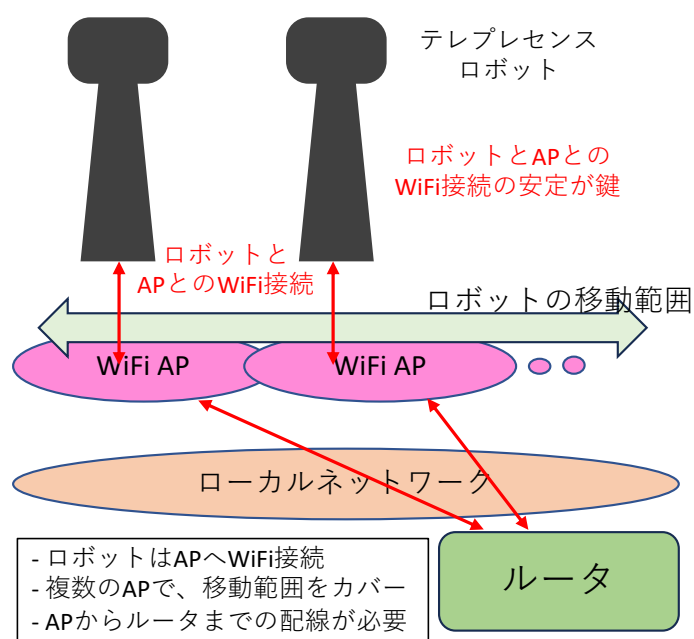


図 24 WiFi 利用によるローカルネットワークの構築

テレプレゼンスロボットからの通信の送受信を処理するには、その移動をスムーズにカバーするために WiFi AP を高密度に配置する必要がある。一方で、接続先の AP 間の切り替えには、切り替え時間やロスが発生することや、過剰な WiFi AP は電波干渉や混雑の原因となるため、単純に多くすればよいわけではない。最終的には経験則や、他の WiFi AP の配置や外来の電波の状況に応じて、適切な配置を導き出す必要がある。AP の配置には、電源の確保や、設置の物理的場所の確保などの条件や制約も

考慮して決定する。

先述の「無線通信における電波干渉の問題」にて説明してある通り、2.4GHz 周波数帯は既存の WiFi AP が多数存在していることや、チャンネル数が少ないことから、利用には慎重な検討が必要である。事前の調査で、既設の AP の存在の有無やチャンネル利用の状況を確認しておくことが利用可否の判断に役立つ。ただし、それでもよほどの事情がない限りは、5GHz 周波数帯の利用を勧める。

利用する周波数帯を定めたら、各 AP の利用チャンネルも決定する。利用チャンネルは可能な限り、近隣の AP では異なるものを利用できるようにして、電波干渉を軽減する。また、外部に他者利用の AP があれば、その利用チャンネルを避けるようにするなど、通信の安定への配慮が必要である。

各 AP からルータへの接続方法も準備する必要がある。一般的には、有線 LAN ケーブルを利用する。場合によっては既設の LAN 配線を利用することもある。テレプレゼンスロボットが必要とする通信帯域量は数 Mbps から、複数台数でも～100Mbps 程度であるため、通常の Gbps クラスの有線 LAN でも問題が生じることはない。他の通信と混在利用も現実的な選択肢となる。

図 25 は、著者らがテレプレゼンスロボットの利用実験を行った際の WiFi ネットワークの設計図の下書きである。テレプレゼンスロボットを利用する会場を対象にして、どこに AP を配置するかを検討している。図 26 は会場写真である。144m x 72m の広い場所であったため、複数台の AP の効果的な配置を検討する必要があった。AP の配置には、電波のカバー範囲や、電源の確保や通路を避けるといった条件を反映して決定した。

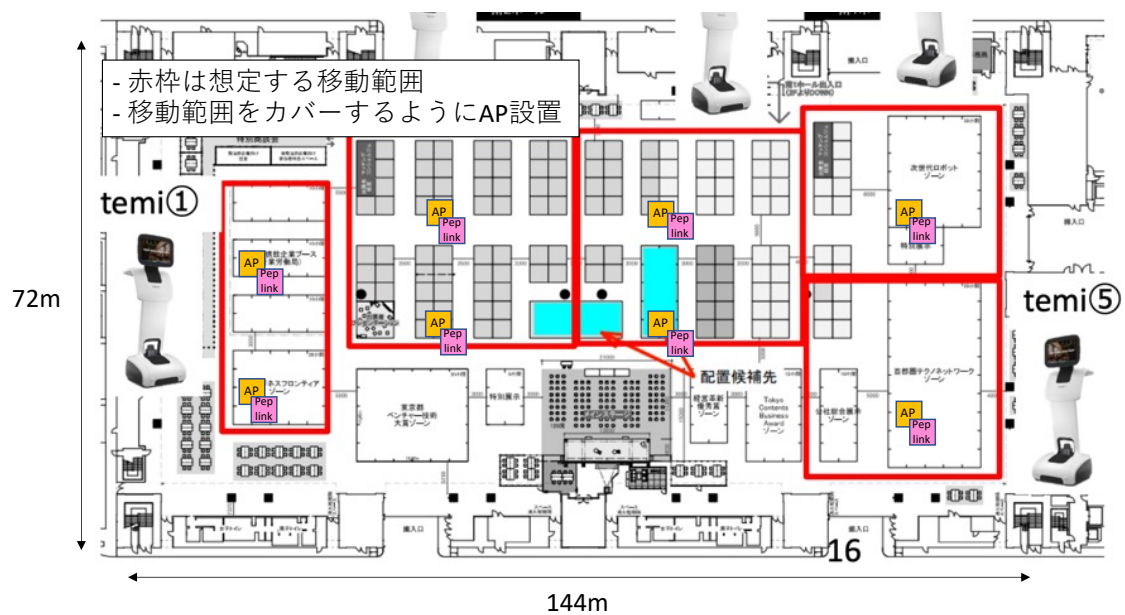


図 25 展示場での WiFi AP 設置例



図 26 展示場の様子（奥行き 72m）

(WiFi アクセスポイント設置の工夫)

