情報処理学会論文誌　デジタルプラクティス　Vol.3　No.3　21–31 (July 2022)

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

金子 直矢[1]　伊東 孝紘[2]　勝田 肇[2]　渡辺 敏暢[2]　阿部 博[1]　大西 亮吉[1,2]

受付日 2021年11月22日, 再受付日 2022年3月3日,
採録日 2022年4月22日

概要：自動車の遠隔運転・操作を実現するためには外界の視覚情報と聴覚情報を車からオペレータに対して必要なときに伝達することが必要不可欠である．これを実現するため，マルチメディア伝送の低遅延化，通信の可用性および通信品質の向上が要求される．低遅延化は，ピアツーピアで端末間の通信路を確立しマルチメディア伝送とデータ伝送を可能とする WebRTC 技術を用いることで実現することが可能である．一方で通信の可用性および通信品質の向上は，昨今のモバイル通信の進化を承けてなおカバレッジエリア内外を移動する車載通信においては困難である．そこで本研究では，可用性と品質向上のため複数の通信手段による補い合いを可能とするマルチパス通信技術を WebRTC に対して導入する．評価として，自動車に複数のモバイル通信回線を備えた本システムを搭載し，市街地走行環境における映像伝送実験を行った．その結果，単一の通信手段のみを用いた場合と比較して可用性が向上しロスや遅延の低減に寄与することを確認した．

キーワード：マルチパス通信，LTE，セルラネットワーク，モバイル通信，車載通信，WebRTC，トランスポートプロトコル

Applying and Evaluating Multipath Redundant Communication Technology for WebRTC-based Video Streaming

Naoya Kaneko[1]　Takahiro Ito[2]　Hajime Katsuda[2]　Toshinobu Watanabe[2]　Hiroshi Abe[1]
Ryokichi Onishi[1,2]

Received: November 22, 2021, Revised: March 3, 2022,
Accepted: April 22, 2022

Abstract: A driving system should convey visual and auditory information from a car to itsoperator on time to realize remote driving and teleoperation of a vehicle. For this objective, it is necessary to reduce the delay and to improve both availability and quality of communication for multimedia transmission. By introducing WebRTC technology which enables Peer-to-Peer transmission of multimedia and data between end devices, we can achieve the former. On the other hand, the latter is still a big challenge for vehicular communication moving inside and between coverage areas,even with the recent improvement of 3G/4G/5G cellular mobile networks. In this paper, we introduce a multipath communication technique for WebRTC to improve communicaton availability and quality. Our method utilizes multiple communication devices to reduce losses, latency and aggregate availability. We have tested our implementation with a vehicle streaming video while driving in an urban area, equipped with multiple cellular network devices. As a result, our study shows that compared to single-path transmission, WebRTC over multipath-enabledtransport achieved higher availability, reduced packet loss and latency.

Keywords: multipath communication, LTE, cellular network, mobile communication, vehicular communication, webRTC, transport protocol

1. 背景と目的

モバイルネットワークの普及および性能の向上を承けて通信機能を備えた自動車であるコネクティッドカーの普及

[1] トヨタ自動車株式会社
Toyota Motor Corporation, Chiyoda, Tokyo 100–0004, Japan
[2] ウーブン・プラネット・ホールディングス株式会社
Woven Planet Holdings, Inc., Chuo, Tokyo 103–0022, Japan

© 2022 Information Processing Society of Japan

が進んでいる．コネクティッドカーはWi-Fiやモバイル網に接続する機能を持ち，テレマティクスサービスやオペレータサービスを可能としている．車載通信機能が提供するメディア伝送に充分な通信帯域を活用して，遠隔監視のみならずメディア伝送を行い遠隔運転に活用する検討がなされている．既存のモバイル通信サービスは端末からのアップロード通信において数十Mbps程度の可用帯域で利用が可能である[1]．この帯域幅は，例としてIntel RealSense[*1]でサポートされる1080 pの映像を複数伝送するのに充分な帯域幅である．

一方で，移動体であるコネクティッドカーの通信環境は常に変動し続け，遠隔運転に充分な通信品質を維持できないことがある[2]．コネクティッドカーは公道を中心とした環境での稼働が想定されており，通信手段は3G/4G/5Gモバイル通信サービスに依存している．これらの通信サービスでは基地局との距離や見通し，エリアを同じくする他の通信端末，モバイル網およびゲートウェイの通信状況によりパケットのロスや遅延，可用帯域が変化する．

このような環境下で遠隔運転システムを実現するためには，遠隔からの操作に用いる車両の視覚情報および聴覚情報を，遠隔地のオペレータに対して品質を高く，かつ可用性を高く伝送する仕組みが必要である．本稿では，「品質が高い」とは視覚情報および聴覚情報が高精細であり低遅延に届くこと，「可用性が高い」とは伝送が途切れることなく安定していることと定義する．音声・映像情報をやりとりするメディア伝送には，DASH（Dynamic Adaptive Streaming over HTTP）[3]やSRT（Secure Reliable Transport）[4]といった様々なプロトコルおよび技術が存在している．これらの技術の中で最も低遅延なフレームワークとしてWebRTCがある．WebRTCは従来のサーバ・クライアント型の技術とは異なり，メディア伝送をサーバを介さずにP2Pで実施することで音声・映像伝送の低遅延化を実現している．WebRTCを利用することで遠隔運転に必要な低遅延なメディア伝送を実現できる可能性がある．

しかし，前述のとおり車両の通信環境は移動に伴い変化しづつけるため，1つの通信手段では車両とオペレータ端末間の通信品質を維持できない．通信の可用性を向上するためには，複数の異なる通信手段を利用し通信状況に応じて使い分けるなどの仕組みが必要である．一方で，従来のTCPやUDPといった通信プロトコルは1つの通信手段を想定しているため複数の通信手段が利用できる状況下でもそれらを活用できない問題がある．そこで筆者らは，複数の通信手段を併用する技術であるマルチパス通信技術を採用したトランスポート層以下の通信の可用性向上を目指す．マルチパス通信技術は複数の通信手段にまたがった連続的な通信により可用性を向上し，品質を補い合うことでパケットロスを低減し可用帯域を増加させ通信品質の向上を可能とする．また，マルチパス通信技術は通信制御の柔軟性向上が可能である．本稿では，「通信制御の柔軟性」とはそれぞれの通信手段が提供する可用帯域や遅延特性などの通信資源をアプリケーションの需要に応じて分配できることと定義する．WebRTCをこのマルチパス通信技術のうえで利用することで，遠隔運転システムが必要とする視覚情報・聴覚情報の低遅延な伝送と高い可用性といった通信要件を実現できると考えられる．

