

地域デジタル基盤活用推進事業(自動運転レベル 4 検証タイプ)

神奈川県横浜市

混雑発生地域における安全な高度通信技術・路車協調システムの実証

実績報告書

2025 年1月 31 日

エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社

自動運転の社会実証機関

目次

1. 実証の背景・目的	1
1.1 実証の背景.....	1
1.2 レベル 4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題	2
1.3 実証の目的	2
1.4 最終目標・構想イメージ	3
1.5 最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標.....	4
2. 業務実施体制.....	6
2.1 実証機関.....	6
2.2 実施体制図.....	8
3. 自動運転の運行結果	9
3.1 運行場所.....	9
3.2 運行期間	9
3.3 運行時間帯・頻度・運行方式	10
3.4 運行者	10
3.5 運行体制	10
3.6 自動運転車両の特徴	11
3.7 自動運転に関する手続き	14
4. 実証の手法	15
4.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証.....	15
4.2 交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証	15
4.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携	24
4.4 明瞭な映像・音声による常時モニタリングを実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証.....	25
4.4.1 QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証の概要	25
4.4.2 「映像伝送システムに関する検証」の実施内容	28
4.4.3 「通信システムに関する検証」の実施内容.....	29
4.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上	33

4.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証	34
4.7 レベル4の社会実装に向けた検討	34
4.7.1 運用検証	34
4.7.2 効果検証	38
5. 通信システムに関する構築	40
5.1 通信システムの全体像	40
5.2 使用機器・ソフトウェア一覧	43
5.2.1 データ取得に関する機器・ソフトウェア	43
5.2.2 データ通信に関する機器・ソフトウェア	44
5.2.3 データ処理に関する機器・ソフトウェア	46
5.2.4 データ利用に関する機器・ソフトウェア	47
5.3 システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等	47
5.3.1 ユースケース共通のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項	48
5.3.2 ユースケース2のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項	49
5.3.3 ユースケース4のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項	49
6. 実証結果・考察	50
6.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証	50
6.2 交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証	50
6.2.1 AIを活用した周辺環境情報の見える化	50
6.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携	71
6.4 明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証	71
6.4.1 QoS、ローカル5G、WiGig、MECを組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証の結果	71
6.4.2 「映像伝送システムに関する検証」の実施結果	72
6.4.3 「通信システムに関する検証」の実施結果	82
6.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上	91
6.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証	91
6.7 レベル4の社会実装に向けた検討	91
6.7.1 運用検証	91
6.7.2 効果検証	114
7. 本実証の総括	124

7.1 本実証の成果・課題	124
7.1.1 考察のサマリ	124
参考資料	126

1. 実証の背景・目的

1.1 実証の背景

バス運転者はバス事業を営む上での根幹となるものであるが、近年、バス運転者の不足により減便や路線廃止の動きが相次いでおり、2023年、バス運転者は全国で1万人不足。2030年には3万6000人に達する見込みである¹。

またバス運転者の拘束時間が制限される「2024年問題」を控え、各自治体では喫緊の対応を迫られている。例えば弘前市では路線が廃止されても地域の足を確保するために乗り合いタクシーの拡大を検討しているが、タクシー業界においても人手不足に直面しており解消の見通しは立っていない。

本実証の実施地域である横浜市においても、バス運転手不足への対応が喫緊の課題となっている。各交通事業者は、バス運転士の確保に向けて、応募条件の緩和や「養成制度」の設置により、大型第二種免許を持たない人の応募も受け付けるなど、様々な取り組みを実施している。

給与の引き上げや採用試験の見直しなども実施されているが、少ない人材の中で効率的にバス事業を運営していくための施策導入が急務の状況にある。

事業者は、運転手不足の解消に向けて、さらなる創意工夫と柔軟な対応が求められている²。

この状況を踏まえ、相鉄バスは、2019年から2024年にかけて、自動運転「レベル2」の実証実験を6回にわたり実施してきた。近年、バス運転者の不足により減便や路線廃止が相次いでいる中、自動運転バスの導入が必要とされている。しかし、都市部や混雑したエリアへの導入には、まだ技術的な課題が残っている。

一方で、相鉄線沿線では、少子高齢化や人口減少、高齢者の免許返納の増加など、様々な課題に直面している。そのような中、相鉄グループは「選ばれる沿線の創造」を基本理念として、持続可能な街づくりを目指している。

具体的には、自動運転に対する社会受容性の向上や、公共交通ネットワークの維持・拡大に取り組んでいる。今後は、自動運転「レベル4」の営業運行の早期実現に向け、路車協調等を活用し、交通量の多い交差点でも安全に運行できるよう、先端通信技術を活用した監視映像の安定・高品質化に取り組むとともに、複数の営業路線での実証実験を行い、地域社会における交通の利便性向上を実現に取り組んでいく。

自動運転バスの導入による効率的なバス事業運営に向けては、手動運転バスと自動運転バスのハイブリッド運用が必要となる。自動運転バスの導入効果を最大化するために、乗車率・稼働率の高い路線へ自動バスを適用することが有効であると考ええる。

¹ 東京新聞、「路線バス維持へ「戦後最大の危機」 東京でも運転手足りない 廃止・減便・値上げ相次ぐ」, <https://www.tokyo-np.co.jp/article/283801>, 発行年（2023年）, 最終閲覧日 2025年1月31日閲覧

² 毎日新聞、「給与アップや試験見直しでバス運転手確保 横浜市交通局「最重要」」, <https://mainichi.jp/articles/20240225/k00/00m/020/175000c>, 発行年（2024年）, 最終閲覧日 2025年1月31日閲覧

1.2 レベル 4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題

実証背景を踏まえ、本実証では「よこはま動物園（よこはま動物園）エリア（正門 5 番バス停～北門バス停～正門バス停ルート）」を実証地域とする。

なお、横浜市・相鉄バスにおいても全国的な傾向と同様、バス運転者の確保に向けた対応が迫られており、過去にも自動運転バスの導入に向けて積極的に取組 1 を実施している。³

手動運転バスと自動運転バスのハイブリッド運用においては、自動運転バスの導入効果を最大化するために、乗車率・稼働率の高い路線へ自動バスを適用することが有効である。その点において、よこはま動物園（よこはま動物園）エリアは最寄り駅から離れており、日常の交通をバスに依存している住民の割合が多い。また、本実証ルートは歩車分離がされているとともに、よこはま動物園への来訪者や年二回の花のイベントが開催される関係で市外からも来訪者が多いエリアである。したがって、自動運転バスの導入により、運転者不足に起因する路線バスネットワーク及び日常の足、交通手段の持続的な確保が実現し得るエリアであるとともに、レベル 4 の社会実装に欠かせない受容性の醸成にふさわしいエリアである。

他方、本実証地域のようなアミューズメントパーク付近においては、土日の混雑緩和が課題となっており、渋滞や事故の増加につながるため、レベル 4 自動運転バスを実装するためには安全性の確保が必要不可欠である。特に本実証ルートにおいては、自動運転バスの死角からの子どもの飛び出しや、付近のロータリーが公園の入り口になっていることから中高校生の往来も多い。また信号がないため、自動運転バスや歩行者を検知する仕組みや歩行者に注意喚起する仕組み及び信号がない前提での安全対策の仕組みの構築が課題である。

また、日常的に混雑しているわけではなく、土日等の局所的に混雑するようなアミューズメントパーク等のエリアは、通信環境の拡充に時間がかかることが想定される。人が混雑したタイミングに通信システムも混雑する可能性が高いことから、混雑エリアにおいても安定した通信が提供できるシステムの構築も課題である。

1.3 実証の目的

以上のような背景・地域課題を踏まえ、本実証事業では、バス事業の省力化・経営合理化を見据えた手動運転バスと自動運転バスのハイブリッド運用の実現を目標に、アミューズメントパーク周辺における自動運転バスの安全走行に係る要素項目を明らかにすることを目的とする。

具体的には前項で提起した課題に対応し、「協調システムによる必要な情報の見える化」を目的とした実証を行い、自動運転バスの死角に関する情報を収集し、混雑エリアにおける自動運転の安全性の向上ができるか、また、「QoS (Quality of Service)、ローカル 5G、WiGig

³ 横浜市経済局産業連携推進課、「I・TOP 横浜「路線バス自動運転プロジェクト」～日本初 大型バスによる遠隔監視・操作での自動運転を実施～」, <https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/koho-kocho/press/keizai/2020/itopautomobile.files/kisyahappyo.pdf>, 発行年（2020 年）, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

(Wireless Gigabit)、MEC (Multi-access Edge Computing) 等を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上」を目的とした実証を行い、映像等のリアルタイム伝送における優先通信制御や専用通信経路の導入によってアミューズメントパーク等の混雑エリアにおいても安定した通信品質を維持し、自動運転が継続できるかについて、明らかにする。

また、特に本実証は「アミューズメントパーク」かつ「信号のないルート」におけるレベル4自動運転バスの実装に向けた検証を行うことを想定していることから実証結果を他のアミューズメントパークや信号のないエリアへの転用することも念頭に結果を取り纏める。横浜市としても、地域交通の利便性向上による利用促進や運行効率化、運転手不足など社会的課題への対応を図るため、DXを推進するとともに、脱炭素社会へ向けたGXの取組を進めている。相鉄バスとしては、今後、運行の実証等を繰り返しながら、社会受容性の向上も含めた検証を行い、今回のよこはま動物園も含めて、横浜市内相鉄線沿線での実装を目指している。

1.4 最終目標・構想イメージ

手動運転バスと自動運転バスのハイブリッド運用によるバス事業の省力化と経営合理化を最終的なゴールと設定した上で、本実証事業においては、自動運転レベル4での実装を後押しする協調システムによる情報の見える化、及び、QoS、ローカル5G、WiGig、MECを組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に取り組む。

この2つの取り組みにおける最終目標・構想としては以下の通りである。

【AIを活用した周辺環境情報の見える化】

将来的には、複数のエリア・ルートを一元的にモニタリング可能なシステムを構築することで、管理側の省力化と通信ネットワークのリソース確保を目指す。また、モニタリングについては各エリアに遠隔監視装置を設置して常に現場で状況を把握できるようにすることで、経済的かつ冗長性の高いシステムを構想している。

経済的なモニタリングの実現においては、複数台を一元的にモニタリング可能なシステムが必要となる。情報の「見える化」だけでなく、監視員が「見なくていい」、「触らなくていい」等、モニタリングの自動化やモニタリング業務の省人化を行う構想である。

将来の構想イメージに向けた第一歩として、本実証では、まずは「1:1」のモニタリングを対象に、監視員のモニタリング業務に係る負担軽減を目指す。具体的には、センサの検知結果をアイコンや音などで監視員に通知することにより、オペレーターのモニタリング業務の省人化の可能性を検証する。

また合わせて、センサで取得した周辺環境データを、地域住民の見守りサービスや暮らしの利便性向上等、バス事業以外の地域サービスに活用するモデルを将来的に構築していくことを想定している。なお、本実証で使用するセンサは既設の道路灯の灯体を交換することでネットワークに組み込むことができる。現状でも比較的設置が容易で拡張性が高いが、今後更なるコスト低減

化を図っていくことで、センサの普及可能性を十分に見込んだ上で社会実装を目指すことができると考えている。

構想イメージ

監視監視装置：走行エリアに捕らわれない監視監視装置の設置

協調システム：センサ情報で取得した周辺環境情報により自動運転車を支援する機能の実現

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上】

前述の通り、将来的には、遠隔監視装置の一元化を構想しているため、取り扱うデータ量が膨大になることが想定されることから、そのデータ通信に耐えられネットワーク環境を構築する必要がある。あわせて、複数拠点の映像・データを一元化して管理する体制に耐えられるような通信環境を構築するため、様々な通信技術を活用して自動運転全体を管理するプラットフォームの構築を目指す。

このような情報プラットフォームを構築することで、自治体が整備を進めているデータ基盤・サービス基盤と連携が可能となり、自動運転だけではなく、見守りサービス等も含め、サービス間での相乗効果の創出が期待できる。例えば、他のサービス由来の人流データを活用することで、人流に合わせたデマンド運行を自動運転サービス側で実施する等が考えられる。

1.5 最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標

【AI を活用した周辺環境情報の見える化】

本実証では、遠隔監視装置の一元化と映像の他拠点配信に向け、遠隔地への装置の配置とその状況化での安全運行の実現性の検証を実施する。

また、将来的なセンサデータと車両情報の連携による管理側の省力化、自動制御に向け、データの活用によるモニタリング業務の省力化、安全性の向上の実現性を検証する。

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上】

自動運転バスの運行エリアが拡大するにつれて取り扱う情報量が増大することは明らかである。大容量データ通信や低遅延等の機能を活用した通信環境の実現には、各エリア・ルート の性質を踏まえた柔軟な通信環境構築手法の確立が必要である。

過年度の検証では、スムーズなネットワークの切り替えが課題となっていたことから、本実証では、ローカル 5G とキャリア 5G を組み合わせ、これらのネットワークをスムーズに切り替えて映像伝送等が途切れないようにするしくみについて検証を行う。

また、光回線を引くのが難しい地域においてローカル 5G のエリア化が難しいという課題に対して、本実証では、引けるところまで光回線を引き、その先を無線回線の WiGig でつなげてローカ

ル 5G エリア化することを想定して、通信品質や費用対効果等の、WiGig によるエリア拡張の有効性についても検証を行う。

(通信環境に関する現状と展望)

○ 過年度実証/実装済機能 (LTE や 5G 等を単体で活用)

遠隔監視の検証で LTE、キャリア 5G、ローカル 5G 等を単体で活用等、単体での活用性を検証

● 本実証 (通信網の複合的な活用)

自動運転走行ルートのカバーする既存のキャリア網 (LTE またはキャリア 5G) に対し、必要な個所へローカル 5G を重畳配置することで選択可能とした 2 つの通信経路の切り替え動作 (本報告書では、以下、「ハンドオーバ」と表記) の検証

WiGig によるローカル 5G エリア拡張の活用可能性の検証

○ 将来 (IOWN 構想や 6G への拡張)

本実証の結果をもって一部の自動運転実装は実現できるため、実装しながら課題解決を図る

継続して効率化や更なる高度化を目指す必要はあるものの、今後、ネットワークスライシング (Qmonus® (クモナス) を活用したオンデマンドで利用エリアや時間を指定したネットワークスライス生成含む) を活用した自動運転用のネットワーク構築や、通信の軸となってくると想定している IOWN や 6G への拡張、することも将来構想として設定

プレス (「エリアや時間を指定したネットワークスライシングの実証実験に成功～世界初！ハイブリッドクラウド構成で構築した 5GC と 5G SA 無線基地局を利用～⁴」より引用)

イベント会場や災害地域など通信トラフィックが集中する特定スポットで日時を指定して利用用途に応じた最適なネットワークを提供するなど、お客さまの多様なご要望に対応するネットワークを早期に提供することをめざします。また、QoS/QoE※3 を可視化することで、提供するネットワーク品質の監視が可能となります。

(1) オンデマンドかつ即時対応を実現するネットワークスライス生成技術実証

オーケストレーションプラットフォームである Qmonus® (クモナス) ※4 より、ハイブリッドクラウド構成で構築した 5GC に対してオンデマンドで利用エリアや時間を指定したネットワークスライスを生成すること

⁴ NTT ドコモほか,「エリアや時間を指定したネットワークスライシングの実証実験に成功 ～世界初！ハイブリッドクラウド構成で構築した 5GC と 5G SA 無線基地局を利用～」, https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_rel ease/topics_240115_03.pdf, 発行年 (2024 年), 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

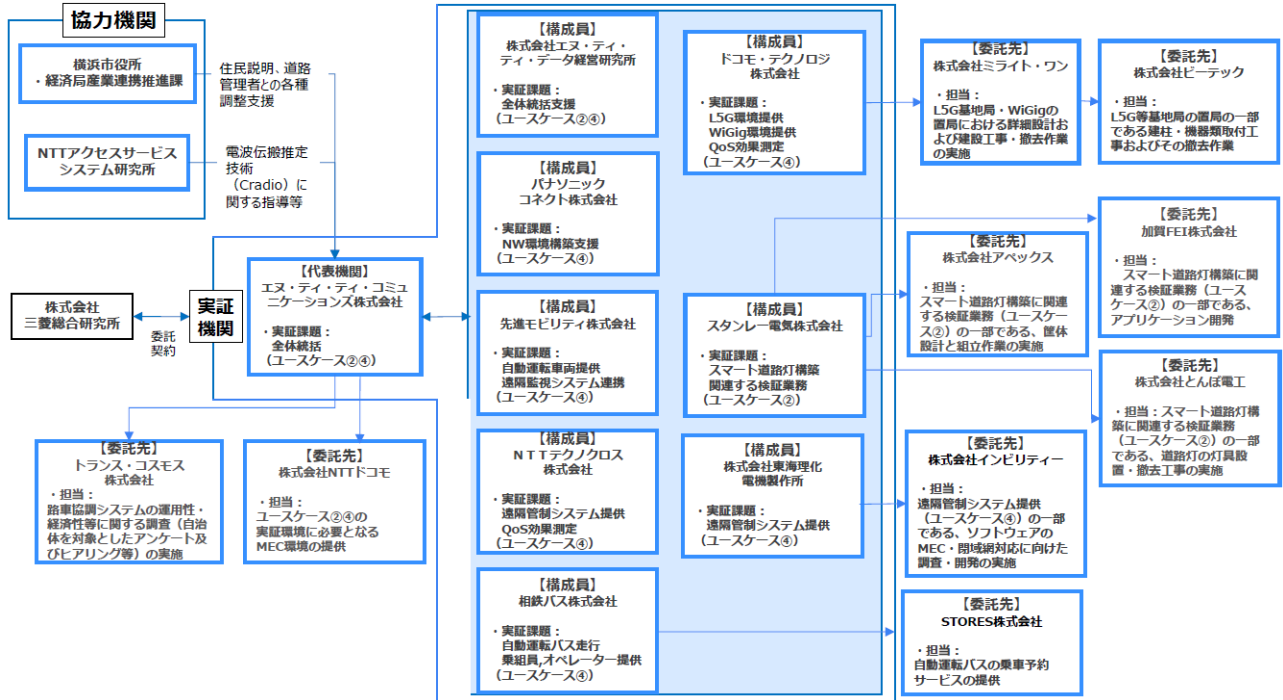
代表機関	法人名	エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社
	代表者氏名	丸岡 亨
	所在地	〒100-8019 東京都千代田区大手町 2-3-1 大手町プレイスウェ ストタワー
	業務の概要	実証事業の全体統括
構成員	法人名	N T Tテクノクロス株式会社
	代表者氏名	岡 敦子
	所在地	東京都港区芝浦 3-4-1 グランパークタワー15 階
	業務の概要	遠隔監視システムのアプリ設定
	構成員とする理由	遠隔監視システムのアプリケーション構築経験が あり、アプリのチューニングの知見が不可欠であ るため
構成員	法人名	株式会社エヌ・ティ・ティ・データ経営研究所
	代表者氏名	山口 重樹
	所在地	東京都千代田区平河町 2-7-9 JA 共済ビル 9 階・ 10 階
	業務の概要	実証事業の全体統括支援
	構成員とする理由	過去、多数の国が所管する実証プロジェクトのプ ロジェクトマネジメントを実施しており、コン ソーシアム構成員を取り纏め、円滑に実証事業 の遂行に向けて寄与できると考えるため
構成員	法人名	スタンレー電気株式会社
	代表者氏名	貝住泰昭
	所在地	〒153-8636 東京都目黒区中目黒 2-9-13
	業務の概要	AI カメラユニットの設計・調整
	構成員とする理由	過年度の自動運転実証実績を有し、円滑に実証事 業の遂行に向けて寄与できると考えるため
構成員	法人名	株式会社東海理化電機製作所
	代表者氏名	二之夕 裕美
	所在地	愛知県丹羽郡大口町豊田三丁目 260 番地
	業務の概要	遠隔監視装置の提供と実証実験の実施

		QoS 関連の適用による遠隔監視装置の映像伝送品質向上の評価実施
	構成員とする理由	モニタリングに関する実証には、同社の技術が必要不可欠であるため。
構成員	法人名	パナソニック コネクト株式会社
	代表者氏名	樋口 泰行
	所在地	東京都中央区銀座 8 丁目 21 番 1 号 住友不動産汐留浜離宮ビル
	業務の概要	ローカル 5G システム構築、映像伝送システム構築
	構成員とする理由	ローカル 5G システム、映像伝送システムの構築実績があり、安定した通信環境の構築と映像伝送におけるアプリケーションのチューニング・解析ノウハウが実証において必要不可欠であるため。
構成員	法人名	ドコモ・テクノロジ株式会社
	代表者氏名	中村 寛
	所在地	東京都千代田区永田町二丁目 11 番 1 号 山王パークタワー16 階
	業務の概要	通信技術実証の実施
	構成員とする理由	5G 技術を用いる端末の開発と応用について多岐にわたる実績を有するため。
構成員	法人名	相鉄バス株式会社
	代表者氏名	大久保 忠昌
	所在地	神奈川県横浜市西区北幸 2-9-14
	業務の概要	実証実験における調律走行、乗客を乗せた自動運転走行、モニタリング、車内外の保安、伴う安全、操作などの教育、期間中の車両維持・管理。
	構成員とする理由	実証地域において自動運転バスの実証実験を繰返し実施し、安全と運行に知見と経験があるため
構成員	法人名	先進モビリティ株式会社
	代表者氏名	瀬川雅也
	所在地	茨城県つくば市緑ヶ原 4 丁目 13 番地
	業務の概要	Lv2 自動運転バスの提供、走行環境に併せた自動運転システムの調整および運行担うドライバーへの操作トレーニング
	構成員とする理由	一般道、混在交通環境における大型自動運転車両の実証実験の実績を多数有するため。

2.2 実施体制図

本実証における実施体制は以下の通り。

図 1 実施体制図



3. 自動運転の運行結果

3.1 運行場所

本実証では、神奈川県横浜市のよこはま動物園正門 5 番バス停から北門バス停の間の往復を行う約 2km の区間において自動運転車両の運行を行った。原則レベル 2 の自動運転であり、横断歩道付近に人がいる場合等に安全のため手動介入が行われた。遠隔監視装置は相鉄バス旭営業所（よこはま動物園より約 4 k m）に設置した。



図 2 自動運転バス運行ルート

3.2 運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	2024 年 9 月 2 日～13 日 ※うち土日は走行無し
関係者試乗運行	2024 年 9 月 30 日 運行人数：109 名
一般運行等	本番運行：2024 年 10 月 1 日～10 月 8 日 ※うち土日は通信実証のみ 運行人数：693 名

※一般運行の際、ホームページから予約していただき試乗いただいた。

3.3 運行時間帯・頻度・運行方式

運行時間帯は 10 時 30 分～16 時 30 分、頻度は 30 分に 1 本、運行方式は路線バス方式で運行を行った。

3.4 運行者

相鉄バス株式会社が運行を行った。同社は、横浜市ならびに神奈川県県央部において 116 系統の乗合路線バスを運行している。自動運転レベル 4 による路線バス営業運行を目指し 2019 年より自動運転バスの実証実験に取り組んでいる。

3.5 運行体制

項目		内容
運行管理者の選任・人員体制		実証地域から至近の相鉄バス旭営業所の運行管理有資格者と補助者（常時計 2 名以上）が当該自動運転バスの出庫から帰庫までの運行管理を実施する
遠隔監視装置	種類・特徴	カメラからの映像に対して、映像を統合する事により従来のドライバーが見えている範囲(約 210 度)を一括で画面に表示できると共に、側方/後方/車室内のカメラ映像に関しても統合し、一つのストリームとして送る事で、通信容量削減/画質向上が可能な遠隔監視装置
	機能	車両周囲全体を死角なく遠隔監視装置に表示 車室内映像について遠隔監視装置に表示 自動運転車両の車両状況を映像と共に表示 車室内の乗客検知による安全確認と通知
	設置場所	〒241-0806 神奈川県横浜市旭区下川井町 393 相鉄バス株式会社 旭営業所
監視員	事業者	相鉄バス株式会社
	人員体制	監視員：2 名 自動運転車両 1 台当たりの配置人数：2 名
	オペレーション	自動運転車両に取り付けられたカメラや音声等の情報を遠隔監視室に備えた遠隔監視装置を通じて監視員監視員がモニタリング

	遠隔監視体制	常時 2 名体制で実施し、交代で本監視者、準監視者役を担う
	業務従事者教育	自動運転バスの安全な運行に必要な知識と技術を習得する。具体的には、モニタリング画面からの情報を通じて車内外の状況をリアルタイムで把握できるようにする。また <u>車内の異常や通常の状況判断、さらには車外の状況や歩行者、自転車、バイク等の動きの確認、監視対象の状況を監視し、異常が発生した場合にはすぐに適切な対策を講じられるように、また定められた連絡先に連絡を取るなどの対応を行う。</u>
テスト ドライバー	事業者	相鉄バス株式会社
	人員体制	自動運転車両 1 台当たりの配置人数：3 名（交代・休憩・病欠に備え） 運転手ののべ人数：10 名 教育係：3 名
	オペレーション	事前指導、点呼、出庫前点検、営業所から実証実験場所の回送、実証走行、乗務記録、帰庫点検、給油
	テストドライバー	2019 年より自動運転バスの実証に取り組んでいるため、 <u>自動運転バスのテストドライバーの経験を有する運転手が約 15 名在籍している。</u> 本実証においても経験を有する運転手を中心に割り当てる。
保安員 (※上記以外で 運行の安全の ために配置す る人員)	事業者	相鉄バス株式会社
	人員体制	保安員の人数：5 名 自動運転車両 1 台当たりの配置人数：2 名（交代・休憩・病欠に備え） 車外への配置人数：3 名
	オペレーション	テストドライバー補助、車内アナウンス、乗客介助、車両移動

3.6 自動運転車両の特徴

項目		内容
台数		1 台
所有者		先進モビリティ株式会社
	車両名	ポンチョ

車両 スペック	自動運転レベル	レベル 2
	車両定員	34 人
	試乗枠の定員	11 人
	最高速度	車両機能上限：80km/h
		実証実験時上限：60km/h
	センシングデバイス	3DLiDAR：3 台、ミリ波レーダー：1 台、物体検知カメラ：2 台
	車両性能 (チェックを入れること)	☐ 走行中に自動運転と手動運転を切り替えることが可能な遠隔型自動運転システムを備えた自動車として生産された車両である
		☒ 自動運転レベル 2 以上での走行が可能であり、かつ将来的に車両調整等により自動運転レベル 4 での走行が可能であること
		☒ 乗車定員は、実証地域で将来的に実装することを想定した適当な規模であること
	運行管理システム (チェックを入れること)	☒ 車両に搭載したカメラによる車両内外のモニタリング
☒ 緊急時における車内との通話		
☒ 速度や位置等の車両走行状態のリアルタイムでの取得		
☒ 実験車両に車両周辺の状況や車両状態情報の記録を行うドライブレコーダーやイベントデータレコーダー等を搭載すること		
☐ 公道実証実験中の実験車両に係るセンサ等により収集した車両状態情報を含む各種データ、センサの作動状況等について、交通事故又は交通違反が発生した場合の事後検証に利用することが可能な方法により、適切に記録・保存すること		
その他装備	磁気マーカセンサ	
走行可能 環境	天候	晴天、曇天、雨天（小雨）
	照度	300lx 以上

保有機能	自車操作	左折	走行可否	可
		右折	走行可否	否
		車線変更	走行可否	否
		障害物回避	対応可否	可（停止による回避）
	対象認識		4 輪車、2 輪車、人	
	白線認識		可	
	標識認識		否	
	信号認識		可	
	MRM		否（レベル 2 のため）	

