

5G モバイルブロードバンド下での遠隔コラボレーションの実現可能性 調査

中川 紘輔[†] 中里 仁^{*†} ロマンフォンテュニユ^{††} 伊藤 広記[†] 塚田 学^{*†}
江崎 浩[†]

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 〒152-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

^{††} 株式会社インターネットイニシアティブ

〒102-0071 東京都千代田区富士見 2-10-2 飯田橋グラン・ブルーム

E-mail: *jin-nakazato, mtsukada@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

あらまし 昨今、より低遅延な遠隔コラボレーションへの注目が集まっており、特に自動運転分野においても、遠隔監視などのユースケースが提案されている。また、2019年より世界中でサービス開始された5Gは、大容量・低遅延通信が期待されているため、遠隔コラボレーションの需要に対して重要なインフラであると考えられている。しかし、現状の5Gはカバレッジエリアの拡大やスループットの改善に焦点が当てられており、3GPPなどの標準化にて策定された機能が全て動作しているわけではない。そのため、遠隔コラボレーションの実現に向けた性能・用途の詳細な検討が必要不可欠である。そこで、本研究ではWebRTCを用いた遠隔コラボレーションを用いて、様々な5G環境下での遅延・映像音声品質の計測と分析を行った。具体的には、WebRTC通信品質と同時に5G通信の電波状況を詳細に調査し、それらの結果データを統合した。次に本統合データを分析し、可視化した結果をもとに遠隔コラボレーションが実現可能なユースケース検討を評価した。本評価において、交通手段とWebRTC通信の性能の関係（自動車／山手線）、および車載環境のシナリオにて同時に4つの通信事業者を活用した性能向上の可能性の2点を明らかにした。

キーワード 遠隔コラボレーション, WebRTC, 5G測定, 複数MNO, ハンドオフ, 遅延, 車載環境

Feasibility Study on Remote Collaboration under 5G Mobile Broadband

Kosuke NAKAGAWA[†], Jin NAKAZATO^{*†}, Romain FONTUGNE^{††}, Koki ITO[†], Manabu TSUKADA^{*†},
and Hiroshi ESAKI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 152-8657 Japan

^{††} Internet Initiative Japan Inc.

Iidabashi Grand Bloom 2-10-2 Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0071, JAPAN

E-mail: *jin-nakazato, mtsukada@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Abstract Low-latency remote collaboration has received a lot of attention in the recent years, including remote collaboration applications designed for in-vehicular environments. Since 5G is a vital infrastructure to meet this demand, we study the actual 5G ability to achieve high QoE for remote collaboration. We design and implement a measurement tool to monitor the QoE of remote collaboration under unstable, real-world 5G conditions. We conducted measurements under various modes of transportation and we employed different tools to acquire detailed mobile signal conditions. Using these measurements we show the relationship between real-world 5G environments and remote collaboration QoE performance. This research elucidated two key points: the relationship between the mode of transportation and the performance of WebRTC communications (via automobile/Yamanote railway line) and the potential for enhancing performance in the in-vehicular setting through the utilization of communication techniques from all four network providers.

Key words Remote Collaboration, WebRTC, 5G Measurements, Multiple MNO, Handoff, Latency, In-Vehicle Setting