WiFi AP の設置にあたっては、可搬性と設置の邪魔にならない工夫が必要になる。人が電波経路の障害になるため、一定以上の高さを確保して設置をしている。対象とするイベントや場所によって、AP の設置に対してさまざまな条件がある。AP が来場者から見えてよい、参加者の邪魔にならない場所、実施内容の邪魔にならない場所などの物理的条件である。運用を開始すると、想定していない通信不調などが発生することもある。そうした際に場所の移動ができると、通信品質の調整の余地につながる。

図 27 は著者らの実験での設置例である。このときは、会場の広さに余裕があったこと、イベント運営者からの理解も得られたため、このように見える場所への設置となった。カメラ用三脚を利用して、位置や方向、高さも自由に変更できるようにしている。必要があれば、周辺への柵や目印の設置、転倒防止の重石を設置する。

AP 設置における工夫として、AP からローカルネットワークへの接続部分の無線通信化がある。メッシュ WiFi と呼ばれる技術を用いることで、有線 LAN を利用している、AP 間の接続に WiFi を利用できる[16]。AP 間の接続の無線化は、敷設コストの大幅な削減と設置位置の自由度の拡大につながる。通信不調にして、AP 位置の微調整による対応が可能になる。一方で、無線通信は電波干渉などで性能悪化の可能性があるため、万が一の場合は AP 間接続が失われる可能性があることを想定する必要がある。

著者らは、WiFi 6E による 6GHz 帯の WiFi メッシュ技術による AP 間接続を実験した[17]。6GHz 帯は新たに利用可能になった周波数帯であるため、電波干渉もなく、イベント期間中の参加者来場中も、AP 間通信を安定して維持できた。今後の普及次第では、この周波数帯域も混雑するかもしれないが、現状では十分な性能であった。2023 年 12 月 22 日の電波法令改正により、6 GHz 帯での利用帯域幅がこれまでの 160MHz から 320MHz に拡大されて、今後 WiFi7 ではより広帯域が利用可能となる。これらの新しい技術がロボットテレプレゼンスにもたらす影響も今後調査したい。

この実験の際には、WiFi メッシュの利用に加えて、222Wh のバッテリーも利用することで、WiFi AP の完全無線運用も実施できた。LAN 配線と電源配線も不要になることで、AP 設置の自由度は飛躍的に拡大できた。ロボットテレプレゼンスによる WiFi 接続の利用では、来場者などの増加で、想定していなかった通信品質の悪化も起こるため、こうした可搬性の高い方法は対策として有効である。



図 27 イベント会場での WiFi AP 設置例（半可搬型）

（WiFi 電波の制御、アンテナの工夫）

WiFi 通信で利用可能な電波帯域は限られているため、WiFi ネットワークの整備では、利用可能な電波帯域への干渉が最大の妨害要因となる。周辺の WiFi 機器などの外来要因のものはもとより、自分たちが設置した AP が原因となることもある。そこで、AP からの電波の送受信方法を工夫することで、テレプレゼンスロボットとの安定的な通信が実現できる可能性がある。以下にあげる方法では、テレプレゼンスロボットの周辺に通信エリアを局所化することで、S/N 比の改善や、自前 AP の増加による干渉の抑制を図る。

1. 指向性アンテナ等の利用（LCX ケーブル）

通常の WiFi AP は電波を周辺に無指向に出力するものが多いが、指向性アンテナを利用することで、電波の送受信範囲を制御できる。指向性を利用して、通信エリアを局所化することで、電波干渉も抑制して、安定的な通信品質を確保できる可能性がある。

図 28 フジクラ・ダイヤケーブル社 無線 LAN 用漏えい同軸ケーブル (WBLCX) は LCX (Leaky Coaxial Cable) を利用した WiFi 通信基盤のイメージである。LCX とは、穴を開けた特殊な構造の同軸ケーブルを用いて、ケーブルに沿った空間に通信信号を電波として放射して、通信アンテナとして利用する技術である。LCX の通信距離は、ケーブルから 3~5m に限定できるため、近隣の AP との電波干渉を避けながら、特定エリアに対して安定的に通信を提供できると言われている

[19]。

また、LCX はケーブルに沿って面的に通信エリアを展開できるため、ひとつの AP により広域をカバーできる。テレプレゼンスロボットが移動している状況でも、複数 AP 間でのハンドオーバーの発生を抑制できるため、通信品質の確保に有用である可能性がある。ロボットテレプレゼンスが移動する想定順路を LCX でカバーするような運用形態が考えられる。ただし、LCX ケーブルの調達と敷設に対するコストが LCX 利用の欠点であるため、あらかじめの試算も必要となる[20]。LCX も通常の WiFi であるので、既存の無指向性の WiFi AP との組み合わせも考えられる。

著者らも、テレプレゼンスロボットに対する LCX を利用したネットワークはまだ経験できておらず、実験などをしたいと考えている。特に外来からの電波干渉が多い状況での耐性などに関心を持っている。