3.7 自動運転に関する手続き

下記の報告および許可申請を実施。

申請先	申請内容
神奈川県警	下記の実証内容を報告 ・ 期間 ・ 場所 ・ 体制 ・ 実施内容 ・ 車両 ・ 自動運転システム機能概要 ・ 遠隔監視装置概要 ・ 安全確保措置
旭警察署	
関東運輸局	
緑の協会 ※よこはま動物園 指定管理者	
横浜市	自動運転車両の走行に関する行為許可申請 ネットワーク構成装置設置に関する公園占用許可申請

4. 実証の手法

4.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

4.2 交差点における車両の認知機能の補助機能（自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能）の検証

(1) 目的

AI カメラを活用し、自動運転バスが走行する区域の一般車両、歩行者の存在を監視室に伝えることで、バス運行者による安全性確保の質向上を目指す。また、交通参加者（交通弱者含む）に対して自動運転バスの存在を通知する仕組みを構築することで、接触事故リスク等の軽減を図る。

(2) 実施内容の詳細

自動運転バス運行区間における危険な箇所（交通弱者等とバス、及び、関係車両とバスが接触するリスクが高い箇所）の道路灯にエッジ AI カメラやセンサを設置する。エッジ AI カメラを通じて路車協調データをネットワークに伝送することが可能になり、エッジ AI カメラのデータには、車両や歩行者を検出し、それらの位置情報が含まれる。

本実証では、エッジ AI カメラにて、自動運転車の死角と想定される対象区域をエッジ AI カメラの監視範囲とする。車両や歩行者を検出し、それらの位置情報が、予め設定したエリア条件と一致すると、監視室に設置したモニタに、侵入があることを表示することが出来る。また、AI カメラに装着した電光掲示板等により自動運転バスが走行していることを交通弱者等に通知する。なお、電光掲示板の対象は普通車運転手、歩行者とする。

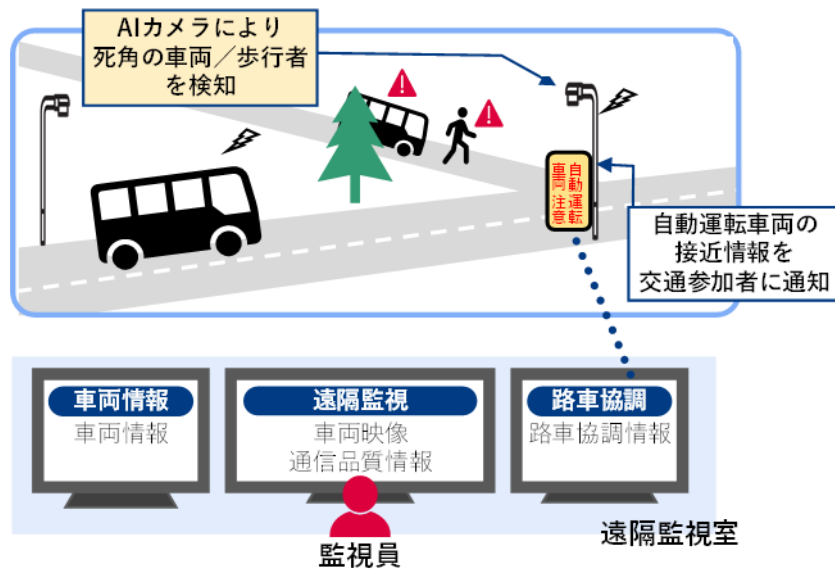


図 3 実証図

(3) 利用技術

検知した歩行者・車両映像を遠隔監視装置にフル HD で伝送するため、本実証では以下の 4 つの通信技術を活用する。

- ①5G 技術(ローカル 5G/キャリア 5G)
- ②WiGig 技術
- ③MEC
- ④Intdash

それぞれの通信技術を選択した理由を述べる。

① 5G 技術(ローカル 5G/キャリア 5G)

ローカル 5G (ローカル 5G) は、移動通信事業者が展開するキャリア 5G とは別に、地域や各種産業における個別の要求・需要に応じて企業や自治体などが所有または管理する土地や建物に自ら構築する 5G ネットワークであるが、そのシステムとしての主要な特長を以下に挙げる。

- ・ キャリア 5G の既存エリアやエリア拡大状況とは関係なく、必要な場所、タイミングで 5G ネットワークを構築可能である。
- ・ ネットワークの用途に応じて必要な通信性能を設定・カスタマイズ可能であり、上りのトラフィック需要にも柔軟に対応できる。
- ・ 他のネットワークにおける通信障害や災害などの影響を受けにくく、通信サービスの継続性を得やすい。
- ・ 無線 LAN などのアンライセンスバンドを使用する無線アクセス手段と比較し、専用のライセンスバンドを無線局免許に基づいて使用することで干渉問題を極力回避した安定した通信が可能である。

以上のような特長を有するローカル 5G を自動運転システムにおいて活用することは、全国の様々な環境でサービスされることが想定される自動運転バスにおいて、より安定かつ高品質な映像の無線伝送を可能とすることを通して安全かつスムーズな運行を実現することが可能である。

②WiGig 技術

WiGig (Wireless Gigabit) は、60 GHz 帯 (ミリ波帯) を使用する IEEE 802.11ad 規格ベースの無線 LAN であり、高速・大容量のデータ通信が可能である。本実証で使用する WiGig 装置は、ビームフォーミング機能を有しており、移動する端末をリアルタイムに追従する、なお、WiGig は、いわゆるアンライセンスバンドを使用しており、無線局免許の取得が不要である。

③MEC

自動運転制御において、通信の安定性とセキュリティ脅威の排除による信頼性およびリアルタイム遠隔制御を実現する低遅延性を求められるため、通信キャリア網内という完全閉域で外部脅威を受けないかつ公共ネットワークの揺らぎや冗長な物理的通信経路の影響を受けないことから、MEC が適していると考えられる。

本実証では、ネットワーク観点として通信経路として MEC を活用するが、将来的にはアプリケーション観点からも MEC 上にサーバを構築することで、完全閉域による高セキュリティなネットワーク環境の構築を見据える。また、MEC 上のサーバへ自動運転車両やエッジ AI カメラで処理しているシステムを移行することで、広範囲で稼働する路車協調型自動運転環境の実現を見据える。上記のことから、本実証において、MEC を採用する。

④Intdash

Intdash は特許技術 100 ミリ秒~1 ミリ秒間隔程度の高頻度で発生する時系列データをネットワークを介して、高速・大容量かつ安定的にストリーミングするための双方向データ伝送技術である。カメラや GPS、Lidar、CAN などの多数のセンシングデバイスからデータを収集し、リアルタイムに可視化や複数のアプリケーションへの連携が可能となる。本実証では路側インフラからのデータ収集・可視化として活用するが、将来的には双方向データ伝送を活かして車両制御または車両制御のための物標情報などの自動車車両までのシステム連携の実装を見据える。

(4) 必要性・緊急性・新規性

■必要性

- ・ 本実証場所は植林や構造物による自動運転車両にとって死角になりうる箇所が存在するため AI カメラからの画像・センシング情報を補助的に活用することで安全な自動運転支援に繋がる。
- ・ 本実証場所には信号機がなく、道路灯以外の電源環境の整った既存インフラ設備もないため路車間協調に向けた AI カメラの活用が、その他代替手段と比較して重要となる。

- ・ 路車協調のインフラ導入手段としては、信号灯、道路灯、監視カメラ、スマートポールがある。選定根拠としては、信号機がなく、監視カメラやスマートポールを設置するには、初期設置コストが高い懸念があった。道路灯にエッジ AI カメラを設置する方法は、電源環境の整った既存インフラ設備を活用可能な点で、他の手段と比較して重要であった。さらに、道路灯は高所にされることから、広範囲で死角が少ない監視が可能であることも必要性が高い点である。

■ 緊急性

- ・ アフターコロナにおける海外を含む観光客の増加に伴い、実証場所であるよこはま動物園（よこはま動物園）への来訪者の増加が見込まれている。増加する来訪者に対しては、パーク・アンド・ライドの観点から公共交通の整備が求められ、バス運行者・よこはま動物園関係者・地方公共団体からも自動運転バスの活用が期待されている。
- ・ このような背景の中、路車協調による自動運転支援の重要性は今後益々高まると考えられるとともに、我が国における多くのアミューズメントパーク設置地域で顕在化する課題解決に資する成果が得られると考えられるため、全国的な自動運転の実装を見据え緊急性の高い課題である。

■ 新規性

- ・ 我が国における協調型自動運転社会を見据えた路車協調型インフラとして、信号機や機能特化型の専用路側センサなどの活用は散見されるが、既設の道路灯を活用したソリューションについては事例がない（コンソーシアム調べ）
- ・ 上記の通り、本実証を通じて協調型自動運転社会を見据えた路車協調型インフラとしての AI カメラの有用性を検証することは新規性がある。

(5) 検証条件

- ・ AI カメラは、24 時間給電とする
- ・ AI カメラを設置した灯具ポールに、電光掲示板を設置する。
- ・ AI カメラの相互通信、及びスマート道路灯から AI カメラへの通信はローカル 5G 通信を用いる
- ・ AI カメラから遠隔監視装置への通信はキャリア 5G 通信を用いる
- ・ AI カメラ出力用のモニタを設置した遠隔監視装置から、監視員が MEC 上に構築した AI カメラから遠隔監視装置にアクセスし、一般車や歩行者の通知結果や映像を確認する

(6) 開発・評価項目

表 1 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	直線 50m 範囲の道路に走行する一般車両の有無を検知し通知する開発を行う
2	カメラの映像を監視室にストリーミングする機能を実装する開発を行う

3	検知結果を監視室に伝える機能、UI の開発を行う
4	車番を活用した自動運転バス車両の認識に向けて走行車両のナンバープレートの OCR 活用可能性を確認する
5	自動運転バスの走行していることを、ほかの交通参加者へ電光掲示板によって伝える

1) 直線 50m 範囲の道路に走行する一般車両の有無を検知し通知する開発を行う

道路灯具の設置間隔は多くは 30m～50m で設置されており、検知範囲のデッドスペースが生じないよう、50m の検知範囲と目標設定する。

また、特定自動運行保安員による常時監視の負担軽減に資するソリューションとして路車協調システムへの要求性能を設定した。

具体的には、画角内に対象物が写りこんでから、画角から消えるまでの検知率を評価することとし、AI のオブジェクト検知としては、一般的に精度が高いとされる下記の値とした。

➤ 車両検知率（適合率 95%）

➤ 歩行者検知率（適合率 90%）

車両と歩行者の検知手段は、エッジ AI を採用している。上記の評価値の他に、その AI の能力である 1 フレームごとの検知率を評価することとし、令和 5 年度地域デジタル基盤活用推進事業における検証結果を踏まえて、車両検知率 92%（適合率）85%（再現率）、歩行者検知率 75%（適合率）70%（再現率）とした。

2) カメラの映像を監視室にストリーミングする機能を実装する開発を行う

監視室にいる監視者が画像認識 AI による通知をうけ、歩行者や車両の存在を、映像からも情報として正しく確認できることが社会実装に向けて求められる要件とする。よって、上記 1) 記載の検知範囲と同じ視野範囲が見えることで 50m 範囲とする。かつ歩行者や車両として監視者が目視で認識可能であること、ナンバープレートを OCR で読み取ることを想定した解像度として 1080p（1920×1080pixels）、9fps 以上と設定した。

3) 検知結果を監視室に伝える機能、UI の開発を行う

監視者が通知の発出を迅速に認識できることが要件として求められる。そのため、対象物の検知をトリガーに、監視画面に検知物を示すアイコンを表示させる機能とアラート音により通知する機能を開発する。なお、これらの評価は、監視者のインタビューによって収集する。

4) 車番を活用した自動運転バス車両の認識に向けて運行車両のナンバープレートのOCR活用可能性を確認する

自動運転車の形態は多種多様だが、ナンバープレートの形態は不変であり検知率の適合率・再現率ともに高精度での実現が見込まれる。

認識したい車番の登録により識別が可能のため、車種ごとの認識学習と比較して技術/コスト面からも簡易に実装できる可能性が高い。

汎用 API を活用した開発を行うことで、他の用途への応用可能性にも繋がる。今回は、汎用 API (Google Vision API) で識別可能な分解能及び、フレームレートの閾値目安を抽出する。

5) 自動運転バスの走行していることを、ほかの交通参加者へ電光掲示板によって伝える

交通参加者が通知の発出を迅速に認識できることが要件として求められる。そのため、自動運転バスが走行していることを電光掲示板にて通知する機能を開発する。さらに、走行中の車両を検知し、交通参加者に、車両の接近を通知する機能を開発する。なお、評価は、歩行者および普通自動車運転手へのインタビューなどによる定性評価を行う。インタビュー対象者の属性は次のとおりである。また、対象者の自動運転に対する知識レベルは、初～中級レベルであり、ごく普通の市民の知識レベルであった。知識レベルは、被験者の「意識変容」等の回答に影響すると考えられたため、選定時ではなく、調査中のインタビューの中で確認した。

表 2 インタビュー対象者の選定条件

対象者	一般ドライバー兼歩行者 (6 名)
選定条件	・普通自動車免許所有 (月 1 以上で運転している方) ・年齢 : 20 代～40 代 ・居住地 : 神奈川県 ・7 歳以下のお子様をお持ちの方* (慎重なタイプのお子様ではなく、活発なタイプのお子様がいらっしゃる方) ※歩行中の子どもの事故は 7 歳がピークであることから上記の選定を行った。 出所 : 内閣府『令和 2 年交通安全白書』 https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou_haku/zenbun/genkyo/feature/feature_01_2.html
(内訳) 性別/年代	男性 : 3 人、女性 : 3 人 20 代 : 1 人、 30 代 : 2 人、 40 代 : 3 人

レベル		人数
Lv.5	専門家レベルの知識を有している	0
Lv.4	展示会などで自ら一次情報を収集しているレベル	1
Lv.3	ニュースなどの二次情報を見て、自動運転の特性/機能について自らの言葉で語れるレベル	2
Lv.2	ニュースなどの二次情報を見て、なんとなく知っているレベル	3
Lv.1	全く知らない	0

図 4 自動運転に対する知識レベルの定義

(7) KGI/KPI

表 3 KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値									
定性評価	1	路車協調システムを監視員が利用することを想定し、機能・運用性の観点から課題と活用できるシーンを抽出する。									
	2	交通参加者を対象とした、電光掲示板による注意喚起や離れた場所の交通情報の伝達に対する受容性の高さの確認、および課題を抽出する。									
定量評価	3	特定自動運行保安員による常時監視の負担軽減に資するソリューションとして路車協調システムへの要求性能として、画角から消えるまでの検知率を評価することとし、車両検知率（適合率 95％）、歩行者検知率（適合率 90％）を設定する。 上記の評価値の他に、1 フレームごとの評価として、車両、歩行者の検知率について、以下の値を満たすこととする。 <table><tr><td></td><td>車両</td><td>歩行者</td></tr><tr><td>適合率</td><td>92%</td><td>75%</td></tr><tr><td>再現率</td><td>85%</td><td>70%</td></tr></table>		車両	歩行者	適合率	92%	75%	再現率	85%	70%
		車両	歩行者								
	適合率	92%	75%								
	再現率	85%	70%								
	4	映像要件が以下を満たすこと。歩行者や車両として監視者が目視で認識可能であること、ナンバープレートを OCR で読み取ることを想定して設定した。 分解能：1920 × 1080 pixels 以上 フレームレート：9fps 以上 遅延：500msec 以下									
5	クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合がないこと										
6	AI カメラによる運用保守管理業務に要する工数削減効果が 50%以上 保守用灯具の在庫数削減が 30%以上										

1) 路車協調システムの機能・運用性の主観評価

路車協調システムを自動運転バスの監視員が活用することを想定し、以下の機能・運用性評価を行う。

表 4 機能・運用性評価

機能・運用性評価	調査項目	調査内容
A 機能評価 監視員向けの路車協調システムの使用に関する評価	A1 センシング機能	センシング機能の検知精度に対する主観的評価、および検知すべき対象に関する調査
	A2. 通知機能	通知方法・通知の量に関する適切性に関する調査
	A3. 死角監視におけるモニタリング機能	カメラによって得られる情報の適切性に関する調査
B 運用性評価 路車協調システムを活用できる利用シーンの調査	B1. 事故の未然防止	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点の死角にいる飛び出しの可能性がある自転車や子供の存在を道路灯で検知し、監視員は自動運転バスに徐行の指示を出す。
	B2. 停止後の事後対応	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行中に何らかの原因により停止した場合、監視員は道路灯による映像から周囲の安全を確認し、走行再開の指示を出す。
	B3. 運行管理	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点内で事故が発生し、故障車が停車している状況を道路灯で検知し、監視員が状況確認後自動運転バスに迂回の指示を出す。

2) 電光掲示板の交通参加者への通知に関する評価

一般車両のドライバーや歩行者が電光掲示板に気付いたか、また、気づいた場合は、どのような距離感でそれをみて自動運転バスの存在に気が付くことが出来たか、どのような行動につながったのか等を、インタビューし、電光掲示板による注意喚起や、離れた場所の交通情報の伝達に対する受容性の高さの確認、および課題を抽出する。

3) AI カメラによる車両検知率/歩行者検知率

適合率については、AI カメラが車両/歩行者と予測した中で、実際に車両/歩行者だった割合を測定する。再現率については、実際に車両/歩行者だった中で、エッジ AI が車両/歩行者と予測で

きた割合を測定する。目標値については、令和5年度地域デジタル基盤活用推進事業における当該項目の検証結果を踏まえて設定した。

4) 分解能、フレームレート、遅延

目標値については、令和5年度地域デジタル基盤活用推進事業における当該項目の検証結果を踏まえて目標値を設定した。遅延は下図のエッジ AI カメラとモニタ用 PC の区間の遅延を計測する。

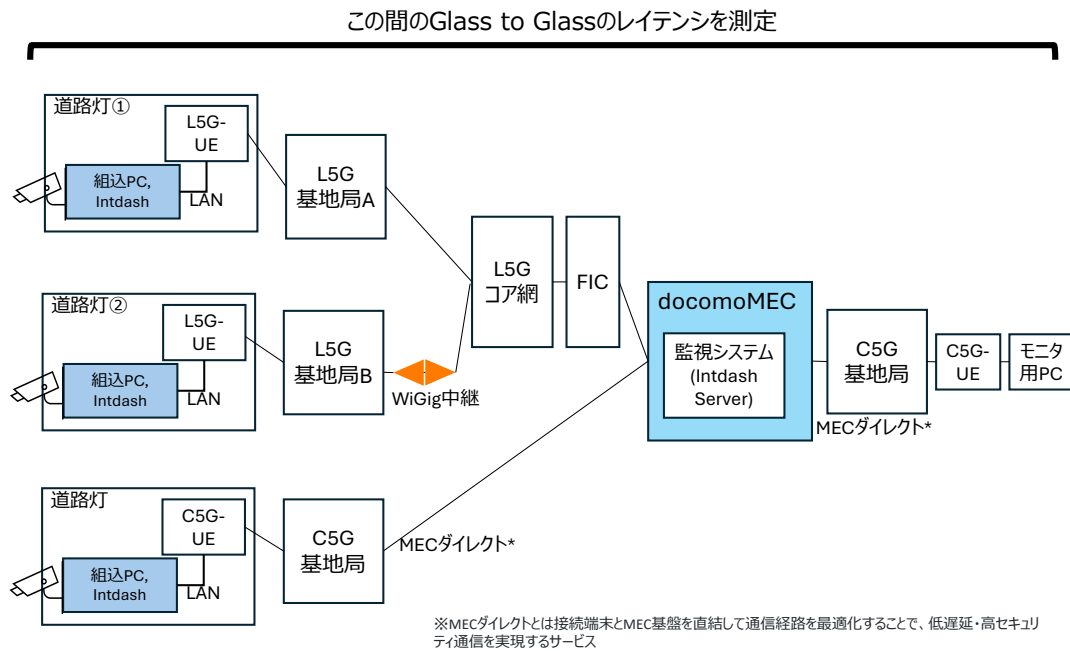


図 5 AI カメラ範囲通信システム構成

5) クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合

セキュリティ対策の有効性を確認するために設定した。デバイス側とネットワーク経由先 (ThingsCloud/ローカル端末) の双方で取得している期間のデータを評価対象とする。

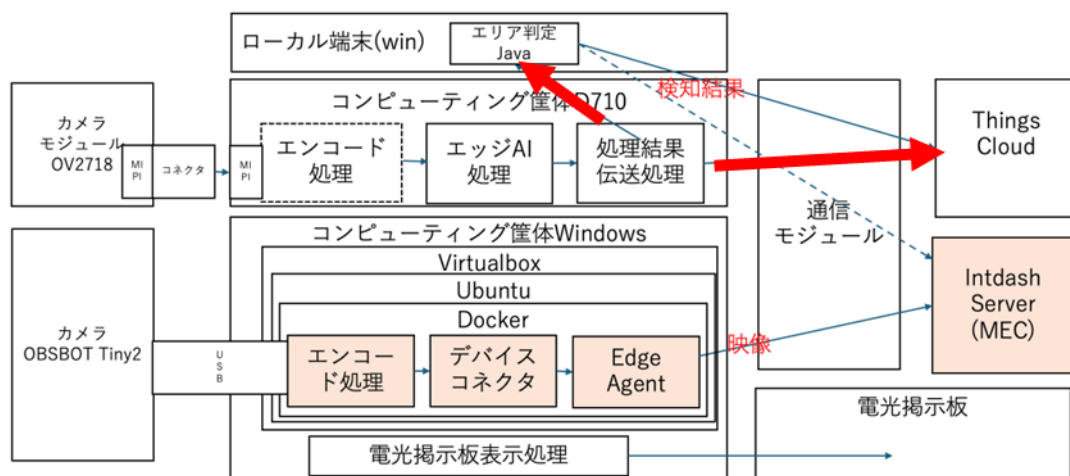


図 6 通信経路

また、閉域網が構築できていること確認する。具体的にはUTMでインターネット向きの通信が全て遮断されていることをログで確認する。

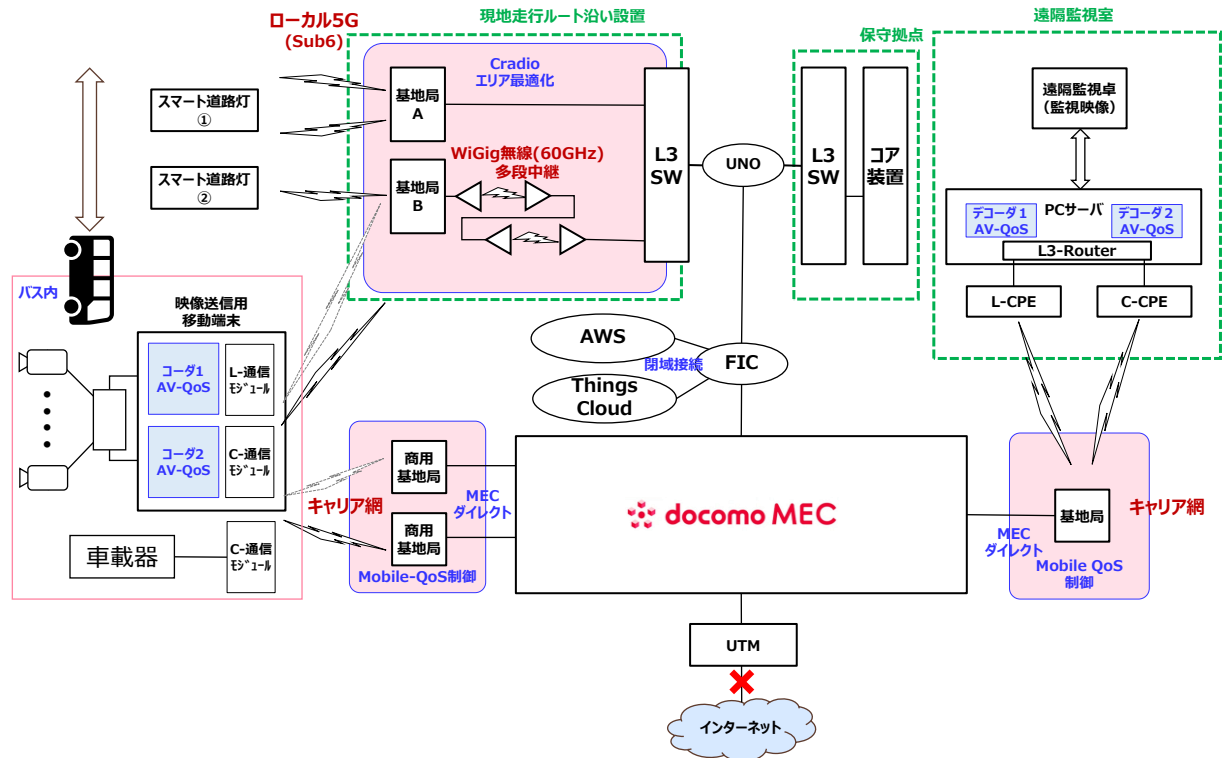


図 7 システム構成図

6) AI カメラによる運用保守管理業務に要する工数削減、保守用灯具の在庫数削減

AI カメラの死活監視機能、及びジャイロセンサによる傾き検知機能を活用すれば、管理担当者の業務の負担や保守用灯具の在庫数の軽減が見込まれるため設定した。

4.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

4.4 明瞭な映像・音声による常時モニタリングを実現する自動運転用軽量映像伝送システムの検証

4.4.1 QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証の概要

明瞭な映像・音声による常時モニタリングを実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証の具体的な実証手法として、「QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証」に取り組んだ。以下に同検証の概要を述べる。

(1) 目的

QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上：車両運行時に周辺状況（建物や電波状況など）の変化により刻々と変化する通信環境においても自動運転システムのモニタリングを成立させる必要がある。そこで、基地局間と移動端末間において所望の通信速度が得られるようネットワークレイヤでの優先制御を行う Mobile-QoS とアプリケーションレイヤでの QoS を確保する技術(AV-QoS)を組み合わせた技術（本報告書において、単に QoS と記載する場合は、当該組み合わせ技術を表す）を適用した高品質映像伝送システムを自動運転システムのモニタリングに用い、モニタリングの観点から映像品質が安定的に実現できるかを検証する。

(2) 実施内容

モニタリングシステムで伝送後の映像について、定性・定量の両観点から、自動運転バスの運行の課題となる大きな乱れがないことを確認する。また、自動運転バスの運行を実現するには、電波受信状況が悪い中でも、大きな映像の乱れがないことが求められるため、電波受信状況が低下している状況下における評価も実施する。また、「AI 画像解析の実現に必要な通信システム条件の検証」および「遅延時間の測定」を行う。さらに、通信環境が弱い場所でのシステム動作や映像を検証する。

なお、本節では、これらの検証における具体的な実施内容として「開発・評価項目」及び「KGI/KPI」を、4.4.2「映像伝送システムに関する検証」、4.4.3「通信システムに関する検証」に分けてそれぞれ記載する。

(3) 利用技術

自動運転システムにおけるリアルタイムモニタリング機能の維持・向上のため、無線通信システムを用いた大容量通信と低遅延通信の実現が不可欠であり、また、移動する車両から伝送されてくるカメラ監視映像の品質を適切に維持するため、本実証では以下の 5 つの通信技術を活用する。

- ①5G 技術(ローカル 5G/キャリア 5G)
- ②WiGig 技術
- ③AV-QoS 技術

④Mobile-QoS

⑤MEC

それぞれの通信技術を選択した理由を述べる。

① 5G 技術(ローカル 5G/キャリア 5G)

ローカル 5G (ローカル 5G) は、移動通信事業者が展開するキャリア 5G とは別に、地域や各種産業における個別の要求・需要に応じて企業や自治体などが所有または管理する土地や建物に自ら構築する 5G ネットワークであるが、そのシステムとしての主要な特長を以下に挙げる。