筆者らは，低遅延メディア伝送が可能なWebRTC技術に対してマルチパス通信技術を組み合わせ通信品質およびメディア伝送品質の向上を可能とする手法の提案を文献[5]にて行った．文献[5]ではマルチパス技術とWebRTCとの連携を実現し，提案手法がWebRTCのメディアストリームごとに通信手段を選択でき通信制御の柔軟性向上に寄与することを示した．提案したマルチパス通信手法の骨子は，1. IP ToS値を用いたメディアストリームの識別，2. マルチパス通信技術導入による通信選択肢の多様化，3. メディアストリームごとのパス利用形態制御，の3点である．

本稿では，マルチパス通信技術を複数回線による冗長化に用いる検証を，文献[5]では実施できなかった遠隔運転システムが対象とする環境を模擬して行った．市街地を走行する自動車から映像伝送を実施する実験と評価を行った．

本稿の構成は以下のとおりである．2章では関連研究を紹介する．3章では提案する手法およびシステムについて述べる．4章で提案手法の評価環境について述べる．5章では評価結果のまとめと考察を行う．最後にまとめと今後の課題について整理する．

2　関連研究

マルチパス通信技術および研究の代表的な例として，Multipath TCP（MPTCP）[6]，MP-QUIC [7]，MP-DCCP [8]が存在する．既存の研究では，トランスポート層が輻輳制御および再送制御を実装している．本研究は，WebRTCのトランスポートプロトコルであるUDPを対象としてマルチパス技術を導入する．輻輳制御および再送制御はWebRTCが搭載するGoogle Congestion Control（GCC）[9]に一任し，マルチパス制御のみを行う点が異なる．

文献[10]が提案するMP-UDPは，本研究と同様にUDPを対象としたマルチパス技術を提案し，シミュレーションによる検証を行っている．本研究では，車載走行環境でWebRTCを対象に検証を行う点が異なる．

文献[11]は，移動する鉄道列車環境において複数のモ

[*1] https://www.intelrealsense.com/

© 2022 Information Processing Society of Japan

バイル通信回線を併用するために MPTCP を適用している．本研究は，同じく複数のモバイル通信回線を用いて走行環境を対象とした検証を行う．一方で，自動車の走行環境を対象としている点，UDP トラフィックおよび WebRTC を対象とする点，アップロード通信におけるマルチパス技術の適用および検証を行う点が異なる．

文献 [12] は，ビデオ配信システムにモバイル通信と Wi-Fi を対象にした MP-QUIC の利用を提案しており，本研究と同じくマルチパス通信技術をメディア伝送に用いる．本研究は，複数モバイル通信回線環境を対象とする点，輻輳制御機能を備えた QUIC ではなく WebRTC をアプリケーションとして UDP を対象とする点，車載環境にあるモバイル通信端末からの WebRTC を用いたアップロード方向のメディア伝送を対象とする点が異なる．モバイル通信環境で端末からみたダウンロードとアップロードの実効スループット特性は異なるため [1]，マルチパス技術の適用においても異なる手法が求められると考えられる．

文献 [13] は，複数の通信手段を用いる Multi-Connectivity（MC）技術のサーベイを行っており，複数回線併用を実現するレイヤ，活用するダイバーシチおよび併用が行われるホップ数に基づいた分類を行っている．本研究の提案手法は MC 技術の 1 つであり，複数のモバイル通信回線を用いて周波数ダイバーシチおよび空間ダイバーシチを活用し，同じ無線通信技術（3G/4G/5G）を併用する．本研究は，通信サービス事業者ごとに異なるネットワークを経由しマルチホップ環境での複数回線併用を行う．また本研究は，トランスポート層で MC 技術を実現し，パケット複製の検証を行う．モバイル通信回線を想定してパケット複製を行う MC 技術として 3GPP Dual Connectivity 技術の研究 [14]-[16] が存在する．本研究と異なり Dual Connectivity 技術は，ネットワーク層よりも下の層で実現され 1 つのモバイル事業者の網内を対象としている．本研究では，複数の異なるモバイル通信事業者のサービスを組み合わせることでカバレッジエリアおよび通信品質の補い合いを行う．

3. 提案手法

3.1 システム構成

筆者らが文献 [5] において提案するシステムの構成を**図 1** に示す．本システムは WebRTC を対象としてマルチパス技術を導入するため，プロキシ方式で実装する．マルチパス通信を行う端末（クライアント端末）と中継サーバのそれぞれにおいて UDP プロキシを動作させることで，プロキシ間の通信路の制御を可能とする．本 UDP プロキシを，マルチパス UDP プロキシと呼称する．

マルチパス UDP プロキシはクライアントとサーバから構成される．プロキシのクライアント側はアプリケーションから受信したトラフィックを IP ToS により識別し，端末が備える通信手段を 1 つ以上用いてサーバへ転送する．サーバは，クライアントから転送された通信の集約制御と順序制御を行い，プロキシ先のアプリケーションに転送する．本稿では，マルチパス UDP プロキシのクライアント側を Multipath UDP Proxy（MUP）クライアント，サーバ側を MUP サーバと呼称する．

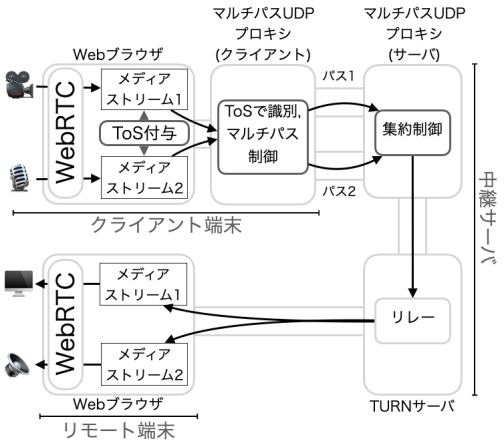

図 1　提案するマルチパスプロキシシステムのブロック図
Fig. 1　Block diagram of proposed multipath proxy system.