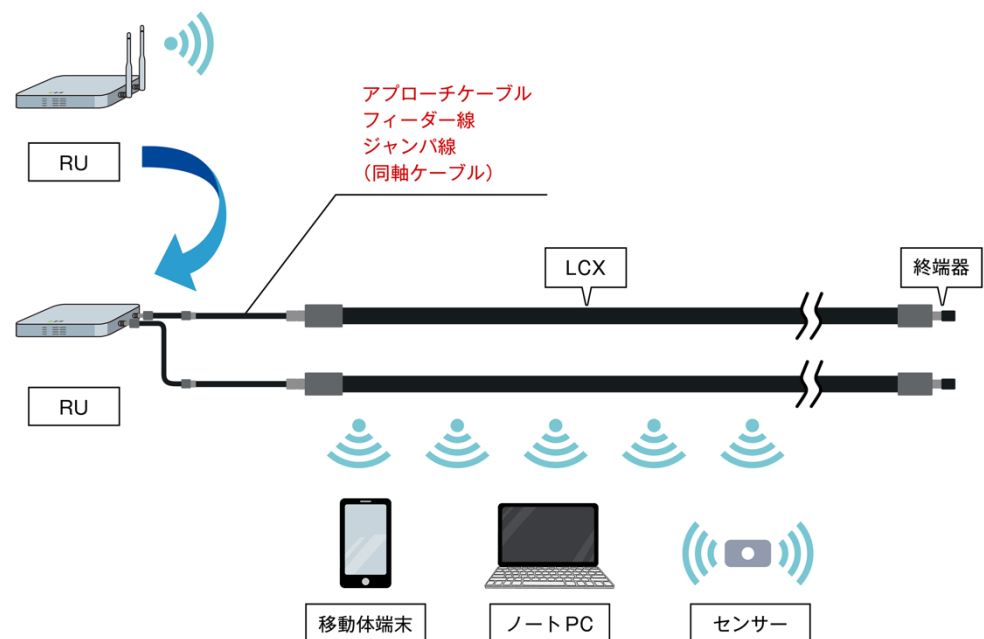


図 28 フジクラ・ダイヤケーブル社 無線 LAN 用漏えい同軸ケーブル (WBLCX)

同様の考えで、AP にて指向性を持たせる方法も考えられる。物理的なアンテナ

特性として指向性を持つことや、802.11ac における MIMO でのビームフォーミングのようにアクセスポイントでの電子的な制御により指向性を持つことも考えられる。802.11ac のビームフォーミングによる指向性通信が通信品質の向上に寄与することが示唆されている [20]。

まだ検討の段階であるが、ロボットの移動に合わせて、指向性アンテナの方向を物理的に追従させることで、特定のロボットに対して良好な通信を与えることができるのではないかと考えている。このような可能性についても検討を続ける。

2. 特殊なアンテナ技術の利用

そのほかに、Kpnetworks 社からは、複数のアンテナをひとつの AP から物理的に延長する製品も提案されている [21]。この AP とアンテナ群を利用することで、AP の数を抑制しながら、ロボットの移動範囲の近くまでアンテナを配置できる。AP の設置台数を削減できて、電波干渉の低減とハンドオーバー発生の低減による通信品質の向上が期待できる。

本技術も、テレプレゼンスロボットとの組み合わせでは試験をしたことがないため、実験の機会を持ちたいと考える。この技術も、電波干渉に対する耐性を検証したい。

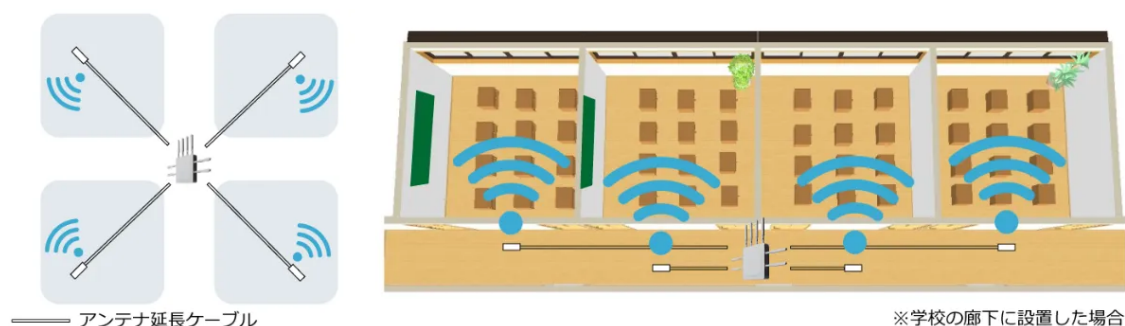


図 29 アンテナ延長ケーブルを利用する方法[KPWL-0300H]

(携帯電話回線の利用方法の工夫)

電波干渉の問題のある WiFi 利用を避けるには携帯電話回線を利用することが考えられるが、テレプレゼンスロボットの通信インターフェイスを交換できないことも多々ある。そうした場合の代替策として、図 30 にあるような、モバイルルータを介して携帯電話回線へ接続するような方法も考えられる。ロボットのすぐ傍など、WiFi 区間を最小限にすることで、通信インターフェイスに制約のあるロボットでも、電波干渉の影響を抑えつつ、携帯電話回

線の利用のメリットを享受できる。

著者らの実験でも、こうしたアイデアが有効に機能したこともあったが、この最小限の WiFi 区間でも通信品質が悪化することもあった。よりよい運用のためには、ロボットとモバイルルータ間の通信においても、外部からの電波干渉を遮蔽するような工夫も必要となる。このような複合利用は、完全な解決法にはなっていないが、工夫次第ではまだ発展の可能性はある。