- ・ キャリア 5G の既存エリアやエリア拡大状況とは関係なく、必要な場所、タイミングで 5G ネットワークを構築可能である。
- ・ ネットワークの用途に応じて必要な通信性能を設定・カスタマイズ可能であり、上りのトラフィック需要にも柔軟に対応できる。
- ・ 他のネットワークにおける通信障害や災害などの影響を受けにくく、通信サービスの継続性を得やすい。
- ・ 無線 LAN などのアンライセンスバンドを使用する無線アクセス手段と比較し、専用のライセンスバンドを無線局免許に基づいて使用することで干渉問題を極力回避した安定した通信が可能である。

以上のような特長を有するローカル 5G を自動運転システムにおいて活用することは、全国のような環境でサービスされることが想定される自動運転バスにおいて、より安定かつ高品質なモニタリング映像の無線伝送を可能とすることを通して安全かつスムーズな運行を実現することが可能である。

② WiGig 技術

WiGig (Wireless Gigabit) は、60 GHz 帯 (ミリ波帯⁵) を使用する IEEE 802.11ad 規格ベースの無線 LAN であり、高速・大容量のデータ通信が可能である。本実証で使用する WiGig 装置は、ビームフォーミング機能を有しており、移動する端末をリアルタイムに追従する。なお、WiGig は、いわゆるアンライセンスバンドを使用しており、無線局免許の取得が不要である。

③ AV-QoS 技術

想定するシステムにおいて、自動運転車両の運行中に映像乱れや映像の停止のない滑らかな映像伝送が求められる。車両の周辺状況 (建物や電波状況など) は常に変化し、これにより利用可能なネットワーク帯域も大きく変動する。AV-QoS 技術による帯域推定と伝送レート制御を通じ、これらの変動環境でも滑らかな映像伝送を可能にする。

AV-QoS 技術は送信および受信間の遅延時間を常に監視し、このデータを基に最適な映像レートを推測算出することで、解像度や圧縮率等の調整を行いながら、滑らかな映像伝送を実現している。

⁵ ミリ波帯：30 GHz～300 GHz の周波数帯であり、EHF (Extremely High Frequency) 帯とも呼称され、1 GHz を超える広帯域の無線伝送が可能である。なお、屋外等に展開するシステムへの導入にあたっては、必要な伝送距離を確保するため、高い周波数で大きくなる電波伝搬損失を補償する技術の適用が不可欠である。

この技術の有効性は、総務省令和 4 年度課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証【端末システム試作事業】「移動ロボット等での利活用を想定したエンコーダ一体型ルータ端末の試作」、および総務省令和 5 年度地域デジタル基盤活用推進事業「土地利用型農業におけるローカル 5G 等無線技術を用いた自動走行トラクター実装モデルの高度化」への参画と、そこでの実証・検証によって裏付けられている。

令和 4 年度の検証では、自動運転車両のモニタリングに必要とされる 24 時間連続の安定した通信が可能であることと、FullHD (Full High Definition) 30fps (frame per second) の画像伝送に対する通信影響を排除した有線環境の条件下で映像エンコーダと映像デコーダ間の遅延時間 150ms 以下の目標を達成した。

令和 5 年度では、自動運転トラクターや自動運転車両の移動体から高精細映像をローカル 5G、キャリアネットワーク、BWA 等を介してセンター側へ伝送し、映像監視の有用性を検証した実証で、長時間利用における安定稼働、映像伝送中の通信品質の劣化や通信断の未発生、400ms 以下の遅延時間を含む複数の目標を達成した。

これらの検証結果を踏まえ、AV-QoS 技術を適用することで、新たにアプリケーションでネットワーク帯域に即したパケットの伝送を行い、本検証に求められる特に低遅延化を実現する上で極めて有効である。

④ Mobile-QoS

自動運転システムが利用するモバイルネットワークのうち、一般ユーザと電波リソースを共有するキャリア 5G においても自動運転車両の運行中に映像乱れや停止のない滑らかな映像伝送が求められる。

そのため自動運転制御に用いる通信など一般的に優先されるべき通信については一定の混雑状況下においても優先的に無線リソースを割り当て、通信品質を安定的に維持することが肝要だと考えられる。

本技術は sim プロファイルを用いてコアネットワーク側でユーザ認証を行っており、優先的なリソース割り当て機能を sim 単位で提供できる。

上記より本実証において、キャリア 5G における映像伝送をより安定的かつ一定の品質で実現するために本通信技術を採用する。

⑤ MEC

自動運転制御において、通信の安定性とセキュリティ脅威の排除による信頼性およびリアルタイム遠隔制御を実現する低遅延性を求められるため、通信キャリア網内という完全閉域で外部脅威を受けないかつ公共ネットワークの揺らぎや冗長な物理的通信経路の影響を受けないことから、MEC が適していると考えられる。

本実証では、ネットワーク観点として通信経路として MEC を活用するが、将来的にはアプリケーション観点からも MEC 上にサーバを構築することで、完全閉域による高セキュリティなネットワーク環境の構築を見据える。また、MEC 上のサーバへ自動運転車両やスマート道路灯で処理しているシステムを移行することで、広範囲で稼働する路車協調型自動運転環境の実現を見据える。上記のことから、本実証において、MEC を採用する。

(4) 必要性・緊急性・新規性

必要性：将来的には、人間が判断する部分より AI が判断する部分が増えてくることが想定される。そのためには高品質な映像伝送が必要となるが、そのままではデータ量が膨大になってしまうため、軽量化や伝送の効率化が重要となる。

緊急性：「人手不足」という課題は、早急に解決すべき課題のため、映像伝送システムの軽量化をすることで、AI 画像解析や複数台数や離れた拠点での監視等で、業務効率化を早期に進めていく必要がある。とりわけ AI 画像解析に関しては、バス運転者の不足やいわゆる「2024 年問題」などから、効率的にバス事業を運営するための施策として自動運転バスの導入が急務であるところ、そこでは複数台のバス車両を一名の監視員で管理するモニタリングシステムが効率化のためには必要となり、一名の監視員で複数台車両の監視を行うには「AI による危険検知」と「人間による判断」を合わせたシステム構築に必要な技術の確立が急務である。

新規性：ローカル 5G とキャリア 5G の切り替え、WiGig によるローカル 5G エリア拡張、Mobile-QoS、AV-QoS、MEC を重ね合わせた映像伝送の活用というのは事例がない（コンソーシアム調べ）ため、本実証での活用は新規性があると考えている。

(5) 検証条件

映像伝送システムにおける AV-QoS 技術を搭載した映像伝送ルータを自動運転バスへ搭載し、監視室へリアルタイム映像伝送を行う。自動運転バスは本実証環境のローカル 5G とキャリア 5G ネットワークエリアを走行し、映像伝送の品質を確認するため、次のデータを取得する。

- ① 伝送前/伝送後の映像
- ② 伝送時の GPS 情報と電波受信感度
- ③ 伝送時刻と伝送データ情報（伝送レートや遅延時間等）

最小伝送レートを特定するため、解像度 FullHD、30fps の映像伝送を行い、圧縮率や最大伝送レート設定などを行い、滑らかな映像伝送が可能な伝送レートを特定する。

映像伝送中におけるネットワーク切断の影響を検証すべく、その際のシステム動作や映像復帰に問題が無いかを確認する。

4.4.2 「映像伝送システムに関する検証」の実施内容

QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証のうち、「映像伝送システムに関する検証」についての「開発・評価項目」及び「KGI/KPI」は以下の通り設定した。

(1) 開発・評価項目

表 5 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	バス運行監視員の視認の支障となる映像の乱れ状況の評価

2	電波受信感度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価
---	---------------------------

1) バス運行監視員の視認の支障となる映像の乱れ状況の評価

Mobile-QoS 技術や AV-QoS 技術などの複数の通信・映像伝送パターンを用いて監視室へリアルタイム映像伝送を行い、自動運転バス監視員の視認により、伝送後の映像品質に対して運行の課題となる大きな支障の有無について、主観評価による調査を実施する。

具体的には、「映像の乱れ」、「映像の確認のしやすさ」、「監視への支障」、「総合評価」の調査項目に対して、監視員の主観評価による調査を実施する。

2) 電波受信感度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価

自動運転バス走行中の GPS データ、電波受信強度データを取得。同時に伝送映像の録画、遅延時間、スループットデータを取得した上で、GPS データと電波受信強度データ、遅延時間、スループットの紐づけを行った。GPS データと電波受信強度データ、遅延時間、スループットの各データから、「電波受信強度の悪い場所の特定」を行い、リソース利用率やアクティブユーザ数の基地局データから類推した「混雑時間帯と推測される日時」において、「電波受信強度の悪い場所」を走行した際の伝送後映像の録画データを確認し、映像乱れの状況を確認することとした。

(2) KGI/KPI

表 6 KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	伝送後の映像について、監視員の視認による監視に課題となる大きな映像乱れなどがないことを確認する。

1) 伝送後の映像について、監視室の監視員の視認による監視に課題となる大きな映像乱れなどがないことを確認する。

定量的な数値だけでは十分に表せない遠隔監視装置の利用者が主観的に感じる利用感を評価することが、社会実装に向けた重要な視点であるため、伝送前/伝送後の映像を取得し、伝送後の映像についてバス乗務員等の視認により運行に課題となる大きな映像乱れなどがないことを確認することを KGI/KPI（定性評価）項目と設定した。

4.4.3 「通信システムに関する検証」の実施内容

QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証のうち、「通信システムに関する検証」についての「開発・評価項目」及び「KGI/KPI」は以下の通り設定した。

(1) 開発・評価項目

表 7 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	映像伝送遅延時間の評価
2	滑らかな映像伝送が可能な最低伝送レートについての評価
3	Cradio を活用した置局配置、ハンドオーバ等に関する評価
4	WiGig 中継システムの適用効果、設置性等に関する評価

1) 映像伝送遅延時間の評価

映像伝送時の伝送時刻と伝送データ情報（伝送レートや遅延時間等）を確認する。特に遅延時間は人の映像制御に関する応答時間が 180ms～200ms（視覚光刺激の応答時間）との記載（反応時間研究の歴史と現状⁶）がある。また、今回のシステムの通信経路上の遅延の影響も踏まえ End to End で 400ms 以内となっていることを確認することとした。

2) 滑らかな映像伝送が可能な最低伝送レートについての評価

解像度 FullHD、フレームレート 30fps 以上（設定理由は後述）で画像解析が可能な滑らかな映像伝送が可能な伝送レートを特定するため、自動運転バス走行中の映像を録画し、人や車が映っている時間帯を切り抜き、この映像について伝送レートの最大値を 0.5Mbps, 1Mbps, 5Mbps と設定する映像伝送をそれぞれ行い、その映像の録画を行う。その上で、当該録画映像について yolov7 をベースにした画像解析を行い、どこまでのレートであれば人や車が解析できるかを確認することとした。

⁶ 出展：大山 正「反応時間研究の歴史と現状」（『人間工学』Vol.21, No.2(1985 年 4 月発行)）

3) Cradio を活用した置局配置、ハンドオーバー等に関する評価

ローカル 5G において、基地局の設置場所やアンテナの方向等を周囲の電波伝搬環境を考慮して最適化する技術（本報告書において「Cradio」と呼ぶ）を適用し、本実証におけるローカル 5G 基地局の最適な設置場所や、ローカル 5G とキャリア 5G の最適なハンドオーバーポイント（システム間の切り替え位置）を実証に先立ち導き出し、その効果を評価することとした。

なお、Cradio 自体は研究中の技術であり、基地局の最適設置場所や最適なハンドオーバーポイントの導出を、新しい技術である無線品質予測技術を活用して自動計算することが可能であるが、本実証では、これらの計算結果をシステムへ手動で設定（静的制御に相当）を行うこととした。その上で、ハンドオーバーポイントの今回実証における設定に関する評価としては、ローカル 5G とキャリア網間の通信経路切り替えの適切な位置決定に要する工数が削減されたことおよび置局配置の精度向上を確認した。

4) WiGig 中継システムの適用効果、設置性等に関する評価

本実証において活用する WiGig 中継システムは、ローカル 5G 基地局のエリアを、光回線の設置状況に依らず柔軟に展開可能とした上で、所望の通信性能を安定して再現可能であることが重要である。そこで、WiGig 中継システムに着目した検証として、「適用効果の評価」及び「設置性に関する評価」を実施することとした。

具体的には、「適用効果の評価」において、本実証における通信ネットワーク構成は、既存のキャリア 5G エリアの一部にローカル 5G エリアをオーバーレイ展開したハイブリッド構成（冗長構成）を採用するが、WiGig 中継システムの適用を前提とするローカル 5G 基地局において同システムが適用できない場合、すなわち、本来ローカル 5G エリアを展開すべきところがキャリア 5G エリアになった場合を仮定し、平均データ伝送スループットを評価指標として同一エリアにおけるキャリア 5G／ローカル 5G を比較評価することとした。また、その際、キャリア 5G については、収容される端末数（ユーザ数）の時間変化に伴うスループットの変動についても考慮する。

また、「設置性に関する評価」では、本実証で使用する WiGig 中継システムの設置において、推奨されている設置手順に従って対向する通信モジュール間の方向合わせを行った上で、通信リンクを確立する際、ビームフォーミングされた電波のビーム方向が適切に自動調整され、所望の通信速度を再現できるかを評価することとした。また、その際、設置完了後、一定時間、動作させた状態における時間経過に伴う通信速度の変動についても考慮する。

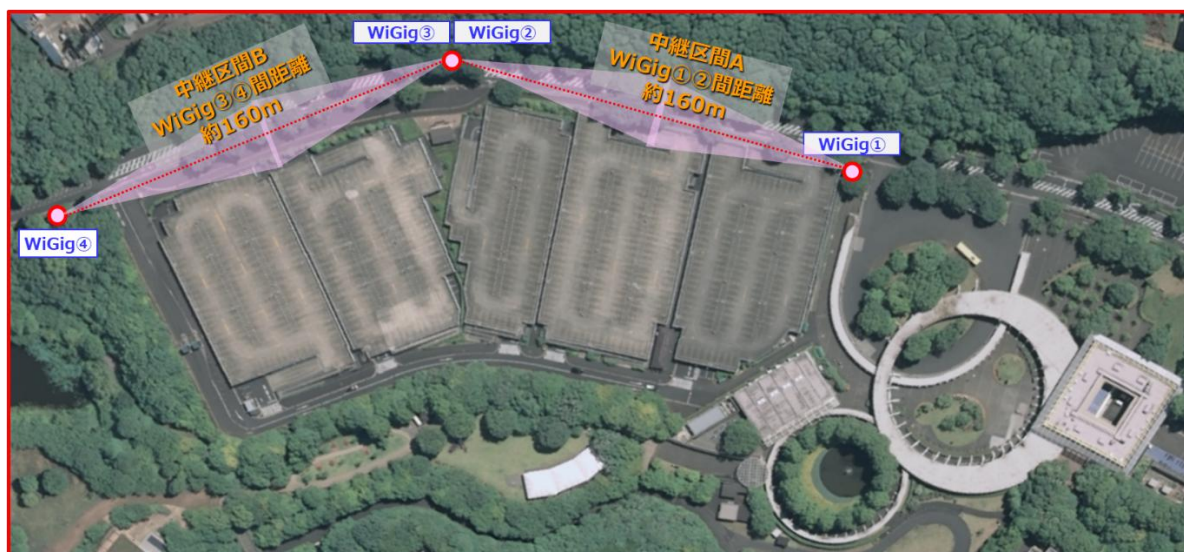


図 8 WiGig 中継システム無線伝送イメージ

(2) KGI/KPI

表 8 KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	映像伝送遅延時間 400ms 以内
	2	エンコード設定調整を行い、本システムにおける FullHD30fps における最低伝送レートを特定する

1) 映像伝送遅延時間 400ms 以内

監視対象である自動運転バスの視点とその視点をカメラで撮像し遠隔監視装置へ伝送した後の映像の時間差分(映像伝送遅延)は、モニタリングの容易性と高い相関があるため、遠隔監視装置の社会実装に向けて検証する指標として「映像伝送遅延」が妥当であると考えた。本実証では、「映像伝送遅延時間 400ms 以内」を KGI/KPI (定量評価) 項目と設定した。

また、遅延の定量評価のための測定方法については、映像伝送機器(エンコーダ/デコーダ)にて具備している遅延測定機能による実測値と、カメラモニターを直結した評価系での映像処理遅延時間の実測値から算出することとした。

※エンコード/デコード時間 102ms 程度 (参考値、引用元：R5 年度 地域デジタル基盤活用推進事業「土地利用型農業におけるローカル 5G 等無線技術を用いた自動走行トラクター実装モデルの高度化」)

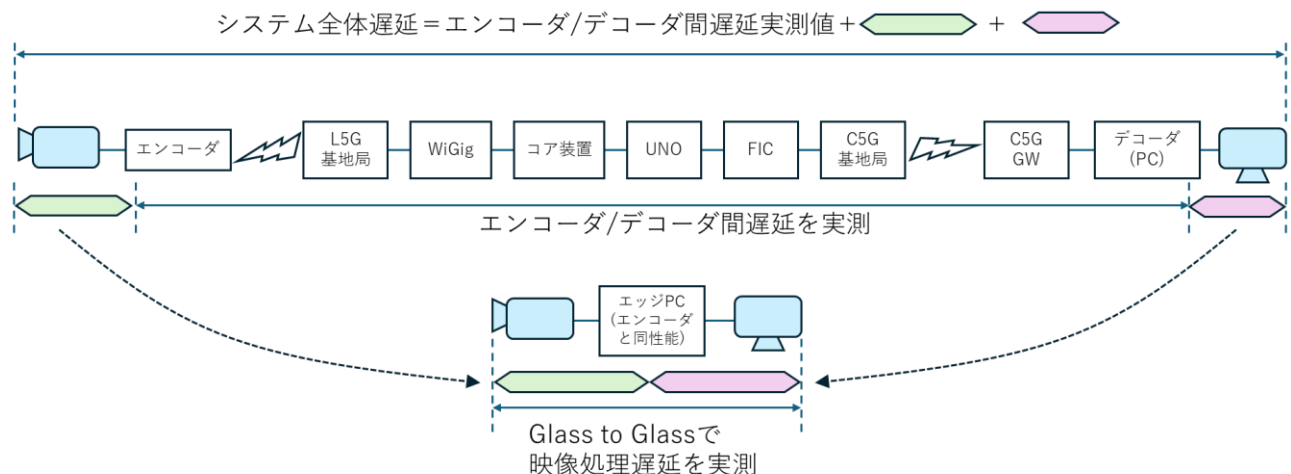


図 9 測定のイメージ

なお、本実証では、令和 5 年度地域デジタル基盤活用推進事業における当該項目の検証で得た結果を踏まえて該当目標値を設定した。

2) エンコード設定調整を行い、本システムにおける FullHD30fps における最低伝送レートの特定

将来のモニタリングにおいては AI 解析との連携が不可欠である。現在社会実装されている AI 顔認識等で求められる入力映像の解像度は FullHD 画質が主流となっており、AI システムと連携するカメラとして、FullHD 対応のスペックを有するカメラ端末が、既に複数メーカーから販売されていることが確認できる^{7,8}。これらを踏まえ、解像度 FullHD、フレームレート 30fps の映像伝送を可能にすることが、社会実装に近づくこととなると考えられる。無線伝送される映像の品質は、通信環境の違いによる影響を多分に受けるため、通信容量が確保しづらい山間部等のエリアにおいて所望の品質性能を満たすためには、通信システムとして必要な容量を評価することが検証方法として技術的に妥当であると考えた。本実証では、「本システムにおける解像度 FullHD、フレームレート 30fps における最低伝送レートの特定」を KGI/KPI（定量評価）項目と設定した。

なお、本実証では、令和 5 年度地域デジタル基盤活用推進事業における当該項目の検証で得た結果を踏まえて該当目標値を設定した。

4.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

⁷ パナソニックコネクト、「AI プロセッサを搭載したネットワークカメラ」, <https://connect.panasonic.com/jp-ja/products-services/security/networkcamera/ai>, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

⁸ ソラコム社、「高解像度 屋外型 AI カメラ」, https://soracom.jp/support_partners/certified_device/si7222tx2cu30/, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

4.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

4.7 レベル 4 の社会実装に向けた検討

4.7.1 運用検証

(1) システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価（特に監視員の軽減負担等）

本実証においては、自動運転バスのカメラ映像の伝送品質と AI カメラのセンシングデータ・画像を可視化するダッシュボードの運用性について検証することとした。

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（定性評価と遅延データの比較）】

カメラ映像伝送システムの全体構成は、「遠隔用カメラブロック～映像処理ブロック～通信システム遠隔 PC～評価用ディスプレイ」である。通信システムの違いによる影響を検証するため以下の 4 つの通信システムにて、映像伝送における定性評価と遅延データの比較を行い、各通信技術がモニタリングにどのような影響をもたらすか検証を行うこととした。

表 9 システム名称と通信システム構成

システム名称	通信システム構成
AV-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+AV-QoS
Mobile-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+Mobile-QoS
Mobile-QoS、AV-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+AV-QoS+Mobile-QoS
ローカル 5G/キャリア通信併用システム	docomoMEC 閉域網/ローカル 5G 併用+AV-QoS

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（システム遅延時間及び解像度）】

自動運転バスのカメラ映像の伝送品質について、カメラで対象を捉えてから最終出力先の評価ディスプレイに表示されるまでのシステム遅延時間と解像度を以下の方法で検証することとした。

表 10 シスム遅延時間及び解像度の検証方法

検証項目	検証方法
システム遅延時間	・ 車両に取り付けたカメラの前で LED ライト明滅させ、遠隔監視装置の映像とライトが同時に映るように撮影し、End to End の遅延時間を計測。Mobile-QoS On/Off の 2 系統同時に映像伝送。使用帯域幅を揃えた条件（≒混雑時）と揃えていない条件（≒非混雑時）、ローカル 5G の計 5 条件での計測を実施済。4 回計測した平均値を算出。

	動画閲覧用のアプリケーションを用いて、コマ送りをしながら遅延時間を計測。
解像度	- 実証期間中に自動運転バス走行した際の映像を画面録画。システム遅延時間と同様の条件での画面録画を実施。 - 関係者間での画面録画を視聴した際の主観評価を実施。

【AI カメラのセンシングデータ・画像を可視化するダッシュボードの運用性】

AI カメラのセンシングデータ及び画像をダッシュボードで閲覧できる環境を監視室に用意し、以下の方法で運用性を検証する。

表 11 運用性の検証方法

検証項目	検証方法
運用性	- AI カメラから通知されるアラートに対して監視員がアラート内容の確認及び必要に応じて自動運転バス内の補助員への連絡を問題なく実施できたか確認 - 複数のシナリオを設定し、シナリオに応じて、監視員が問題なく操作できたかをユーザテスト形式で確認

(2) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直しなど、地域交通の持続性への寄与度

本実証を通じて路車協調型インフラとしての AI カメラの有用性を検証することで以下の観点において地域交通の持続性に寄与することを目的とする。

- 人員削減：エッジ AI カメラを搭載した AI カメラを活用することで、自動運転バスの死角で検知した車両と人の情報のみ監視室から状況を確認可能とし恒常的に広範囲な人員張りつけをする必要がなくなる。
- 運行経路の見直し：AI カメラから取得されるデータを利活用することで、自動運転バスにとって危険な箇所を抽出し運行経路計画の見直しや監視人員配置の見直しにも活かすことができる。また将来的には AI カメラ周辺の交通情報や路駐等の複雑な道路情報を自動運転者と連携させることで状況に応じた柔軟な目的地への運行経路をリアルタイムに実現しより地域交通の持続性の寄与に繋げていく。

(3) データの処理・管理に係る運用などのセキュリティ対策

本実証においては、2つのユースケースについて検証を行うが、それぞれ以下のセキュリティ対策を目的として、当該対策の導入による運用性向上に係る目標、検証方法を設定した。

【AI を活用した周辺環境情報の見える化（ユースケース 2）】

- セキュリティ対策

- AI カメラを通じて取得する路車協調データ（測定データ、カメラ映像等）は、鍵管理されたネットワークシステム上やPCでのみアクセス可能な環境とする
- ・ 当該対策の導入による運用性向上に係る目標
 - AI カメラで取得した路車協調データの改ざん件数がゼロ
- ・ 検証方法
 - AI の検知結果をネットに上げる前、後を比較することで、改ざんの有無を検証する

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

- ・ セキュリティ対策
 - 本ユースケースの実証に向けて用意するネットワークでは、通信品質の向上を可能とする方式として、既存のキャリア 5G に加えてローカル 5G を組み合わせて無線通信路を冗長構成（あるいはハイブリッド構成）とすることで、一方の通信路において著しく伝送品質の劣化が生じた場合、他方の通信路に切替えて伝送品質の回復または向上を図ることが可能となり、走行中の自動運転バスからの伝送映像を安定化できるようにしている。さらに、無線通信路と MEC を含めたネットワーク全体がインターネットを経由することのないクローズドネットワークとなっており、外部からの侵入を阻止するセキュアな環境の中で必要な情報伝送が行われている。
 - ここで、屋外に設置される小型化された基地局ユニットは、局舎（屋内）に設置されているネットワーク装置類に比べて、物理的にアクセスしやすい状態にあり、一般には想定し得ない特殊な手段を用いて不正なアクセスを試みるケースを完全には排除し切れない。しかしながら、本ネットワークにおいて採用されている通信路の冗長構成においては、万一特定の基地局が攻撃を受けた場合においても、例えば、基地局の不調状態を検知するしくみ（本セクションの④相当）からのアラートを用いることができれば、これを契機として、地理的に異なるロケーションにある他方の通信路の基地局へ切替えて映像伝送を継続することが可能になる。
- ・ 当該対策の導入による運用性向上に係る目標
 - 上述した基地局の異常状態を検知し、アラートを発出するしくみにおいては、その検知率（または見逃し率）や検知遅延などが評価指標になるとともに、当該アラートを契機として通信路切替え（基地局切替え）が速やかに実行できるかを評価することで、最終的な運用性を見極めることになるが、本実証では、複数システム間の連携動作である通信路の切替え部分に着目し、通信路切替（基地局切替）の失敗による映像途絶がゼロとなることをめざす。
- ・ 検証方法
 - アラートを模擬したイベントを契機とする基地局切替動作と、原理的に等価と考えられる自動運転バスの走行に伴って発生する基地局切替の成功率を評価することにより検証が可能である。

併せて、通信のセキュリティ性の向上を図る技術（MEC）を適用し、通信経路の正当性を評価すべく、具体的には、UTM の通信ログを確認し、インターネットとの通信が行われていないことを確認することとした。

(4) 通信システム（路車協調システムや端末を含む。）の維持管理・保守

本実証においては、2つのユースケースについて検証を行うが、それぞれ以下の維持管理・保守性の向上に係る対策の導入を目的として、当該対策の導入による運用性向上に係る目標、検証方法を設定した。

【AI を活用した周辺環境情報の見える化（ユースケース 2）】

- ・ 維持管理・保守性の向上に係る対策
 - AI カメラの検知機能、及びジャイロセンサによる傾き検知機能を活用して、管理担当者の業務の工数削減を図る
- ・ 当該対策の導入による運用性向上に係る目標
 - 道路灯の運用保守管理業務に要する既存工数比削減効果 50%以上
 - 予防保全対応により、保守用灯具の在庫数削減（在庫最適化）による費用削減効果（削減コスト 30%）
- ・ 検証方法
 - 実証場所の道路灯管理担当者へのインタビューもしくは机上調査により年間の道路灯管理工数を算出し比較
 - 机上調査により道路灯の市場価格と補修想定費を比較実施

