

SRv6 Mobile User Plane を併用するマルチバンド冗長化 5G V2N2V のフィールド実験 Field Trial of Multi-Band Redundant 5G V2N2V Employing SRv6 Mobile User Plane

三上 学† 中里 仁††
Manabu Mikami Jin Nakazato

1. まえがき

我が国では少子高齢化に伴う労働力不足や地方過疎化の進行により物流・地域交通のエッセンシャルワーカーである運転手・運転士の担い手不足が深刻化し、物流サービス、地域交通サービス（路線バス・鉄道等）の維持が困難となりつつある。持続可能な物流・地域交通サービスの実現には自動運転技術の導入が不可欠であり、トラックや Bus Rapid Transit (BRT) における後続車自動運転隊列走行が検討されている [1]–[5]。我々は現在、持続可能な地域交通サービス実現に向けて貢献すべく、自動運転 BRT の隊列走行への利活用を目指した低遅延車車間通信に関する技術検討を進めている [6]–[8]

本稿では、まず現在の 4G や 5G 等セルラ携帯電話網（モバイルネットワーク）経路による車車間通信 V2N2V を隊列走行に適用する場合に発生する主な課題として、(i) セル間ハンドオーバー (HO) 時における伝送遅延スパイク発生及びパケットエラー発生 [6]、(ii) 基地局～モバイル交換機（モバイルコア）間のトランスポートネットワーク (TN) 区間遅延 V [8]、に代表される通信品質劣化の影響について述べる。次に、これらの解決に向けた要素技術として検討しているマルチバンド冗長化 V2N2V [7]、及び“Segment Routing over IPv6 for the Mobile User Plane” (SRv6 MUP) を用いた低遅延 V2N2V [8] についてそれぞれ紹介する。そして、地方市街地エリアで運用される自動運転 BRT の隊列走行における車車間通信への適用に向けた高信頼・低遅延 V2N2V 方式として SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 V2N2V を提案すると共に、その屋外フィールド実験内容についても紹介する。商用 5G 網環境下で実施した地方市街地エリアでの実験結果から、SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 V2N2V により、セル間 HO 時における伝送遅延スパイク抑圧効果や基地局～モバイルコア間における TN 区間伝送遅延削減効果が得られるのに加え、重複受信、受信順序誤り、欠損といった様々なパケットエラーの発生をも抑圧でき、モバイルコアの展開場所に依存することなく V2N2V における低遅延化と高信頼化の同時向上を図る有望なアプローチの 1 つであることを示す。

2. 隊列走行向け車車間通信とその課題

自動運転 BRT の隊列走行では、図 1 に示すように主に車両位置情報、車速情報、車間距離情報、操舵角情報等の隊列走行車両間のリアルタイム情報共有や後続車監視画像伝送のため、高信頼かつ安定して低遅延な車車間通信 V2V が不可欠である。4G LTE や 5G NR 等のセルラ系無線通信方式を用いる V2V として、基地局を経由せず車載端末間が直接通信する V2V Direct と基地局を経由して車載端末間通信を行う V2N2V に分類され

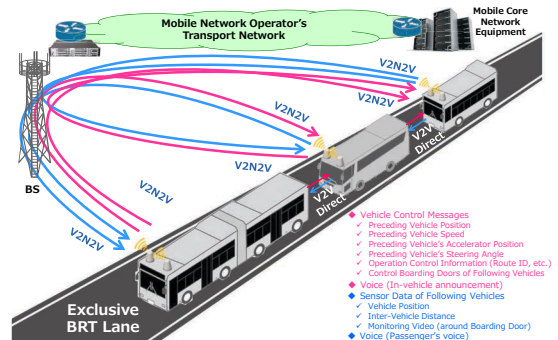


図 1: 自動運転 BRT の隊列走行における車車間通信

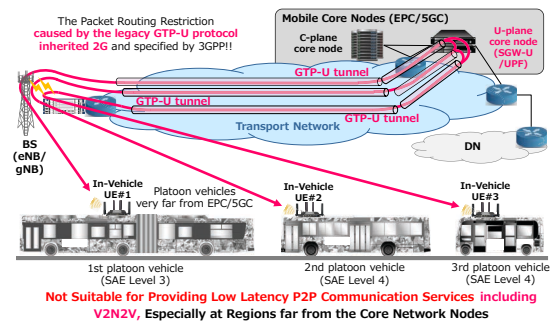


図 2: 隊列走行 V2N2V における TN 区間伝送遅延の課題

る [2]。セルラ系通信による V2V 実用化に関して、端末間直接通信インタフェース PC5 対応の端末製品開発動向や日本国内の制度整備の現況から、少なくとも日本国内においては PC5 インタフェースに依存しない既存の端末機能で実現できる V2N2V からはじまり、その後徐々に V2V Direct との併用へ移行させるシナリオも考えられる。そのため、V2V の早期実用化の観点から 5G をはじめとするセルラ系通信を活用する V2N2V の課題克服も重要なテーマと 1 つと我々は位置づけている。そこで、隊列走行向け車車間通信 V2N2V で実現する場合における下記 2 つの課題解決に現在注力している [6]。

2.1 セル間 HO 時の伝送遅延スパイク等通信品質劣化

隊列走行向け V2N2V では、隊列車両群の走行により複数の基地局カバーエリア（セル）を跨ぎ移動することから、各車載端末は、通信中接続先基地局を切り替えるセル間 HO を伴う。現在の 4G/5G 網ではハード HO が採用されている影響で複数のセルを跨ぐ際、無線区間（基地局～端末）のユーザデータ転送に用いられるベアラである DRB (Data Radio Bearer) のサスペンド等に伴う伝送遅延スパイク発生に加え、重複受信、受信順序誤り、欠損によるパケットエラーも伴いやすい [6]。そのため、HO 等セル間移動に伴う伝送遅延スパイクやこれらのパケットエラーによる通信品質劣化の抑圧が課題となる。

2.2 トランスポートネットワーク伝送遅延

隊列走行向け V2N2V をはじめとする同一基地局または互いの隣接基地局に収容される端末間の P2P パケッ

† ソフトバンク株式会社 基盤技術研究室

†† 東京理科大学 工学部 電気工学科

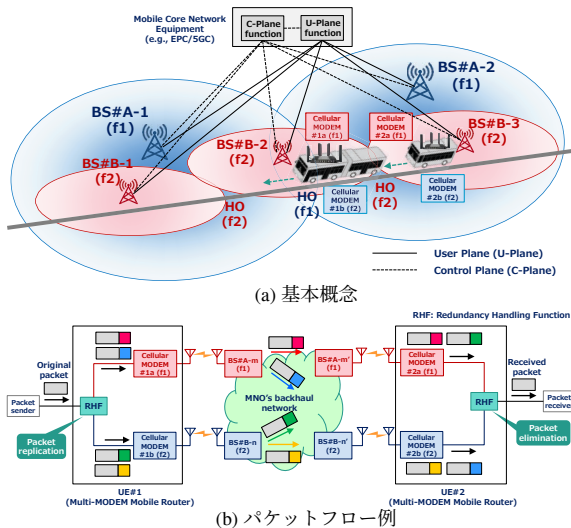


図3: マルチバンド冗長化 V2N2V

ト折返し通信に関して、基地局直下でパケットを折り返せることが理想である。ところが、現在のモバイルネットワークでは基地局でパケットを折り返すことはできず、図2に示すように基地局とモバイルコア間の TN 上に張られた GTP-U (General packet radio system Tunneling Protocol User plane) トンネルを通じてモバイルコアの U-Plane 装置 (SPGW-U/UPF 等) 経由でパケットを折り返す必要がある。そのため、モバイルコアの U-Plane 装置から地理的に遠いエリアで運用する場合に定常的に存在する TN 区間伝送遅延の削減も課題となる [8]。