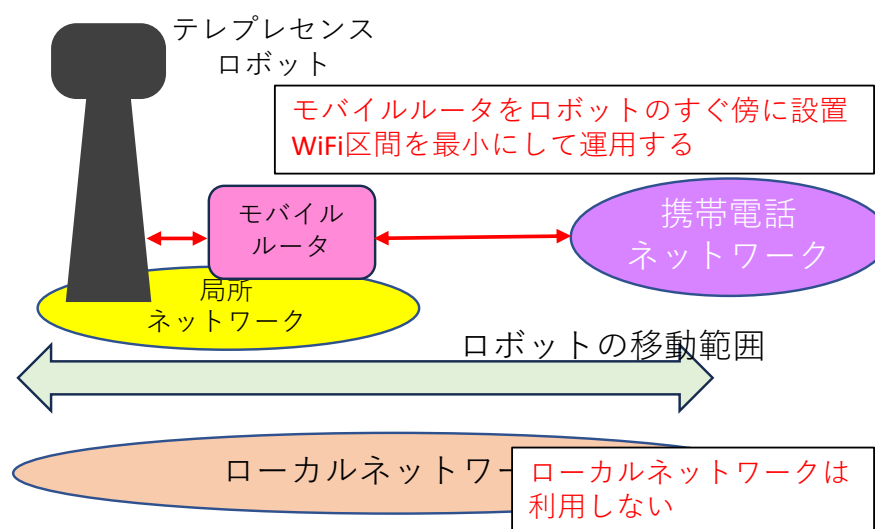


図 30 モバイルルータを用いた携帯電話接続の利用

(その他の通信技術の利用)

少し先の将来のことを考えると、新たな通信技術の登場なども期待できる。ローカル 5G の通信環境の普及や、802.11 系の新たな WiFi 技術も利用可能になる。これらの通信技術により、外因の電波干渉を避けて、安定的な通信環境を利用できる可能性がある。

802.11ah は、IEEE 802.11 規格のうち、サブ 1GHz 帯の狭帯域を使用する無線 LAN 規格である[22]。これまでの WiFi 技術よりも広域の 100m～1km 程度をカバーするために提案された。利用の少ない周波数帯であることから、電波干渉の問題を避けることができる可能性がある。狭帯域とは言っているが、数 Mbps 程度の速度は利用可能とされており、テレプレゼンスロボットの移動範囲を 1 台の AP でカバーするような運用など、従来の WiFi 基盤とも異なるローカルネットワークを実現できる可能性がある。

2024 年頃には、IEEE 802.11ax の後継規格として、IEEE 802.11be 規格と対応製品が、WiFi7 という名称で登場する予定である[23]。802.11ax をベースにして、2.4 GHz 帯、5 GHz 帯に加え、6 GHz での通信機能を提供する。802.11be では、マルチバンド/マルチチャネル運用や、アクセスポイント間協調などの機能があるため、異なる周波数や AP をスムーズに切り替えられるようになる可能性があり、テレプレゼンスロボットのような移動体での通信品質の向上への効果も期待できる。

2023 年 7 月には、IEEE 802.11bb として、光無線通信の標準規格も策定された。LED 光を利用して、10 Mbps～9.6 Gbps の通信機能を提供する[24][25]。光通信ということで、光 AP から端末間で見通しが確保できないといけませんが、現在は天井に設置する LED ライトのような形で光 AP が提案されている。802.11bb 標準化に関わった pureLiFi 社からは製品群も提案されており、通信手段のひとつとして利用できる日も近い[26]。光という高周波数を利用することで、広帯域化などに注目が集まる光無線通信であるが、電波のような干渉が起きないこと、電波法の規制を受けないことは、テレプレゼンスロボットでの利用に対してのメリットとなる。テレプレゼンスロボットの頭頂部に光アンテナを設置するなど想定すると、通信インターフェイスの問題さえクリアできれば、安定した通信のために利用する価値はある。

こうした新しい通信規格への対応のために、テレプレゼンスロボット側の通信インターフェイスも交換可能になっていることが望ましい。temi 社の temi V3 ロボットでは、USB インターフェイスにより通信機器を自由に交換できるようになっている。今後のテレプレゼンスロボットの選択において、通信インターフェイスの交換可能性も重要な視点となると考える。

4.2. ネットワーク監視の検討

ここまで、インターネット接続やネットワーク構築に関する対策について説明した。しかし、これらの対策を施した場合でも、テレプレゼンスロボットの利用時に通話体験の悪化が起きることがある。特に、電波干渉や通信混雑は、状況が随時変わるため、あらかじめの構築や準備だけで対応することは難しく、問題が起きたことを把握して、適切な対応を取ることが望ましい。そのため、テレプレゼンスロボットの通信部分における運用部分の工夫も重要である。

テレプレゼンスロボットの通信部分の運用においても、構築の検討と同様にいくつかの部分にわけて考えることができる。図 31 はテレプレゼンスロボットの通信利用において、

観測対象となる部分である。それぞれの部分で、原因と対策は異なるため、トラブル場所の正確な把握は重要である。

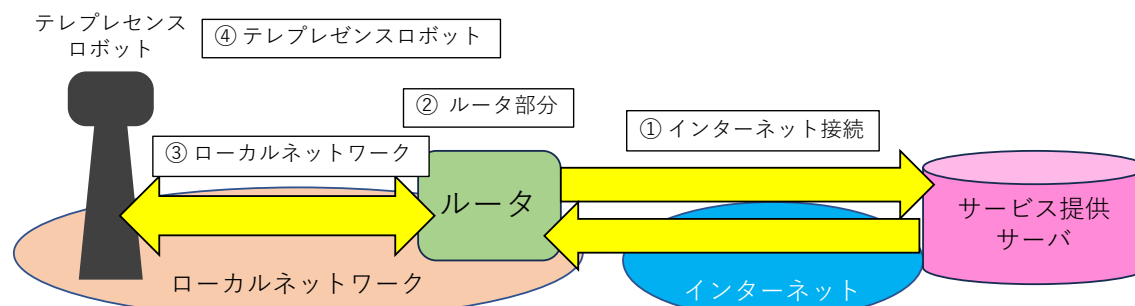


図 31 ネットワーク運用における観測対象

4.2.1. インターネット接続に対する監視

インターネット接続部分は、サービスへのアクセスを維持するために重要な部分である。この接続が適切な性能を維持できているか、計測や監視をする必要がある。そのために、利用可能帯域の計測や、疎通性を確認することが考えられる。