1. はじめに

昨今のウィズコロナ・ポストコロナ時代において、社会におけるもっとも顕著な行動変容として、リモート活動の一般化が挙げられる。令和3年度版情報通信白書 [1] によると、2020年3月～4月にかけて新型コロナウイルスが日本国内に蔓延して以降、リモートワーク率は3月以前の2.1倍に急上昇したのち、半年以上にわたって微減しつつも高止まりを続けた。これはリモート活動がコロナによって一般化し、その後も継続的に市民権を得続けている状態であると言える。コロナ禍当初に一切の対面活動が禁じられた状態で、企業や市民はできるだけ対面活動と等価なリモート活動を実現できるよう、様々なサービスがかつてない速度で導入・利活用されてきた。2017年時点では、Web会議等を含むIP Videoのトラフィックはインターネット全体の11%を占めており、2022年にはほぼ倍増の20%に達すると試算されていた [2] が、この試算にはウィズコロナ・ポストコロナが考慮されていなかったため、実際には倍増以上のペースで急速に普及が進んだものと考えられる。そのような中で、いくつかの成功した取り組みが、ZoomのようなWeb会議サービスや、コンサートやライブのリアルタイム・ストリーミング配信、ライブコマース、音声SNSなどが挙げられる。我々は一般的にこういった成功事例のみをリモート活動であると認識しがちであるが、実際にはその裏で、現在の技術水準では実現困難な多くのリモート活動の在り方などが検討され、実現困難であるがゆえに埋没してきた現実がある。その代表格として挙げられるのが、リモート間の映像・音声同期を要する遠隔コラボレーション活動である。例えば合奏や、ライブやスポーツイベントなどにおける歓声などは、コロナ禍においてリモート活動への転換が図られたが、通信遅延の制約によって、そのような取り組みが大きく社会に普及することはなかった。曾根らの研究 [3] は遅延のある演奏系において、満足な合奏体験をするためには片道遅延が30ms未満である必要があることを報告しているが、これは現代のブロードバンド環境においても非常に厳しい条件である。この通信遅延の制約は、主として二点挙げられる。まず一つ目は、現状の一般エンドユーザー向けに普及している固定ブロードバンド通信が、依然として宅内・ラストワンマイルの高遅延の影響を受ける場合があるという点である。二つ目は、そもそも近年の消費者向けブロードバンドの主体は固定ブロードバンドからモバイルブロードバンドに移行しつつあり、固定ブロードバンド上でしか使用できないサービスはスケラブルではないという点である。

上述の問題を回避し、遠隔コラボレーションを社会実装するうえで解決策として成りうる可能性として、昨今急速に普及が進んでいる5Gモバイルブロードバンドが挙げられる。5Gモバイルブロードバンドは、4G以前のモバイルブロードバンドと比較して、無線区間で大容量・低遅延の通信が実現可能で、理想的には遠隔コラボレーションなど低遅延ユースケースの実現を期待できる。したがって、将来的には5Gの長所である高い通信性能を生かした遠隔コラボレーションサービスを普遍的に享受しうる可能性が高い。しかしながら、RAN (Radio Access

Network) の機能分割に伴う異なるアーキテクチャ導入による異なる性能の混在化、昼夜異なる混雑率、性質の異なる複数の周波数導入、ハンドオフなどによって、通信が不安定となることが多く、また、現在はまだ4G環境のコア機能を共有している状態で、その真価は依然として発揮されていない状態にある。

このような問題を解決し、遠隔コラボレーションの社会実装を進めるうえで最も重要となるのは、まず第一に5Gモバイルブロードバンドの性能向上であるが、真に理想的な大容量・低遅延モバイルブロードバンドが実現されるには以前として長い時間を要すると考えられる。従って、どういった条件下でどのような遠隔コラボレーションが実現できるか、どのような制約が存在するのかについて具体的に明らかにすることが重要であり、本研究ではこれを問題意識とした計測を行った。

本研究の具体的な貢献は以下である。まず、WebRTCを用いた遠隔コラボレーション計測ツールを実装し、様々な5G環境下での遅延・映像音声品質の計測と分析を行った。また、WebRTC通信品質と同時に5G通信の電波状況を詳細に調査し、それらの結果データを統合し、分析・可視化を行った。そしてその結果をもとに遠隔コラボレーションが実現可能なユースケースについて検討を行った。

以降、2章に5Gの通信品質とWebRTCを用いた遠隔コラボレーションに関連する研究を説明する。3章でWebRTCによる遠隔コラボレーション計測ツールの実装と計測対象を述べる。第4章では、実験方法と結果を示す。最後に第5章において、結論と今後の展望を述べる。