車載通信環境で用いられる WebRTC を対象としてマルチパス UDP プロキシを導入する場合，車側に MUP クライアントを導入し，端末間通信の中継に用いる Traversal Using Relay around NAT（TURN）サーバ機能を提供する中継サーバ端末に MUP サーバを導入する．

3.2 回線の冗長利用

本研究は，複数回線を冗長し可用性と品質を向上するためにマルチパス技術を用いる．MUP クライアントは，アプリケーションから受信した UDP パケットをそれぞれの通信手段へ複製して送出し，MUP サーバへ転送する．本研究ではこの動作を回線の冗長利用と呼称する．プロキシは転送時に各パケットにシーケンス番号を付与する．MUP サーバは，シーケンス番号が常に増加するよう古いパケットおよび重複パケットの排除を行い，アプリケーションに転送する．複数のパスから同一のパケットが到来する場合，最初に受信したパケットが採用される．MUP サーバは受信パケットのシーケンス番号が 1 つずつ増加することを期待する．これに反して 2 つ以上増加する場合，パケットが受信できずシーケンス番号の欠損が発生していると本稿では呼称する．MUP サーバはシーケンス番号が欠損した場合，未受信のシーケンス番号を記録する．MUP サーバは，未受信として記録された古いシーケンス番号を持つパケットが後から到着した場合，最初のパケットを採用する．これらのシーケンス番号が古いパケットの受信を，本研究ではアウトオブオーダー [17] 受信と呼称

© 2022 Information Processing Society of Japan

する．

WebRTC はトランスポートプロトコルとして UDP を用いており，輻輳制御および再送制御は GCC が実施する．低遅延メディア伝送を目的として再送制御および順序制御はマルチパス UDP プロキシでは実施しない．本システムでは機能を重複させないこととしそれらの制御は WebRTC 側に一任し，マルチパス制御のみを行う．

4. 評価

本システムの回線冗長利用の効果を確認するために，遠隔運転システムを想定する環境での評価を行う．遠隔運転環境を模倣するため，本システムを搭載する自動車（試験車）を用意する．試験車は通信を行う車載通信器を備え，遠隔操作端末へ映像伝送を行う．本稿では，車体に前方および左右の合計 3 つのカメラを備える遠隔運転を想定し，試験車から遠隔端末へ各カメラから 1 ストリームずつ合計 3 ストリームの映像伝送を行う．遠隔運転の通信状況を模すため，試験車は市街地を走行する．走行中に映像伝送を行い，車載通信器が 1 つの通信手段のみを用いる場合（シングルパス構成）と複数の通信手段を冗長利用する場合（マルチパス構成）とで，通信制御を行うトランスポート層およびメディア伝送を行う WebRTC 層の統計情報を比較し，提案手法の有効性を評価する．

本稿で用いた評価環境のネットワーク構成を**図 2** に示す．評価環境は，試験車に搭載される車載通信器，マルチパス集約と TURN によるリレーを担う中継サーバ，および映像を受信する遠隔操作端末より構成される．

車載通信器は docomo（BIGLOBE MVNO），au，SoftBank の 3G/4G 回線を提供するモバイルルータをそれぞれ 1 つずつ，合計 3 つ備える．それぞれの回線を以降 path0，path1，path2 と呼称する．モバイルルータは富士ソフト FS030W（docomo，SoftBank）と Speed Wi-Fi NEXT W05（au）を用いる．モバイルルータは USB テザリングを有効にしネットワークインタフェースとして認識される．車載通信器は，マルチパス構成の評価を行う場合は path0 および path1 と path2 の 3 回線をすべて用い，シングルパス構成の評価を行う場合は path0 のみを用いる．

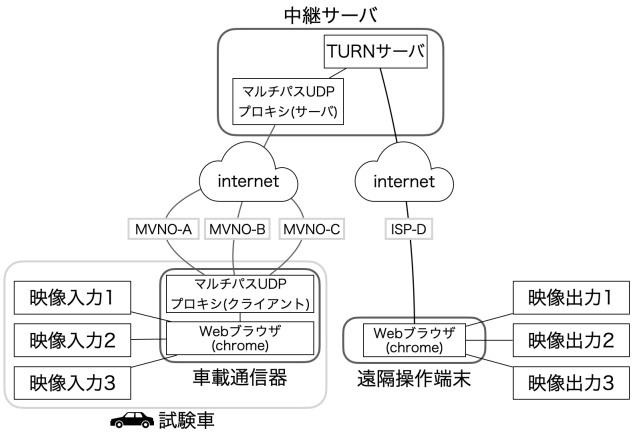

図 2　評価環境のネットワーク

Fig. 2　Network diagram of evaluation environment.

車載通信器は，Ubuntu 20.04.3 を導入したラップトップ PC を利用し，MUP クライアントプログラム，および WebRTC に用いる Google Chrome 93.0.4577.82 を動作させる．車載通信器は，遠隔操作端末に対して仮想カメラから入力される 3 つの映像を WebRTC を用いて伝送する．本稿では映像素材として車載カメラで録画した映像を AVI ファイルとして用意する．走行中は v4l2loopback[*2] を用いて 3 つの AVI ファイルから 800x600 15fps の映像をブラウザおよび WebRTC に入力する．

遠隔操作端末は，Ubuntu 20.04.3 を導入したラップトップ PC を利用し，WebRTC に用いる Google Chrome 93.0.4577.82 を動作させ映像の受信を行う．遠隔操作端末は，安定した固定回線のあるオフィス環境に設置する．

中継サーバは AWS EC2 上の仮想サーバとして構築する．中継サーバでは TURN サーバとして coturn[*3] 4.5.1.2 を用い，MUP サーバプログラムを動作させる．

図 3　試験車：車載通信器の設置環境

Fig. 3　Inside test car: vehicular communication device.

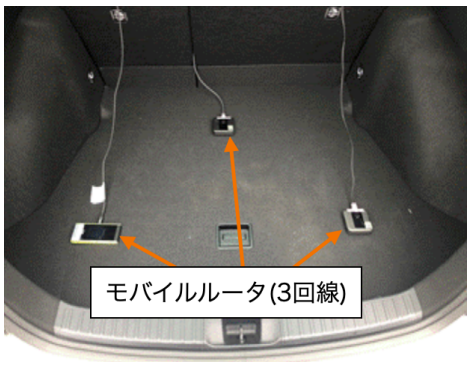

図 4　試験車：モバイルルータの設置環境

Fig. 4　Inside test car: mobile routers.