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

- ・ 維持管理・保守性の向上に係る対策
 - アラートを模擬したイベントを契機とする基地局切替動作と、原理的に等価と考えられる自動運転バスの走行に伴って発生する基地局切替の成功率を評価することにより検証が可能である。
- ・ 当該対策の導入による運用性向上に係る目標
 - 本実証における自動運転バス自走中におけるローカル 5G システムの通信サービス障害ゼロを目指して運用する
- ・ 検証方法
 - 日毎の実証終了時にログの確認を行い障害発生の有無を確認するとともに、障害発生の可能性を確認し、翌日以降の実証開始に向けて適切な対策を検討対応することで障害発生を抑制し、滞りない運用が行えたことを定性的に検証する

(5) モニタリングの監視台数の増加を実現する要件の検討

自動運転バスの社会実装・普及を現実的にするには、監視員：自動運転バスが 1:1 ではなく、監視員が多数のバスを監視できるようにする必要がある。モニタリングの将来のあるべき姿の策定（7.1 に記載）に向け、相鉄バスへのインタビューを通し、モニタリングの業務や監視者の要件などを整理する。なお、相鉄バスへのインタビューは、運行管理経験者、路線バス運転経験者の 4 名に行う。

(6) 自動運転バスに対する社会受容性の評価

自動運転バスの社会実装・普及のためには、消費者の理解と社会受容性の向上が求められる。本実証では、自動運転バスの試乗および技術に関する説明を通して、市民の自動運転バスに対する受容性が向上するの可否かを調査した。

10/1～4、7～8 の計 6 日間に試乗会に参加し乗車した方全員を対象に、Microsoft Forms を使用した計 16 問のアンケートを実施した。

アンケートでは、自動運転の安全性に対する意識等が乗車前後で変化したか、在住する街で走行しても良いと思うか等を調査した。

4.7.2 効果検証

(1) 本実証における自動運転率の評価

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

手動介入回数・運行停止時間を減らすことを目的として、自動運転車両～自動運転監視システム間のデータ連携を行う MQTTBroker に記録された通信のログから、運行状況や自動運転モードを集計し、自動運転率（運行距離のうち自動運転で走行した割合）を評価する。

(2) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、シェアリング等によるコスト低減化方策

自動運転実装におけるコスト低減を目的として、各ユースケースで下記の検証に取り組む

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

- ・ ローカル 5G 基地局を屋外に設置し、新たに使用を開始する際は、通常、コア装置との光ファイバ接続が必要となるが、本実証では、当該光ファイバ区間の一部に WiGig 方式（60 GHz 帯を使用）による無線中継を導入し、隣接する基地局を一つの光回線と接続・収容することで、基地局エントランスに必要な初期コストとランニングコストを低減し、かつ基地局設置位置の自由度を高められることで、本実証における自動運転バス向けの映像伝送サービスと、スマート道路灯向けの通信サービスの品質を同時に向上可能な基地局設置が可能となる

- ・ また、本実証において設定された自動運転バスの走行コースに対して、全行程をローカル 5G 基地局によるエリアのみでカバーするのではなく、キャリア 5G エリアとの組み合わせによりカバーすることでトータルのコストを低減することが可能になることから、通信品質（スループットや遅延等）の定量的な測定結果とともに、バス事業者による遠隔監視装置の使用感（主観評価）とコストを含めた総合評価についてヒアリング等を行い、複数無線アクセスの有効性を確かめる

5. 通信システムに関する構築

5.1 通信システムの全体像

本実証で用いる通信システムの設置場所とネットワーク構成図は以下の通り。

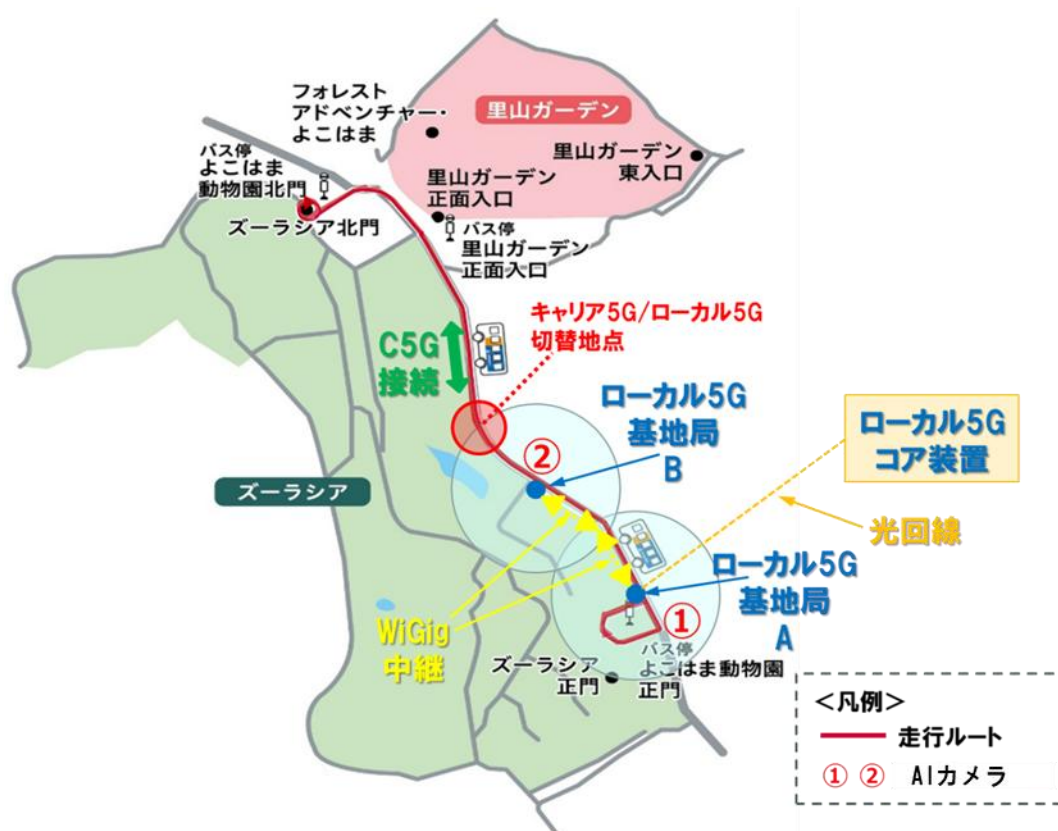


図 10 システム設置場所

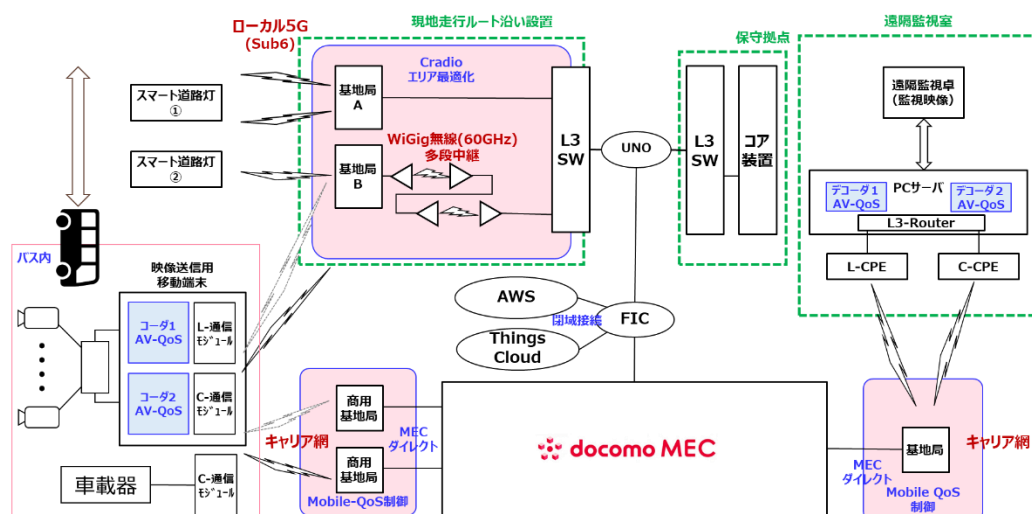


図 11 ネットワーク構成図

本実証では、上図に示す通り、走行ルート全体をキャリア網（LTE またはキャリア 5G）がカバーしているところ、これに重畳する形で、スマート道路灯とローカル 5G 基地局をよこはま動物園の正門付近と駐車場の北側出入口付近にそれぞれ設置した（正門付近の基地局を基地局 A、北側側出入口付近の基地局を基地局 B と呼ぶ）。正門側のバス停から切り替え地点まではローカル 5G による通信を行い、北門川へ向かう途中、切り替え地点ではローカル 5G からキャリア網へのハンドオーバーを実施した。遠隔監視装置は相鉄バスの旭営業所に設置し、AI カメラからの映像はローカル 5G を通して旭営業所まで伝送した。

【ネットワーク構成図における各システムの役割】

ローカル 5G：スマート道路灯の設置エリア等を中心にキャリア 5G の通信エリアを重畳又は補完

WiGig：コア装置からローカル 5G 基地局への光回線接続が困難な基地局における代替回線接続手段

QoS：AV-QoS を活用したエンコーダ一体型低遅延映像伝送のためと、Mobile-QoS を活用
映像伝送の通信速度の低下を抑止

キャリア 5G：走行コース上をカバー

MEC：車両で利用するデバイスにできるだけ近い NW にサーバを配置。

MEC の活用により、インターネット網に出ない、閉域ネットワーク構成とした。本方法ではほかのクラウドサービスの接続可否が発生し、閉域環境でのネットワーク構築スキルが必要となる。しかし、本方法には、社会実装時にサイバー攻撃を受けてはならない自動運転システムのセキュリティ確保という大きなメリットがある。また、量産が進むことで、ネットワーク維持費も効率化できるため、コスト面でも問題ない。

※本実証における MEC の具体的な活用について

監視室に、スマート道路灯出力用のモニタを設置し、監視員が、ThingsCloud（NTTCom 社のクラウドサービス）もしくは MEC 上に構築したシステム（利用ソフトウェア intdash）に専用アカウントでアクセスし、一般車や歩行者の通知および映像での確認を実施する。これにより、ThingsCloud からと MEC 上の intdash server に対してエッジ AI カメラの検知結果を送信する機能の開発が必要となるが、MEC 上での処理によりインターネット区間の通信の揺らぎの影響を受けない検証が可能になる。また、検知データ、映像のストリーミングを同一ウィンドウでの表示が可能になるため、実運用を想定した可視化できるようになる。さらに、技術上の難易度は低く、intdash を使用したデバイスセンタの双方向通信開発工数の削減が見込まれるため、MEC 活用前と比べると社会実装上の優位性も高い。

本実証では、ネットワーク観点として通信経路として MEC を活用するが、将来的にはアプリケーション観点からも MEC 上にサーバを構築することで、完全閉域による高セキュリティなネットワーク環境の構築を見据える。また、MEC 上のサーバへ自動運転車両やスマート道路灯で処理しているシステムを移行することで、広範囲で稼働する路車協調型自動運転環境の実現を見据える。

ローカル 5G（ローカル 5G）基地局及び WiGig 中継部分のネットワーク接続構成は下図の通りで、通常、基地局 A のようにコア装置と基地局の間は有線回線（光回線）を介して接続するのに対して、基地局 B では、基地局に近い光回線の一部の区間に WiGig を用いた無線回線を適用することで、柔軟に基地局設置位置を決定することができるとともに、光回線が敷設されていない地域などにおいても基地局設置が可能である。さらに本実証では、本来 2 つの基地局に対してコア装置からそれぞれ異なる光回線を用いて接続するところを、同図の下半分に示すように、レイヤ 3 スイッチを用いて 2 つの光回線の一つに統合し、光回線数を半減する形でコスト低減も実現している。

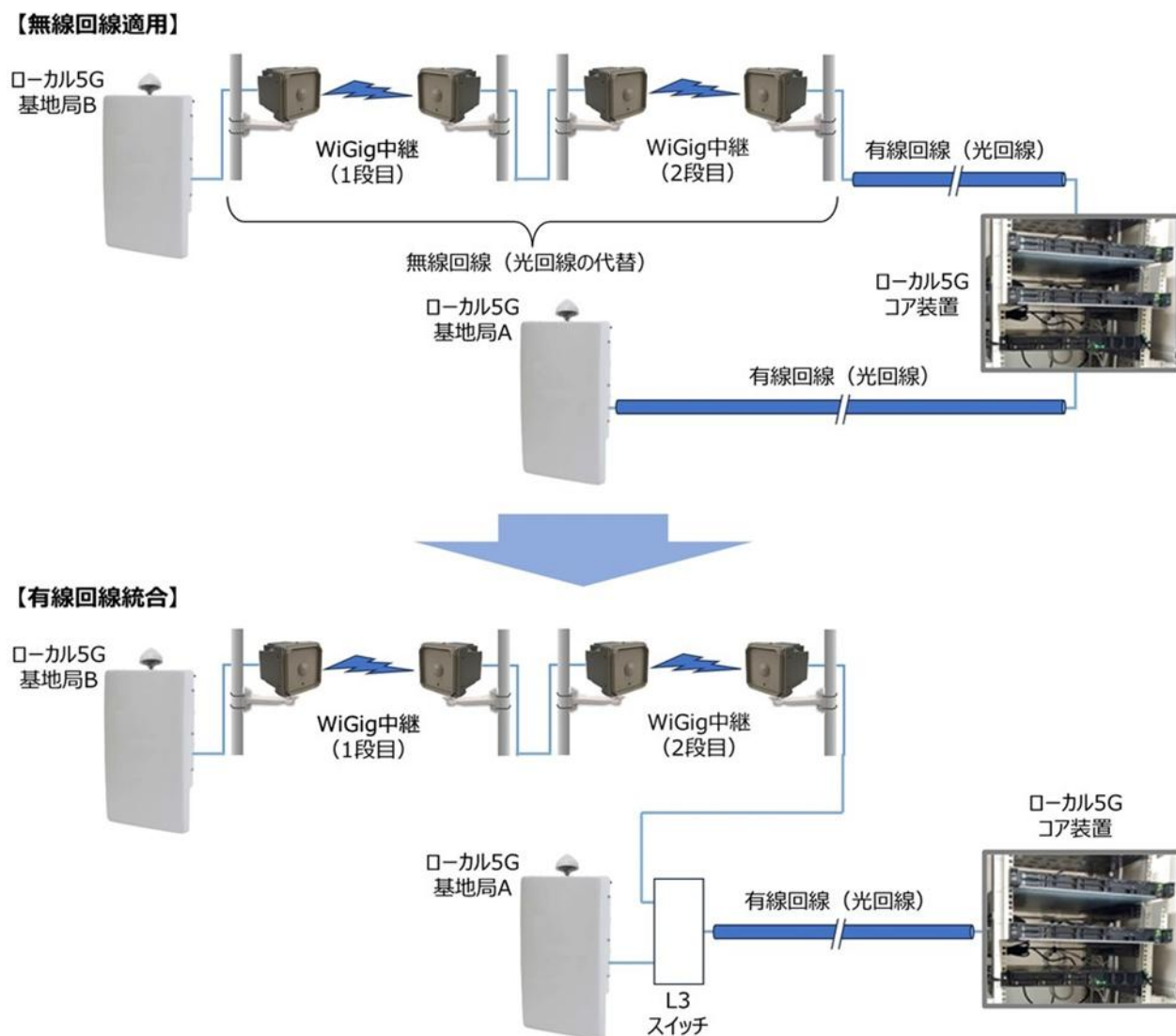


図 12 ローカル 5G、WiGig 構成図

なお、WiGig 中継システム（60GHz 帯）の屋外環境における使用については、同システムを用いた各種屋外中継実験（同システムの提供ベンダ等が実施）の実績から、通常の降雨および降雪の日においても、接続中の無線リンクが切断される現象や、中継データの伝送スループット落ち込むような現象はこれまで確認されておらず、実用上、問題ない動作が期待される。

また、エッジAI カメラの設置場所（想定）、設置理由、設置方法、数量、構成図は以下の通り。

表 12 スマート道路灯世知場所と設置方法

図中の 番号	設置場所	設置理由		設置方法	数量
①	正門前バス ロータリー の出入口	他の車両や歩行者の 往来が比較的多く、 自動運転バスの周囲 の状況を検知すると ともに、自動運転バ スの存在を他の車両 や歩行者に通知する 必要があるため。各 設置場所において、 特に注意すべき対象 は右欄に掲げるとお り。	ロータリー出入口付 近にいる車両 バス停に向かう歩行 者	既設の道路灯 具の灯体を交 換	1
②	一般車両駐 車場の出口		正門一般車両駐車場 から出てくる車両		1

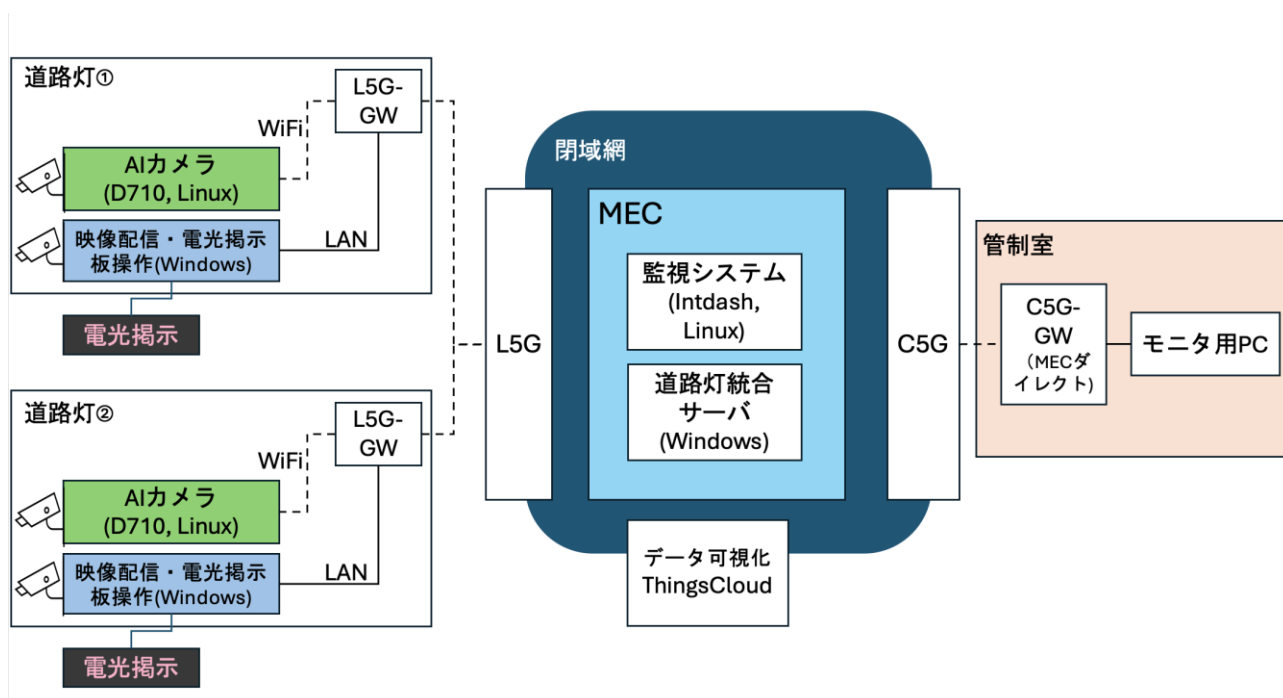


図 13 道路灯に設置したエッジAI カメラの構成図

5.2 使用機器・ソフトウェア一覧

5.2.1 データ取得に関する機器・ソフトウェア

表 13 データ取得に関する機器・ソフトウェア

機器・ソフトウェア名	台数	画質	フレームレート
AI カメラ (D710) *1	2	VGA(640×480)	2fps
Obsbot tiny2*2	2	4K/FHD/HD	15fps
STURDeCAM25*3	8	2.3Mp/FullHD/HD	60fps/65fps/120fps

以下は各設備の概要

*1：スマート道路灯の車両と歩行者検知用

*2：スマート道路灯のカメラストリーミング用

*3：遠隔監視装置用カメラ：バス設置用

5.2.2 データ通信に関する機器・ソフトウェア

表 14 データ通信に関する機器・ソフトウェア

機器・ソフトウェア名	サイズ	周波数	同期パターン	最大通信速度
ローカル 5G 基地局 (AirSpeed1900)*11	H496×W279×D131(mm)	N79 (4.8～4.9GHz／中心周波数 4.84998GHz)	同期、準同期	同期：DL 740Mbps, UL60Mbps 準同期：DL 410Mbps, UL 120Mbps
Compal Electronics/RAKU Plus*1	119×72×23.5 H×W×D(mm)	Sub6: n79 ミリ波: n257		
Wi-Fi STATION SH-52B*2	約 74 (H) ×約 108 (W) ×約 15.7 (D) mm	5G NR (sub6) :n78 / n79 4G LTE (FD-LTE) :B1 / B3 / B19 / B21 / B28 4G LTE (TD-LTE) :B42		5G：受信時最大 4.2Gbps／送信時最大 218Mbps 4G：受信時最大 1.7Gbps／送信時最大 131.3Mbps
Wi-Fi STATION SH-54C*3	約 84mm×約 157mm×約 16mm	5G NR (sub6) :n28 / n78 / n79 5G NR (ミリ波) :n257 4G LTE (FD-LTE) :B1 / B3 / B19 / B21 / B28 4G LTE (TD-LTE)		5G：受信時最大 4.9Gbps／送信時最大 1.1Gbps 4G：受信時最大 1.7Gbps／送信時最大 131.3Mbps

		:B42		
C-CPE 5G ゲートウェイ XC-WN930J-01*4	246×206×65.5 mm	sub6:n77,n78,n79 mmW:n257 4G:B1,B3,B8,B18, B19,B21,B42B39,B41		4G のみ : [下り]1.584 Gbps/[上 り]131Mbps 4G+5G(Sub6): [下り]3.313 Gbps [上り]218Mbps 4G+5G(mmW): [下り]3.975Gbps[上 り]483Mbps
基地局管理サー バ HPE DL360 Gen10*5	1U×434.6×707 mm	—		
5G コアネット ワークサーバ (UPF) HPE DL360 Gen10*6	1U×434.6×707 mm	—		
5G コアネット ワークサーバ (CP) HPE DL20 Gen10*7	1U×434×424 mm	—		
マネージメント スイッチ AT- SH230-28GT チ*8	44×341×231mm	—		
バックホールス イッチ AT-X550- 18XSQ*9	42.5×210×346 mm	—		
N6 スイッチ AT-X530- 28GTxm*10	44×441×323mm	—		
WiGig*12	ロングレンジタイプ : 70.5 × 70.5 × 99.4mm	57～64GHz		

	ショートレンジタイプ ： 70.5 × 70.5 × 70mm			
IoM 5G エッジ ゲートウェイ iR730B ^{*13}	24.8×125×77.9mm	LTE:B1,3,8,18,19,26,28, 39,41,42 5G FR1:n3,28,41,77,78,79		
RTX830 ^{*14}	43.5×220×160mm	-	-	最大 2.0Gbit/s

以下は各設備の概要

*1：スマート道路灯の無線通信装置

*2：自動運転車両の無線通信装置、遠隔監視装置データ通信装置、システム開発時の閉域アクセス用途

*3：遠隔監視装置データ受信装置、システム開発時の閉域アクセス用途

*4：遠隔監視装置データ受信装置

*5：ローカル 5G ネットワーク構築用

*6：ローカル 5G ネットワーク構築用

*7：ローカル 5G ネットワーク構築用

*8：ローカル 5G ネットワーク構築用

*9：ローカル 5G ネットワーク構築用

*10：ローカル 5G ネットワーク構築用

*11：ローカル 5G ネットワーク構築用

*12：ローカル 5G 基地局・コア装置間接続用ミリ波無線中継装置

*13：車両映像伝送用装置

*14：ローカル 5G 基地局ネットワークと WAN の相互接続用途

5.2.3 データ処理に関する機器・ソフトウェア

表 15 データ処理に関する機器・ソフトウェア

機器・ソフトウェア名	メモリ	CPU	GPU	OS
D710 ^{*1}	1GB DDR3L SDRAM	ARM Cortex-A7 Dual Core with Deep Learning Accelerator		Linux
AIR-101-S62A1 ^{*2}	SO-DIMM DDR3L 8GB	Intel Atom E3940 Quad Core SoC	Two Intel® Movidius™ Myriad™ X MA2485 (1 x VEGA-330-02A1 Built-in)	Win10 IoT LTSC 64bit w/ Edge AI Suite
GIGABYTE XE4-73JP614SP ^{*3}	16GB	12th Gen Intel® Core™ i7	GeForce RTX™ 3070	Windows 11 Pro
DELL Precision 7550 ^{*4}	16GB	CPU: Intel Core i9-10885H CPU @ 2.40GHz	NVIDIA Quadro RTX 3000 / Mem: 6 GB	Linux Ubuntu20.04LTS
ROScube RQX-59G ^{*5}	32G	8-core Arm® Cortex®-A78AE v8.2 64-bit CPU	with 1792 NVIDIA CUDA® cores and 56 tensor cores	Ubuntu 20.04 L4T

以下は各設備の概要

- *1：スマート道路灯のエッジ AI 機器
- *2：スマート道路灯のカメラストリーミング制御用
- *3：スマート道路灯の遠隔監視装置表示用
- *4：遠隔監視装置映像受信用 PC
- *5：遠隔監視映像処理用 PC

5.2.4 データ利用に関する機器・ソフトウェア

表 16 データ利用に関する機器・ソフトウェア

機器・ソフトウェア名	サイズ	解像度	表示色
EV2450 ^{*1}	537.6x473.5x233 mm	1920x1080	1677 万色

以下は各設備の概要

- *1：遠隔監視用モニタ

5.3 システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等

5.3.1 ユースケース共通のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項

<無線局免許申請>

- 実証用の通信システムとしてローカル 5G が含まれている場合は、実証実験開始までにローカル 5G 基地局について無線局の開局手続きが必要である。本実証では、2 つのローカル 5G 基地局について無線局（実験局）の免許を申請し、取得した。
- 免許申請に向けては、まず、無線設備（基地局・移動局）、ネットワーク構成と使用機器の仕様、実証エリアの早期確定を行う。
- その後、免許申請書類の作成、整理、干渉調整を行う必要があるが、これらには時間がかかるため（本件では3 ヶ月程度）、それを予め想定したプロジェクトの計画が必要となる。

<道路使用許可申請>

- ローカル 5G 基地局建設工事において、重機や高所作業車、並びに作業場所が行動におよぶ際には、事前に管轄する警察署署長への道路使用許可の申請と承認を得ておく必要がある。ローカル 5G 基地局または WiGig 中継局の設置に当たり、基地局アンテナユニットまたは WiGig 装置を地上高 5～10m 程度を上回る位置に新設柱または既設柱（電力・通信の共用柱など）に設置する場合、新設柱の建設工事、アンテナユニット・接続ケーブル等の取り付け作業等を重機や高所作業車を使用して実施する際、並びに、地上における関連作業を実施する際、それらの作業範囲が公道（車道、歩道）に及ぶ場合は、事前に管轄警察署の署長宛てに「道路使用許可申請」を行い、許可を得ることが必要である。
- 許可申請書の様式、道路使用条件等については、申請予定の所轄警察署や警察庁のホームページを参照するとともに、不明点等があれば直接所轄署へ問い合わせ、相談することが推奨される。
- 申請後、許可証が発行されるまでの期間が 3 日以上となる場合があるため、公道を利用した作業（工事）の開始前に十分余裕をもって申請する必要がある。