2. 関連研究

2.1 5G モバイルブロードバンドの通信性能に関する研究

5Gモバイルブロードバンドに関しては、モバイルブロードバンド自体の一般的な通信性能の研究と、あるモバイルブロードバンドをある特定用途で活用するシナリオを想定した際の通信性能の研究の二種類が存在する。

まず、モバイルブロードバンド自体の一般的な通信性能の研究として、Xu et al. [4] は中国での商用5G導入の初期段階で、大学のキャンパス内の5Gモバイルブロードバンドに対して計測を行い、有効な利活用のために必要なプロトコル改善やレガシーのインフラとの共存策についての示唆を与えた。Narayanan et al. [5] は、米国での商用5G導入の初期段階で、キャリア3社のmmWave、Sub-6 5Gのスループットをスマートフォンを用いて計測し、ハンドオフ時のスループット変動、アンテナに対する角度や距離などとスループットの関係性、自動車での移動時の性能変動などを明らかにした。Pan et al. [6] は、中国の高速鉄道の、5G Sub-6によってカバーされた路線で、高速移動時の5GのRSRP、SNRといった電波情報や、ハンドオフ間隔の累積分布、ハンドオフ時の性能変動などの情報を収集した。

2.2 WebRTC を用いた遠隔コラボレーション

WebRTCとはWeb Real-Time Communicationsの略で、ブラウザやモバイルアプリに簡潔なAPIを通じてリアルタイム通信を提供するオープンソースの技術である [7]。そのため、仕様

表1 先行研究との比較表

論文	環境	移動モード	計測方法	電波情報
Xu [4]	5G	歩行/自転車	Ping,iperf,video	✓
Narayanan [5]	5G	歩行/自動車	Ping,iperf	✓
Pan [6]	5G	高速鉄道	Ping,iperf,QUIC	✓
Moulay [10]	4G	自動車	WebRTC	×
金子 [8]	4G	移動なし	WebRTC	×
石原 [9]	Wi-Fi	移動なし	WebRTC	×
本研究	5G	歩行/自動車/鉄道	WebRTC	✓

あるためアカデミックの領域でも様々な検討が行われている。実際に WebRTC を用いる通信の QoE・QoS を扱う論文は数多くある。

金子らの研究 [8] では、車載環境下で WebRTC をメディアストリーミングに使用する際に、セルラーインターネットを複数束ね、UDP パケットをマルチパス制御して転送を行うことで、ハンドオフの影響を低減させる手法を提案した。石原らの研究 [9] では、無線 LAN 環境下で多くのユーザーが Web 会議アプリを使用するようなユースケースを想定した際の QoE を簡単に計測するために、Raspberry Pi と WebRTC を使用したストリーミング品質計測ツールを提案した。Moulay et al. [10] は 4G LTE モバイルブロードバンド上で WebRTC によるストリーミングを行った際の実環境性能を計測した。

上述にて説明した先行研究と本研究との比較を表 1 に示す。表より、5G, WebRTC それぞれについては数多くの研究がこれまで実施されてきたが、5G かつ WebRTC という問題意識で行われている研究は少なく、また移動モードに着目し複数の検討を行っているのは本研究のみである。

3. WebRTC QoE 計測システム

3.1 システム設計

既存の計測方法である ping や iperf, パケットの創出頻度・データサイズ・輻輳制御アルゴリズム等による計測が遠隔コラボレーションの QoE について議論するうえで信頼に足るとは言い難い。そこで本研究では、実際の遠隔コラボレーションと同様、WebRTC を使用して映像・音声をストリームした状態でのリアルタイム性計測を行うことが実測可能なシステム（以下、計測システム）を設計する。QoE 計測に関して、遠隔コラボレーションでは、低遅延な映像音声の伝送のみならず、その映像音声人間にとって高品質に近くできることも重要である。そのため、実際にリモートからストリームされた映像音声データをローカルに保存することが可能な計測ツールを作成し、生の動画音声データの解析を可能とすることを目指している。

計測システムの全体構成は図 1 に示す。図より、①と②に関しては多様なモバイルブロードバンドのユースケースに対応して計測を行うため、PC, スマートフォン, CLI 環境などでクロスプラットフォームで一元的に計測を行うことができるツールを設計している。次に、③について、近年、ネットワーク計測では、従来の ping や iperf のような専門ツールではなく、