3. マルチバンド冗長化 V2N2V

隊列走行向け V2N2V での HO 時通信品質劣化問題に関して、DAPS (Dual Active Protocol Stack) HO や LTM (L1/L2 Triggered Mobility) 等の HO 高度化技術を導入する手法も考えられるが、0ms interruption 通信の安定的実現は容易でない [7]。そこで、我々は既存の基地局及び端末の無線インタフェースへの機能追加が必要なく簡易に実現可能なアプローチとして、単一 MNO (Mobile Network Operator) が運用する複数周波数帯での冗長通信 [9] を適用したマルチバンド冗長化 V2N2V を提案している [6]。図3に、提案するマルチバンド冗長化 V2N2V の基本概念及び2バンド利用時のパケットフローをそれぞれ示す。図3(a)に示すように、提案しているマルチバンド冗長化 V2N2V では複数の Cellular MODEM を搭載した各車載端末が互いに同じ MNO で運用されている複数周波数帯を同時に用い、同じ MNO が運用するモバイルコアネットワーク装置に接続する。その際、各車載端末内の複数 Cellular MODEM 間で、互いに異なる周波数帯を用いる形で接続する。図3(b)に示すように、送信端末側で複製された同一のパケットを単一 MNO が運用する複数周波数帯上で並列伝送し、受信端末側で最も早く届いたパケットのみ転送する。複数周波数帯間の基地局配置が互いに異なってくるのに伴い HO 発生個所がこれらの周波数帯間で異なる結果、各周波数帯での HO タイミングも異なる環境が得られる [6]。

マルチバンド冗長化 V2N2V の実験評価のため、2台の Cellular MODEM を搭載し送信側にパケット複製機能、受信側に重複受信パケット廃棄機能を有するモバイル

表1: 開発したマルチモデム 5G 車載端末の主要諸元

Item	Value
Number of 5G MODEMs	2
Support Network Architecture	LTE, 5G NSA, 5G SA
Support Operating Bands	LTE: B1/B3/B8/B28/B41/B42 5G NR: n3/n28/n77
Redundancy Handling Function (RHF)	Packet replication&elimination

ルータ型マルチモデム 5G 車載端末の開発を我々は実施している [6]。表1に、開発したマルチモデム 5G 車載端末の主要諸元を示す。本 5G 車載端末は、モバイルコアとして 5GC (5G Core) を用いる 5G SA だけでなく、モバイルコアとして 4G の EPC (Evolved Packet Core) を用いる LTE (Long Term Evolution) 及び 5G NSA (Non StandAlone) もサポートし、5G SA の回線同士でのマルチバンド冗長化だけでなく LTE や 5G NSA を含む組合せでのマルチバンド冗長化も可能である。

4. SRv6 MUP を用いる低遅延 V2N2V

4.1 従来モバイルネットワークアーキテクチャの課題

現在の標準的なモバイルネットワークのアーキテクチャでは、移動端末 (UE) が送受するユーザパケットがモバイルコアの U-plane 装置を経由することを前提・原則とする回線交換・コネクション指向のネットワークである。この前提・原則の元、UE が接続する基地局を切り替わる HO 後も UE の IP アドレスを維持しつつ基地局～モバイルコア間の GTP-U による仮想的な回線を切り替え、モバイルコアが外部網側から UE の移動を隠蔽した移動透過性を提供することにより、インターネット等の外部網との間で途切れることのない移動体通信を実現する。このような回線交換・コネクション指向のネットワークは、サーバー・クライアント型の中央集権的なコンピューティングモデルでの通信には適合するものの、MEC (Multi-access Edge Computing) サーバー等のモバイルネットワーク内に分散するコンピュータとの通信や V2N2V をはじめとする UE 間の P2P 通信における最短経路通信の実現が困難という課題がある [10]。

4.2 SRv6 MUP の概要

SRv6 MUP [11] は、既存の 3GPP で標準化されたモバイルネットワークの仕組みを変更することなく、基地局とモバイルコア間の GTP-U による回線交換・コネクション指向のネットワークからルーティング指向のパケット交換ネットワークに変換する枠組みである。SRv6 MUP は、既存の 3GPP で標準化されたモバイルアーキテクチャとは独立した “pluggable” なシステムとして設計されており [12]、GTP-U に代表される Mobile User Plane をステートレスに SRv6 へ変換する機能とモバイルネットワークの制御信号と連動した IP (Internet Protocol) 経路情報を TN に配布する機能 [13]、により、本来 SPGW-U や UPF といったモバイルコアの U-plane 装置を経由すべきユーザパケットを SRv6 網内に引き込みこれらの装置をバイパスできる。その結果、SRv6 MUP では、既存の端末・基地局・コアネットワークに影響を与えることなく MEC サーバーとの通信や UE 間の P2P 通信におけるパケット経路最適化を可能とする [10]。

4.2.1 基本アーキテクチャと各 SRv6 MUP の基本動作

図4に、4G/5G ネットワークにおける SRv6 MUP の基本アーキテクチャを示す。SRv6 MUP が導入された 4G/5G ネットワークでは、MUP-PE (MUP Provider Edge

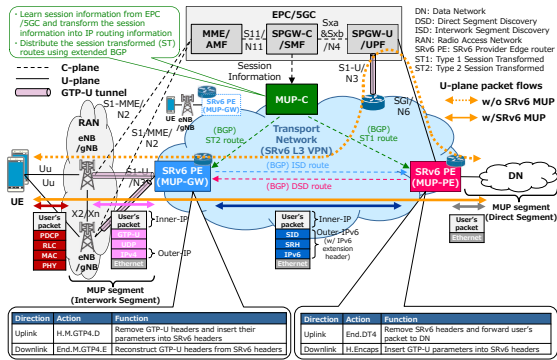


図4: SRv6 MUPの基本アーキテクチャ

router), MUP-GW (MUP GateWay router), MUP-C (MUP Controller) と呼ばれる装置がそれぞれ動作する [12]. また, インターネット等のモバイルネットワークの外部側ネットワーク DN (Data Network) や基地局側ネットワーク RAN (Radio Access Network) に接続される MUP-PE または MUP-GW によって SRv6 網の外側に形成されるネットワークを MUP Segment と呼ぶ.