利用可能帯域の計測は、図 32 のように、手軽なものは Web 上のサービスが存在する。定期的な計測により、テレプレゼンスロボット利用期間中の動向を把握することができる。帯域計測は手軽であるが、この計測自体が大量の通信データを送受信するため、テレプレゼンスロボットの利用を妨害する要因となる。重要な利用時には本計測は実施できない。

より精密な計測には、ping による ICMP パケットの送受信を利用したインターネットサービスプロバイダ側のルータとの RTT (Round-Trip Time) の計測という方法がある。そもそも通信状態が保たれているかの疎通性の確認という意味もあれば、遅延時間の変化から混雑状態を把握できる可能性がある。インターネット接続部分の混雑が発生すると、遅延時間も増大するため、遅延時間の変化やばらつきを期間中に観測することで、通信品質を推定できる。図 33 は smokeping と呼ばれるソフトウェアでの、RTT 計測と可視化のグラフ例である[27]。横軸が時間で、縦軸が遅延時間である。遅延時間が変化している部分が、混雑状態を表す。

トラブル時の問題の切り分けや原因究明のためには、これらの帯域計測や遅延時間の計測について、自動化して記録を残しておくことが重要となる。



図 32 利用可能帯域の計測（インターネット接続）

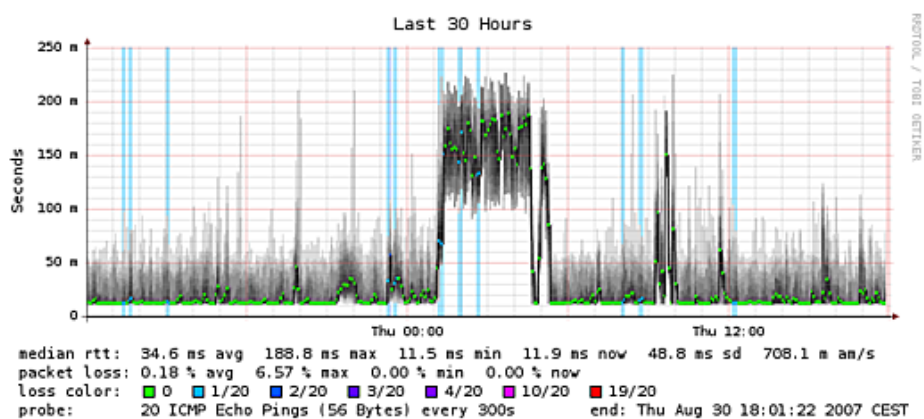


図 33 smokeping による RTT 計測と可視化例

4.2.2. ルータにおける観測

ローカルネットワークを用意する場合には、ルータ部分が通信の集約点になるため、この場所での観測が可能となる。通過するパケットのデータサイズを観測することで、通信量をカウントできる。より厳密な観測をすることで、パケット破棄なども確認できる。

ルータ部でのパケット計測は、インターネット接続部分で説明したような計測と異なり、受動的な計測であるため、通信に影響を与えない観測が可能である。そのため、定期的な計測などを実施することも可能である。通過時のパケット内容を確認することで、パケット破

棄の様子や、通信のRTTも観測できる。簡単な分析プログラムなどの用意が必要であるが、関心事に応じて、さまざまな項目の継続的な記録が可能な場所となる。また、後述するローカルネットワーク側に対しても、テレプレゼンスロボットをターゲットとした計測などの場所にもなり得る。ルータ部分は、各プレゼンスロボットとインターネット接続に対する、通信部分の状況を集約して可視化するダッシュボード化などの工夫が考えられる。

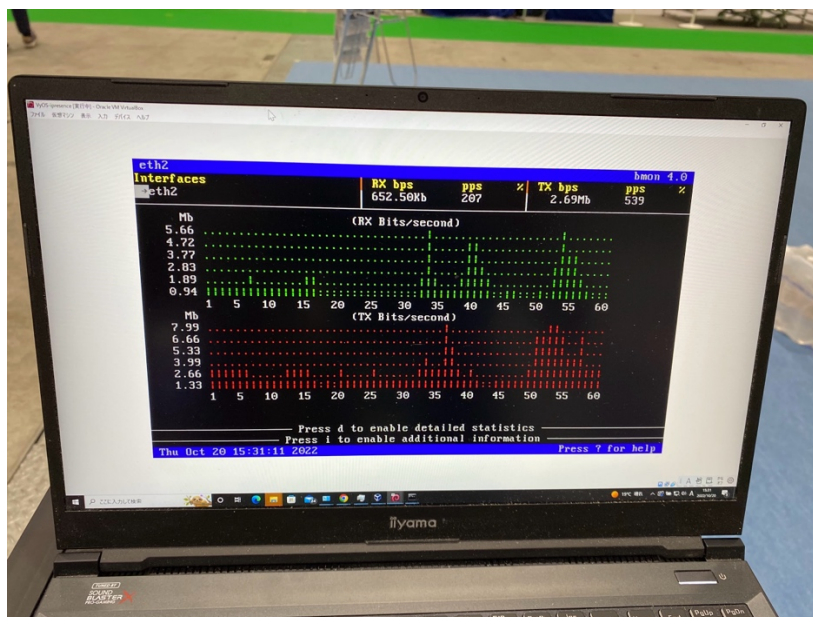


図 34 ルータ上での通信流量の計測例

図 35 は、著者らの実験の際のルータやインターネット接続の様子である。外部への接続はすべてここに集約して、PC 上でルータソフトウェアを動作させた。インターネット接続も、会場側で用意いただいたフレッツ接続や、携帯電話回線(4G/5G)などを複数用意して、複数のインターネット接続の複合利用や切り替えなどの実験も行った。また、通信の様子やテレプレゼンスロボットとの通信疎通性などの確認にもこのルータを利用した。