[*2] https://github.com/umlaeute/v4l2loopback
[*3] https://github.com/coturn/coturn

© 2022 Information Processing Society of Japan

車載通信器は**図 3** のように試験車へ搭載する．車載通信器に接続するモバイルルータは**図 4** に示すように車内後方に設置する．

試験車による走行は，映像伝送を有効にした状態で 1 時間から 2 時間程度実施する．評価に用いる統計情報として Ping による遅延，トランスポート層，および WebRTC の情報を収集する．利用した通信回線の特性比較のため，評価中に各パスを対象として MUP クライアントと MUP サーバ間で Ping 計測を行う．Ping は MUP クライアントが MUP サーバに対して 5 秒ごとに送信する．5 秒以内にサーバから応答がない場合はロスとみなす．Ping 統計値およびトランスポート層の統計情報は，車載通信器上の MUP クライアントおよび中継サーバ上の MUP サーバから 5 秒ごとに採取する．WebRTC の統計情報は，車載通信器および遠隔操作端末のブラウザから WebRTC Statistics API を用いて，1 秒ごとに採取する．

回線の冗長利用がトランスポート層へ与える影響を，Ping 計測から得られる各回線の RTT 統計値および MUP クライアントと MUP サーバの送受信スループット，送受信パケット数，シーケンス番号の欠損パケット数とアウトオブオーダー受信との差を元に評価する．RTT 統計値により，各回線の遅延特性を評価する．MUP クライアントの送信スループットおよび MUP サーバの受信スループットから，複数の通信回線にトラフィックが複製され回線の冗長利用が行われていることを評価する．MUP サーバが各回線から受信しアプリケーションへ転送したパケット数により，複数の通信回線からパケットを補い合う動作がなされていることを評価する．また MUP サーバが観測したシーケンス番号の欠損パケット数，およびアウトオブオーダー受信パケット数との差により，ある通信回線で発生するパケットロスに対してアウトオブオーダー受信により別の通信回線からの補填がなされていることを評価する．

複数回線の冗長利用が WebRTC 層へ与える影響を，WebRTC が映像ストリームごとに計測する RTT，ジッタ，ロスの割合（fraction lost）と，WebRTC 層でのパケットロス数および受信スループットにより評価する．本研究ではシングルパス構成とマルチパス構成の統計値をそれぞれ採取し比較することで，回線の冗長利用が与える影響を評価する．WebRTC の RTT により，回線の冗長利用がアプリケーションが行う通信の低遅延化に与える影響を評価する．WebRTC のジッタおよび fraction lost により，回線の冗長利用が WebRTC の輻輳制御に与える影響を評価する．WebRTC のパケットロス数により，回線の冗長利用が WebRTC 層のパケットロス低減に有効であるかを評価する．WebRTC 受信スループットにより，回線の冗長利用が WebRTC の輻輳制御および利用帯域に与える影響を評価する．

5. 結果と考察

本章では，本システムの走行時通信評価の結果をまとめ，考察を行う．まず利用した通信回線の RTT 推移を明らかにする．次にトランスポート層の評価結果を示す．最後に WebRTC の統計情報から，マルチパス UDP トランスポート層がメディア伝送に与える影響をまとめる．

5.1 利用した通信回線の RTT 推移の評価

Ping 計測の結果として各パスの RTT の推移を**図 5** に示す．Ping 計測の統計を**表 1** に示す．既存研究 [18], [19] にて，遠隔操作環境の一方向遅延の許容値と例示される 100 ms の RTT を想定して 200 ms を上限とする範囲の，RTT の分散を**図 6** に示す．

これらの結果は本評価に用いたモバイル回線のそれぞれの特性を示す．それぞれのモバイル回線は 10–35% 前後のロスが発生し，最大で 4 秒程度の RTT を示す．一方で

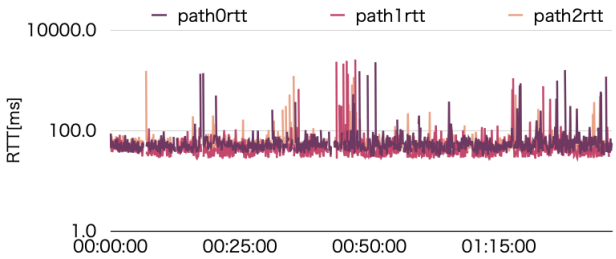

図 5　走行試験環境：各パスの RTT（対数表示）の推移
Fig. 5　Driving environment: logarithm RTT for each path.

表 1　各回線の Ping の統計
Table 1　Ping statistics on each path.

	MNO-A path0	MNO-B path1	MNO-C path2
RTT 最小 [ms]	30.2	26.4	35.7
RTT 最大 [ms]	3990.0	2602.7	1535.8
RTT 平均 [ms]	87.5	69.9	69.5
RTT 中央値 [ms]	50.3	40.3	52.7
RTT 標準偏差 [ms]	215.5	196.3	111.0
ロス率 [%]	9.2	12.7	34.1
RTT ＞ 200ms [%]	0.044	0.027	0.022

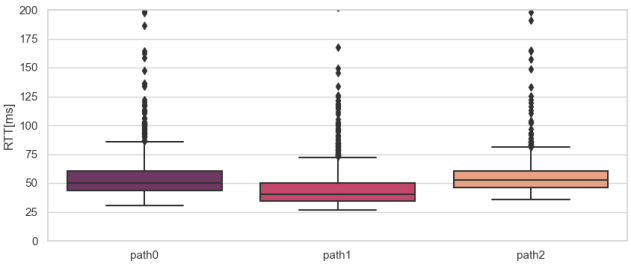

図 6　試験走行中の各回線の 200 ms 以下の RTT 分散
Fig. 6　Distribution of RTT for each path（under 200 ms）.

© 2022 Information Processing Society of Japan

RTT の第三四分位数は，既存研究 [18], [19] にて許容値とされる 100 ms を往復で超えていない．

5.2　マルチパス UDP トランスポートの評価

車載通信器の MUP クライアントが各パスへ送信したトラフィックのスループットを**図 7** に示す．このトラフィックは WebRTC の通信を受けて発生したものである．MUP クライアントは，path0 と path1 および path2 に同量のトラフィックを送信している．MUP クライアントは，複数回線を冗長したマルチパス利用を行っているといえる．

MUP クライアントが各パスへ送信したトラフィックは，異なるネットワークを経由して中継サーバに到着する．中継サーバ上の MUP サーバが受信した各パスのトラフィックのスループットを**図 8** に示す．path0 および path1 の受信スループットは最大で 6.2 Mbps を示したが，path2 は定常的に 120 kbps 程度を推移していた．

図 8 より，MUP サーバは MUP クライアントが送信したトラフィックを 3 つの回線より受信していることが確認できる．本システムは複数回線を冗長したマルチパス利用を行っているといえる．

図 7 は各パスで同量の送信スループットを示していたが，図 8 は各パスで異なる受信スループットを示している．path0 と比較して，path1 は同程度の受信スループットを示している．一方で path2 は定常的に低い値を示している．path2 はモバイルネットワーク内で帯域制限を受けていたと考えられる．このように一部の回線が充分な可用帯域を提供できない場合においても映像伝送が行えていることから，マルチパスにより可用性が向上したといえる．

評価期間中に MUP クライアントが各パスへ送信したパケット数と MUP サーバが受信したパケット数，および 5 秒ごとの送受信パケット数の差に基づくロス率の統計を**表 2** に示す．評価期間全体で MUP クライアントから MUP サーバへ送信されたパケットのパケットロス率はそれぞれ path0，path1，path2 で 1.1%，1.5%，83.9% であった．この結果は表 1 に示した Ping 計測のロス値と異なる．path0，path1 においてパケットロス率が Ping 計測結果より低いのは，表 2 に示されるパケットの送信がモバイル回線へのアップロード通信のみ行う一方で，Ping 計測はダウンロード通信を伴うため差が生じていると考えられる．また表 2 中の 5 秒ごとの統計値に示されるように，評価期

表 2　各回線の MUP クライアントから MUP サーバへのパケット数とロス率の統計

Table 2　Statistics on number of packets and losses for traffic on each path from MUP client to MUP server.