(i) MUP-PE

DN と SRv6 網間の接続性を提供する MUP Segment として定義される Direct Segment を収容する装置である. MUP-GW によって GTP-U Header から SRH (Segment Routing extension Header) に変換されて SRv6 網側から送られてくる UL (Uplink) パケットに対しては, End.DT4 等の SRv6 Network Function によって SRH を削除し DN 等の外部網へ転送する. 外部網から UE 向けに送られてきた DL (Downlink) パケットに対しては, MUP-C から広告された経路情報に基づき対象 UE と接続される基地局を収容する MUP-GW における GTP-U Header 再構成に必要なパラメータ情報を SID (Segment ID) 内に Encode した SRH を付与し [14], SRv6 網へ転送する.

(ii) MUP-GW

RAN と SRv6 網間の接続性を提供する MUP Segment として定義される Interwork Segment を収容する装置である. 基地局から送られる UL パケットに対しては, GTP-U Header に含まれるパラメータ情報を SID に Encode した SRH を付与し, SRv6 網へ転送する. SRv6 網から送られてくる DL パケットに対しては, End.M.GTP4.E 等の Network Function によって SRH に Encode されているパラメータ情報に基づき GTP-U Header を再構成し [14], 基地局側へ転送する. 尚, 本機能は MUP-PE と同じ筐体でも動作が可能である.

(iii) MUP-C

モバイルコアが持つ UE 毎に固有のセッション情報を SRv6 の経路情報に変換し, MUP-PE 及び MUP-GW に BGP で配布する装置である.

4.2.2 経路情報の生成・広告と経路表の構築

SRv6 MUP を導入したモバイルネットワークにおいて, 各 UE から又は各 UE 向けに送信されるユーザパケットが所望の宛先へ転送可能となるには, UE がネットワークに接続あるいは再接続した際, MUP-PE, MUP-GW, MUP-C の各 SRv6 MUP ノードが広告する経路情報, MUP-PE 及び MUP-GW がユーザパケット転送時にそれぞれ参照する経路表内に該当 UE 及び DN に対

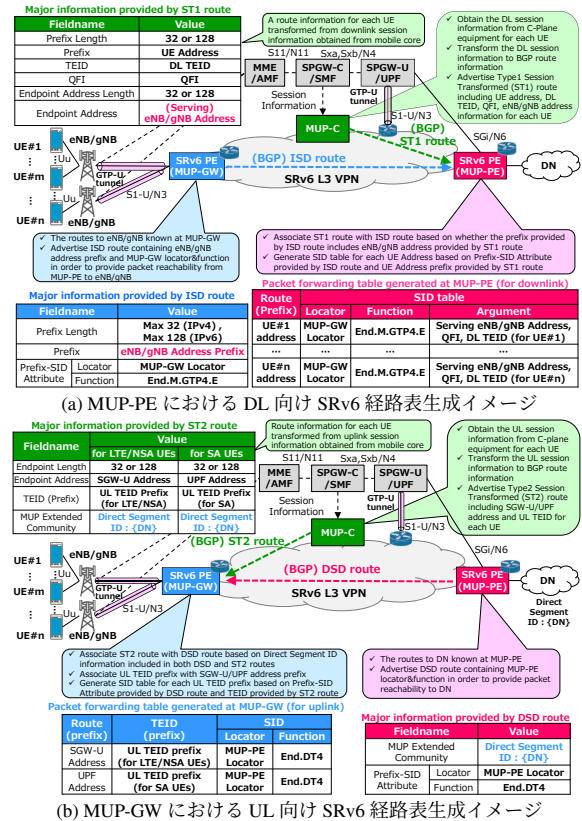
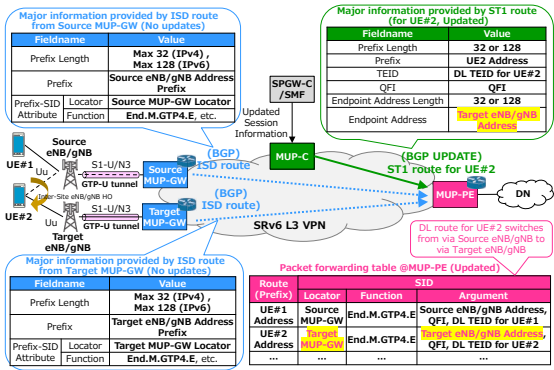


図5: 経路情報の広告と経路表の構築

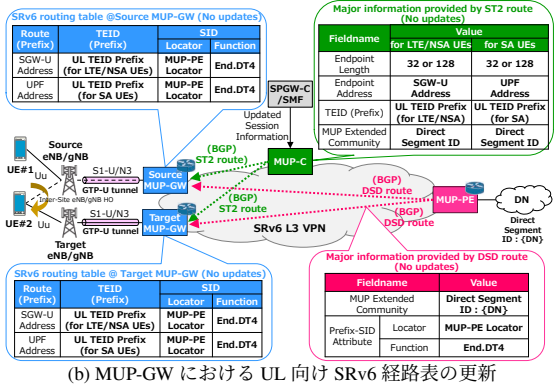
するエントリが含まれている必要がある [10].

図5に, 各 SRv6 MUP ノードが広告する経路情報とそれにより生成される経路表のイメージを示す. MUP-PE 及び MUP-GW は, DN 等外部網及び基地局側へのパケット到達性を提供する経路情報である DSD 経路 (Direct Segment Discovery route) 及び ISD 経路 (Interwork Segment Discovery route) をそれぞれ生成し, それらの経路情報を動的経路制御プロトコルである BGP (Border Gateway Protocol) を用いて互いに広告する [13]. 一方, MUP-C は, モバイルコア C-plane 装置が持つ UE 毎に固有のセッション情報における DL の TEID (Tunnel Endpoint Identifier) 及び各 UE が接続されている基地局 (eNB/gNB) 側の Endpoint Address と紐づく DL 経路情報である ST1 経路 (Type-1 Session Transformed route) 及び UL の TEID に対する DN 向け UL 経路情報である ST2 経路 (Type-2 Session Transformed route) を MUP-PE 及び MUP-GW に対し, BGP を用いそれぞれ広告する [13].