<土地の占有（使用）許可>

- ローカル 5G 基地局、WiGig 中継局の設置場所に依り、地権者による土地の占有（使用）許可を事前に申請し、許可を得ることが必要である。
- 本実証では、地権者が自治体（横浜市）であり、かつ、占有場所が公園の敷地内であったため、ここでは所管する自治体への「公園占有許可申請」を例として述べる。
- 許可申請書の様式、土地使用条件等については、申請予定の管轄自治体のホームページを参照するとともに、不明点等があれば直接管轄自治体へ問い合わせ、相談することが推奨される。
- 申請後、許可証が発行されるまでの期間が 10 日以上必要となる場合があるため、土地の使用（占有）の開始前に十分余裕をもって申請する必要がある。

5.3.2 ユースケース 2 のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項

- ・（課題 1）既存の道路灯からスマート道路灯に灯具交換する際、道路の視認性を確保する必要がある
- ・（対応 1）既設灯具の道路照明仕様を事前調査し、道路照明として求められる照度と均斉度が、同等以上のものとし、道路の視認性を確保した。さらに、LED 化による電力コストの削減とメンテナンス頻度の低減を行った。
- ・（課題 2）設置個所（既設灯具）は枝葉が豊富な箇所であったため、カメラの視野範囲（監視したい範囲）に枝葉が干渉し、監視に影響を及ぼす課題があった。
- ・（対応 2）灯具周辺約 2m 以内の枝葉を剪定することで対策を行った。
- ・（課題 3）既設灯具の道路照明は、タイマーによる点灯制御を集中管理している仕様であった。
- ・（対応 3）スマート道路灯は道路照明が点灯しない日中も使用する必要があるため、近接する電柱から電源を新設することで対策を行った。
- ・（課題 4）過年度の実証試験では、ローカルのデータサーバを個別に設置していたため、機器の数が多く、設置スペースの確保が必要だった。
- ・（対応 4）過年度（23 年度裾野市での実証試験）と類似のネットワークおよびシステム構築を行うにあたり、ローカルのデータサーバとしての機能を MEC に移植することで、機器のダウンサイジングと関連する設置、調整工数の削減を行った。

5.3.3 ユースケース 4 のシステム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項

- ・（課題 1）端末の通信特性を可能な限り良好にする必要があった。
- ・（対応 1）バスに設置するアンテナ位置を見通しが良く且つ進行方向を考慮した場所に設置した。
- ・（課題 2）WiGig を用いた通信に際し、WiGig 装置（アンテナ）の送受信間を結ぶ電波伝搬経路を、街路樹の枝葉や道路上の交通案内版等が妨げることで通信速度が低下する恐れがあった。
- ・（課題 2）電波伝搬経路の途中に障害物がなく、見通しが確保できていることを WiGig アンテナと同じ位置に設置したカメラで撮影した画像解析により確認し、電波伝搬経路を妨げていた枝葉等を避ける形でアンテナ位置調整を実施した。その際、天候により枝葉が動くことも考慮した適切なクリアランスを確保するように調整した。
- ・（課題 3）ハンドオーバーポイント導出に当たり、キャリア網側のスループットが同時利用者数の状況によって変動することを考慮する必要があった。
- ・（対応 3）午前・午後の利用者の変動状況を考慮して平均的な品質を予測し、品質劣化を未然に回避するようローカル 5G とキャリア 5G を切り替えた。

6. 実証結果・考察

6.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

6.2 交差点における車両の認知機能の補助機能（自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能）の検証

6.2.1 AI を活用した周辺環境情報の見える化

(1) 実証スケジュール

表 17 実証スケジュール

フェーズ	2024 年								2025 年	
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月
実証準備（事前計測、物品調達等）	要件検討									
			システム設計、開発、試験							
実証					調律					
						本番走行				
実証評価						データ取りまとめ				
							報告書作成			

(2) 開発・評価項目の結果

表 18 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	直線 50m 範囲の道路に走行する一般車両の有無を検知し通知する開発を行う
2	カメラの映像を監視室にストリーミングする機能を実装する開発を行う

3	検知結果を監視室に伝える機能、UI の開発を行う
4	車番を活用した自動運転バス車両の認識に向けて運行車両のナンバープレートの OCR 活用可能性を確認する
5	自動運転バスの走行していることを、ほかの交通参加者へ電光掲示板によって伝える

1) 直線 50m 範囲の道路に走行する一般車両の有無を検知し通知する開発を行う

車両・歩行者の検知範囲

本実証ではスマート道路灯を 2 基設置している。それぞれの道路灯の車両・歩行者検知範囲は以下の画像のとおりである。

灯具①視野範囲と車両・歩行者検知範囲



図 14 灯具①視野範囲と車両・歩行者検知範囲

灯具②視野範囲と車両・歩行者検知範囲

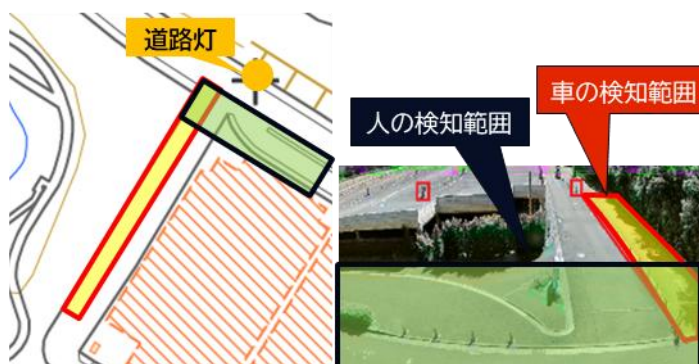


図 15 灯具②視野範囲と車両・歩行者検知範囲

評価対象のデータセット

本実証では評価用データセットとして、以下の No. 1～5 の 5 パターンを用意し、それぞれ、車両・歩行者検知結果を調べた。

評価方法

評価対象と処理方式に応じて、次の評価を行った。

表 19 評価対象と処理方式

評価対象	処理方式	
A. フレームごとに評価	A1. 現行のエッジ AI モデル (v4.1)	エッジ側で AI 検知を行う方法
	A2. エッジ AI モデル (v5.0)	A1. エッジ AI よりもサイズを上げた画像を入力する方法
	A3. クラウド AI	高速大容量かつ低遅延な通信システムを活用し、道路灯の映像をクラウド上に伝送した上で AI 検知を行う処理を想定。入力する画像のサイズは A2. エッジ AI 2 と同じ。
B. ソリューション (※) として評価 ※画角内に対象物が写りこんでから、画角から消えるまでを評価	B1. 現行のエッジ AI モデル (v4.1)	A1. 現行のエッジ AI モデル (v4.1) と同じ

なお、処理方式の詳細な違いは表 20 のとおりである。

表 20 処理方式の比較

特徴・利点	エッジ AI	エッジ AI 2	クラウド AI
AI 処理 実行場所	デバイス自体	デバイス自体	クラウド (センター側で実行)
AI モデル	独自モデル (v4.1) 道路灯の高い視点からの、 オブジェクト検知に特化した学習を行ったモデル。 軽量の設計としており、処理能力の低い端末での動作が可能。	独自モデル (v5.0) v4.1 から、入力画像サイズアップ	YOLOX-X 追加学習を行っていない、 オープンソースで公開されている素のモデル 物体検出の分野での最新技術を取り入れたモデル。道路灯の視点ではなく、さまざまなカメラの画像にて学習している。
特徴	レスポンスが早いですが、機能に制約あり。合流支援や、交差点支援のような、リアルタイム性が求められる場面に適している	左記と同じ	遅延が発生するが高機能交通管理や、予知保全のような大規模なデータ分析が必要な場面に適している
セキュリティ/プライバシー リスク	カメラ映像を送信しないため、リスクが低い	左記と同じ	カメラ映像をネットワークに送信するため、エッジよりも相対的に高い
コスト (初期費用)	関連機器費用総額 10 万円	関連機器費用総額 25 万円	関連機器費用総額 10 万円
データ通信量	16GB/月	左記と同じ	112GB/月
コスト (運用)	通信料	左記と同じ	通信料+クラウド利用料 参考) 50 万円/月
認識オブジェクト	車両、歩行者	左記と同じ	歩行者、車両(一般、バス等) 自転車、バイク テキスト検出 (OCR)

評価結果

「A. フレームごとに評価」については、表 21 に示す5つのデータセットに対して、車両・歩行者の再現率及び適合率を確認した。

表 21 評価データセット

評価データセット	内容
No. 1	本実証で取得した映像データから晴天環境を中心として作ったデータセット
No. 2	本実証で取得した映像データから雨天環境を中心として作ったデータセット
No. 3	上記 No1/2 のうち 灯具①の横断歩道横断中歩行者を多めに作ったデータセット
No. 4	上記 No1/2 のうち 灯具②の歩行者を多めに作ったデータセット
No. 5	No1-4 をまんべんなく入れたデータセット

5つのデータセットに対する結果は、表 22 車両・歩行者の再現率及び適合率 のとおりであった。

表 22 車両・歩行者の再現率及び適合率

		現行のエッジ AI モデル (v4.1)		エッジ AI モデル (v5.0)		クラウド AI モデル	
		車両	歩行者	車両	歩行者	車両	歩行者
データ セット 1	再現率	94.1%	56.3%	95.1%	62.7%	90.8%	74.5%
	適合率	95.2%	65.7%	94.8%	85.6%	78.6%	40.2%
データ セット 2	再現率	97.5%	60.9%	95.8%	61.6%	89.8%	61.7%
	適合率	97.7%	56.1%	98.4%	59.7%	76.9%	52.5%
データ セット 3	再現率	100.0%	50.0%	100.0%	55.9%	93.5%	73.5%
	再現率	98.5%	98.6%	97.1%	99.2%	78.7%	46.8%
データ セット 4	再現率	100.0%	88.5%	100.0%	86.9%	93.7%	72.9%
	適合率	93.2%	49.5%	98.7%	63.9%	78.0%	45.7%
	再現率	94.8%	57.6%	95.2%	62.4%	90.6%	69.6%

データ セット 5	適合率	95.7%	62.3%	95.5%	75.6%	78.2%	43.7%
-----------------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

「B. ソリューションとしての評価」による評価結果は、表 23 現行のエッジ AI モデル（v4.1）の再現率・適合率 のとおりであった。

表 23 現行のエッジ AI モデル（v4.1）の再現率・適合率

		現行のエッジ AI モデル（v4.1）	
		車両	歩行者
全シーン	再現率	99.5%	91.0%
	適合率	99.9%	91.9%
日中	再現率	99.9%	91.7%
	適合率	99.9%	93.2%
夕方（14時以降）	再現率	98.4%	89.2%
	適合率	99.7%	88.6%
晴	再現率	99.6%	90.8%
	適合率	99.8%	90.1%
雨	再現率	98.5%	91.6%
	適合率	100%	98.5%

考察

「A. フレームごとに評価」における「A.1 現行のエッジ AI モデル（v4.1）」の検知率について、歩行者の検知率が KPI（適合率 75%、再現率 70%）を下回る結果であった。一方で、「B. ソリューションとしての評価」としての検知率は、KPI（車両適合率 95%、歩行者適合率 90%）を超える結果であり、ユースケースによっては、十分に採用できる性能と判断した。

「A.1 現行のエッジ AI モデル（v4.1）」の「A2. エッジ AI モデル（v5.0）」の比較について、現状採用しているエッジ AI は、入力画像サイズを大きくすると、弱点であった歩行者の検知率が改善することがわかった。他方で、これらを実施すると AI モデル容量が大きくなり、処理時間が長くなる弊害が発生するが、エッジ AI モデルを実装するハードウェアを処理能力の高い新型に更新することで対策可能である。さらに、高い検知性能である AI モデル（YOLOX-X）を処理可能なハードウェアであれば、クラウド AI 相当のパフォーマンスをエッジ側で実装することも可能であると考えられる。また、今回クラウド AI モデルとして使用した YOLOX-X では追加学習を行っていないモデルであり、表 24 参考：現行のエッジ AI モデル学習前後の再現率・適合率 にも示す通

り、追加学習前後で検知率は改善することが分かっている。そのため追加学習することでさらなる改善を見込むことが出来る。さらに上述している通り入力画像サイズの増加も結果改善に繋がるため、将来的にエッジからフル HD サイズなどで入力することができるようになればさらなる改善に繋がる。

エッジ AI とクラウド AI それぞれ特徴があり、それぞれで適したユースケースがあると考ええる。
メリット・デメリット、活用シーンを

表 25 参考：エッジ AI とクラウド AI の特徴比較 に示す。

表 24 参考：現行のエッジ AI モデル学習前後の再現率・適合率

	学習前		学習後	
	車両	歩行者	車両	歩行者
再現率	63.0%	25.3%	81.6%	67.6%
適合率	92.7%	85.0%	96.3%	65.7%

2) カメラの映像を監視室にストリーミングする機能を実装する開発を行う

計測方法

ストリーミングの機能性を図る指標として、分解能、フレームレート、遅延を計測する。

表 25 参考：エッジ AI とクラウド AI の特徴比較

方式	エッジ AI 処理	クラウドにて AI 処理
メリット	低遅延、通信コスト削減、プライバシー保護	高い計算能力、データ統合(他の場所や種類のデータも合わせて処理)、スケーラビリティ
デメリット	計算リソースが限られる、デバイスのコストが高い	遅延が発生する、通信コストが高い、プライバシーリスク
コスト	初期導入コストが高いが、運用コストは低く、長期的には安価傾向	初期導入コストは低い、大容量通信を実現するコスト等の運用コストが高い
自動運転への適性	合流支援や、交差点右左折支援のような、リアルタイム性が求められる場面に適している	柔軟なルート管理や、路上駐車回避などの予知保全のような大規模なデータ分析や都市 OS 等との統合が必要な場面に適している

分解能とフレームレートについては、Intdash Visual M2M Data Visualizer（監視室の担当者が使用する可視化ダッシュボード）上にて、ストリーミングカメラの解像度とフレームレートが表示されるので、その値を得た。表示されている解像度、フレームレートとKPIを比較する。

遅延については、図 18 遅延の計測方法 に示すGlass to Glassの遅延を計測する。具体的には、図 18 遅延の計測方法に示すように、PCのストップウォッチアプリを起動し、経過時間をTIME Xとする。スマート道路灯でそのPC画面を撮影し、監視室のモニタに映し出される経過時間をTIME X'とする。TIME XとTIME X'の差分を計測する。

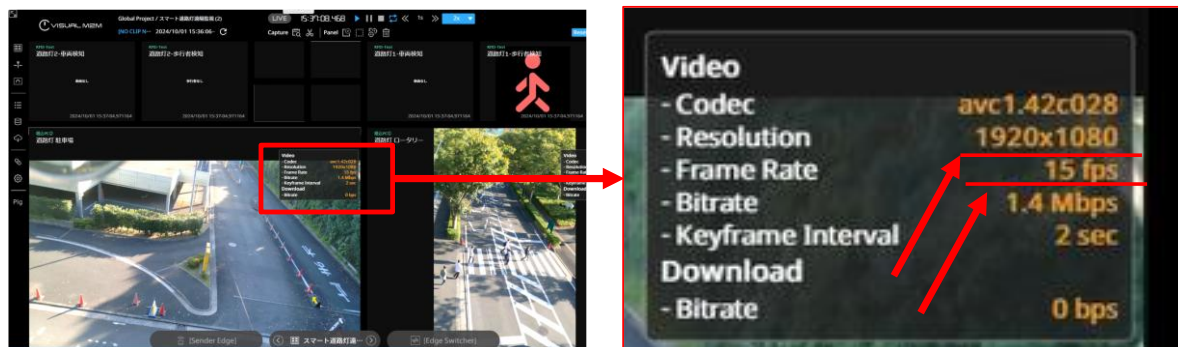


図 16 Intdash Visual M2M Data Visualizer の表示

この間のGlass to Glassのレイテンシを測定

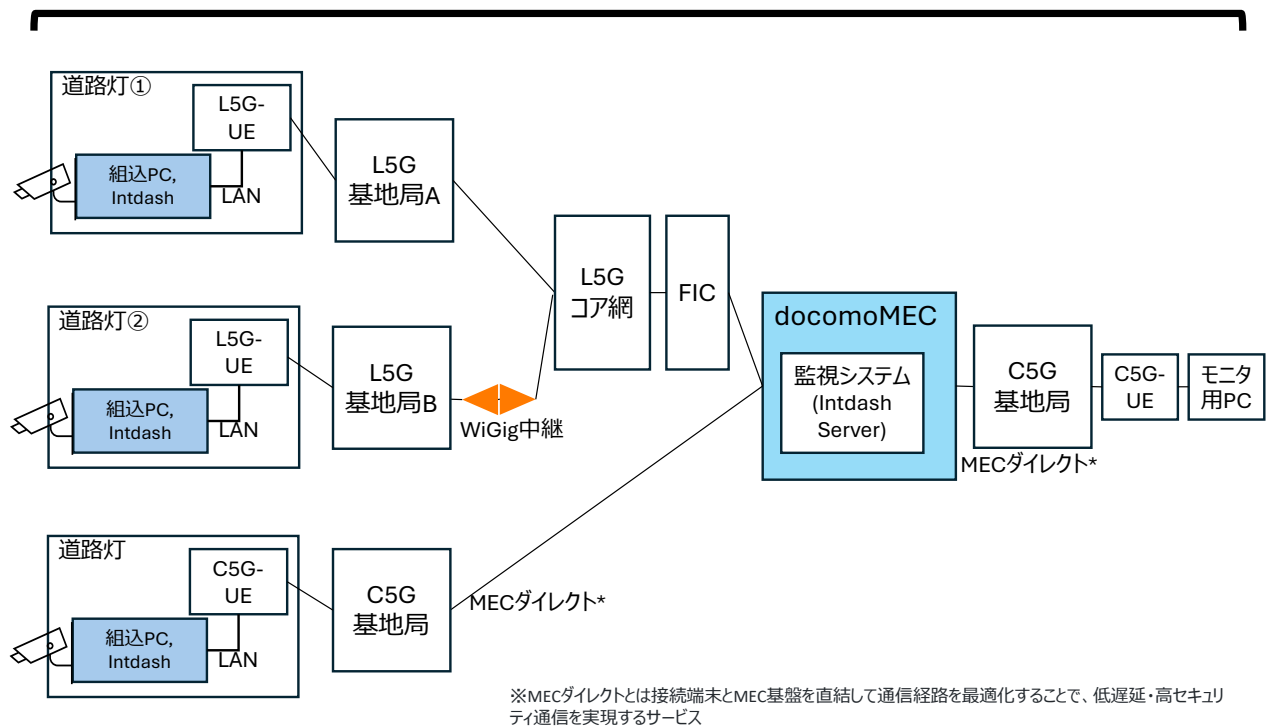


図 17 スマート道路灯のシステム構成図

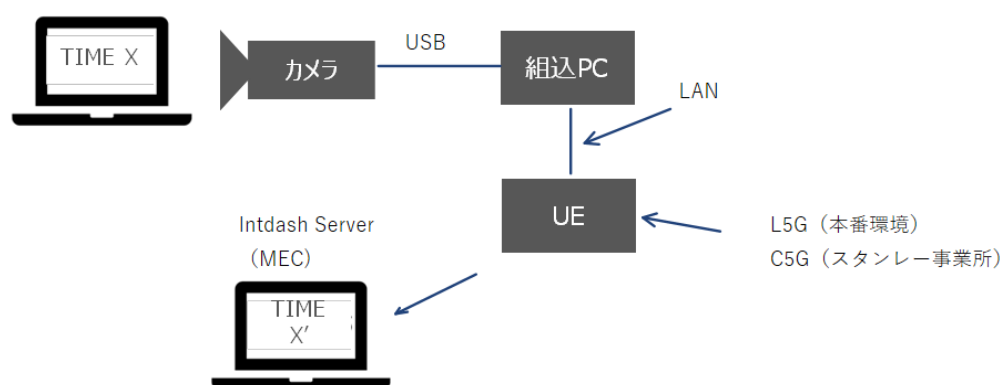


図 18 遅延の計測方法

計測結果・考察

分解値とフレームレートについては、2カ所の灯具各5回の平均値を算出し、KPIと比較した。その結果、いずれもKPIを超えていた。

表 26 分解能・フレームレートの結果まとめ

灯具	指標	結果	KPI
灯具①	分解能	1080×1920	1920×1080 以上
	フレームレート	13.6	9fps 以上
灯具②	分解能	1920×1080	1920×1080 以上
	フレームレート	15.6	9fps 以上

表 27 分解能・フレームレートの計5回の結果

灯具	指標	測定 1	測定 2	測定 3	測定 4	測定 5	平均	KPI
灯具①	解像度	1080 × 1920	1080 × 1920	1080 × 1920	1080 × 1920	1080 × 1920	1080 × 1920	1920 × 1080 以上
	フレームレート	14	13	14	13	14	13.6	9fps 以上
灯具②	解像度	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080 以上
	フレームレート	15	16	15	17	15	15.6	9fps 以上

遅延については、2カ所の灯具各5回の平均値を算出した結果、表 28 遅延の計測結果のまとめに示すように、いずれもKPIである500msecを下回った。また、参考としてキャリア5Gが受信

可能なスタンレー事務所内でも計測したところ、遅延はほとんど同じであった。本実証では、目標となる数値を達成したが、更なる高速化を目指す場合、通信の部分だけでなく、ハードウェアやソフトウェア性能・仕様に依存する処理時間削減も検討が必要である。例えば、本実証において、前記処理時間の中に、ソフトウェアによる画像回転処理も含まれており、その部分の有無による遅延の差が、約 30～40msec であることがわかっている。画像回転処理を要しないハードウェア・ソフトウェアの選定を行えば、更なる処理時間の削減が期待される。

また、今回の機器の構成要素の中、図 19 映像配信の区間分けの①～③区間のおおよその所要時間を表 30 図 19 映像配信の区間分けにおける各区間の所要時間に示す。瞬間瞬間の CPU の使用状況、映像の変化、NW 状況などにより所要時間が変化するため値は流動的となるが、今回使用したカメラ(obsbot tiny2)は低遅延設計としたカメラではないため、高速なイメージセンサ、ハードウェアによる高速な画像処理を採用した低遅延カメラへ変更することで①区間の遅延削減が最大 100msec 程度期待される。例として、カメラ解像度を 4K からフル HD にスペックダウン、PTZ (パン・チルト・ズーム) 機能を削除し、低遅延性能を優先したカメラを選択することで、コストアップを避けつつ、低遅延化を実現することは可能である。また、組込 PC の CPU 性能の向上や GPU の搭載などを行うことでエンコード処理の速度向上も見込めるが、コストも上昇するため効果とコストのバランスを見極める必要がある。

表 28 遅延の計測結果のまとめ

灯具	通信	遅延 (msec)	KPI
灯具① (図 17 の道路灯①に該当)	ローカル 5 G (RSRP : -102dbm)	403	500msec 以下
灯具② (図 17 の道路灯②に該当)	ローカル 5 G WiGig 中継 (RSRP : -88dbm)	413	
(参考) スタンレー事務所内 (図 17 の道路灯に該当)	キャリア 5 G	399	

表 29 映像回転の有無による遅延への影響

灯具	通信	映像回転	遅延 (msec)
灯具①	ローカル 5 G	あり	403
		なし	382
灯具②	ローカル 5 G	あり	413

	WiGig 中継	なし	361
--	----------	----	-----

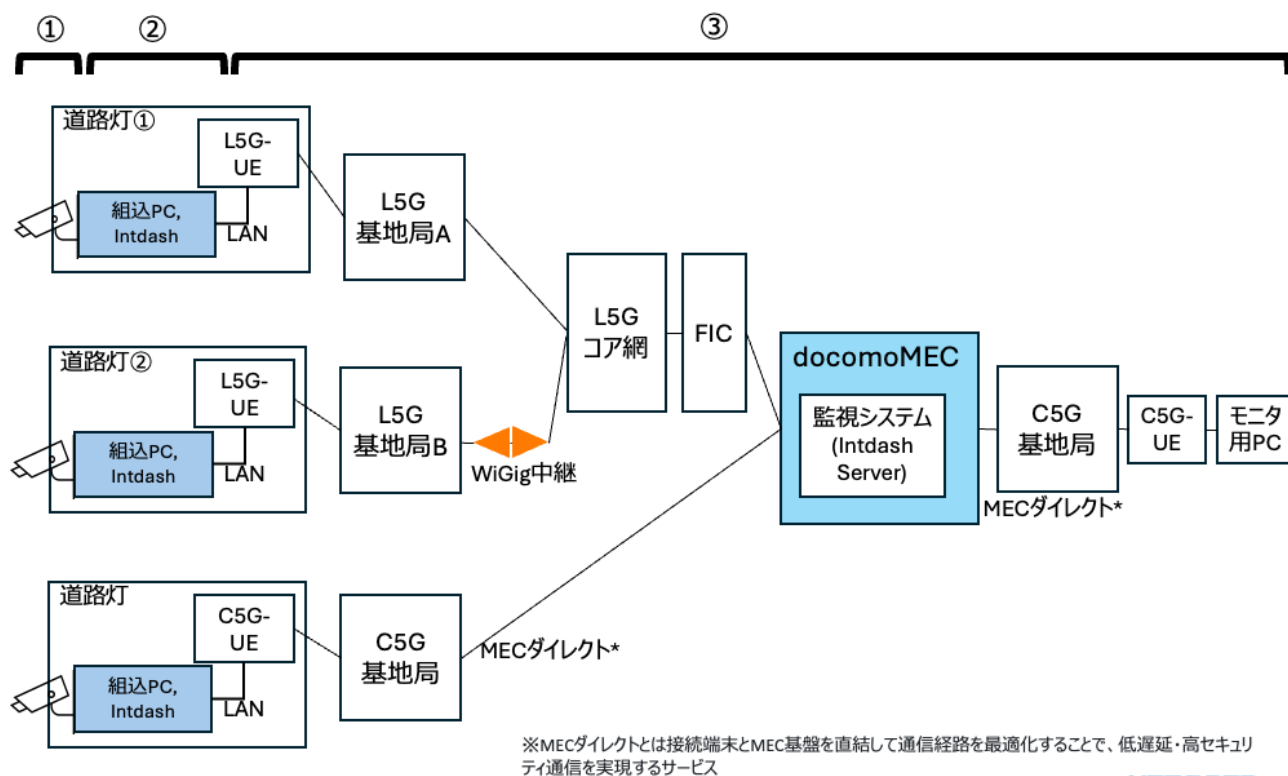


図 19 映像配信の区間分け

表 30 図 19 映像配信の区間分けにおける各区間の所要時間

区間	区間説明	所要時間
①	カメラが映像を組込 PC に渡すまでの区間	120msec～150msec
②	映像エンコード処理、intdash データ整形処理区間	60msec～130msec
③	組込 PC-intdash サーバ間のデータ伝送、intdash サーバ-モニタ用 PC 間のデータ伝送、デコード処理	100msec～200msec

3) 検知結果を監視室に伝える機能、UI の開発を行う

路車協調システムを自動運転バスの監視員が活用することを想定し、以下の機能・運用性評価を行った。2024 年 9 月～10 月にかけて計 3 回、監視員の監視業務に関する行動観察およびインタビューを行った。対象者は相鉄バスの 4 名で、いずれも運行管理経験者、路線バス運転経験者である。

表 31 インタビューの調査内容

機能・運用性評価	調査項目	調査内容
A 機能評価 監視員向けの路車協調システムの使用に関する評価	A 1 .センシング機能	センシング機能の検知精度に対する主観的評価、および検知すべき対象に関する調査
	A2. 通知機能	通知方法・通知の量に関する適切性に関する調査
	A3. 死角監視におけるモニタリング機能	カメラによって得られる情報の適切性に関する調査
B 運用性評価 路車協調システムを活用できる利用シーンの調査	B1. 事故の未然防止	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点の死角にいる飛び出しの可能性がある自転車や子供の存在を道路灯で検知し、監視員は自動運転バスに徐行の指示を出す。
	B2. 停止後の事後対応	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行中に何らかの原因により停止した場合、監視員は道路灯による映像から周囲の安全を確認し、走行再開の指示を出す。
	B3. 運行管理	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点内で事故が発生し、故障車が停車している状況を道路灯で検知し、監視員が状況確認後自動運転バスに迂回の指示を出す。