	MNO-A path0	MNO-B path1	MNO-C path2
MUP クライアント			
合計送信パケット数	852723	852723	852723
MUP サーバ			
合計受信パケット数	843456	839702	137673
パケットロス率 [%]	1.1	1.5	83.9
5 秒毎のパケットロス率			
平均 [%]	2.3	4.2	70.5
最大 [%]	96.0	95.7	100.0
標準偏差 [%]	6.2	14.5	21.0

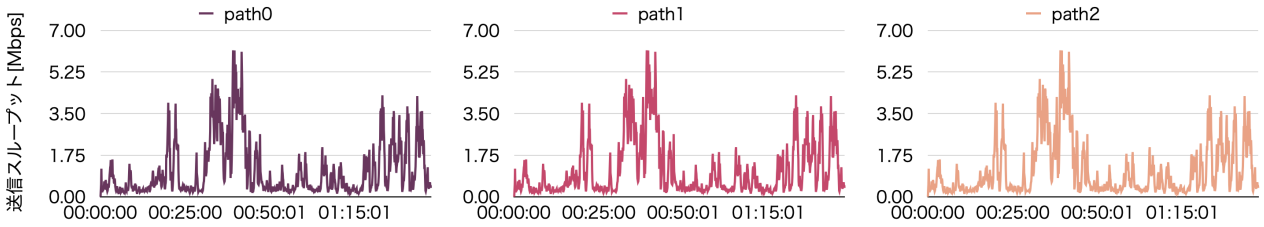

図 7　MUP クライアント：各パスへの送信スループット

Fig. 7　MUP Client: Tx throughput for each path.

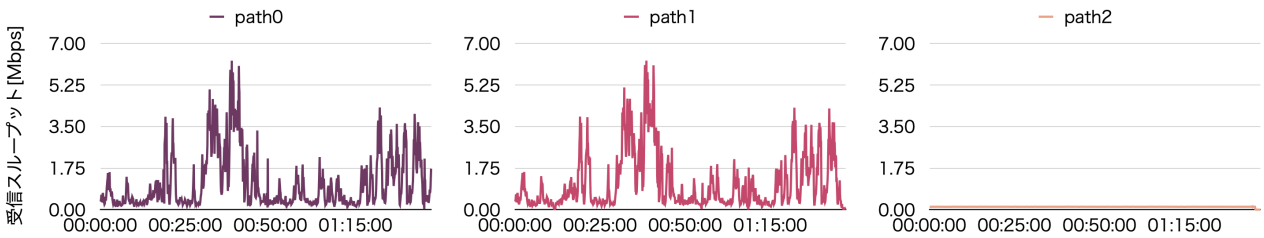

図 8　MUP サーバ：各パスからの受信スループット

Fig. 8　MUP Server: Rx throughput from each path.

© 2022 Information Processing Society of Japan

間中全体のパケットロス率と比較して時間ごとのパケットロス率は各回線で大きく変動している．Ping 計測のパケットロス率は，ダウンロード通信でのパケットロスおよび時間ごとに異なるアップロード通信でのパケットロスにより生じていると考えられる．一方で，path2 のパケットロス率は表 2 において 83.9% であり表 1 の 34.1% よりも大きい．これは Ping 計測で送信されるパケットサイズとメディア伝送に用いられるパケットサイズの違いや送信間隔の違い，当該回線が帯域制限を受けていた影響によりモバイル網側の QoS 制御等によると考えられる．

MUP サーバでの集約処理にあたりアプリケーションへの通信に採用された各パスの累積パケット数を**図 9** に示す．本評価では，path1 および path0 にて採用パケットが多く観測された．一方で 1.2% のパケットは，定常的に低帯域を示していた path2 から採用された．本稿では複数回線を冗長併用しているため，パス間でパケットを補い合う動作がなされたことが確認できる．

図 10 は，MUP サーバで観測したシーケンス番号の欠損パケット数を示す．全体の受信パケット数に対してシーケンス番号の欠損は 11327 回，1.0% 発生していた．モバイル通信環境では各パスのネットワークの遅延，可用帯域の特性が変動する．各パスのパケットロスおよび到着順序の入れ替わりにより，シーケンス番号の欠損が発生していたといえる．これは単一回線のみを用いた場合のパケットロスの発生回数に相当する．

図 11 に，シーケンス番号の欠損パケット数とアウトオブオーダー受信による補填回数の差を示す．この差は複数回線の冗長利用によって補填できなかったパケットロスの数を示す．評価中の走行期間において，121 回のパケットロスが発生しており，シーケンス番号の欠損パケット数の 1.0%（全体の受信パケット数に対して 0.014%）であった．

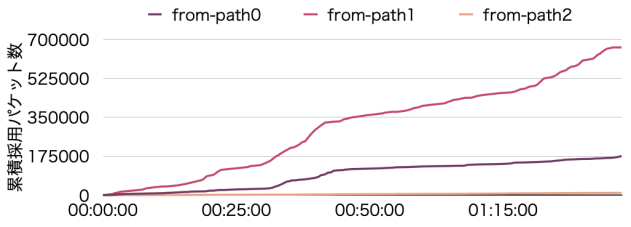

図 9　MUP サーバ：各パスの累積採用パケット数

Fig. 9　MUP Server: Sum of accepted packets per each path.

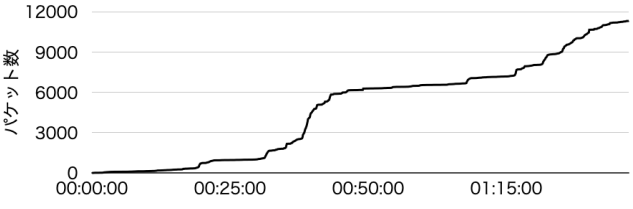

図 10　MUP サーバ：シーケンス番号の欠損パケット数

Fig. 10　MUP Server: sum of packet skipping sequence order.