図5(a)に示すように, MUP-PE は MUP-GW が広告する ISD 経路中の基地局アドレス空間に MUP-C が配布する ST1 経路中の基地局アドレスを含むかどうかキーに, 指定する転送先 MUP-GW 側における GTP-U 再構築の動作指示及びそれに必要なパラメータ情報である基地局アドレス, DL TEID 及び QFI の情報を含む UE の IP アドレスに対するホスト経路毎の SID table を構築する. MUP-PE はこの SID table から UE 側に向かう DL パケット転送処理で参照する経路表を生成する. これにより, MUP-PE は各 UE に向かう DL 経路を解決できる. 尚, SRv6 網側からインターネット等 DN へ向かう UL パケットについては, Inner-IP ヘッダの宛先アドレスに基づき Pure IP パケットを転送する処理となるため, 通常の IP



(a) MUP-PE 機能及び MUP-GW 機能の配置とパケットフロー



(b) MUP-GW における UL 向け SRv6 経路表の更新

図 6: 基地局間 HO に伴う経路情報と経路表の更新

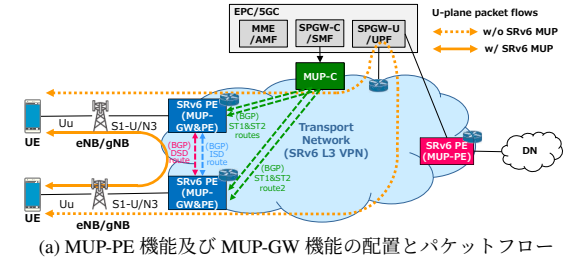
パケット転送に必要な経路をオペレータ側で MUP-PE の経路表に対し静的に設定しておく、又は何らかの動的経路制御プロトコルを用いて構築しておけばよい。

一方、図 5(b) に示すように、MUP-GW は、MUP-PE が広告する DSD 経路と MUP-C が配布する ST2 経路にそれぞれ含まれる Direct Segment ID が一致するかどうかをキーに、UL TEID 毎に指定する転送先の MUP-PE とそこでの SRv6 ヘッダ削除の動作指示を埋め込んだ SID table を構築する。そして、MUP-GW は SID table を UL TEID と SGW-U や UPF のアドレスと紐づけることにより、基地局側からインターネット等 DN に向かう UL パケットの転送処理で参照する UL 用の経路表を生成する。尚、SRv6 網側から基地局側に向かう DL パケットの転送処理については、MUP-GW で再構築された GTP-U パケットにおける Outer-IP ヘッダの宛先アドレスに基づいて所望の基地局に転送する処理となるため、収容する基地局のアドレスに向かう経路情報を基地局パラメータ設定時にオペレータ側で MUP-GW の経路表に対し静的に設定しておく、又は何らかの動的経路制御プロトコルを用いて構築しておけばよい。

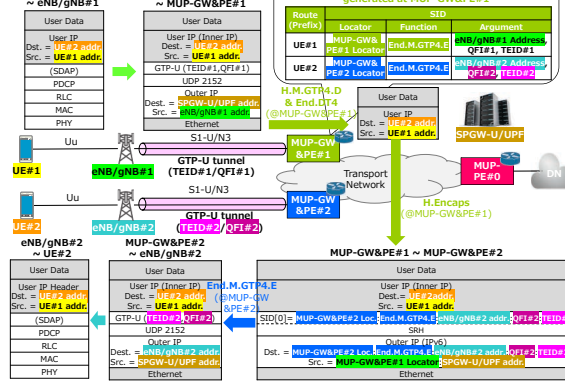
4.2.3 基地局間 HO を含む UE モビリティへの対応

SRv6 MUP では、BGP を用いて広告される経路情報をモバイルコアが持つセッション情報の更新と連動して更新し、更新された経路情報を受信した各 SRv6 MUP ノードが経路表を適切に更新することにより基地局間 HO を含む UE モビリティへの対応ができる [10]。図 6(a) 及び (b) に、各 SRv6 MUP ノードにおける経路情報と経路表について、2 台の UE (UE#1 及び UE#2) のうち、UE#2 が基地局間 HO した場合を例として示す。

図 6(a) に示すように、MUP-PE は UE#2 に関して基地局アドレスが HO 元から HO 先の基地局アドレスに更新



(a) MUP-PE 機能及び MUP-GW 機能の配置とパケットフロー



(b) SRv6 MUP 機能有効化時パケットフォーマット変換動作の概略

図 7: SRv6 MUP を用いた低遅延 P2P 端末間通信の原理

された ST1 経路を MUP-C から受信すると、経路表内に含まれる UE#2 に対する SID table 中の基地局アドレス情報を更新し、基地局を収容する MUP-GW の Locator 情報が変化した場合はその情報も併せて更新する。この動作により UE#2 は SRv6 MUP を用いた HO 先基地局との DL 通信継続が可能となる。

図 6(b) に示すように、基地局間 HO が発生しても MUP-GW における UL 経路表の元となる 2 種類の経路情報、即ち DSD 経路及び ST2 経路の更新は発生しないため、UL については基地局間 HO による経路情報及び経路表の更新を特に意識する必要はない。従って、基地局間 HO 発生時、HO 元及び HO 先基地局を収容する MUP-GW 双方において経路表の更新を行う必要はなく、UE#2 は HO 先基地局との UL 通信継続が可能である。

4.2.4 P2P 端末間通信におけるパケット経路最適化

SRv6 MUP が導入されたモバイルネットワークでは、従来のモバイルネットワークと異なり、ユーザパケットは SPGW-U/UPF を経由する必要はなくなるため、MUP-PE 機能及び MUP-GW 機能の配置を柔軟に組み合わせたネットワーク構成により、目的に応じたパケット経路の最適化が可能となる。例えば、図 7(a) に示すように、MUP-GW 機能を持つ SRv6 ルータに MUP-PE 機能が追加された MUP-GW&PE を配置することで P2P 端末間通信におけるパケット経路最適化が可能となる [10]。

SRv6 MUP を用いた P2P 端末間通信におけるパケット経路が最適化される原理について、図 7(b) を参照し、互いに異なる 2 台の MUP-GW&PE#1 配下の基地局にそれぞれ接続される UE#1 及び UE#2 における UE#1 から UE#2 へのパケット伝送を行う場合を例に説明する [8]。

UE#1 から UL を介して 4G LTE/5G NR 基地局 (eNB/gNB#1) を経由し MUP-GW&PE#1 で受信した GTP-U パケットの Outer-IP ヘッダを除去して取得した Inner-IP パケットの宛先 IP アドレスが P2P 通信相手