機能評価：監視員向けの路車協調システムの使用に関する評価の実施概要

監視員が通知に気づき路車協調画面を確認するまでのフローは以下の通りである。

- ① 監視員は、通常時には自動運転バスに搭載されているカメラから伝送された映像を見ている。
- ② 路側カメラの画角内に車両/人が侵入すると、音と車両/人のアイコンにより監視者に通知される。
- ③ 監視員は、路車協調システム画面に目を移し、カメラで状況を確認する。



図 20 監視員が通知に気づき路車協調画面を確認するまでのフロー

A1. センシング機能に関する調査結果

- 概要 1：運転手添乗の本実験環境での監視においては、問題ない検知精度であった。また、小動物・バイク・自転車など、飛び出しが多いものも検知の対象として加える必要があると評価された。
- 詳細：
 - 検知精度について、「（運転手がバスに添乗している）今回の要件では十分に賄いきれている。」「（システムが検知精度と、自分が映像内で対象を捉えた）感覚と大きな乖離はない。」と、運転手同乗の本実験環境での監視においては、問題のない精度であるとの評価が得られた。また、「検知しないのが一番怖い。過検知でもいいから、検知する方がいい。」との声もあり、検知率の向上が求められていることがわかった。
 - 検知対象としては、当初想定していた、歩行者や車両の他に、小動物や自転車/バイクも「検知してほしい」と共通して意見があった。ただし、小動物については、「鳩やネズミなど含めるとキリがなくなるので、何まで検知するのか、整理がいる」との意見もあった。
- 概要 2：検知時には、検知対象と自動運転バス間の距離、加えて相対速度を測定できるようなセンシング方式が求められている。
- 詳細：
 - 「停止する必要がある場合は、バスの速度と対象物の速度と距離を考えた上で、どのタイミングで停止して欲しいかを伝える必要がある」「バスと対象物との距離によって伝える内容が変わってくる」など、検知対象と自動運転バスが何秒後にどのくらい接近す

るかを予測し、必要な操作を決定するため、検知対象と自動運転バス間の距離と相対速度を測定可能とすることが求められている。

- また、死角からの飛び出しによる衝突事故を防ぐためには、「(バスにとって)交差点より少し奥側の映像で情報を取得しないと対応が間に合わない」など、交差点での動きだけでなく、死角から迫る検知対象とバスの距離が遠い状態からセンシングする必要性が示唆された。

A2. 通知機能に関する調査結果

- 概要：監視員は通知音によって迅速に気づくことができていた。一方で、通知の頻度が高いと供給過多により監視業務の妨げとなる可能性がある。また、アイコンによる通知の効果は見られなかった。
- 詳細：
 - 「走行中は正面のカメラを見ていて、音が出ると道路のカメラをチラッと見る感じ」
「音で知らせてくれるのでその時だけ見ていた」など、通知音に気づいて路車協調画面を確認することができていた。
 - その一方で、「実際の営業日はもっと増えるだろうから見切れないかも。」「路車協調の数は増やさないといけないが、そうすると通知がすごい数になる。」など、通知の頻度が増えた時のことを言及する声が多く見られた。また、「人は当たり前に通るので、位置や速度が一定の基準を超えたものをアラートとして出すのが良い。」「画角内をゾーンに分けて、危ない場所で検知したら音が鳴るようにできると良い。」など、システム側で通知を送る判断をすることが求められている。
 - 監視員は車載カメラの映像を注視しているため、アイコンを元に通知に気づくというシーンは見られなかった。

A3. 死角監視におけるモニタリング機能に関する調査結果

- 概要：映像の角度や画角についての言及が多く、死角となる箇所を十分に監視できない可能性がある。また、アイコンでの表示は検知対象の把握という観点では有効である。
- 詳細：
 - 道路灯1について、「自転車や歩行者がどのタイミングで入ってくるかわからないので、歩道の前後まで確認したい。」「人が右にいるのか左にいるのかわからない。せめて歩道が二本入るぐらい広角でも良い。」など、状況を詳しく把握するために画角を広く取りたいという声が多く見られた。
 - 道路灯2について、「画角の左上はほとんど必要ない情報なので、道路を出るところまで確認したい。」「交差点全体が見えていたほうがいい。」など、道路灯1と同様に画角についてのコメントが多かった。また、「角度が斜めになっているのが気になる」など映像の角度への指摘もあった。
 - アイコンについて、「感覚的にわかりやすい」「アイコンは見やすいと思う。例えば緊急車両かどうかなどが分かれば停止等の判断ができる。」など、アイコンで検知対象の情報を伝えることは有効である。

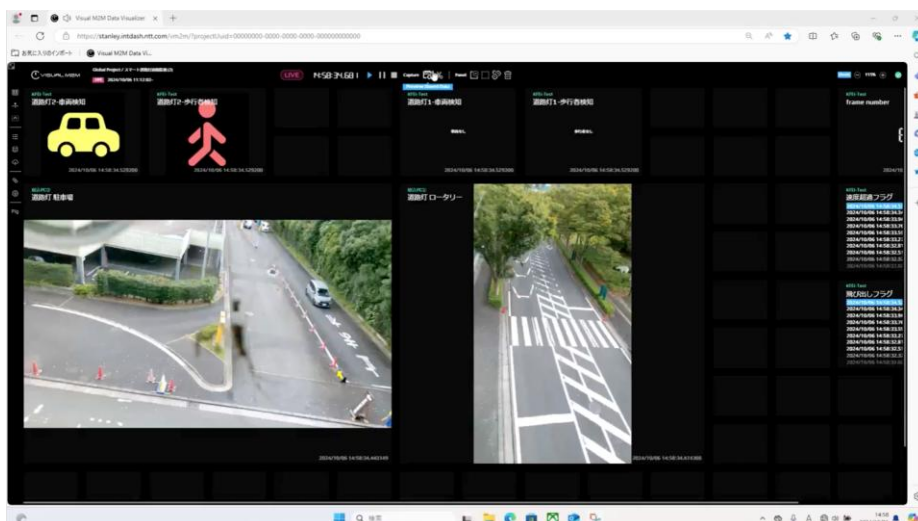


図 21 路車協調画面(左から、道路灯 2, 道路灯 1)

B:運用評価：路車協調システムを活用できる利用シーンの調査の実施概要

路車協調システムの運用性を評価するために、以下、監視員による利用シーン（B1～B3）を想定した際に、路車協調システムをどのように活用しうるか調査した。

B1. 事故の未然防止

自動運転バスが走行予定の交差点の死角にいる飛び出しの可能性がある自転車や子供の存在を道路灯で検知し、監視員は自動運転バスの乗務員に徐行の指示を出す（レベル 2）。

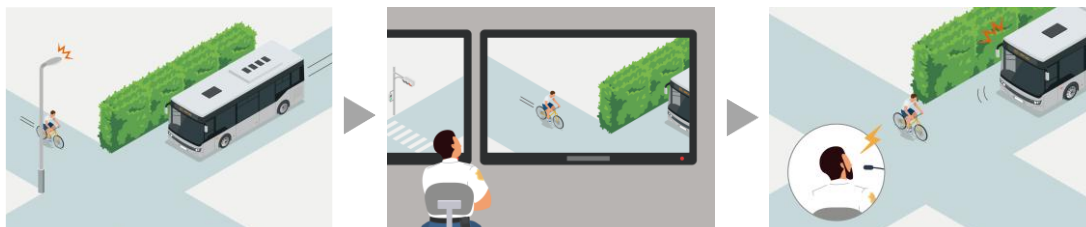


図 22 事故の未然防止

B1. 事故の未然防止に関する調査結果

- 概要 1：車両システムとの連動：路側情報の活用は、監視員を介さずに車両システムと直接連動させることが必要である。
- 詳細：
 - 当初、路車協調システムでは、死角にいる車両/歩行者を検知し、遠隔監視側へ伝送することを想定していたが、本調査により、監視員を介することで、「監視者の判断が入るので、対応のスピードが落ちる」、「監視者が捌ける数に限界がある」といった、安全上のリスクやデメリットが大きいことがわかった。インタビュー対象者 4 名中 4 名からは、監視員を通さずに直接情報の伝達を行う方が良いとの回答が得られたことから、路車協調システムから自動運転システムに直接伝達することが望ましいと考えられる。

遠隔監視者を通して情報の伝達を行う



遠隔監視者を通さずに情報の伝達を行う

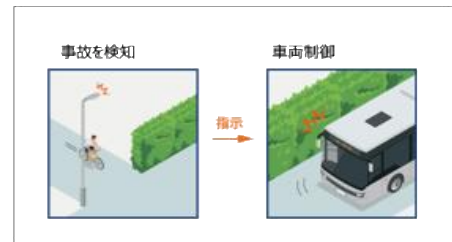


図 23 遠隔者を通す情報伝達と監視員を通さない情報伝達比較

- 概要 2：急ブレーキによる車内事故を防止：車両からは検知できない死角情報により、急ブレーキを回避することで車内事故防止につなげたい
- 詳細：
 - バス運行管理者からは、「一番気になるのはお客様の安全」「車内事故を避けたい」といった、乗客の安全責任を重視する声や、「急ブレーキをかけると一番後ろで立っている人が前まで飛ぶ程の威力がある」など、一般車両やタクシーと異なり、乗客が動き回ることができるバスならではの、注意点が挙げられた。また、バス車内での転倒など、車内事故は人身事故扱いで警察へ届出が必要なため、死角からの飛び出しによる急ブレーキには、通常運転時にも細心の注意を払い運転していることがわかった。路車協調システムにより、車載カメラでは把握できない死角の情報をを用いた減速など、今後の活用可能性が考えられる。

路車協調システムなし



バスがセンシングできない区域からの飛び出しへの対応が難しい

路車協調システムあり



事前にバスの死角からの飛び出し推定情報をバスに伝達し、減速等で急ブレーキが回避できる

図 24 路車協調システム有無の比較

- 概要 3：かもしれない運転への適用：自動運転バスの「かもしれない運転」実現にむけた検討の余地あり
- 詳細：
 - バス運転手は走行時に、子どもや動物など予測不明な行動をとる対象がいる場合や、自転車の急な飛び出しなど、即座に対応できない状況が見込まれる場合、自身のヒヤリハット経験や、社内の共有事例に基づき、「かもしれない運転」を行なっている。かもしれない

運転が染みついたバス運転手は、「大丈夫だと思うことが一番危険」という考えのもと、対象が「飛び出してくるだろう」といった前提にたち、車両の減速や停止操作を行なっていることがわかった。

- AI カメラにより、車載カメラでは捉えきれない死角の先や、車両からは捉えきれない先の情報を把握し、早い段階で検知対象を検知することで、バス運転手が当たり前に行なっている「かもしれない運転」の実現が求められる。

考察

● 結論

- 本調査から、自動運転バスの走行における複数の利用シーンにおいて、路車協調が利用し得ることが示された。インタビューでは、バス運行において、「乗客の安全が一番大事」との声やバス内で乗客が自由に立ち動きできる環境であるため、「急ブレーキをかけると一番後ろの人が前まで飛ぶ」といった状況も聞かれ、利用シーンの中でも、B1. 事故の未然防止から実装されていくことが望ましいと考えるただし、前述したように、“監視員”が事故の未然防止のために活用することは、現実的ではなく、監視員を介さず、路車協調システムで検知されたデータを元に、自動運転バスを直接制御させる必要がある。

● 今後の課題

- 本調査では、インタビューを通し、死角において路車協調があることで、事故や急ブレーキなどを未然に防ぐ可能性があると示されたが、実際の有効性については、シミュレーションや実証が求められる。また、歩行者や車両の検知精度については、運転手がバスに添乗している本実証の環境においては問題がないと評価されたが、自動運転バスを直接制御するためには、偽陰性、偽陽性ともに低くすることが求められる。路車協調システムでの偽陰性が高い場合は、自動運転バスが急停止するおそれがあり、乗客の安全性に影響する。また偽陽性が高い場合には、不必要に減速・停止をして、バスの定時走行に支障をきたすおそれがある。特に、インタビューでは、検知しないのが一番怖いと言うコメントがあった。まずは、安全性を高めるために、偽陰性を下げる必要がある。

(3) KGI/KPI との比較結果

表 32 KGI/KPI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	路車協調システムを監視員が利用することを想定し、機能・運用性の観点から課題と活用できるシーンを抽出する。
	2	交通参加者を対象とした、電光掲示板による注意喚起や離れた場所の交通情報の伝達に対する受容性の高さの確認、および課題を抽出する。

定量評価	3	特定自動運行保安員による常時監視の負担軽減に資するソリューションとして路車協調システムへの要求性能として、画角から消えるまでの検知率を評価することとし、車両検知率（適合率 95%）、歩行者検知率（適合率 90%）を設定する。		
		上記の評価値の他に、1 フレームごとの評価として、車両、歩行者の検知率について、以下の値を満たすこととする。		
			車両	歩行者
		適合率	92%	75%
		再現率	85%	70%
	4	映像要件が以下を満たすこと 分解能：1920 × 1080 pixels 以上 フレームレート：9fps 以上 遅延：500msec 以下		
	5	クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合がないこと		
	6	スマート道路灯による運用保守管理業務に要する工数削減効果が 50%以上 保守用灯具の在庫数削減が 30%以上		

1) AI カメラを活用した路車協調システムの機能・運用性の主観評価

6.2.1 3)に記載のとおり、AI カメラを活用した路車協調システムの機能・運用性を評価した。その結果、自動運転バスの走行における複数の利用シーンにおいて、AI カメラを活用した路車協調が利用し得ることが示された。インタビューでは、バス運行において、「乗客の安全が一番大事」との声やバス内で乗客が自由に立ち動きできる環境であるため、「急ブレーキをかけると一番後ろの人が前まで飛ぶ」といった状況も聞かれ、利用シーンの中でも、B1. 事故の未然防止から実装されていくことが望ましいと考える。

2) AI カメラによる車両検知率/歩行者検知率

6.2.1 1)に記載のとおり、「A. フレームごとに評価」における「A.1 現行のエッジ AI モデル (v 4.1)」の検知率について、歩行者の検知率が KPI（適合率 75%、再現率 70%）を下回る結果であった。一方で、「B. ソリューションとしての評価」としての検知率は、KPI を超える結果であり、ユースケースによっては、十分に採用できる性能と判断した。

3) 分解能、フレームレート、遅延

6.2.1 2)に記載のとおり、分解値、フレームレート、遅延について、KPI と比較した結果、いずれも KPI を超えていることを確認した。

4) クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合がないこと

評価方法

- クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータを比較

デバイス側とネットワーク経由先（ThingsCloud/ローカル端末）の双方で取得している期間のデータを評価対象とする。実施手順は以下の4ステップである。

- ① D710-1 および D710-2 デバイスから取得したエッジ AI データのログを記録。
- ② ローカル 5G ネットワークを通じて ThingsCloud（クラウド）に送信されたデバイスのエッジ AI データのログを記録。
- ③ ローカル 5G ネットワークを通じて MEC（ローカル端末）に送信されたデバイスのエッジ AI データのログを記録。
- ④ 比較ツールを使用して、デバイス側のログ（①）とクラウド（②）または MEC（③）で受信したログの差分を出力。

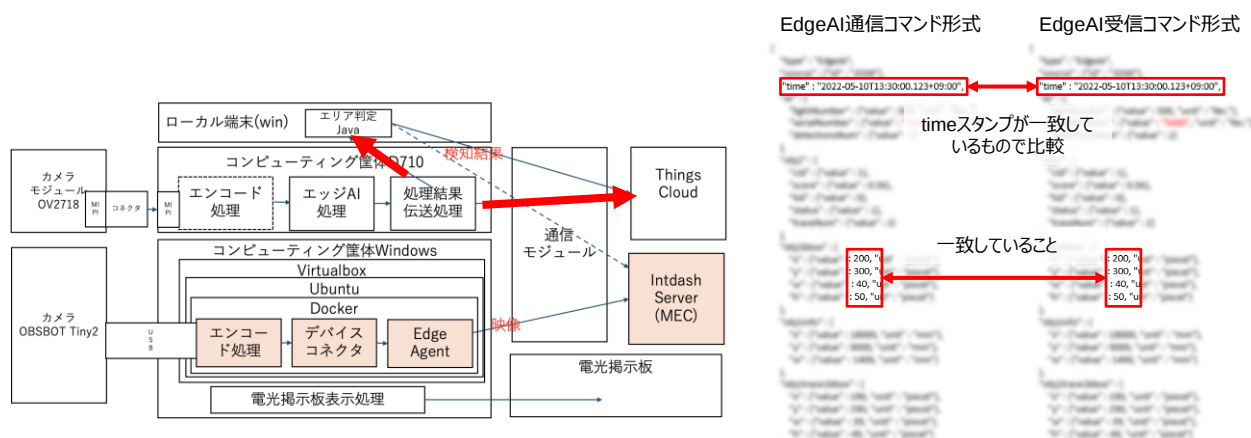


図 25 通信経路と比較イメージ

- 閉域網が構築できていることの確認

UTM でインターネット向きの通信がすべて遮断されていることをログで確認する。

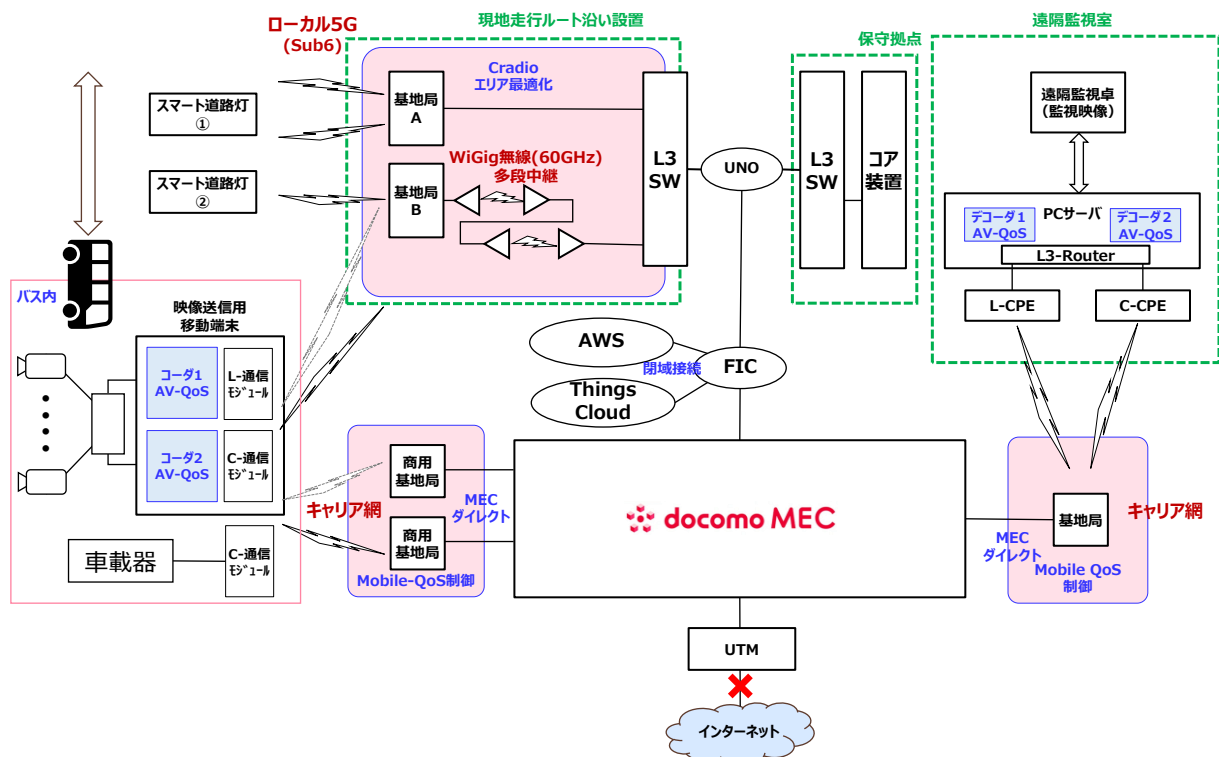


図 26 システム構成図

評価結果・考察

- クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータを比較

評価結果は、表 33 に示すとおり、クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合がないことが確認できた。

表 33 評価結果

Intex	デバイス側		ネットワーク経由後		データ期間			データ数	不整合
1	灯具②	D710 送信 log	ThingsCloud	受信 log	10 月 12 日	9:00	15:00	21,600	0
2	灯具②	D710 送信 log	ThingsCloud	受信 log	10 月 15 日	9:23	15:00	20,220	0
3	灯具①	D710 送信 log	ローカル端末	受信 log	10 月 17 日	10:18	17:08	24,600	0
4	灯具②	D710 送信 log	ローカル端末	受信 log	10 月 18 日	10:11	23:59	49,680	0
5	灯具①	D710 送信 log	ローカル端末	受信 log	10 月 19 日	0:00	12:00	43,200	0

6	灯具①	D710 送信 log	ThingsCloud	受信 log	10 月 21 日	10:38	11:38	3,600	0
7	灯具②	D710 送信 log	ThingsCloud	受信 log	10 月 21 日	10:51	16:15	19,440	0
8	灯具①	D710 送信 log	ローカル端末	受信 log	10 月 21 日	10:38	11:38	3,600	0
9	灯具②	D710 送信 log	ローカル端末	受信 log	10 月 21 日	10:51	16:15	19,440	0

- 閉域網が構築できていることの確認

図 27 遮断された通信と許可された通信の数に示すとおり、OS やアプリケーションのデフォルトの設定上インターネット向けの通信は発生しているが UTM ですべて遮断されており、期間中インターネット間の通信は行われていないことを確認した。

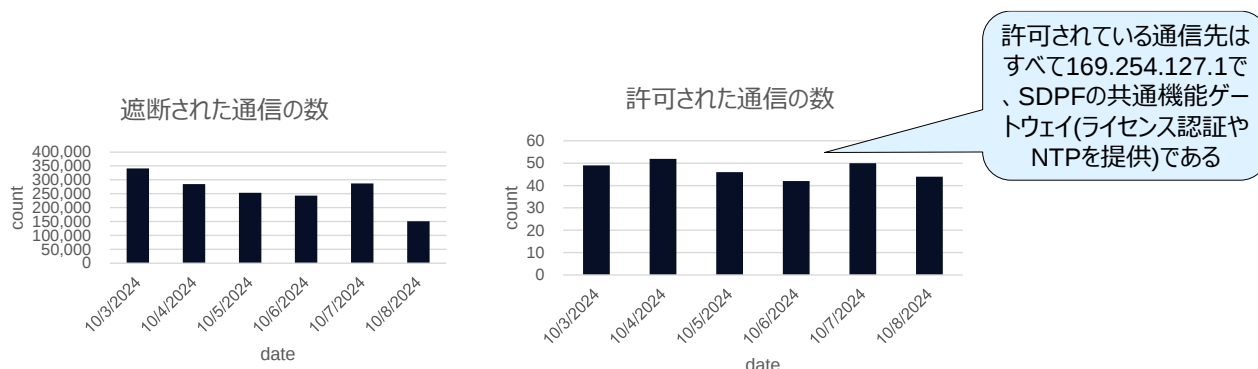


図 27 遮断された通信と許可された通信の数

(4) 考察

- AI カメラにおける検知率の向上について

6.2.1 (2) 1)に記載したとおり、「A.1 現行のエッジ AI モデル (v4.1)」の「A2. エッジ AI モデル (v5.0)」の比較について、現状採用しているエッジ AI は、入力画像サイズを大きくすると、弱点であった歩行者の検知率が改善することがわかった。また、追加学習することで、さらなる改善を見込むことが出来る。他方で、これらを実施すると AI モデル容量が大きくなり、処理時間が長くなる弊害が発生するが、エッジ AI モデルを実装するハードウェアを処理能力の高い新型に更新することで対策可能である。さらに、高い検知性能である AI モデル (YOLOX-X) を処理可能なハードウェアであれば、クラウド AI 相当のパフォーマンスをエッジ側で実装することも可能であると考えられる。

- 遅延の更なる低減について

今回、遅延についてKPIを達成した。社会実装に向けては更なる遅延の低減が求められる可能性があるが、6.2.1(2)2に記載したとおり、更なる高速化を目指す場合、通信の部分だけでなく、ハードウェアやソフトウェア性能・仕様に依存する処理時間削減も検討必要である。例えば、本実証において、前記処理時間の中に、ソフトウェアによる画像回転処理が含まれており、その部分の有無による遅延の差が、約30～40msecであることがわかっている。

- 協調システムについて

6.2.1(2)3に記載したとおり、本調査から、自動運転バスの走行における複数の利用シーンにおいて、協調が利用し得ることが示された。インタビューでは、バス運行において、「乗客の安全が一番大事」との声やバス内で乗客が自由に立ち動きできる環境であるため、「急ブレーキをかけると一番後ろの人が前まで飛ぶ」といった状況も聞かれ、利用シーンの中でも、B1.事故の未然防止から実装されていくことが望ましいと考える。ただし、前述したように、“監視員”が事故の未然防止のために活用することは、現実的ではなく、監視員を介さず、路車協調システムで検知されたデータを元に、自動運転バスを直接制御させる必要がある。

今後の課題として、本調査では、インタビューを通し、死角において路車協調があることで、事故や急ブレーキなどを未然に防ぐ可能性があると示されたが、実際の有効性については、シミュレーションや実証が求められる。また、本実証では、路車協調のカメラを道路灯に具備したが、道路灯が死角監視に適切な位置にあるとは限らない。道路灯以外の構造物にも設置できるよう、路車協調システムのモジュール化も必要になると考える。さらに、路車協調の社会実装に向けて、インタビューで「安全性を向上させるために路車協調もあるといいが、単一の事業者が導入するのは、コストがかかり導入が難しい。自治体で導入してほしい」との声も聞かれ、行政含めた複数事業者の連合体での検討も要する。

6.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

6.4 明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証

6.4.1 QoS、ローカル5G、WiGig、MECを組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証の結果

QoS、ローカル5G、WiGig、MECを組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上に関する検証については、以下のスケジュールで検証作業（3フェーズ）を実施した。

図 28 実証スケジュール

フェーズ	2024年								2025年
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
実証準備 (事前計測、物品調達等)	要件検討			システム設計、開発、試験					
実証					調律走行				
						本番走行			
実証評価						データ取りまとめ			
							報告書作成		

以下、同検証の実施結果として「開発・評価項目の結果」、「KGI/KPI との比較結果」、及び「考察」を、6.4.2「映像伝送システムに関する検証」、6.4.3「通信システムに関する検証」に分けてそれぞれ記載する。

6.4.2 「映像伝送システムに関する検証」の実施結果

(1) 開発・評価項目の結果

表 34 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	バス監視員の視認の支障となる映像の乱れ状況の評価
2	電波受信感度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価

1) バス運行監視員の視認の支障となる映像の乱れ状況の評価

4.4.2 に記載のとおり、1 便～6 便の 6 つの映像を用いて、映像視聴/評価→ヒアリングの流れを 6 回繰り返し、最後に総合評価を行った。

走行エリア	① ② ③ ④ ⑤				
	正門 ロータリー	ロータリー後の直線、 トイレ前まで	トイレ後～里山 ガーデン手前	里山ガーデン 手前～北門手前	北門 ロータリー
4 G 5 G キャリア	1便	—			
	2便	AV-QoS			
	3便	Mobile-QoS			
	4便	AV-QoS + Mobile-QoS			
5 G ローカル	5便	-	ハンドオーバー 前後区間	評価対象外 ※3便と同条件の通信/映像伝送方式を使用	
	6便	AV-QoS	ハンドオーバー 前後区間	評価対象外 ※4便と同条件の通信/映像伝送方式を使用	