このことから，複数回線の冗長利用およびアウトオブオーダー受信の有効化は Ping 計測にて 10–35%，トランスポート層にて 1–84% のロス率を示していた各回線を組み合わせることで，トランスポート層でのパケットロスを 0.014% に低減したといえる．

アウトオブオーダー受信はパケット到着時間および到着間隔を変動させ，受信側 GCC の遅延ベース輻輳制御器に影響を与える可能性がある．そのため，WebRTC 通信などパケット到着間隔や時間に制約をもつリアルタイム通信プロトコルでは，遅延時間の増加に対するトレードオフを考慮しつつ順序制御機構の導入が有効と考えられる．

5.3　WebRTC の品質評価

車載通信器が観測した WebRTC の RTT（googRTT）の分散を**図 12** に示す．図示される各分散は伝送した 3 映像のメディアストリームの各 RTT と対応する．Google Chrome は WebRTC レイヤで RTCP（RTP Control Protocol）を用いた端末間の RTT 計測の仕組みを備えており，SSRC（Synchronization Source）で識別されるメディアストリームごとに RTT 計測を行っている．計測結果の RTT は，メディアストリーム送信側のブラウザにて SSRC の RTCStatsReport の googRTT として得られる．本評価では，3 つのメディアストリームの RTT はそれぞれの取得時にストリーム間で同じ値を示していた．本稿で利用した Google Chrome の実装では，メディアストリームで共通の値が得られるものと考えられる．

WebRTC の RTT はマルチパス構成にて平均 65.0 ms，最大 101 ms，シングルパス構成にて平均 83.5 ms，最大

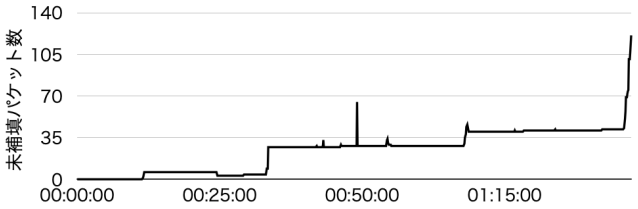

図 11　MUP サーバ：シーケンス番号の欠損パケット数とアウトオブオーダー受信による補填回数の差

Fig. 11　MUP Server: gap between sum of packet skipping sequence order and recovered in out-of-order reception.

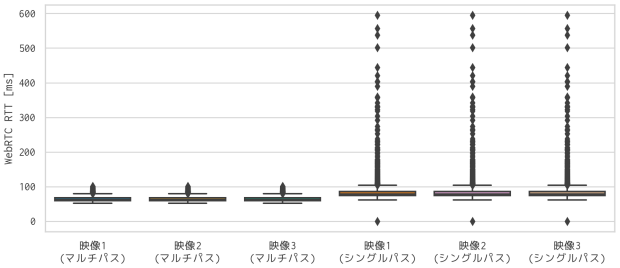

図 12　WebRTC RTT：マルチパス vs シングルパス（path0）

Fig. 12　WebRTC RTT: Multipath vs Singlepath（path0）.

© 2022 Information Processing Society of Japan

595 ms を示した．マルチパス構成はシングルパス構成に比して低い RTT と狭い分散を示している．複数の回線によるパケットの補填が RTT の低減に貢献している．

車載通信器の WebRTC が受信したジッタの分散を**図 13**，fraction lost の分散を**図 14** に図示する．メディア受信側のブラウザ（WebRTC）は，メディアの送信元に RTP パケットの到着時間のジッタおよびロスの割合（fraction lost）を RTCP により定期的に送信する．これらは GCC が送信スループットを制御する際に用いるパラメータである．ジッタは映像受信側の遅延ベース輻輳制御器，fraction lost は送信側のロスベース輻輳制御器により利用される．fraction lost が 0.1 以上の値となる事象は，シングルパス構成では映像 1 で 16 回，映像 2 で 16 回，映像 3 で 21 回，マルチパス構成では映像 1 で 35 回，映像 2 で 22 回，映像 3 で 30 回発生した．

ジッタはマルチパス構成でより大きな値を示すことが観測された．受信側の輻輳制御器が輻輳と判断する傾向が，シングルパス構成と比較して高いと考えられる．マルチパス構成では，図 9 に示されるように複数パスからパケットが流入する．通信の特性がパケット単位で変化することによりジッタ特性が大きく変化すると考えられる．

ジッタを観測するアプリケーションに対しては MUP サーバでのペーシングが有効と考えられる．あるいはジッタの増大および可用帯域の減少が発生しない範囲で他のパスからの補填を抑制する機構が有効と考えられる．

シングルパス構成の fraction lost の最大値はマルチパス構成の最大値よりも大きくなることが観測された．一方でそれぞれの映像で fraction lost が 0.1 以上を示した回数は，マルチパス構成がシングルパス構成よりも多く観測された．

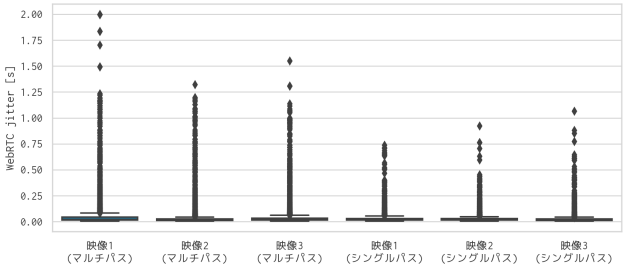

図 13　WebRTC ジッタ：マルチパス vs シングルパス（path0）
Fig. 13　WebRTC jitter: Multipath vs Singlepath (path0).

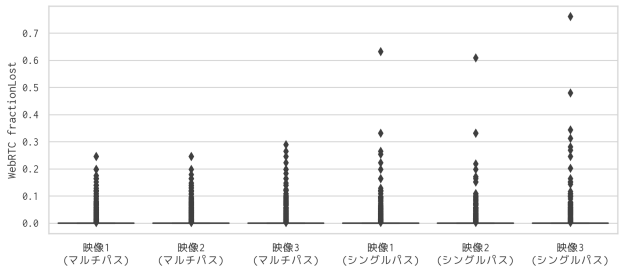

図 14　WebRTC fraction lost：マルチパス vs シングルパス（path0）
Fig. 14　WebRTC fraction lost: Multipath vs Singlepath (path0).