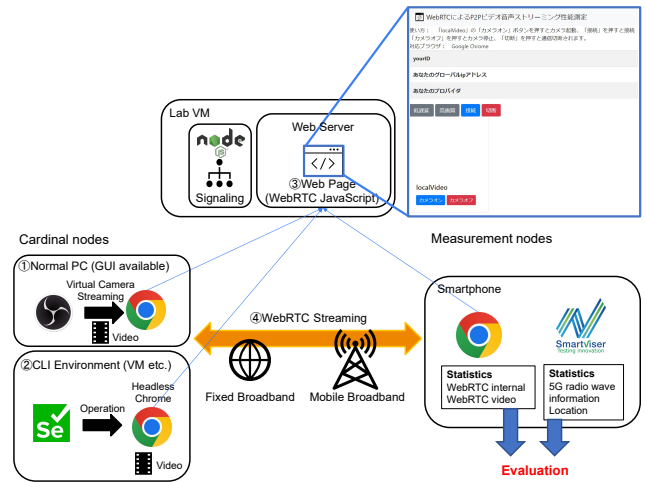


図1 計測システムの全体構成

表2 ソフトウェア実装

Name	Version
node.js	v14.15.1
Google Chrome	105, 106, 107, 108
SmartViser	6.13.1, 6.14.0
OBS Studio (64bit)	28.1.2
Selenium	4

fast.com^(注1) や iNonius^(注2) などの Web ブラウザベースの計測が主流となっている。そのため、本設計においては、先述のクロスプラットフォーム運用性の向上、かつ将来的に一般ユーザーが容易に利用しやすいように Web ブラウザ上で動作する計測ツールを実装する設計としている。一方で、④を設計した背景として、fast.com や iNonius などの既存の Web ベース計測ツールは、サーバ・クライアント方式を意識した実装となっているが、近年ではエンドツーエンドを P2P で結んだ遠隔コラボレーションも注目されている (WebRTC・リモート合奏・FPS ゲーム等)。そこで、本設計では、NAT を超えた P2P 接続のリアルタイム性について、計測の始点・終点を自由に設定可能な計測ツールを作成することを目指している。また、本稿において主として自宅 PC 環境・モバイル環境での通信品質計測を行うが、計測の起点をサーバに変更すると、サーバ・クライアント方式の計測も行うことが可能になっている。

本研究では、WebRTC の計測プログラム、および NAT を超えた P2P 接続に必要なシグナリングサーバを固定 IP アドレスを持った VM 上に配置し、そのサーバに、各クライアント端末 (スマートフォン・PC) から Google Chrome を用いて Web アクセスすることにより、実験を行う構成とした (各ソフトウェア Version は表 2 参照)。クライアントのスマートフォン上には、モバイルの接続情報 (バンド・電波強度・帯域幅等) を取得することができる SmartViser というソフトウェアをインストールし、計測中は常にアクティブ状態にしてログを蓄積させた。