図 29 評価に用いた 6 便の状況

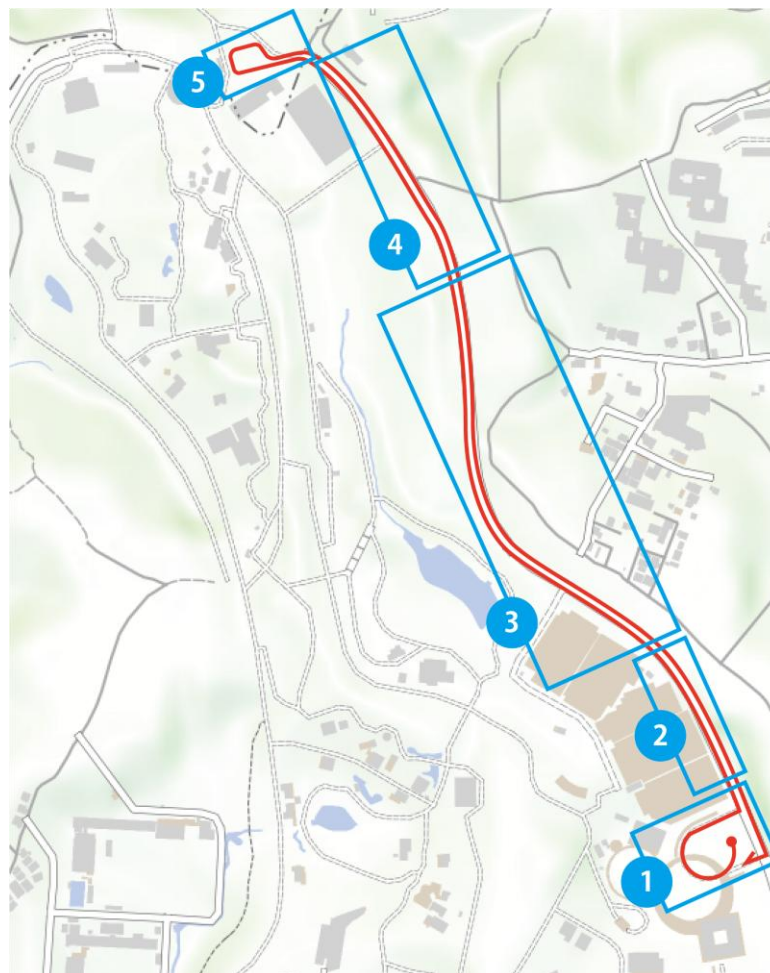


図 30 6 便の走行エリアのイメージ

遠隔監視映像の乱れは、①キャリア 4G/5G のみ、②キャリア 4G/5G で Mobile-QoS、AV-QoS のどちらか一方適用時、③キャリア 4G/5G で Mobile-QoS と AV-QoS の両方適用時、④ローカル 5G (AV-

QoS あり/なし含む)、⑤ネットワーク切替に伴うハンドオーバー前後区間、で主に発生傾向が異なった。乱れがないと評価された順序は、④③②①⑤であった。運行に、バス周囲の「状態の監視」までが必要であるとする、④～①はいずれも支障なく監視可能と評価された。一方、運行に、自動運転の再開を含むような「遠隔操作」まで必要であるとする、④③が利用可能と評価された。ただし、③については「いいのではないくらい。大丈夫とまでは言い切れない」というレベルであった。⑤については、ハンドオーバー区間前後のフレームの飛びが大きく、「状態の監視」の際にドラレコのように後から使うとしても厳しい品質と評価された。ローカル 5G の使用については、ハンドオーバー前後で発生したフレームの飛びや、途切れが解消できないと使用が難しいとされ、使用する場合はローカル 5G の箇所のみを見て、途切れが発生した区間では実際には見ないようにする、といった使い方を想定していた。

表 35 各便の評価結果 (まとめ)

走行便		1便	2便/3便	4便	5便/6便 (正門ロータリーエリア)	5便/6便 (ハンドオーバー前後区間)
通信・伝送方式		① キャリア4G/5Gのみ	② AV-QoS または Mobile-QoS※1	③ AV-QoS、Mobile-QoS 両方を活用 ※2	④ ローカル5Gのみ	⑤ ローカル5G、キャリア4G/5G 併用 ※3
映像の乱れ	カクツキ	✕ 全体的にフレームの飛びが激しく、監視で使いたいとは思えない。	✕ 多少の改善がみられるが、監視に使うのは厳しい。	△ ①②に比べ、カクツキ、フレームの飛びの低減を感じたが、場所によってフレームの飛びがあり、問題ないとは言いきれない。	○ 場所によってはスムーズさがない箇所もみられたが、十分使えるレベル。	✕ 映像が「途切れた」と感じるほどのフレームが飛び、監視で使うのは厳しい。
	鮮明さ	✕ 気なるレベルの画像の荒さ。	✕ 劇的に変わった感じはない。	△ 画像の荒さがなくなり、変化を感じる。	◎ 明らかに映像が綺麗で鮮明	✕ 画像が飛びがひどく、きれいさかどうかのレベルではない。
監視への支障	状況確認	○ ①～④共通で、対象の自動運転バスの周囲や、先の方の状況を確認可能なため、監視の支障はない。				✕ 「後から見返すにしても使えない」レベルの映像で、監視で使うのは厳しい。
	操作を伴う	✕ もう少し先が見える程の鮮明さが必要。	✕ 確認はできるが、実際に車を動かそうとする際を考えると難しい。	△ 何か起きた時、起きそうな時、何もいよいよを確認するだけなら良い。支障ないとは言い切れない。	○ 今回の映像の範囲では、走行再開のロック操作や遠隔操縦といった操作をするにも、支障なく監視可能と思う。	✕ 映像が途切れた後にだいたい飛んだり、固まるため監視が難しい。監視できないレベルの支障がある。

※1 キャリア 4G/5G に AV-QoS、Mobile-QoS のどちらか一方を適用

※2 キャリア 4G/5G に Mobile-QoS と AV-QoS の両方を適用

※3 ローカル 5G からキャリア 4G/5G へネットワーク切替点を含むハンドオーバー前後の区間

併せて、「映像の確認のしやすさ」に関する評価と、「監視への支障」に関する評価も行った。

「映像の確認のしやすさ」では、「遮断物がない場所での状況確認」、「静止物 (50cm 程度) の存在確認」、「他のバス車両の通行状況の確認」、「人物の存在確認」、「人物の振る舞いの確認」、「人物の表情の確認」の 6 項目に対し、あらかじめ具体的な確認対象を設定し、各通信・映像伝送方式における遠隔監視で、どれくらい確認しやすいかを評価した。確認のしやすさは、監視対象となる自動運転バス【停止時】および、【走行時】に分けて評価を実施した。結果は、以下のとおりである。

- ・ キャリア 4G/5G と比較して、ローカル 5G 使用時は、いずれの映像伝送方式においても、画像のボヤつきなく全てが鮮明に見えるため、全ての確認対象を確認しやすいと評価された。ただし、ローカル 5G でもハンドオーバー前後区間では、明らかな画像の飛びが発生しており、特に走行時に人物の振る舞いや表情について確認が困難であると評価された。
- ・ キャリア 4G/5G でも、全ての通信・映像伝送方式において物体の存在確認は行えるが、場所によって映像が乱れ、特に走行時の人物の振る舞いや表情の確認がしばらく状況が発生した。

また、「監視への支障」については、「状況確認（対象車両の周辺）」、「状況確認（対象車両から離れた先の情報）」、「操作（走行再開のロック解除）」、「操作（遠隔操縦）」の4つのシナリオで監視の役割を担うことを想定したとき、それぞれの項目についてこの映像品質で監視が可能かどうかを評価した。結果は、以下のとおりである。

- ・ 状況確認のための監視への支障は、いずれの通信/映像伝送方式においても、概ね支障がないが、走行再開のロック解除や遠隔操縦といった、操作を伴う監視では、フレームの飛びの発生の有無によって評価が分かれた。
- ・ 操作を伴う監視の場合、キャリア 4G/5G やハンドオーバー前後区間で頻発した、フレームの飛びが発生すると、監視不可能であるという声があがる程、監視への支障が大きく、わずかな時間であっても見えない区間や、急な状況の変化が発生すると怖さを感じてしまう、といった声があがった。特に映像が明らかな飛びが発生したハンドオーバー前後区間においては、監視がこれ以上続けられないといったレベルの支障である、と評価された。
- ・ キャリア 4G/5G でも AV-QoS と Mobile-QoS の両方を適用した 4 便については、映像のカクツキがみられたものの、完全に止まる瞬間では低減したため、おおよそ支障はないと評価された。ただし、完全に映像が止まらない訳ではなく、「人を避けてなどの時はこれでもまだ怖い」といった、操作を伴う監視での使用に対して、懸念の声も上げられた。
- ・ 一方で、ローカル 5G エリアでは、カクツキがほとんど発生していなく、画像も鮮明なため、操作を伴う監視でも、十分監視で活用できると評価された。

「映像の乱れ」、「見やすさ」、「監視への支障」、「総合評価」について、走行便ごとの評価結果一覧は以下のとおりとなった。

表 36 各便の評価結果（キャリア 4G/5G）

バス走行便 映像伝送方式		1便 -	2便 AV-QoS	3便 Mobile-QoS	4便 AV-QoS および Mobile-QoS
映像の乱れ	カクツキ	× 映像が止まった感覚になる程、カクツキ頻度が高い。見ようと思ったら次に飛んでいる。	× カクツキはいくらか改善したが、これで使うのは厳しい状態。	× 1,2便よりはカクツキが減ったが、まだ少し止まる場所がある。動きはじめて小刻みにカクツキ。	△ カクツキや画像の飛びが減った。ただし、里山ガーデン手前から北門の飛びは酷い。横断歩道のところは、次の瞬間変わった。
	粗画質	× 気なるレベルの画像の荒さ。場所により画質がばらつく。	× 正面が綺麗に見えない。近くは見えるが、遠くは見えにくい。	× 1,2便よりは映像の綺麗さが変わったが、大きくは変化していない。	△ バス正面の画像の荒さが見やすくなった。変化を感じる。
映像の確認のしやすさ	存在確認	○ 近くの人を確認できるが、歩道あたりまで行くと見づらい。	○ 全体的に1便と同じような感覚。	○ 前便より1段階良くなった。	○ 前便よりさらに良くなった。
	詳細確認	× コミュニケーションや表情の読み取りは難しい。	× 劇的に変わった感じはない。	× 人の動きが見えて変わったが、表情までは見るのは難しい。	△ 基本カクツキや止まることが減り、信頼しやすくなった。
監視への支障	状況確認	○ 先の方も見えているため、周囲を含め対象物の確認はできる。	○ 前便同様	○ 前便同様	○ 前便同様
	操作を伴う	× 操作が伴うのなら、もう少し先が見れる程の鮮明さが必要。映像が飛び前の状態や、映っていない間に何が？というのが怖い。	× 確認はできるが、実際に車を動かそうとする際を考えると難しい。	× 最初スムーズだと思ったが、エリアにより、状況が変わるような飛び方をして怖い。止まってる状態から出れるかという微妙。	△ いいのではないかと、くらい。大丈夫とまでは言い切れない。
総合評価	監視のストレス	× スムーズに見れないと感じる頻度がかかなり多く、ストレスを感じる。	× ストレス度少しだけ減ったくらい。運転している風景が流れる感じではないので、見て疲れる。	× 1便、2便と余り変わらない	△ ドラレコの映像でこのレベルを見ることはよくある。その感覚に近い。全く飛んじゃうよりは、かつたるいな、くらい。
	利用意向	× カクツキが多く、映像が止まってしまうのが気になり、使いたとは思わない。	× カクツキは減った気がするが、これを使うのは厳しい。	× 先ほどよりは良い。ただし使いたいと思うほどの良さではない。	△ × 楽にはなったが、止まることがあり、見方としてはよくない。 △ 何か起きた時、起きそうな時 × 「何も無いよね」を確認するだけならこれぐらいでも良いかも。

表 37 各便の評価結果（まとめ）

		ローカル5G		ハンドオーバ前後区間	
バス走行便 ※1 映像伝送方式		5便 L -	6便 L AV-QoS	5便 H -	6便 H AV-QoS
映像の乱れ 粗画質	カクツキ	○ カクつきがない。十分にけると思う。場所によっては、スムーズに流れずこれまでと同等な箇所もある。	○ カクツキがみられなかった。5便L同等。小刻みにずっとカクカクするのはある。	× 映像がだいぶ先に飛んでいた。対向車が通る時に写っていないタイミングがあった。あとから見返すのでも使えない。	× カクカクはあったが、5便Hよりフレームの飛びはなかった。途切れの間の間はよくあったものの、常時の乱れを感じた。モバイル網での里山～北門の感覚に近い。
		◎ 映像が綺麗で鮮明に見える。正面のモヤもなくなった。	○ 画像の鮮明さが、5便Lに比べて落ち、粗い箇所がある。	× 画像が飛びがひどく、きれいさかどうかのレベルではない。	×
の映しやすさ 確認	存在確認	◎ 車体に書いている文字もはっきり見やすくなった。	◎ 正面の映像が、5便Lより落ちている感じがした。	×	×
	詳細確認	◎ 近くは表情も見れる。離れてても前より見やすい。	○ 5便Lの方が見やすかった。	×	×
監視への支障	状況確認	◎ 問題なく行える。	◎ 5便L同等	×	× 停止時の状況確認でもちよつと厳しいレベル。
	操作を伴う	○ ロック解除操作など、今回の映像の範囲では支障なく監視可能だと思う。	○ 5便L同等	× 映像が途切れた後にだいぶ飛んだり、固まるため監視が難しい。見たい場所がちょうどそういうタイミングに重なると厳しい、監視できないレベルの支障。	× 動いている時のカクツキは怖い。車を寄せるにしても、把握できない瞬間にどこまで行ってしまったかわからないと怖い。
総合評価	監視のストレス	○ 長い時間だとストレスになる可能性もあるが、部分的に見るのであればいい。	○ 5便L同等、ストレスなどの違いはない。	×	× 5便Hに比べるとストレス減る。
	利用意向	○ 映像が止まる時間がないので、それがいい。	○ 映像のモヤがあったが、支障がギリギリない程度。	×	× 5便Hよりは悪くはないが、これを使うのは厳しいレベル。

※1 バス走行便 確認対象区間 L：ローカル 5G を捉えたエリアを確認対象とする、H：ハンドオーバ前後区間での確認を対象とする

2) 電波受信強度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価

4.4.2 に記載のとおり、「混雑時間帯と推測される日時」において、「電波受信強度の悪い場所」を走行した際の伝送後映像の録画データを確認し、映像乱れの状況を確認することとした。まず、検証対象とする箇所は、「キャリア網の利用者が多い時間帯」と「RSRP が低い場所」の条件に当てはまる箇所を設定した。

「キャリア網の利用者が多い時間帯」に関しては、リソース利用率、アクティブユーザ数といった基地局情報から利用者が他の日時より多い時間帯を特定したところ、日曜日（図 32 電波受信強度の低い場所の特定（キャリア網）図 33 電波受信強度の低い場所の特定（ローカル 5G 網）の 10 月 6 日）の利用者が多かった。「RSRP が低い場所」に関しては、遅延時間の増加タイミングから、RSRP-105dBm を閾値と設定し、別の日時においても、同じ場所で RSRP が下がっていることから下記記載の①～⑤の 5 箇所を「電波受信強度の低い場所」と設定した。



なお、グラフ内の横軸は下記の

図 31 グラフ内の横軸の基点配置内の 3 箇所をそれぞれ基点とし、そこからの距離としている。



図 31 グラフ内の横軸の基点配置

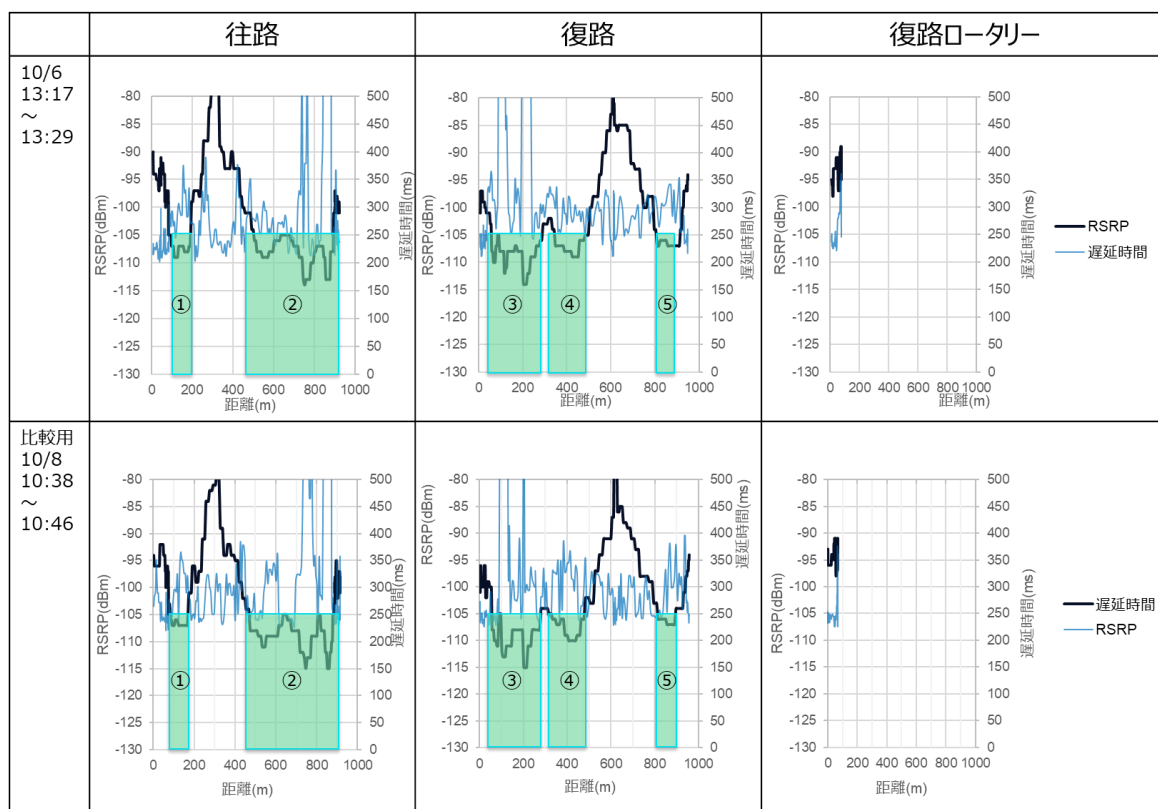


図 32 電波受信強度の低い場所の特定（キャリア網）

また、ローカル 5G に関しても、「電波受信強度の低い場所の特定」として、遅延時間の増加タイミングから、キャリアと同じく RSRP-105dBm を閾値と設定し、別の日時においても、同じ場所で RSRP が下がっていることから下記表記載の①～③の 3 箇所を「電波受信強度の低い場所」と設定した。

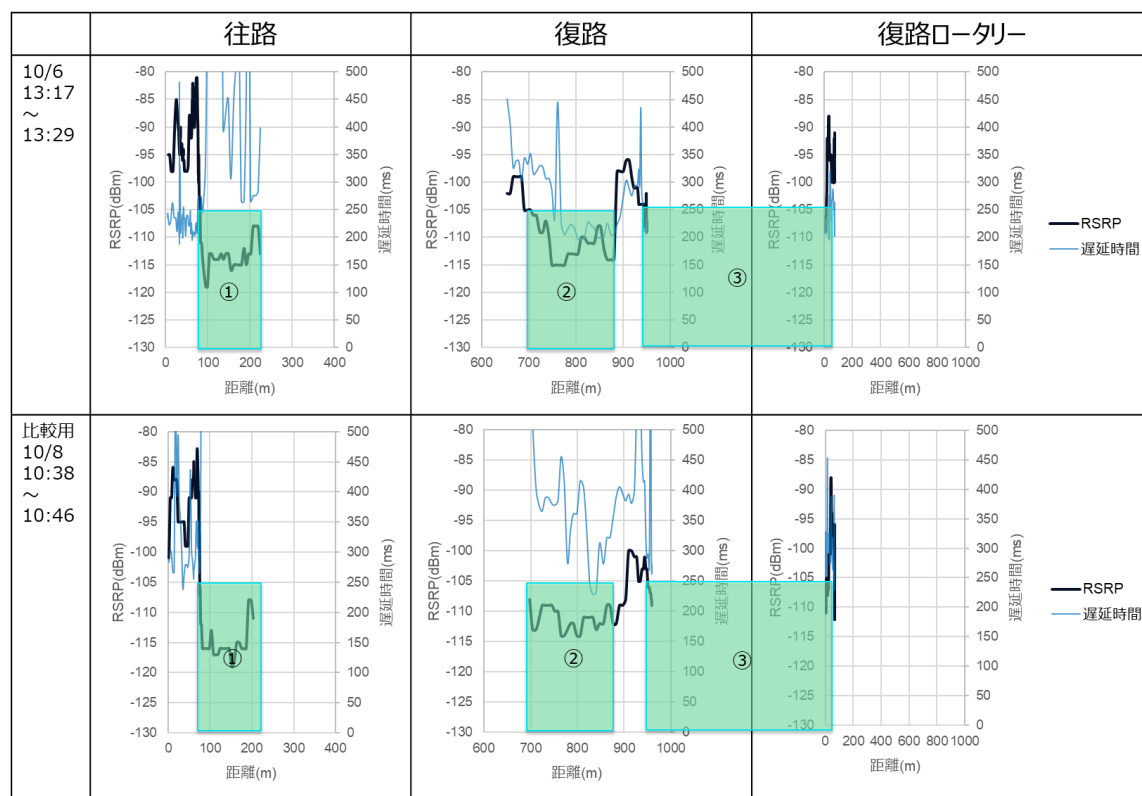


図 33 電波受信強度の低い場所の特定（ローカル 5G 網）

その上で、RSRP の低い該当区間の伝送映像について、AV-QoS の ON, OFF 映像を比較し映像乱れが解消され、滑らかな映像となっているかを 16 名の被験者に対し、キャリア網における AV-QoS あり / AV-QoS なし、ローカル 5G 網における AV-QoS あり / AV-QoS なしの各映像について定性評価を行った。具体的には、基準映像とするローカル 5G 網における AV-QoS なしに点数（評価：0～100）をつけ、それと比較して他の映像に点数を付けるという方法で実施した。相対評価結果は以下の表となった。平均値は基準映像としたローカル 5G 網における AV-QoS なしを 50 点として各映像の相対値を算出し、平均を求めた値となっている。

表 38 相対評価結果

	ローカル5G		キャリア	
AV-QoS	なし	あり	なし	あり
平均値	50	69.4	18.0	45.9

評価結果より、キャリア網/ローカル 5G の両方で AV-QoS のあり/なしで値の差分があることから、評価者は AV-QoS の効果により滑らかに見えることが確認された。特にキャリア網では相対値換算で 30 点近くの向上が見られた。統計学的にも t 検定の片側 p 値がローカル 5G：0.00008、キャリア網：0.0000014 であったことから評価者のほぼ全員が効果を感じることができていることを確認した。

また、ローカル 5G の映像がキャリア網より相対値平均が高い値となっていることから、ローカル 5G ではより滑らかな映像が得られていることも確認された。

以上の結果から、キャリア網/ローカル 5G における映像伝送では AV-QoS の効果により映像を滑らかにできたと言える。また、ローカル 5G は RSRP が低い場所においても滑らかに感じられる映像が伝送出来ており、これはキャリア網と異なり利用者の有無の違いにより帯域を確保できているためと推測される。

(2) KGI/KPI との比較結果

表 39 定性評価の目標値

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	伝送後の映像について、監視室の監視員の視認による監視に課題となる大きな映像乱れなどがないことを確認する。

1) 伝送後の映像について、監視室の監視員の視認による監視に課題となる大きな映像乱れなどがないことを確認する。

(1) 1) 記載のとおり、遠隔監視映像の乱れについて、①キャリア 4G/5G のみ、②Mobile-QoS、AV-QoS のどちらか一方適用時、③Mobile-QoS と AV-QoS の両方適用時、④ローカル 5G (AV-QoS あり/なし含む)、⑤ネットワーク切替に伴うハンドオーバー前後区間で乱れがないと評価された順序は、④③②①⑤であった。運行に、バス周囲の「状態の監視」までが必要であるとする、④～①はいずれも支障なく監視可能と評価された。一方、運行に、自動運転の再開を含むような「遠隔操作」までが必要であるとする、④③が利用可能と評価された。ただし、③については「いいのではないくらい。大丈夫とまでは言い切れない」というレベルであった。⑤については、ハンドオーバー区間前後のフレームの飛びが大きく、「状態の監視」の際にドラレコのように後から使うとしても厳しい品質と評価された。

映像品質について、ローカル 5G では、キャリア 4G/5G に対し、画像のモヤが減少するなど、画像の鮮明さに対し明らかな改善がみられ(図 34 キャリア 4G/5G 使用時(左)とローカル 5G 網使用時の監視画面(道路状況)) 状況確認映像への信頼度が増した。

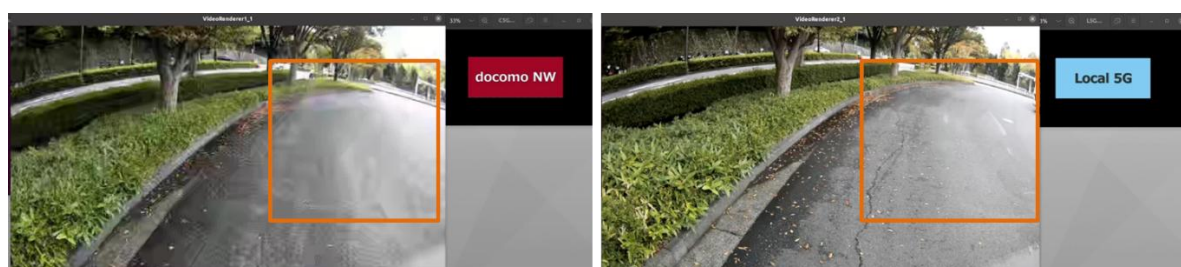


図 34 キャリア 4G/5G 使用時(左)とローカル 5G 網使用時の監視画面(道路状況)

また、ローカル 5G では、キャリア 4G/5G で確認が困難であった、人物の振る舞いや表情についても鮮明に見えるため「近くは表情も見える。離れていても前より見やすい。」「車体写着いる文字とか1つ1つが見やすくなった。」と確認しやすさの明確な違いを実感していた。



図 35 キャリア 4G/5G 使用時（左）とローカル 5G 網使用時の監視画面（人物）

(3) 考察

- 自動運転レベル 4 であっても、遠隔監視の役割と操作内容に応じた映像品質レベルの設定が必要

本検証では、監視の役割が、対象車両の「状態の監視」であれば Mobile-QoS や AV-QoS を使用せずとも監視可能であるが、「運転再開操作」を役割に、自動運転バスの「動き出し」を監視する場合、路肩に寄せるなどの難易度の高い遠隔操縦だけでなく、走行再開のロック解除といった簡易な操作であっても、周囲を確認する際の緊張感が大幅に高まるため、ローカル 5G 相応の映像品質レベルが必要といった声が上がった。この際の映像の乱れによる遠隔監視への支障は、頻度高いカクツキやフレームの飛びなどで一瞬でも映像が停止し、見えない瞬間が発生することが最も怖いと懸念された。