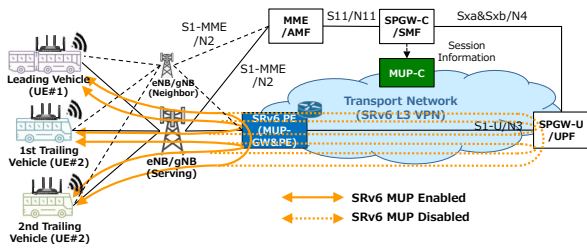


図8: SRv6 MUPを用いる低遅延 V2N2V

UE#2のIPアドレスを指し示すことになる。そのため、MUP-GW&PE#1でUE#2のIPアドレス(即ち、Inner-IPパケットの宛先IPアドレス)宛てのパケットを転送すべきMUP-PEをDSD経路及びST1経路を用いて解決すると、自身と同一のSRv6 PEルータ、即ちMUP-GW&PE#1内にあるMUP-PEとなる。MUP-Cが配布しMUP-PEが受信するST1経路中にはP2P通信相手となるUEとそれを収容する基地局のIPアドレスが含まれることから、MUP-GW&PE#1内のMUP-PEでは、UE#2のIPアドレス宛てのパケットを転送すべきMUP-GWをISD経路を利用して解決すると、通信先のUE#2に接続される基地局を収容するMUP-GW&PE#2内のMUP-GWとなる。その結果、UE#1からUE#2宛てに送られたパケットは、MUP-GW&PE#1内でパケットがSGW-U/UPFを経由することなくMUP-GW&PE#2内のMUP-GWへパケットが転送される。MUP-GW&PE#2では、MUP-GW&PE#1から受信したUE#2宛てのDL方向のSRv6パケットについて、SRHにEncodeされているパラメータ情報に基づきGTP-Uヘッダが再構成された後、基地局(eNB/gNB#2)を経由し、UE#2に届けられる。

4.3 隊列走行向け低遅延 V2N2V への SRv6 MUP 適用

隊列走行におけるV2N2Vは、通常、同一基地局内または互いに隣接する基地局に接続される車載端末間のP2P通信となる。そこで、図8に示すようにMUP-GW&PEを基地局近傍に配置し、そのMUP-GW&PE内でパケットを折り返せるようにすることで車載端末間の通信経路を最適化できる。その結果、MUP-GW&PEとSPGW-U/UPF間のTN区間分の伝送遅延を削減できることから、低遅延V2N2Vの実現が期待できる[8]。尚、V2N2Vでは車載端末の移動に伴う、基地局間HOを考慮しなければならない。4.2.3節で説明したように、SRv6 MUPでは、基地局間HO発生に伴う接続先基地局シーケンスをMUP-Cが検出すると、MUP-CはST1経路情報を更新し、その情報をBGPで広告する。そして、MUP-PEは更新されたST1経路に基づきDLの経路表を更新することで、HO先基地局での通信継続が可能となる。

5. SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 5G V2N2V の地方市街地フィールド実験

5.1 フィールド実験環境・実験条件

本稿では、隊列走行向けV2N2Vに関して、モバイルコアから地理的に離れた地方エリアにおいて高信頼かつ安定的な低遅延車間通信を提供するため、マルチバンド冗長化V2N2Vに対しSRv6 MUPを併用することを提案する。SRv6 MUPを併用するマルチバンド冗長化V2N2Vの有効性を確認するため、1.7GHz帯及び700MHz帯でエリアカバーされる商用5G SA(StandAlone)ネットワーク環境下でのフィールド実験を

実施した。図9(a)にその全体構成を示す。図9(b)及び図9(c)に示すように、本実験では5G NR基地局として静岡県西部の市街地周辺に展開されているgNBを用いた。これらのgNBのバックホール側は静岡県西部の加入者線収容局内でMUP-GW&PE機能を持つSRv6ルータと接続される。本SRv6ルータは県内及び県間の跨ぐTN(推定往復光ファイバ経路長約1,130km)を通じて東京都周辺の基幹ネットワークセンター内に配置された5Gモバイルコア装置(AMF/SMF/UPF等)と接続される。MUP-CはSMFからのセッション情報を取得するため、同じ東京都周辺の基幹ネットワークセンター内に配置されている。表1に示した送信側にパケット複製機能、受信側に重複受信パケット廃棄機能を有するモバイルルータ型マルチモデム5G車載端末(UE#1及びUE#2)を伝送遅延測定用のPC(PC#1及びPC#2)と接続する形で各測定車にそれぞれ設置した。UE#1及びUE#2内のMODEM#1a及び#2aは1.7GHz帯のみ、MODEM#1b及び#2bは700MHz帯のみを用いるよう制御した。

先行車から後続車への通信を模擬するため、ペイロードサイズ100 bytes/packetのUDPパケットをPC#1からPC#2宛てに約20ms間隔発生させた。図9(b)及び図9(c)に示す全長約2.4kmの測定ルート上を2台の測定車を目標車間距離5mで走行しながら、UDPパケットの片道伝送遅延を測定しつつ各5G MODEMの接続先セルID情報を同時に記録した。実験はマルチバンド冗長化V2N2V及びSRv6 MUP双方を用いない場合2通り(Case I: 1.7GHz帯のみ利用, Case II: 700MHz帯のみ利用)、及びマルチバンド冗長化V2N2Vを用いる場合2通り(Case III: SRv6 MUPを併用しない場合, Case IV: SRv6 MUPを併用した場合)の計4通りについて実施した。

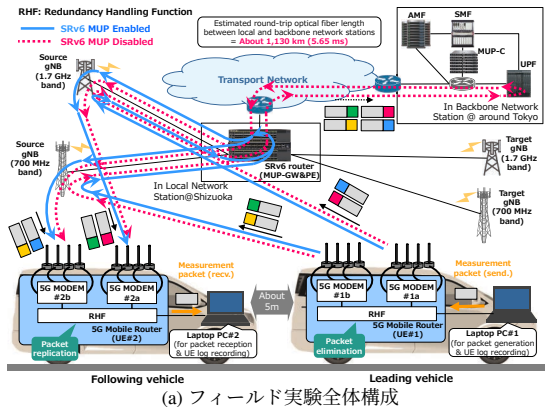
5.2 フィールド実験結果

図10~図13にCase I~Case IVにおける屋外フィールド実験結果をそれぞれ示す。ただし、これらの図ではマーカーの色によって異なる基地局アンテナサイトを区別し、マーカーの種類によって同一基地局アンテナサイト内の異なるセルを識別している。図10(a), (b)及び図11(a), (b)には、Case I及びCase IIにおけるUE#1とUE#2で観測されたUDPパケットのUE-to-UE片道伝送遅延及び重複受信、順序誤り、欠損の事象別パケット受信誤り率の実測結果がそれぞれ示されている。また、図12(a)と図13(a)及び図12(b)と図13(b)にCase IIIとCase IVにおけるUDPパケットのUE-to-UE片道伝送遅延の実測結果及び重複受信、順序誤り、欠損の事象別パケット誤り率の実測結果をそれぞれを示す。