遠隔操作端末が観測した WebRTC パケットロスの累積値の推移を**図 15** に示す．パケットロス数は Web ブラウザが提供する RTCReceivedRtpStreamStats の packetsLost から得られる．パケットロスの発生回数はマルチパス構成が平均で 13.8% 低い値を示しており，fraction lost の示す結果と矛盾する．これは，マルチパス構成で有効にしたアウトオブオーダー受信による補填が，WebRTC の fraction lost の低減に対して有効でないためと推察される．図 10 と図 11 の差から，発生したシーケンス番号の欠損はアウトオブオーダー受信により 11206 回補填されたことが観測される．一方で，パケット到着順序は評価中にこの回数前後していたと考えられる．WebRTC が有効なパケットとして受信しない場合があったと推察される．また，マルチパス構成のパケットロス数は評価期間中の 4 分 11 秒から 7 分 28 秒および 10 分 6 秒から 19 分 48 秒の期間でシングルパス構成よりも大きな値を示しており，最大でそれぞれ 25 パケットおよび 46 パケットの差が観測される．マルチパス構成でシングルパス構成と比較して一時的に多くのパケットロスが観測される原因として，アウトオブオーダー受信がパケット順序の入れ替わりおよびジッタを発生させ WebRTC レイヤでのパケットロス低減を充分に抑制できなかったと考えられる．シーケンス番号の欠損は，図 10 にみられるように継続的に発生しており，図 11 にみられるようにアウトオブオーダー受信によりパケットの補填が行われている．MUP サーバへの順序制御導入による改善の検証が必要と考えられる．

遠隔操作端末上のブラウザが受信した WebRTC トラフィックのスループットを**図 16** に示す．スループットは毎秒得られる RTCTransportStats.byteReceived の差分より算出した．スループットの分散を**図 17** に示す．

両図から WebRTC での受信スループットは，シングルパス構成のほうがマルチパス構成に比べて全体的に高い値を示している．マルチパス構成におけるスループットの低減は WebRTC あるいはトランスポート層の UDP での発生が考えられる．トランスポート層については，図 7 と図 8 の MUP クライアントと MUP サーバ間の送受信スルー

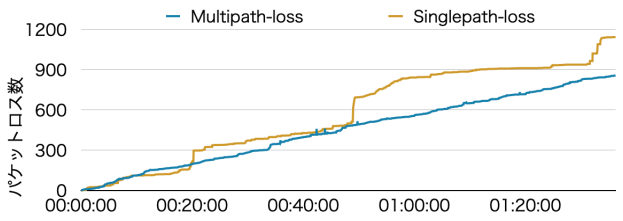

図 15　WebRTC パケットロス数：マルチパス vs シングルパス（path0）
Fig. 15　WebRTC packet losses: Multipath vs Singlepath (path0).

© 2022 Information Processing Society of Japan

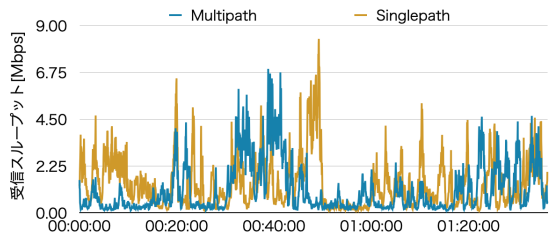

図 16　WebRTC 受信スループット比較：マルチパス vs シングルパス（path0）

Fig. 16　WebRTC Rx Throughput: Multipath vs Singlepath (path0).

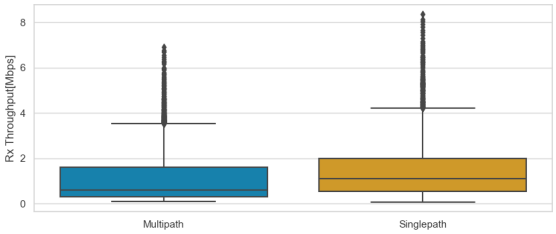

図 17　WebRTC 受信スループット（分散）比較：マルチパス vs シングルパス（path0）

Fig. 17　WebRTC Rx Throughput: Multipath vs Singlepath (path0).

プットの結果から，path2 をのぞいて path0，path1 ともに MUP クライアントの送信スループットと MUP サーバの受信スループットが一致しており，トランスポート層でのスループット低減は発生していないと考えられる．そのため，WebRTC でのスループット低減が発生していると考えられる．WebRTC の GCC が送信スループットを低減させる契機としては，可用帯域の減少，遅延ジッタの増加，fraction lost が 0.1 以上になるという 3 つの原因が考えられる．可用帯域の減少については，前述のトランスポート層でのスループット低減が発生していないことから今回の事象とは関連がないと考えられる．遅延ジッタについては，図 13 の結果からマルチパス構成においてシングルパスよりもジッタが大きいことが分かる．また fraction lost は，図 14 からマルチプロキシ構成のほうが分散は小さいものの，fraction lost が 0.1 を超えた回数はシングルパス構成よりもマルチパス構成の通信のほうが多かった．GCC は通信遅延のジッタおよび fraction lost から送信帯域を決定することが知られており [9]，fraction lost が 0.1 以上の場合に帯域を抑制し，0.02 以下の場合に緩和する．そのため，ジッタと fraction lost の増加により GCC の帯域制御が発生し送信帯域が抑制されることにより，WebRTC の受信スループットがシングルパス構成よりもマルチパス構成のほうが低くなったと考えられる．

6.　まとめと今後の課題

本研究では，WebRTC のメディアストリームトラフィックにマルチパス通信技術を導入する手法を提案した．また本システムを搭載した試験車での市街地走行中に遠隔操作端末への映像伝送を通した評価を行った．単一通信手段と複数通信手段併用時の特性を比較することで提案手法の有効性を確認した．Ping 計測で 10–35%，トランスポート層で 1–84% のパケットロス率を示していたそれぞれの通信手段を冗長併用することで，可用性が向上し，トランスポート層のパケットロス率を 0.014% に低減し，WebRTC レイヤの遅延（RTT）の最大値を 101 ms 以内に低減することを確認した．

今後の課題を以下に述べる．第 5.3 節で述べたように，シングルパス利用に比べて WebRTC の送信帯域が低減する事象がみられた．これはジッタや fraction lost の増加，トランスポート層のアウトオブオーダー受信によるものと考えられる．WebRTC のパケットロス数と fraction lost の関係性，およびアウトオブオーダー受信による影響の調査が必要である．またこれらのパラメータを改善する手法として，順序制御の導入と検証が今後の課題となる．

文献 [5] にて述べたように，本システムではトラフィックの回線への分配が可能であり，マルチパスの実用にあたっては異なる回線に異なる通信内容を送信し可用帯域の向上が可能である．本研究では回線冗長併用を検証したが，分配方式による可用帯域向上への寄与評価およびオーバーヘッドの検証が必要である．

謝辞　本研究はウーブン・プラネット・ホールディングス株式会社との共同研究により実施されたものである．

参考文献

[1] Raida, V., Svoboda, P., Lerch, M. and Rupp, M.: Crowdsensed Performance Benchmarking of Mobile Networks, *IEEE Access*, Vol.7, pp.154899–154911 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949051 (2019).