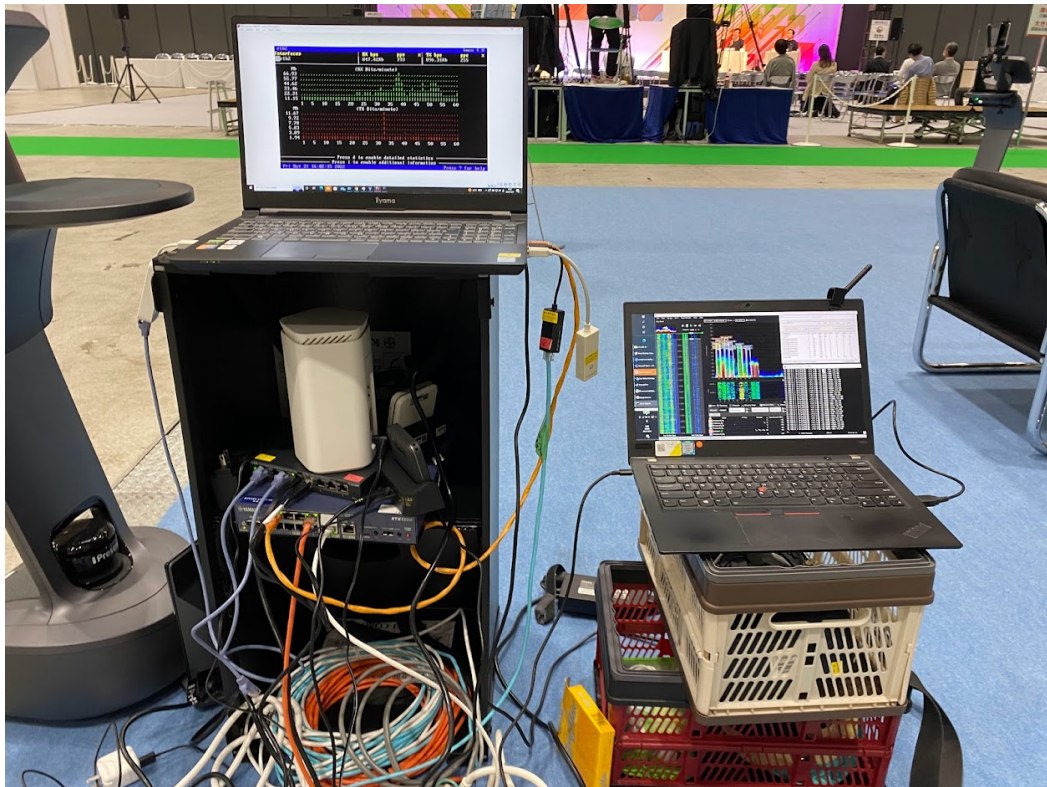


図 35 実験時のルータやインターネット接続の例

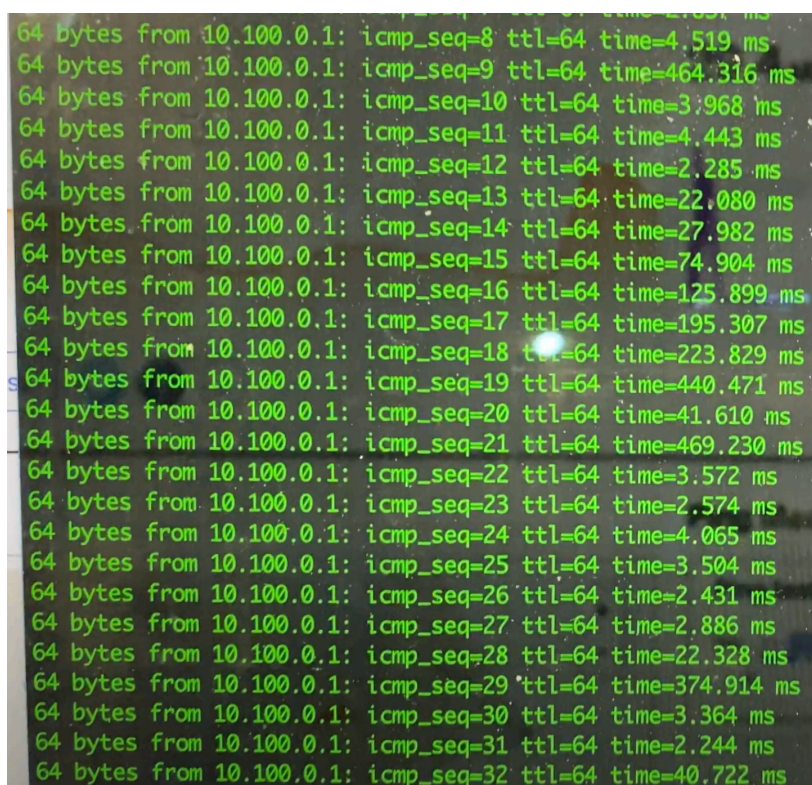
4.2.3. ローカルネットワークに対する監視

インターネット接続は、既存のノウハウもあり、性能を確保することが比較的に容易な部分であるが、WiFi の事例からも分かる通り、ローカルネットワーク部が最も性能変動の激しい部分である。特に、ローカルネットワークの WiFi 区間がトラブルの発生源となる。

そこで、ルータを起点として、テレプレゼンスロボットへの通信状態の確認も重要となる。先述の smokeping の例のように、ルータからテレプレゼンスロボットへ定期的な ping 送信をすることは、ローカルネットワーク内の通信区間の状況の把握には有効である。このときの遅延時間の変化から、アクセスポイントを介した WiFi 部分の通信状況も把握できる可能性がある。

図 36 は、著者らの実験での WiFi 区間の RTT 計測例である。このときは、テレプレゼンスロボット向け WiFi のアクセスポイントに PC を接続して、PC からの ping 計測を行うことで、WiFi アクセスポイントの通信品質を調査した。電波干渉や混雑が発生すると、RT 時間が大きく変動することがわかった。このとき、パケット破棄は起きておらず、レイヤ 2