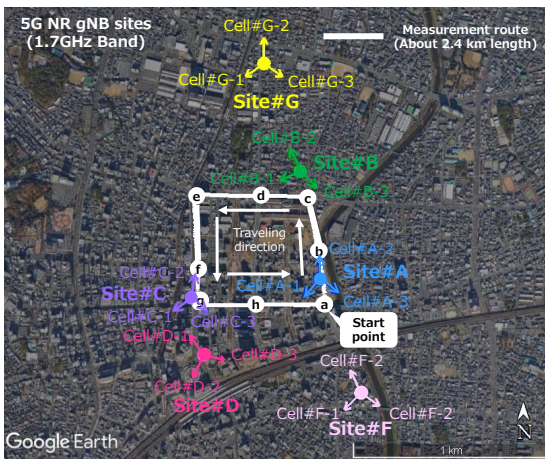
5.3 評価及び考察

5.3.1 伝送遅延特性

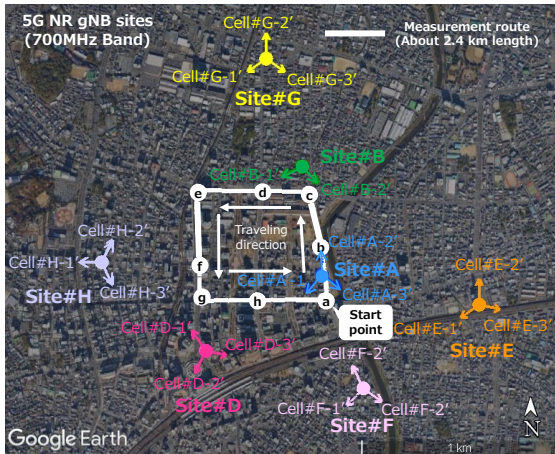
図10(a)及び図11(a)より、マルチバンド冗長化を適用しない単一バンド通信となるCase I及びCase IIでは共に、主に在圏セルが変化するHOポイント付近を中心に数十msから100ms超の遅延スパイクが観測されている。これに対し、図12(a)及び図13(a)より、マルチバンド冗長化V2N2Vを適用したCase III及びCase IV共に50msを超える伝送遅延なく特に目立つ大きな遅延スパイクは観測されてない。これは、1.7GHz帯と700MHz帯の間で基地局サイト配置が互いに異なることにより各周波数帯におけるセル間HO発生ポイントが異なるこ



(a) フィールド実験全体構成



(b) 1.7GHz帯 5G NR 基地局位置及び測定車走行ルート

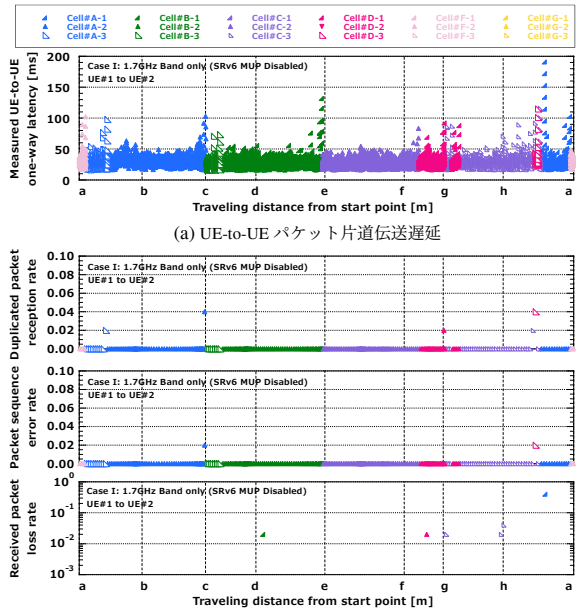


(c) 700MHz帯 5G NR 基地局位置及び測定車走行ルート

図9: フィールド実験構成・実験環境

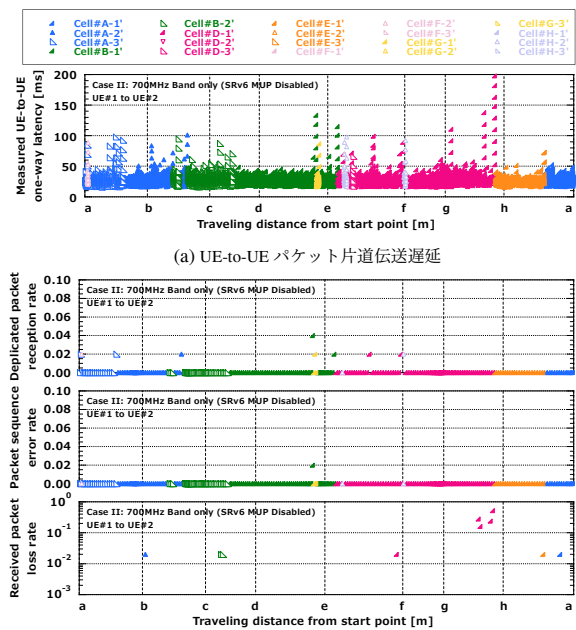
とに伴う結果である。マルチバンド冗長化 V2N2V の場合、各 UE に搭載され 2 つの 5G MODEM においてどちらか一方の周波数帯がセル間 HO により通信が一時的停止していても、もう一方の周波数帯ではセル間 HO は発生しておらず通信が継続できる結果、全体としてセル間 HO に伴う通信停止を回避できるためである。本結果より、同一 MNO が運用する複数周波数帯でのマルチバンド冗長化された 5G V2N2V により、HO 時遅延スパイク発生の問題を回避し得ることを確認できる。

Case I から Case IV の UE-to-UE 片道伝送遅延測定結果について、CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) 及び主要統計値を図 14 及び表 2 にそれぞれ



(b) 事象別パケット受信誤り率 (上段: 重複, 中段: 受信順序ずれ, 下段: 欠損)

図 10: フィールド実験結果 (Case I)



(b) 事象別パケット受信誤り率 (上段: 重複, 中段: 受信順序ずれ, 下段: 欠損)

図 11: フィールド実験結果 (Case II)

示す。図 14 を見るとわかるように、Case III 及び Case IV の CCDF カーブは、Case I 及び Case II に比べて急峻になっており、マルチバンド冗長化 V2N2V による大きなダイバーシティ効果が得られることがわかる。例えば、図 14 より 40 ms 超の伝送遅延が発生する確率で評価すると、Case I 及び Case II では約 5%及び約 2%の確率になるのに対し、Case III ではこれらの 1/50 以下の約 0.03%、Case IV ではこれらの 1/100 を下回るの僅か 0.01%未満に抑えられている。また、表 2 より、標準偏差については、Case I 及び Case II での 10.25 ms 及び 6.97 ms に比べて、Case III 及び Case IV では 3.27 ms 及び約 3.26 ms にそれぞれ圧縮できている。これらの結果から、マルチバンド冗長化 5G V2N2V により、伝送遅延の分散も大きく抑圧できることがわかる。

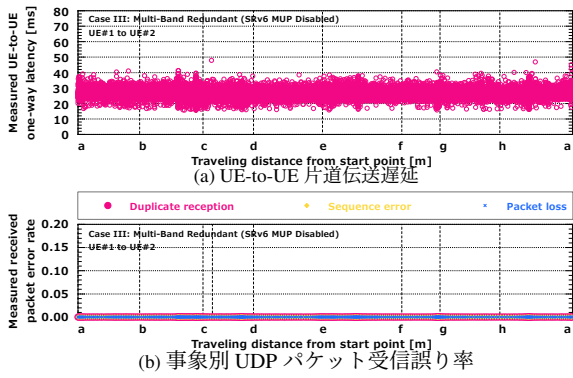


図 12: フィールド実験結果 (Case III)