[2] Neumeier, S., Walelgne, E. A., Bajpai, V., Ott, J. and Facchi, C.: Measuring the Feasibility of Teleoperated Driving in Mobile Networks, *2019 Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA)*, pp.113–120 (online), DOI: 10.23919/TMA.2019.8784466 (2019).

[3] ISO Central Secretary: Information technology — Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) — Part 1: Media presentation description and segment formats, Standard ISO/IEC 23009–1: 2014, International Organization for Standardization (2014).

[4] Sharabayko, M., Sharabayko, M., Dube, J., Kim, J. and Kim, J.: The SRT Protocol, Internet-Draft draft-sharabayko-srt-00, IETF Secretariat (2021).

[5] 金子直矢，伊東孝紘，渡辺敏暢，阿部　博，大西亮吉：マルチパス通信技術を活用した WebRTC におけるメディアストリームトラフィックの柔軟な制御の実現，マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集，Vol.2021, No.1, pp.1059–1067 (2021).

[6] Ford, A., Raiciu, C., Handley, M. J., Bonaventure, O. and Paasch, C.: TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses, RFC 8684 (2020).

[7] De Coninck, Q. and Bonaventure, O.: Multipath QUIC: Design and Evaluation, *Proceedings of the 13th Interna-*

© 2022 Information Processing Society of Japan

tional Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies, CoNEXT '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p.160–166 (online), DOI: 10.1145/3143361.3143370 (2017).

[8] Amend, M., Bogenfeld, E., Cvjetkovic, M., Rakocevic, V., Pieska, M., Kassler, A. and Brunstrom, A.: A Framework for Multiaccess Support for Unreliable Internet Traffic using Multipath DCCP, *2019 IEEE 44th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp.316–323 (online), DOI: 10.1109/LCN44214.2019.8990746 (2019).

[9] Carlucci, G., De Cicco, L., Holmer, S. and Mascolo, S.: Analysis and Design of the Google Congestion Control for Web Real-Time Communication (WebRTC), *Proceedings of the 7th International Conference on Multimedia Systems*, MMSys '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2910017.2910605 (2016).

[10] Liu, S., Lei, W., Zhang, W. and Li, H.: MPUDP: Multipath Multimedia Transport Protocol over Overlay Network, *Proceedings of the 2017 5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2017)*, Atlantis Press, pp.731–737 (online), DOI: 〈https://doi.org/10.2991/icmmct-17.2017.148〉 (2017/04).

[11] Li, L., Xu, K., Li, T., Zheng, K., Peng, C., Wang, D., Wang, X., Shen, M. and Mijumbi, R.: A Measurement Study on Multi-Path TCP with Multiple Cellular Carriers on High Speed Rails, *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, SIGCOMM '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p.161–175 (online), DOI: 10.1145/3230543.3230556 (2018).

[12] Zheng, Z., Ma, Y., Liu, Y., Yang, F., Li, Z., Zhang, Y., Zhang, J., Shi, W., Chen, W., Li, D., An, Q., Hong, H., Liu, H. H. and Zhang, M.: XLINK: QoE-Driven Multi-Path QUIC Transport in Large-Scale Video Services, *Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference*, SIGCOMM '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p.418–432 (online), DOI: 10.1145/3452296.3472893 (2021).

[13] Suer, M.-T., Thein, C., Tchouankem, H. and Wolf, L.: Multi-Connectivity as an Enabler for Reliable Low Latency Communications—An Overview,*IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol.22, No.1, pp.156–169（オンライン）, DOI: 10.1109/COMST.2019.2949750 (2020).

[14] Mahmood, N. H. and Alves, H.: Dynamic Multi-Connectivity Activation for Ultra-Reliable and Low-Latency Communication, *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp.112–116 (online), DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877325 (2019).

[15] Aijaz, A.: Packet Duplication in Dual Connectivity Enabled 5G Wireless Networks: Overview and Challenges, *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol.3, No.3, pp.20–28 (online), DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.1700065 (2019).

[16] Rao, J. and Vrzic, S.: Packet Duplication for URLLC in 5G: Architectural Enhancements and Performance Analysis, *IEEE Network*, Vol.32, No.2, pp.32–40 (online), DOI: 10.1109/MNET.2018.1700227 (2018).

[17] Morton, A., Ramachandran, G., Shalunov, S., Ciavattone, L. and Perser, J.: Packet Reordering Metrics, RFC 4737 (2006).

[18] Kang, L., Zhao, W., Qi, B. and Banerjee, S.: Augmenting Self-Driving with Remote Control: Challenges and Directions, *Proceedings of the 19th International Workshop on Mobile Computing Systems & Applications*, HotMobile '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p.19–24 (online), DOI: 10.1145/3177102.3177104 (2018).

[19] Pantel, L. and Wolf, L. C.: On the Impact of Delay on Real-Time Multiplayer Games, *Proceedings of the 12th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video*, NOSSDAV '02, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p.23–29 (online), DOI: 10.1145/507670.507674 (2002).

金子 直矢（正会員）

トヨタ自動車株式会社 コネクティッドカンパニー コネクティッド先行開発部 Info-Tech E2E コンピューティンググループ 主任 / エンジニア / 修士（情報科学）.

伊東 孝紘

ウーブン・プラネット・ホールディングス株式会社 Business Development and Strategy, Marionette / Senior Engineer, ロボット・車両の遠隔操作・運転システムの開発に従事.

勝田 肇

ウーブン・プラネット・ホールディングス株式会社 Business Development and Strategy, Marionette / Engineer, ロボット・車両の遠隔操作・運転システムの開発に従事.

渡辺 敏暢

ウーブン・プラネット・ホールディングス株式会社 Business Development and Strategy, Marionette / Staff Engineer / 修士（航空宇宙）.

阿部 博（正会員）

トヨタ自動車株式会社 コネクティッドカンパニー コネクティッド先行開発部 Info-Tech E2E コンピューティンググループ 主幹 / シニアリサーチャー / 博士（情報科学）.

© 2022 Information Processing Society of Japan

大西 亮吉

トヨタ自動車株式会社 コネクティッドカンパニー コネクティッド先行開発部 Info-Tech E2E コンピューティンググループ 主査 / プリンシパルエンジニア / 博士（工学）.

© 2022 Information Processing Society of Japan