(注1) : <https://fast.com/ja/>

(注2) : <https://inonius.net/speedtest/>

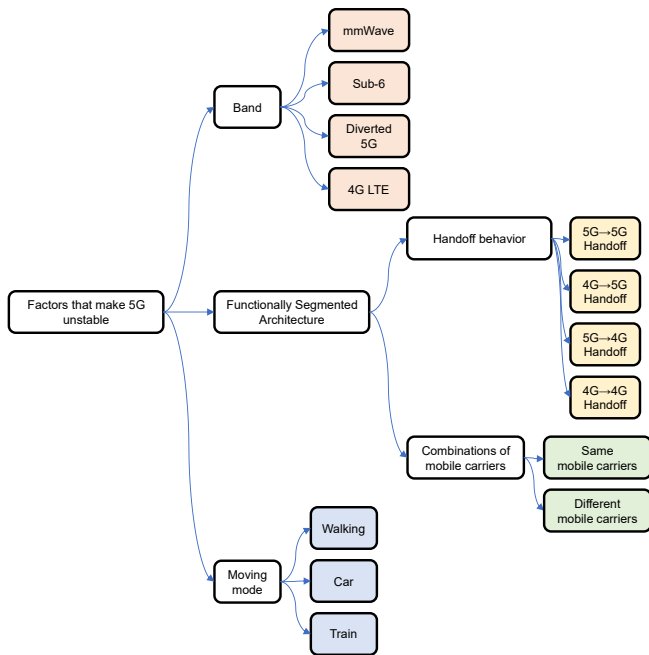


図2 課題の分類と計測対象の定義

3.2 計測対象設定

本稿では、アクセスしている各通信事業者の通信帯域毎に遠隔コラボレーションを行った際の RTT といったリアルタイム性を表す指標について計測・分析を行うことを目指す。また、4G → 5G ハンドオフ機会の増大が QoE に与える影響についても検討を行うことを目指す。また、移動モード別で切り分けた性能についても検討を行うことを目指す。そのため、課題別に図2のように計測対象を細分化して定義した。

4. 実験方法と結果

本章では、5G を用いた複数のシナリオの実験方法と結果について説明する。また、実験において用いた諸元を表3に示す。表より、本実験では4つの通信事業者のSIMカードを4台のスマートフォンに挿入し測定を行っている。以降の節にて各シナリオについて説明していく。

4.1 歩行

図3に楽天モバイルの4GとmmWaveを用いた測定結果をCDF (Cumulative Distribution Function) で示す。図より、4Gと比較しmmWaveによるRTT改善効果は、UEの静止状態・UEと基地局の間に遮蔽物が存在しない場合には期待できることが分かる。しかし、mmWaveに接続した状態で、歩行程度の動きや遮蔽物が存在すると、概ね70ms以上の遅延の発生確率が4Gよりも高くなることが分かる。これは、5G → 4Gのハンドオフの確率が増加し、ハンドオフ中のリアルタイム通信のQoEが低下していることを示唆する結果である。

4.2 鉄道 (山手線)

山手線の上野駅 - 有楽町駅間の6.3kmの往復区間で、実際に電車で乗車して計測を行った。計測対象のキャリアは、山手線全線を5Gカバーしたと公式発表しているKDDIとした。上野駅 - 有楽町駅区間には、この2駅を含めて合計6駅あり、各駅

表3 実験諸元

Device	Value
スマートフォン	Pixel 6 Pro (Tensor, 12GB RAM)
宅内 PC	Core i7-10875H, 64GB RAM
VM (東大内)	Intel Core Processor (Broadwell), 4GB RAM
スペクトラムアナライザ	VIAVI ONA-800A
キャリア	docomo, KDDI, Softbank, Rakuten
バンド	LTE, 5G_NSA(n77, n78, n257, 転用 5G)

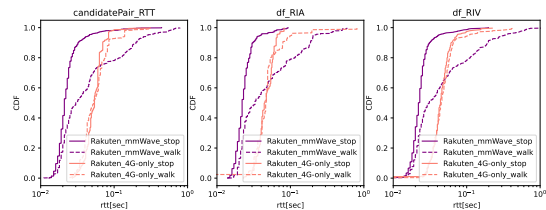


図3 5G ミリ波基地局前で歩いた場合と、立ち止まった場合の性能比較 (楽天・SL 広場)。4Gで同シナリオを実施した場合との比較

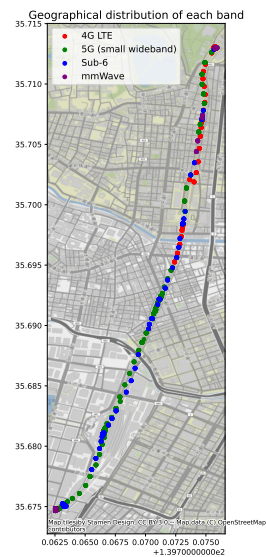


図4 山手線 KDDI のバンド分布

の天井に5Gの基地局が設置されている(図4)。計測は2回行い、1回目ではUEの接続モードを5G優先、2回目ではUEの接続モードを4Gのみとした。1回目の計測と2回目の計測は別日に実施しているが、電車内の混雑条件等に顕著な変化は見られなかった。