の WiFi 通信内の再送によって通信が保たれていると推測される。このような極端な RTT 変動が通信品質や通話品質に悪影響を与えている可能性がある。



```
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=8 ttl=64 time=4.519 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=9 ttl=64 time=464.316 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=10 ttl=64 time=3.968 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=11 ttl=64 time=4.443 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=12 ttl=64 time=2.285 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=13 ttl=64 time=22.080 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=14 ttl=64 time=27.982 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=15 ttl=64 time=74.904 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=16 ttl=64 time=125.899 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=17 ttl=64 time=195.307 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=18 ttl=64 time=223.829 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=19 ttl=64 time=440.471 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=20 ttl=64 time=41.610 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=21 ttl=64 time=469.230 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=22 ttl=64 time=3.572 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=23 ttl=64 time=2.574 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=24 ttl=64 time=4.065 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=25 ttl=64 time=3.504 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=26 ttl=64 time=2.431 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=27 ttl=64 time=2.886 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=28 ttl=64 time=22.328 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=29 ttl=64 time=374.914 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=30 ttl=64 time=3.364 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=31 ttl=64 time=2.244 ms
64 bytes from 10.100.0.1: icmp_seq=32 ttl=64 time=40.722 ms
```

図 36 ICMP による RTT 時間の計測例

4.2.4. テレプレゼンスロボットに対する監視

ユーザーの通話体験そのものを計測するには、テレプレゼンスロボットに注目することが必要である。先述の報告にあった通り、通信品質の問題は、最終的にはテレプレゼンスロボット上でのコミュニケーションの良し悪し（テレビ会議上のコミュニケーションの良し悪し）としてユーザーに伝わる。このコミュニケーションの良し悪しは、人間の主観であるが、ユーザー体験に直結するものとして重要と考える。

ユーザーの通話体験について評価するための、実験シナリオや評価項目の整備を実施することで、評価が容易となると考える。また、ユーザー体験の評価と、ここまであげた通信部分の観測結果を重ねることで、ユーザー体験の悪化の要因分析も可能になると考える。現在は直感に頼っている部分などについて、より精密な判断につながる。

ユーザーの通話体験の評価について、テレプレゼンスロボットの利用期間中にも定期的

に実行できること、最初はテスト用のロボットを用意して、手動で観測することから始めて、テレプレゼンスロボット自体の移動巡回を自動化するなどの可能性もある。このようなユーザー体験の随時モニタリングなどもよい挑戦となると考える。

また、ここまでに挙げた観測を組み合わせることで、トラブル対応についての作業フローを定めることができる可能性がある。そうした対応の作業フローの検討例を表 3 チェックとトラブル対応のフロー例に示す。これは試案であるが、観測情報の時系列の記録などによる運用状況の記録とも合わせて、テレプレゼンスロボットの運用の形式化にもつながると考える。

表 3 チェックとトラブル対応のフロー例

チェック対象	チェック方法	トラブル時の対応
(1) インターネット接続は良好か？	- 利用可能帯域量の測定 - ルータ部分での通信量計測測定 - ルータからインターネット側への ICMP によるパケットロスや遅延の計測	- 別のインターネット接続への切り替え - 通信量の削減（一部ロボットの停止、他利用の停止）
(2) ローカルネットワークの通信は良好か？	- ルータからテレプレゼンスロボットへの ICMP によるパケットロスや遅延の計測 → 問題ある AP の把握 - 問題ある AP 近辺の電波計測（手動）	- AP の追加や移動 - 当該ロボットの接続切り替え
(3) ユーザーのテレプレゼンスロボット利用体験は良好か？	- ユーザー自身による評価 - テスト端末による確認	- 問題が起きていることの把握、より詳細な問題原因の特定は(1)(2)の調査結果を利用する

5. まとめ

本稿では、遠隔地コラボレーションの実現手段として注目されている、テレプレゼンスロボットを対象として、通信部分に関連する課題と対策について検討した。テレプレゼンスロボットは、ユーザーへ遠隔地にいるかのような臨場感を与えながら、コミュニケーションを可能にすることを意図しており、イベントや学会などへの遠隔参加、学校やオフィスでの利用など、さまざまな用途が期待されている。民生品としても販売されており、一般ユーザーでも利用可能となっている。

テレプレゼンスロボットによる遠隔性の提供には、通信が必須である。テレプレゼンスロボットは単体で完結するものではなく、利用場所におけるネットワークの用意や安定した通信環境の提供が必要になる。通信品質の悪化は、ユーザーの遠隔制御や遠隔コミュニケーションに対して、直ちに悪影響を及ぼし、ユーザーのテレプレゼンス体験を損ねて、最悪の場合はテレプレゼンス体験の継続が困難となる。そのため、テレプレゼンスロボットの利用には、通信品質の確保が重要となる。

テレプレゼンスロボット向けのネットワーク構築や運用には、従来のネットワークよりも厳しい条件が求められる。移動しながらのリアルタイムなコミュニケーションを体験するには、通信基盤に対しても、PC やスマートフォンからの Web アクセスなど従来の利用とは異なり、移動範囲内を面的にカバーするような整備が必要となる。また、利用の途中にも通信の混雑や干渉などを回避して、安定的な通信品質を提供することも重要である。著者らは、テレプレゼンスロボットを用いた利用について、通信部分に着目した実験などを実施しており、安定した通信品質の確保の難しさを体験している。

本稿では、通信部分に注目して、トラブル要因となる課題を報告した。① インターネット接続部分、② ローカルネットワーク部分、③ その他のソフトウェア等のパート である。それぞれ、問題となり得る要因があり、特にローカルネットワーク部分でのテレプレゼンスロボットの WiFi 接続部分は、WiFi 起因の電波干渉が最大の阻害要因となっている。それらのトラブル要因に対して、① ネットワーク構築時の工夫、② ネットワーク運用時の工夫のそれぞれの観点で、対応策を検討した。検討のなかには、近い将来に登場する通信インターフェイスの利用や、テレプレゼンスロボットを対象とした通信モニタリングによる運用管理やトラブル原因の発見について触れた。