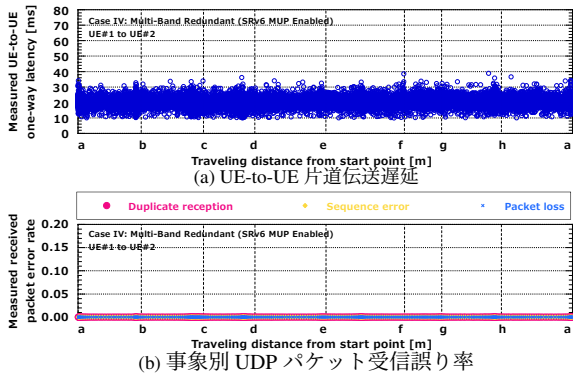


図 13: フィールド実験結果 (Case IV)

更に Case III と Case IV を比較すると、図 14 より、SRv6 MUP を併用した Case IV では、パケットが TN 区間を経由しないため Case III に比べ中央値で約 6 ms 低い伝送遅延を達成していることもわかる。この SRv6 MUP による伝送遅延削減量は、TN 区間約 1,130 km での光ファイバ伝送遅延約 5.7 ms と概ね一致することから、今回の実験結果は妥当な範囲にあると考えられる。本結果より、SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 V2N2V の有効性を確認できる。

5.3.2 パケット受信誤り特性

(I) 単一バンドでの V2N2V 適用時

図 10 (b) 及び図 11 (b) より、マルチバンド冗長化を適用しない単一バンド通信となる Case I 及び Case II では共に、主に在圏セルが変化する HO ポイント付近を中心に UDP パケットの受信重複、受信順序誤り、受信欠損が事象として観測されていることがわかる。これらの事象の発生理由として、例えば下記の理由が想定される。

受信重複 モバイルネットワークでは、無線区間（基地局～端末間）の Layer-2 における MAC（Media Access Control）サブレイヤや RLC（Radio Link Control）サブレイヤにおいてそれぞれ HARQ 再送及び ARQ 再送といった再送処理が適用される。HO が発生する複数のセル境界付近の地点では、周辺セル干渉の影響により複数回の再送処理も発生しやすい。HO 元セルに接続中受信成功したパケットに対する HARQ または ARQ の確認応答フィードバック（ACK）が送信側で正常受信できていない状態で HO 処理が実行されると、受信側では受信成功パケットとしてそのパケットが上位レイヤへ渡される。その一方、送信側はそのパケットを ACK 未受信により再送処理が必要なパケットとして扱うため、HO 元セル

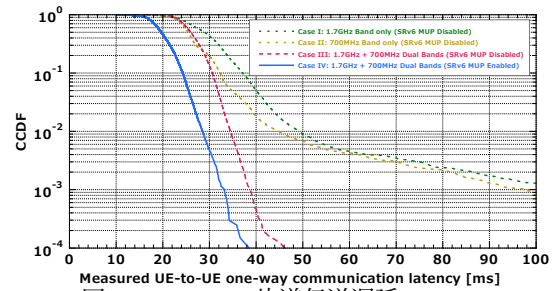


図 14: UE-to-UE 片道伝送遅延の CCDF

表 2: UE-to-UE 片道伝送実測結果の主要統計値

	Minimum Value	Median Value	Maximum Value	Standard Deviation
Case I	15.87 ms	28.98 ms	476.26 ms	10.25 ms
Case II	15.88 ms	25.42 ms	448.92 ms	6.97 ms
Case III	15.74 ms	25.97 ms	47.90 ms	3.27 ms
Case IV	9.96 ms	19.68 ms	38.89 ms	3.26 ms

接続中に送信側 ACK 未受信とされたパケットが HO 先セルへの接続切替後、再度送信されてしまう。HO 後の受信側では HO 前のパケットの受信履歴が廃棄されている状態のため、重複と扱われず上位レイヤへ渡される結果、同一パケットの重複受信が発生し得る。

受信順序誤り HO 元のセル在圏中、無線区間において再送を必要とするパケットが受信側でバッファリングされている中、再送処理を必要としないパケットを正常受信した直後に HO が実行された場合、HO 実行中に未到着パケット待ちタイマが満了し、再送処理を必要としないパケットは HO 完了前に上位レイヤへ渡される。再送のためにバッファリングされたパケットは HO 完了後、HO 先のセルで受信され、その後上位レイヤへ渡される。この場合、これらのパケット間の受信順序が送信順序と入れ替わるシーケンスエラーが発生し得る。

受信欠損 欠損については、無線区間起因と有線区間起因のケースに大別して想定される。前者のケースの例としては、HO が発生する複数のセル境界付近の地点では、周辺セル干渉の影響による伝送容量の低下や HO 発生時の U-Plane 一時断によって送信端末側でのバッファ溢れが発生し、上りリンクパケットが欠損するケースが考えられる。後者のケースについては、基地局～モバイルコア間の IP ネットワークにおいて ECMP（Equal Cost Multi-Path）ルーティングが適用されている場合、基地局間 HO 完了後、モバイルコア～基地局間の下りリンクパケット経路切替前にモバイルコアから HO 元基地局経由で送られている下りリンクデータの最後の GTP-U パケットよりも先に、End Marker*が基地局側に到達してしまう可能性があり、その結果、下りリンクパケットが欠損するケースが考えられる。

現在のモバイルネットワークにおいては、Layer-2 における最上位のサブレイヤである PDCP（Packet Data Convergence Protocol）において受信側でパケットの重複検出と順序補正を行う機能が適用されており、受信重複や受信順序誤りの発生は通常避けられる。しかしなが

* 基地局間 HO 完了後に行われるモバイルコア～基地局間の下りリンク伝送経路切替手順である Path Switch Procedure において、旧経路に対して転送パケットの終了を通知するためモバイルコア側から基地局側へ送られるパケット。End Markerを受信した基地局は HO 元基地局から HO 先基地局への DL Data Forwarding に係るリソースを開放する [15]。

表3: 事象別 UDP パケット受信誤り発生率の主要統計値

	Duplicate reception	Sequence error	Packet loss
Case I	0.0345 %	0.0094 %	0.1280 %
Case II	0.0561 %	0.0051 %	0.3367 %
Case III	0.0000 %	0.0000 %	0.0000 %
Case IV	0.0000 %	0.0000 %	0.0000 %