各バンドごとの通信性能比較を図5に示す。各バンドごとに比較した状態では、mmWaveが突出して良い性能を示していることが分かる。これは、mmWaveの基地局が駅舎の天井に設置されており、なおかつ駅構内は障害物が少ないため、mmWave通信において理想的な条件が整っているからであると考えられる。また、特筆すべき結果として、5G優先モード時のLTE性

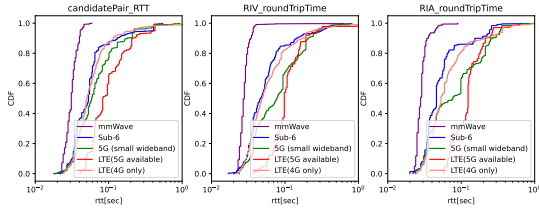


図5 各バンドごとの通信性能比較 (KDDI, 山手線)

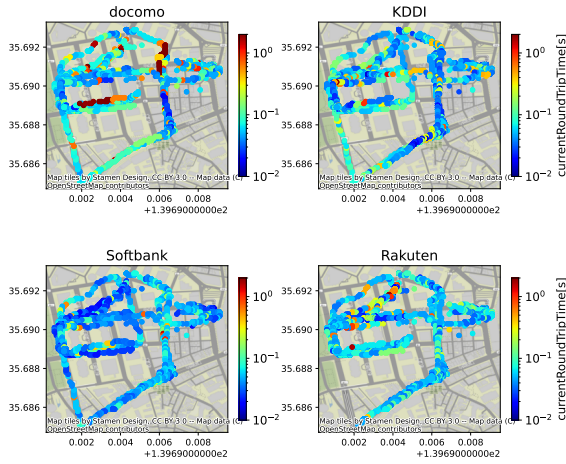


図6 新宿エリアの、各キャリアごとの通信性能 (自動車)

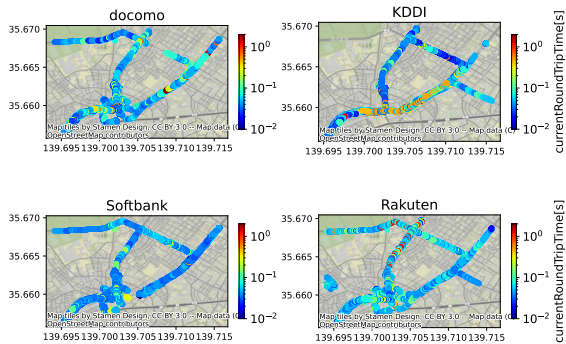


図7 渋谷エリアの、各キャリアごとの通信性能 (自動車)

能と、4Gのみモード時のLTE性能に顕著に差があるということが挙げられる。これは、5G → 4G ハンドオフが、LTEの性能に悪影響を及ぼしていることを示した結果であると言える。

4.3 自動車

新宿エリア、渋谷エリアでの地理的なWebRTCのRTT (candidatePair_RTT) 分布を図6、図7に示す。新宿や渋谷スクランブル交差点は、東京都内でも特に5G基地局が密に整備されているのにも関わらず、赤色の点が目立ち、他方で、表参道や神宮外苑周辺では比較的通信性能が安定していることが分かる。