それぞれの対応策には、著者らも実験済みのものもあれば、今後の検討事項も含めて解説した。本解説の中でも、今後のテレプレゼンスロボットの利用においても有効と思われる知

見を共有した。現状でも、まだテレプレゼンスロボットの通信部分にはトラブルも残っており、今後も運用や実験を継続する予定である。

テレプレゼンスロボットの利用拡大には、通信部分の課題解決が重要となる。現状の技術だけで解決できないことも多く、研究開発の課題がある。安価な IP ネットワーク技術を用いて、移動体でのリアルタイムアプリケーションを安定的に利用できる環境を提供することは、IP ネットワークの活用を広げることにもつながると考える。テレプレゼンスロボットや移動体を対象とした IP ネットワークの提供に関心がある人たちと知見や課題を共有しながら、今後の研究開発にも取り組みたい。

謝辞

本研究は（一財）ニューメディア開発協会が受託した 2023 年度 JKA 競輪補助事業「アバターでの学校生活参加利用者拡大とメタバースによる場面拡大」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] AVA Robotics 社: <https://www.avarobotics.com/> (2024/03/21)
- [2] Double Robotics 社: <https://www.doublerobotics.com/> (2024/03/21)
- [3] iPresence 社 ブログ記事: <https://ipresence.jp/blog/> (2024/03/21)
- [4] Temi 社: <https://robotemi.jp/> (2024/03/21)
- [5] Xandex 社 Kubi: <https://www.kubiconnect.com/index.html> (2024/03/21)
- [6] iPresence 社 Telepii:
https://ipresence.jp/news/%E5%8B%95%E3%81%8F%E9%9B%BB%E8%A9%B1%E3%83%86%E3%83%AC%E3%83%94%E3%83%BC_telepii_press_release/ (2024/03/21)
- [7] 総務省 加入光ファイバに係る接続制度の在り方について 2015 年 2 月 9 日
https://www.soumu.go.jp/main_content/000377023.pdf (2024/03/21)
- [8] 総務省 電波利用ホームページ 無線 LAN の屋外利用について:
https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/wlan_outdoor/index.htm (2024/03/21)
- [9] 総務省 ローカル 5 G 導入に関するガイドライン
https://www.soumu.go.jp/main_content/000806829.pdf (2024/03/21)
- [10] 総務省 大臣官房審議官（情報流通行政担当）辺見 聡, ローカル 5G の普及展開に向けて（令和 3 年 12 月 21 日）
https://www.soumu.go.jp/main_content/000802944.pdf (2024/03/21)
- [11] metageek 社: The best Layer 1 and Layer 2 Wi-Fi Channel Analyzer
<https://www.metageek.com/chanalyzer/> (2024/03/21)
- [12] Vyatta: PBR routing example:
<https://docs.vyatta.com/en/supported-platforms/vrouter/configuration-vrouter/ip-routing/policy-based-routing/configuration-examples/pbr-routing-example> (2024/03/24)
- [13] Vyata: WAN Load Balancer examples:
<https://docs.vyos.io/en/equuleus/configexamples/wan-load-balancing.html> (2024/03/24)
- [14] Peplink: SpeedFusion - Speed & Reliability
<https://www.peplink.com/technology/speedfusion-bonding-technology/> (2024/03/24)
- [15] Speedify: Use all of your Internet connections at the same time
<https://speedify.com/> (2024/03/24)
- [16] ASUS 社: AiMesh について
<https://www.asus.com/microsite/aimesh/jp/> (2024/03/26)
- [17] Buffalo 社 Wi-Fi 6E 到来！分かりやすく解説します:

<https://www.buffalo.jp/topics/knowledge/detail/wifi6e.html> (2024/03/24)

[18] 塚本 悟司, 侯 亜飛, 鈴木 文生, 丹羽 敦彦, LCX (漏えい同軸ケーブル) を用いた無線 LAN システム, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, 2016-2017, 10 巻, 2 号, p. 86-91, 公開日 2016/09/01, Online ISSN 2186-0661,

<https://doi.org/10.1587/bplus.10.86>

[19] 安本太一, 佐合尚子, 愛知教育大学における LCX 無線 LAN の評価, 愛知教育大学研究報告 自然科学編, 愛知教育大学, Vol. 67, No. 1, pp. 15-21, 2018

[20] Juliet. O and Stuart. W, "Investigation of Beam Forming Effectiveness in IEEE802.11ac Indoor Wireless Links," in proceedings of the Fifth International Conference on Wireless and Mobile Networks (WimoN 2013), pp. 27-35 June 2013,.

[21] Kpnetworks 社 KPWL-0300H 専用アンテナ延長ケーブル

<https://kpnetworks.jp/JP/anntena-cable> (2024/03/24)

[22] 802.11ah 推進協議会 IEEE 802.11ah 紹介資料 (2021 年 6 月 28 日)

https://www.soumu.go.jp/main_content/000758531.pdf (2024/03/21)

[23] 総務省 IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) の導入について

https://www.soumu.go.jp/main_content/000918948.pdf (2024/03/21)

[24] IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Light Communications

<https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10823/> (2024/03/26)

[25] インプレス社 PC Watch: Wi-Fi より 100 倍速い? 光無線通信「LiFi」が IEEE 802.11bb と し て 承 認 (2023/07/14) <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1516499.html> (2024/03/26)

[26] pureLiFi 社: <https://www.purelifi.com/> (2024/03/26)

[27] smokeping: <https://oss.oetiker.ch/smokeping/> (2024/03/26)