ら、上述の理由により HO 発生時にはこれらの機能が有効とならない場合が発生し得る。

(II) マルチバンド冗長化 V2N2V 適用時

これに対し、図 12(a)、図 13(a) 及び表 3 を見るとわかるように、マルチバンド冗長化 V2N2V を適用した Case III 及び Case IV では、これらのパケット誤りが観測されていない。これは、1.7GHz 帯と 700MHz 帯の間で基地局サイト配置が互いに異なることにより各周波数帯におけるセル間 HO 発生ポイントが異なることに伴う結果である。マルチバンド冗長化 V2N2V の場合、各 UE に搭載されている 2 つの 5G MODEM においてどちらか一方の周波数帯がセル間 HO により通信が一時停止していたとしても、もう一方の周波数帯ではセル間 HO は発生しておらず通信が継続できる結果、全体としてセル間 HO に伴う通信停止を回避できるためである。本結果から、同一 MNO が運用する複数周波数帯でのマルチバンド冗長化された 5G V2N2V により、SRv6 MUP の適用有無に関わらず HO 時の遅延スパイク発生の問題回避のみならず、HO 時のパケット誤り発生をも回避し得ることを確認できる。

6. むすび

本稿では、現在のモバイルネットワーク経由による車車間通信 V2N2V を隊列走行に適用する場合に発生する主な課題として、セル間ハンドオーバー (HO) 時における伝送遅延スパイクやパケットエラー等の通信品質劣化、及び基地局～モバイル交換機 (モバイルコア) 間のトランスポートネットワーク (TN) 区間遅延の影響について述べた。そして、これらの課題を同時に解決するため、SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 V2N2V を提案し、自動運転 BRT の隊列走行における車車間通信への適用を想定して商用 5G SA (StandAlone) ネットワーク環境下で実施した屋外フィールド実験内容について紹介した。地方市街地での実験結果より、SRv6 MUP を併用するマルチバンド冗長化 V2N2V が、セル間 HO 時における伝送遅延スパイク抑圧や基地局～モバイルコア間の TN 区間伝送遅延削減のみならず、重複受信、受信順序誤り、欠損によるパケットエラー発生抑圧も同時に達成でき、モバイルコアの展開場所に依存することなく V2N2V の低遅延化と高信頼化の同時向上を図る有望なアプローチの 1 つであることを示した。

謝辞

SRv6 MUP に関する多くの貴重な知見を頂きました松嶋聡氏 (現・ソフトバンク株式会社 テクニカルマイスター)、堀場勝広博士 (元・ソフトバンク株式会社 テクニカルマイスター) 及びに SRv6 MUP の実験環境構築にご尽力頂いたソフトバンク株式会社の関係各位の皆さまに深く感謝いたします。また、商用 5G 環境下でのフィールド実験実施にご協力頂きました、富士ソフト株式会社の土田直紀氏、笹田雅幸氏、飯澤卓馬氏、秋山雄弥氏、石垣茉依乃氏に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Mikami and H. Yoshino, "Performance Evaluation and Demonstration of Real-Time Vehicle Control Information Exchange Using 5G New Radio Sidelink for Automated Follower Truck Platooning," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E107-B, no. 1, pp.85–93, Jan. 2024. DOI: 10.1587/transcom.2023WWP0007
- [2] M. Mikami and H. Yoshino, "Field Trial 5G Low Latency Radio Communication System towards Application to Truck Platooning," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E102-B, no. 8, pp.1447–1457, Aug. 2019. DOI: 10.1587/transcom.2018TTP0021
- [3] A. R. Girard, A. S. Howell, and J. K. Hedrick, "Hybrid Supervisory Control for Real-Time Embedded Bus Rapid Transit Applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 5, pp.1684–1696, Sept. 2005. DOI: 10.1109/TVT.2005.853466
- [4] W. Gao, J. Gao, K. Ozbay, and Z. Jiang, "Reinforcement-Learning-Based Cooperative Adaptive Cruise Control of Buses in the Lincoln Tunnel Corridor with Time-Varying Topology," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 10, pp.3796–3805, Oct. 2019. DOI: 10.1109/TITS.2019.2895285
- [5] W. Zhang, E. Jenelius, and H. Badia, "Efficiency of Connected Semi-Autonomous Platooning Bus Services in High-Demand Transit Corridors," *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, pp.435–448, June 2022. DOI: 10.1109/OJITS.2022.3180437
- [6] 三上学, 土屋 貴寛, 中里 仁, "5G モバイルネットワークを用いるマルチバンド冗長化双方向車車間通信のフィールド実験評価", 情報処理学会研究報告, vol.2025-ITS-100, no. 5, March 2025.
- [7] 三上学, 中里 仁, "[依頼講演] 5G モバイルネットワークを用いる車車間通信におけるハンドオーバー時遅延スパイク抑圧技術の検討 — マルチバンド冗長化 V2N2V の提案とフィールド実験 —", 信学技報, NS2024-151/RCS2024-184, Dec. 2024.
- [8] 三上学, 土屋 貴寛, 吉野 仁, "後続車自動運転隊列走行への適用に向けた SRv6 MUP を用いる 5G 低遅延車車間通信の地方市街地フィールド評価", 信学技報, NS2024-45, June 2024.
- [9] N. Yamane, J. Nakazato, K. Ito, M. Mikami, T. Tsuchiya, M. Tsukada, and H. Esaki, "Low Latency Redundant Network Architecture for Enhanced 5G Mobile Communication Quality," in *Proc. the 39th International Conference on Information Networking (ICOIN 2025)*, Chiang Mai, Thailand, Jan. 2025.
- [10] 堀場 勝広, 松嶋 聡, 横田 大輔, 川上 雄也, 三上学, 吉野 仁, "次世代モバイルネットワークを実現する SRv6 Mobile User-Plane", 信学論 (B), vol.J108-B, no. 7, July 2025. DOI: 10.14923/transcomj.2025JBI0001
- [11] S. Matsushima, C. Filsfils, M. Kohno, P. Camarillo, and D. Voyer, "Segment Routing over IPv6 for the Mobile User Plane," *IETF, RFC9433*, July 2023. DOI: 10.17487/RFC9433
- [12] S. Matsushima, K. Horiba, Y. Kawakami, T. Murakami, K. Patel, and J. Horn, "Mobile User Plane Architecture for Distributed Mobility Management," *IETF, Internet-Draft, draft-mhkk-dmm-mup-architecture-02*, March 2025.
- [13] T. Murakami, K. Patel, S. Matsushima, Z. J. Zhang, S. Agrawal, and D. Voyer, "BGP Extensions for the Mobile User Plane (MUP) SAFI," *IETF, Internet-Draft, draft-mpmz-bess-mup-safi-05*, Feb. 2025.
- [14] T. Murakami, S. Matsushima, K. Ebisawa, P. Camarillo, and R. Shekhar, "User Plane Message Encoding," *IETF, Internet-Draft, draft-murakami-dmm-user-plane-message-encoding-05*, March 2022.
- [15] 3GPP TS38.300 V18.5.0, "NR and NG-RAN Overall Description; Stage-2 (Release 18)," March 2025. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.331/38331-i50.zip