図8は、candidatePair_RTTと、GPSの位置情報の時間変化から

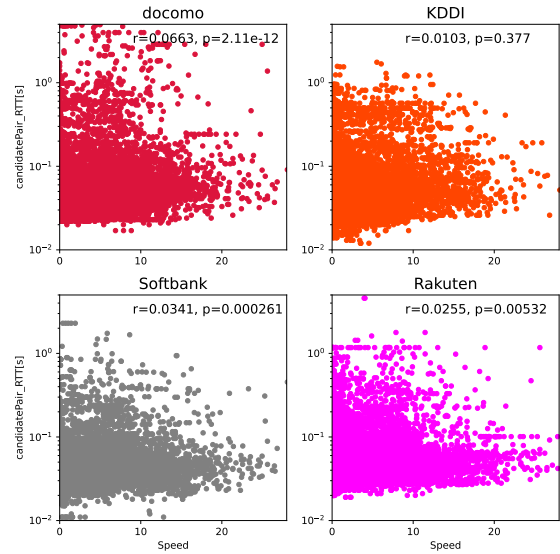


図8 各キャリアごとの通信性能と移動速度の散布図 (自動車)

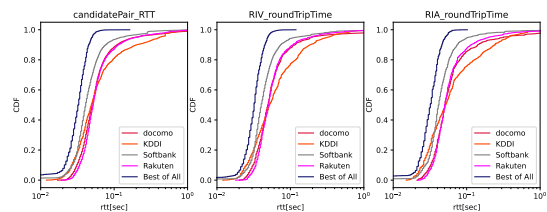


図9 キャリアごとの通信性能比較と、全キャリアの中で最善のものを選択した場合の通信性能 (自動車)

算出した移動速度の関係性を示した散布図である。ここでは、図6、図7のデータに加え、首都高速道路での計測データも含めて可視化を行っている。各キャリアとも、移動速度が遅い領域では散らばりが大きく、移動速度が速い領域では散らばりが小さくなる傾向が見られる。また、速度とRTTに対して無相関検定を行うと、docomoとSoftbank, RakutenではP値が有意水準1%を下回っており、両者には相関があることが分かる。しかしながら相関係数についてはdocomoが0.0663、KDDIが0.0103、Softbankが0.0341、Rakutenが0.0255となっており、相関は非常に弱いということが分かる。また、キャリアごとの比較、および全キャリアの中で、各時刻に最良の性能を有していたものを合計したもの (Best of All) との比較を図9に示した。まず各キャリアの比較では、Softbankが相対的に性能がよく、KDDIは性能が悪い。また、Best of Allでは、各キャリア個別の性能よりも大幅に性能が向上されており、概ねRTTが50ms以内に収まっている。

5. 考察

5.1 mmWave 基地局前での歩行シナリオ

5.1.1 mmWaveによる遠隔コラボレーションQoEへの影響
mmWaveの直進性の高さ、および遮蔽物に対するRobustness性の低さは多くの先行研究により研究されているが、実際の

モバイル環境において、遠隔コラボレーションの QoE に悪影響を及ぼすということが図 3 の結果により示された。従って、mmWave を遠隔コラボレーションの QoE 向上を目指して導入する場合、遮蔽物や移動がほとんどないようなユースケースのみに適用可能であると考えられる。

5.2 5G を用いた車載 WebRTC ストリーミング通信

5.2.1 頻繁なハンドオフ発生に起因する RTT 劣化問題

図 8 では、速度と RTT には非常に弱い相関しか見られなかったが、低速域では散らばりが大きく、高速域になるにつれて収束していく傾向が見られた。これは、速度と RTT は相関関係にはないものの、市街地を低速で走行して、高密度な 5G カバレッジエリア環境下での頻繁にハンドオフするようなシナリオは、場合によっては低い遅延が得られるが、ハンドオフ等のイベント発生時には不安定になりうることもあり、逆に首都高速道路のような郊外道路を定速で走行するようなシナリオでは、マクロセル基地局の通信性能に収束していくということを意味していると考えられる。

5.2.2 複数の通信事業者の併用化による通信改善効果

図 9 に示されているとおり、各キャリアを別々に用いた場合よりも、全キャリアの中で最良の性能を利用し続けることで、大幅なリアルタイム通信性能改善が見込めることがわかる。これは 5G モバイルブロードバンドと、マルチパス通信技術を併用することにより、現在ではできない様々なユースケースが生まれうる余地があることに他ならない。全キャリアの中で最良の性能を利用し続けるというのはあくまで最も理想的な条件に過ぎないが、このシナリオの場合、概ね 50ms の RTT でほぼすべてのパケットが到達しうる。これは昨今、商用化が進められている車載のオンラインゲームのようなユースケースで優れた QoE を実現するには十分な数値であり、なおかつ合奏のような最もハイレベルな遠隔コラボレーションを実現することも視野に入る数値である。

6. 結 論

本研究では実環境 5G のリアルタイム通信性能について、遠隔コラボレーションを想定した WebRTC 計測ツールを用いて詳細に計測を行った。従来、実環境 5G の計測はできるだけ理想的な環境がセッティングされた状態で PLT や Ping RTT, iperf といった一般的なネットワーク品質計測ツールを用いた計測が主流であったが、本研究では実環境の不安定な 5G に対して、遠隔コラボレーションを想定した特殊な計測を適用したことによって、より現実環境でのユースケース創出に向けた問題解決に必要な個別具体の知見を提供できたことが主な貢献である。

今後の展望としては、本研究で実装・使用した WebRTC 計測ツールの OSS 化や、本研究で取得した膨大なデータセットを機械学習等の定量的アプローチに適用可能なデータセットとして公開するほか、本研究では利用に至らなかったリアルタイムスペクトラムアナライザを用いたエリア測定データとの統合が挙げられる。また、計測というアプローチとは異なるものの、本計測によって有効性が示唆された車載 WebRTC 通信におけるマルチパス技術の併用なども、取り組む意義が大きい実装課題

であると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、NICT「Beyond 5G 研究開発促進事業 (#01101)」及び科研費 (#22H03574) の助成を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表したい。また、5G データ取得に関して多くのご支援を頂いた VIAVI ソリューションズ株式会社の皆様並びに SmartViser 社の皆様にも感謝の意を表したい。

文 献

- [1] “総務省 | 令和 3 年版 情報通信白書 | テレワークの実施状況,” <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd123410.html>, July 2021. (Accessed on 01/18/2023).
- [2] T. Barnett, S. Jain, U. Andra, and T. Khurana, “Cisco visual networking index (vni) complete forecast update, 2017–2022,” Technical report **, 2018.
- [3] 西堀佑, 多田幸生, 曾根卓朗他, “遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察,” 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), vol.2003, no.127 (2003-MUS-053), pp.37–42, 2003.
- [4] D. Xu, A. Zhou, X. Zhang, G. Wang, X. Liu, C. An, Y. Shi, L. Liu, and H. Ma, “Understanding operational 5g: A first measurement study on its coverage, performance and energy consumption,” Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication, pp.479–494, 2020.
- [5] A. Narayanan, E. Ramadan, J. Carpenter, Q. Liu, Y. Liu, F. Qian, and Z.-L. Zhang, “A first look at commercial 5g performance on smartphones,” Proceedings of The Web Conference 2020, pp.894–905, 2020.
- [6] Y. Pan, R. Li, and C. Xu, “The first 5g-lte comparative study in extreme mobility,” Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems, vol.6, no.1, pp.1–22, 2022.
- [7] H.T. Alvestrand, “Overview: Real-Time Protocols for Browser-Based Applications,” RFC 8825, Jan. 2021. <https://rfc-editor.org/rfc/rfc8825.txt>
- [8] 金子直矢, 伊東孝紘, 勝田肇, 渡辺敏暢, 阿部博, 大西亮吉他, “複数回線を冗長併用する通信技術の webrtc 映像伝送への適用と評価,” 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (TDP), vol.3, no.3, pp.21–31, 2022.
- [9] 石原知洋, 北口善明, 阿部博, 金子直矢他, “Webrtc を利用した動画配信利用時の無線 lan 品質測定,” 研究報告インターネットと運用技術 (IOT), vol.2022, no.19, pp.1–7, 2022.
- [10] M. Moulay and V. Mancuso, “Experimental performance evaluation of webrtc video services over mobile networks,” IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)IEEE, pp.541–546 2018.