自動運転レベル 4 での監視の役割と遠隔操作内容とともに、適した品質の通信・伝送技術の検討が必要と考えられる。参考までに運行管理者にヒアリングした、操作例と求められる映像品質レベルを例示する。

表 40 操作例と求められる映像品質レベル

	想定する操作	求められる映像品質レベル
運転再開の動き出し	自動運転バス停止状態から走行再開のための動き出しを想定した操作。	操作の難易度に関わらず、フレームの飛びなど見えない瞬間が発生しないレベルの映像品質が求められる。
緊急停止	やむを得ない時に限り実施、道路の先で起こったことを察知し、危険箇所に到達する前に停止させる操作を想定。	映像品質レベルよりも、急ブレーキにならずに安全に停止させることが優先される。
自動運転モードの終了	自動運転モードを終了するための自動運転バスの停止操作を想定する。横断歩道内などを避け、安全な場所で停止する必要がある。	映像品質というよりは、交差点など、停止してよい箇所かどうか分かるレベルでの映像品質で良いと考えられる。

- 遠隔操作時に映像が低品質でも、他手段との組み合わせで安全性向上の可能性あり

遠隔操作に求める映像品質レベルに達しない場合、通常の運転時に注意している観点を、別の手段で多角的に補完することで、映像品質への依存度を下げたり、安全性を高められたりする可能性がある。表 41 安全性向上にむけた補完手段例 に運行管理者にヒアリングした補完手段を例示する。

表 41 安全性向上にむけた補完手段例

安全対策	注意したい点	補完手段（例）
バス床下対策	動き出し時に特になにもないことを確認したい。	床下のピンポイントな映像、センサ類を活用し確認レベルを上げる等
勾配対策	遠隔では勾配が見づらく、下り坂でブレーキがかかる場合の、車内のお客様の安全リスクを回避したい。	勾配を加味した制御、車内安全策（アナウンス、ファシリティ連携など）
車外への周知	自動運転バス動き出しの際に、周囲へ注意喚起したい。	車外スピーカーなどで、どのような動きをするかを周知

- 滑らかな映像伝送の実現にはアプリケーションでの QoS のみではなく、通信帯域を確保することと合わせて品質確保する施策をうつことで高い効果を得ることが出来ると考えられる

6.4.1 (1)-2) にて提示した相対評価結果から、今回の検証のために設置したローカル 5G 網における評価結果が一般利用者向けに敷設されたキャリア網における評価結果と比べて高い評価を得た。特にローカル 5G 網において AV-QoS 機能を使用しなかった場合(スコア 50)と、キャリア網において AV-QoS 機能を使用した場合(スコア 45.9)の比較から、通信帯域の確保が滑らかな映像伝送に寄与する効果が大きいことが推察される。一方、ネットワークについては既存設備が自動運転の通信基盤として流用されることが想定され遠隔監視装置にとって常に最適な通信帯域が確保される保証はないため、アプリケーションでの QoS 制御を合わせて活用し、滑らかな映像伝送を安定して実現することが必要であると考えられる。

6.4.3 「通信システムに関する検証」の実施結果

(1) 開発・評価項目の結果

表 42 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	映像伝送遅延時間の評価
2	滑らかな映像伝送が可能な最低伝送レートについての評価

3	Cradio を活用した置局配置、ハンドオーバー等に関する評価
4	WiGig 中継システムの適用効果、設置性等に関する評価

1) 映像伝送遅延時間の評価

4.4.3 に記載のとおり、映像伝送時の伝送時刻と伝送データ情報（伝送レートや遅延時間等）を確認するため、以下の手順で検証を行った。

- ① 自動運転バス走行中の GPS データ、電波受信強度データを取得するとともに、同時に伝送映像の録画、遅延時間、スループットデータを取得。
- ② カメラ入力＋モニタ表示遅延時間の取得。
- ③ GPS データと電波受信強度データ、遅延時間、スループットの紐づけを実施。
- ④ 紐づけた GPS データ、電波受信強度の数値から電波受信状況の悪い場所を特定。
- ⑤ 電波受信状況が強度の悪い場所/良い場所それぞれにおける遅延時間の平均値を算出し、データに含まれていないカメラ入力＋モニタ表示遅延時間を加算し、目標値の 400ms 内かを確認。

検証対象は、電波受信感度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価でも仮定した「利用者が多い時間帯」である、日曜日のデータを採用した。「RSRP の低い/高い」は、6.4.2 2) 電波受信感度が弱い状況下における映像乱れ状況の評価でも仮定した「-105dBm を閾値」として、キャリア網、ローカル 5G それぞれで遅延時間を確認した。

キャリア網に関しては、RSRP:-105dBm より高い/以下の場所を分け、それぞれで遅延時間の平均を求めたところ、全体平均及び電波受信状況が良い場所においては目標の 400ms を達成できた。一方で、電波受信状況が悪い場所では平均で 400ms を超える結果となった。（遅延時間の全体平均：294.20ms、電波受信状況が良い場所における平均：255.55ms、電波受信状況が悪い場所：平均 404.51ms）なお、グラフ内の横軸は下記の図 36 図 37 キャリア網における RSSP の高低状況のグラフ内の横軸の基点配置内の 3 箇所をそれぞれ基点とし、そこからの距離としている。



図 36 図 37 キャリア網における RSSP の高低状況のグラフ内の横軸の基点配置

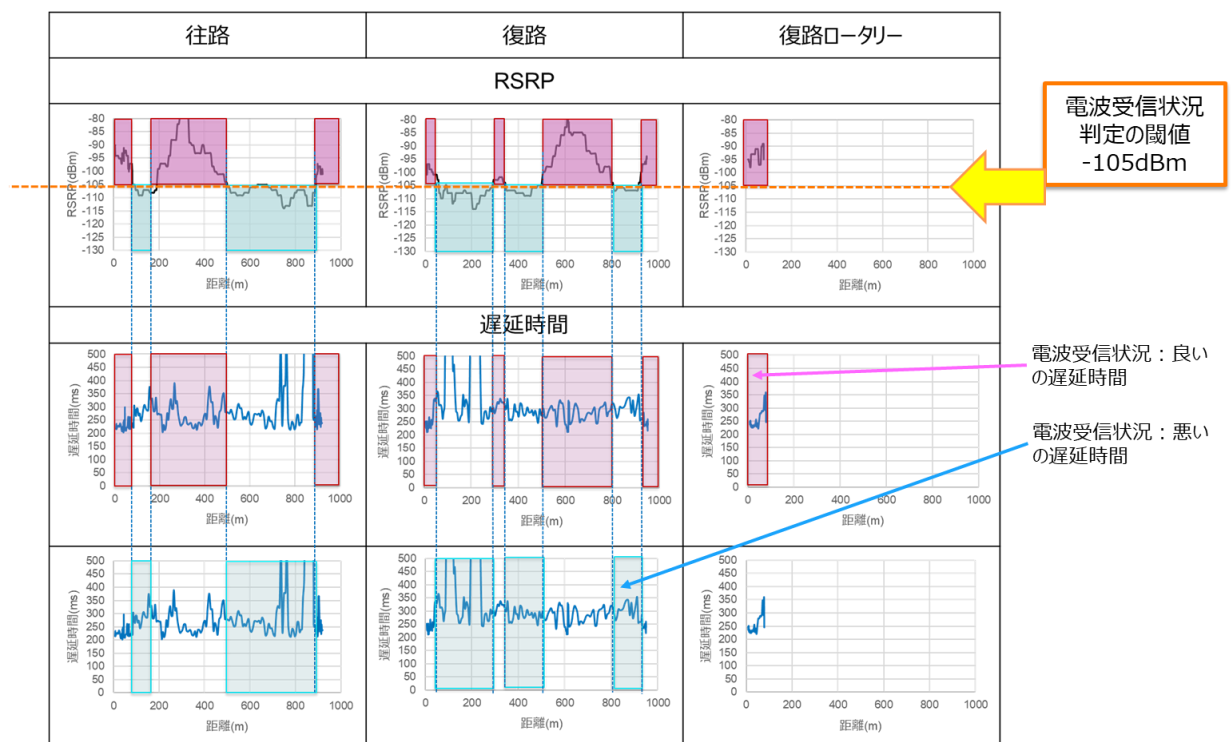


図 37 キャリア網における RSSP の高低状況

表 43 キャリア網における遅延時間の平均

	遅延時間(ms)	目標 400ms 以内可否
全体平均	294.20	○
電波受信状況が良い場所の平均	255.55	○
電波受信状況が悪い場所の平均	404.51	×

ローカル 5G に関しても、RSRP: -105dBm より高い/以下の場所を分け、それぞれで遅延時間の平均を求めたところ、瞬間的に遅延時間 400ms を超えることはあるが、RSRP に関わらず平均すると目標とした遅延時間 400ms 以内の達成を確認出来た。（遅延時間の全体平均：293.49ms、電波受信状況が良い場所における平均：255.46ms、電波受信状況が悪い場所における平均：331.51ms）

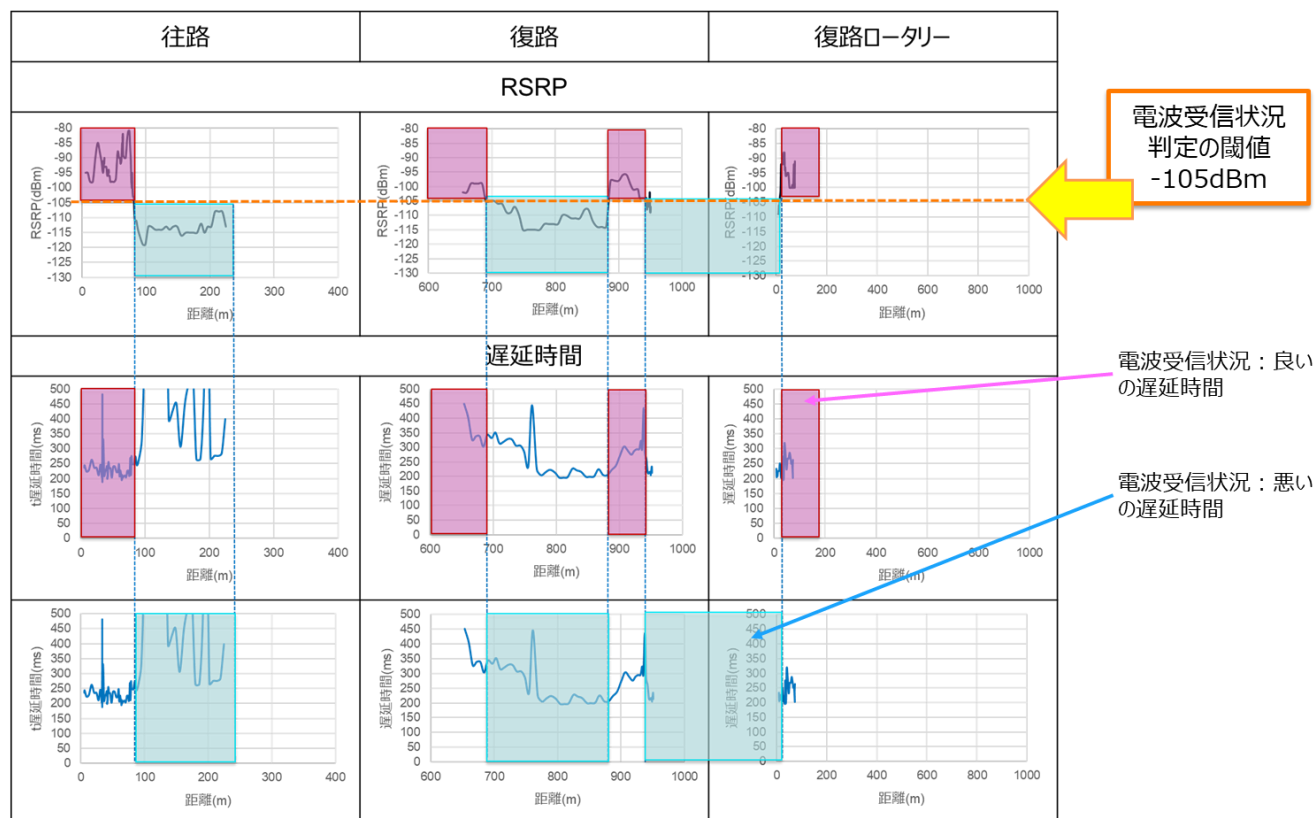


図 38 ローカル 5G における RSRP の高低状況

表 44 ローカル 5G 網における遅延時間の平均

	遅延時間(ms)	目標 400ms 以内可否
全体平均	293.49	○

電波受信状況が良い場所の平均	255.46	○
電波受信状況が悪い場所の平均	331.51	○

2) 滑らかな映像伝送が可能な最低伝送レートについての評価

4.4.3に記載のとおり、解像度 FullHD、フレームレート 30fps 以上で画像解析が可能な滑らかな映像伝送が可能な伝送レートを特定するために、自動運転バス走行中の映像を録画し、人や車が映っている時間帯を切り抜き、この映像について伝送レートの最大値を 0.5Mbps, 1Mbps, 5Mbps と設定する映像伝送をそれぞれ行い、その映像の録画を行った。その上で、当該録画映像について yolov7 をベースにした画像解析を行い、どこまでのレートであれば人や車が解析できるかを確認したところ、最大 1Mbps と 5Mbps に設定した場合に、同じタイミングで車や人の検知が確認された。



図 39 各伝送レートに拠る画像解析の結果比較

上図のとおり、実際に人や車が映った際の検出タイミングを確認した結果、5Mbps と 1Mbps は同様の検出結果となった。一方で、0.5Mbps 時の設定では帯域不足により映像がコマ送りのようになり、検出タイミングのフレーム抜けが発生し、人の検出ができない場合があることが確認された。

yolov7 をベースにした画像解析においては、1Mbps 程度の伝送レートがあれば画像解析が出来ることが確認できたため、画像解析をするためには 1Mbps 以上のビットレートを確保する必要があることが分かった。

3) Cradio を活用した置局配置、ハンドオーバ等に関する評価

4.4.3に記載のとおり、Cradio に関しては、本実証におけるローカル 5G 基地局の最適な設置場所や、ローカル 5G とキャリア 5G の最適なハンドオーバーポイント（システム間の切り替え位置）を実証に先立ち導き出し、その効果を評価した。

Cradio 伝搬推定・置局設計技術（ローカル 5G 基地局の最適な設置場所を導出に該当する技術）は、アプリケーション要件を考慮し、コストミニマムな自動設計導出するが、この特徴を踏まえて「必要最小数またはコスト最小となるアンテナ配置設計を導出し、劣化率 5%以下（もしくはエリアカバレッジ率 95%以上）で所望受信電力(dBm)が得られること。」を評価観点として、①～③の順で実施した。

- ① 当該エリアにおける 3DCAD データをプラトーより自動生成し、Cradio 伝搬推定・置局設計技術によって得られたアンテナ向きとアンテナ高によってローカル 5G の設置条件を導出
- ② ①の設置状態において、車両走行位置に応じた受信電力を取得し、所望受信電力以下となる劣化率を評価
- ③ 測定結果と設計結果の比較

Cradio 伝搬推定・置局設計技術によって、ローカル 5G 基地局 A はアンテナ向きを水平 200 度、垂直 10 度、アンテナ高 12m、ローカル 5G 基地局 B はアンテナ向きを水平 100 度、垂直 5 度、アンテナ高 14m と導出し、準同期方式では劣化率 1.8%以下で所望受信電力-120dBm が得られた。なお、本実証では準同期方式と同期方式を用いて運用を行っており、①のシミュレーションにおいて、準同期方式を基準として置局設計を行った。参考として、同期方式においては劣化率 7.1%以下で所望受信電力-114dBm となった。

Cradio 品質予測技術（ローカル 5G とキャリア 5G の最適なハンドオーバーポイント導出に該当する技術）は、NW 切り替えにおけるスループット低下のプロアクティブな予防に寄与するが、この特徴を踏まえて「NW 切り替え時に、所望スループット以下に低下する時間率 5%以下を可能とすること。」を評価観点として、①～②の順で実施した。

1. 自動運転バスを想定した車両運行中のローカル 5G とキャリア 5G の走行位置に応じたスループットデータを取得。測定は UDP トラフィックを流して評価し、キャリア測定では Mobile-QoS を適用することでスループット向上を図った。
2. 取得したスループットデータを学習データとして、品質変化を予測し、最適なハンドオーバーポイントを導出した。

Cradio 品質予測技術によって、目標とするフル HD 映像が安定的に伝送できる所望スループット以下に低下する時間率が 5%程度となった。

また、キャリアは、利用状況に応じてスループットが変動することから、午前、午後に分けて品質が時間とともに変わった場合の、ハンドオーバーポイントを導出した。キャリアの利用状況によって変化するスループットを予測し、最適なハンドオーバーポイントを時間に応じて手動設定しておくことで、安定的な映像伝送を可能とした。

なお、Cradio によるローカル 5G の基地局設置場所を検討・選定した結果、キャリア網によって遠隔監視映像の高品質無線伝送に必要な通信速度が十分に見込めない走行区間において、ローカル 5G の適用効果を検証するため、キャリア網（当該区間では LTE）と設置後のローカル 5G の上りリンク・スループットをそれぞれ取得した。ローカル 5G の構築前に、バスの走行ルート上の公衆 NW における上りリンク・スループットを測定した結果を以下の図に示す。同図左より正門ロータ

リーはドコモの 5G がカバーし、最大約 60Mbps となっている一方で、北門へ向かう通り沿いは、ドコモの LTE がカバーし、最大約 30Mbps、平均 10Mbps 程度であった。これに対して、ローカル 5G の構築後（検証時期①に相当）では、同図右より LTE 区間であった通り沿いに着目すると、ローカル 5G 基地局 A で最大約 80Mbps、基地局 B で最大 70Mbps となり、LTE の倍以上の最大スループットを得られた。

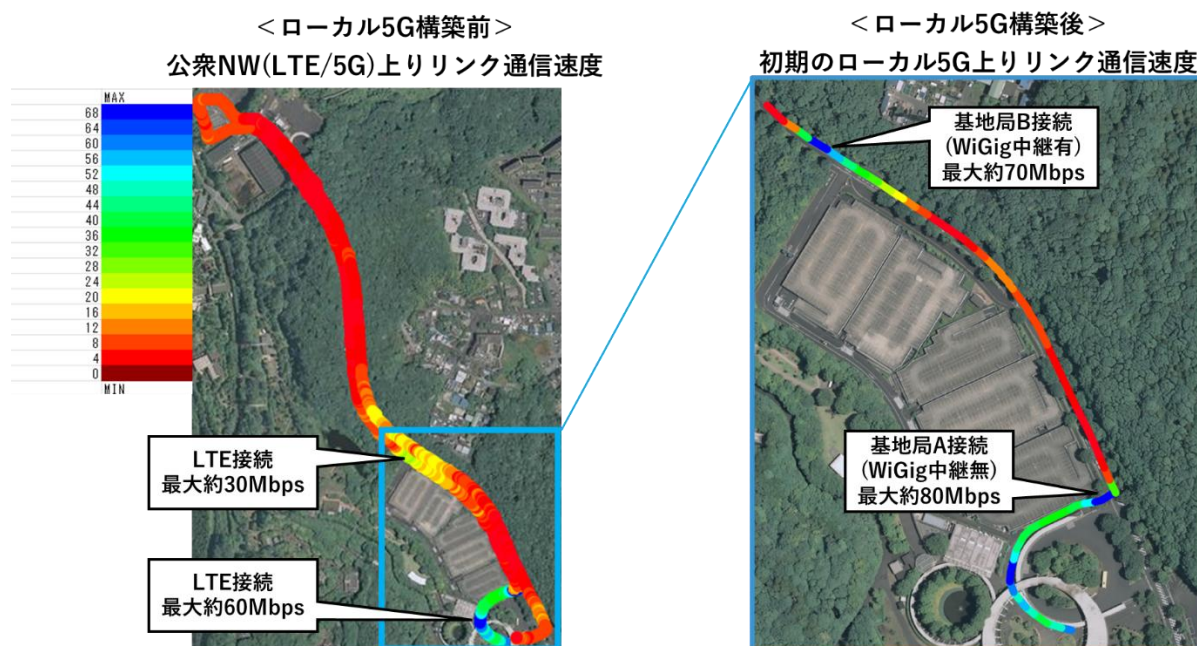


図 40 ローカル 5G 構築前後のスループット測定結果

設置性の評価については、①設置直後、②初期運用期間（一部 WiGig 通信モジュールの調整を継続）、③安定運用期間（一部 WiGig 通信モジュールの調整後）の 3 段階において個々の WiGig 通信モジュールが有する通信速度測定機能と測定ツール（可搬 PC 上で動作する専用ソフトウェア）を用いて、中継区間毎に双方向の通信速度（測定時間 30 秒以上の平均値）を測定したところ、以下の結果となった。

4) WiGig 中継システムの適用効果、設置性等に関する評価

4.4.3 記載のとおり、本実証において活用する WiGig 中継システムは、ローカル 5G 基地局のエリアを、光回線の設置状況に依らず柔軟に展開可能とした上で、所望の通信性能を安定して再現可能であることが重要である。そこで、WiGig 中継システムに着目した検証として、「適用効果の評価」及び「設置性に関する評価」を実施した。

適用効果の評価については、以下の手順で検証を行った。

遠隔監視映像伝送用端末と専用測定ツールを用いて走行しながら対象区間における LTE（NTT ドコモ網）の伝送スループットを測定した。対象区間は、ローカル 5G 基地局 A～同基地局 B とし、同基地局 B からよこはま動物園北門区間においても参考データとして測定した。各区間では、基本的に往路・復路の両方について測定した。

①と同じ測定環境を用いて走行しながら対象区間におけるローカル 5G の伝送スループットを測定した。対象区間は、①と同一区間（ローカル 5G 基地局 B からよこはま動物園北門区間は除く）とし、各区間では、基本的に往路・復路の両方について測定した。

WiGig による中継について、表 45 WiGig 中継の各区間における通信速度測定結果のとおり、スループットに大きな差分はなく、ローカル 5G の性能としては問題ないことが検証できた。

表 45 WiGig 中継の各区間における通信速度測定結果

平均スループット [Mbps]

	A→中間点	中間点→A	中間点→B	B→中間点
① 設置直後		584.38		
② 初期運用期間	543.29	620.20	1544.77	
③ 安定運用期間	1828.70	1851.56		

最大スループット [Mbps]

	A→中間点	中間点→A	中間点→B	B→中間点
① 設置直後		746.95		
② 初期運用期間	767.46	788.99	1711.39	
③ 安定運用期間	1953.15	1969.35		

最小スループット [Mbps]

	A→中間点	中間点→A	中間点→B	B→中間点
① 設置直後		161.32		
② 初期運用期間	157.71	291.55	983.82	
③ 安定運用期間	397.84	578.34		

※A、B はそれぞれ基地局 A、基地局 B を表す。

(2) KGI/KPI との比較結果

表 46 定量評価の目標値

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	映像伝送遅延時間 400ms 以内
	2	エンコード設定調整を行い、本システムにおける FullHD30fps における最低伝送レートの特定する

1) 映像伝送遅延時間 400ms 以内

以下の図のとおり、遅延時間は AV-QoS 及び Mobile-QoS を活用したことで、全体平均で目標の 400ms 以内を達成することができた。

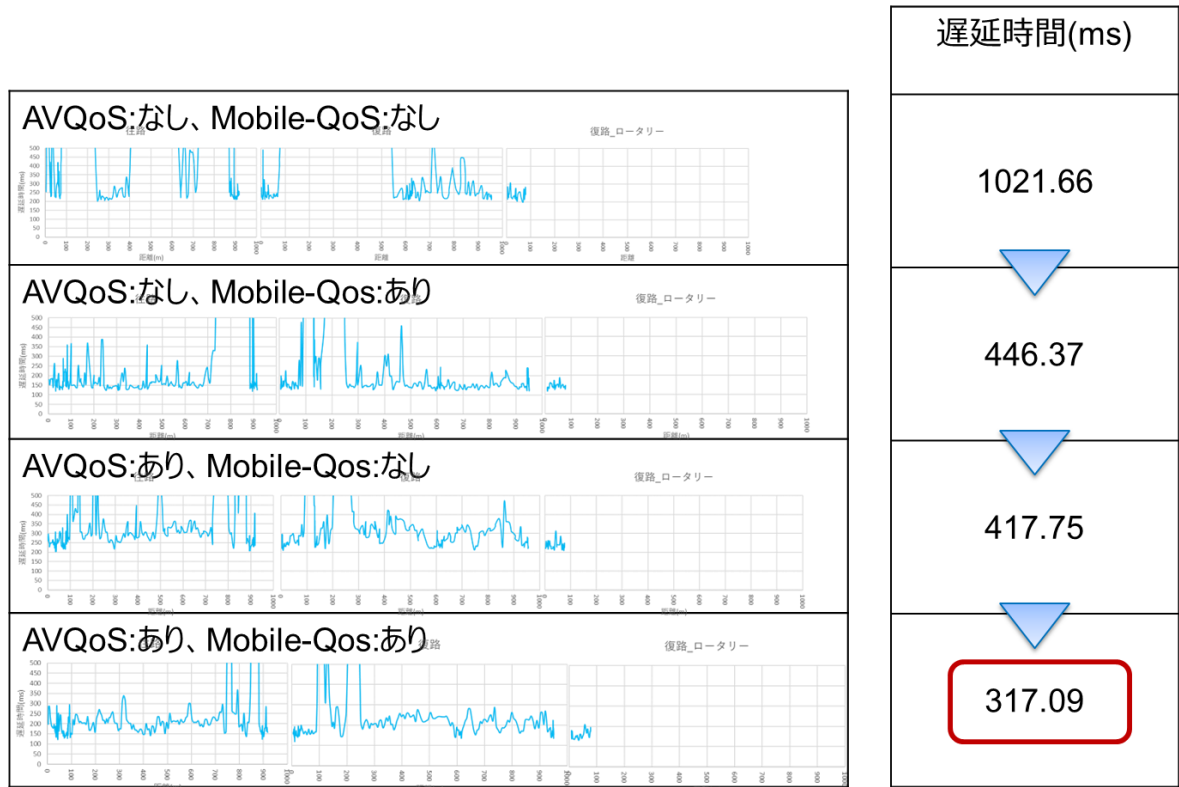


図 41 AV-QoS 及び Mobile-QoS の適用状況と遅延時間の比較

2) エンコード設定調整を行い、本システムにおける FullHD30fps における最低伝送レートの特定する

yolov7 をベースにした画像解析においては、5Mbps と 1Mbps は同じタイミングで車や人の検知が確認された。一方で、500kbps 時の設定では人の検出ができない場合があることが確認された。今回の画像解析システムを用いた画像解析のためには、1Mbps 以上のビットレートを確保する必要があることが特定できた。

(3) 考察

- 映像伝送遅延時間については、キャリア側では、遅延時間の全体平均：294.20ms、電波受信状況が良い場所における平均：255.55ms という条件において目標の 400ms 以内を達成できた。一方で、電波受信状況が悪い場所においては、平均 404.51ms となり、目標値より越えた時間となっていた。また、ローカル 5G 側では、瞬間的に遅延時間 400ms を超えることはあったが、遅延時間の全体平均：293.49ms、電波受信状況が良い場所における平均：255.46ms、電波受信状況が悪い場所における平均：331.51ms と電波受信状況に関わらず平均すると目標の 400ms 以内を達成できた。キャリア網、ローカル 5G それぞれで遅延時間を確認した結果、目標とした遅延時間 400ms 以内を達成するためには、キャリア網では-105dBm 以上の電波環境が必要だったと考えられる。
- 映像伝送レートの特定については、 yolov7 をベースにした画像解析においては、5Mbps と 1Mbps は同じタイミングで車や人の検知が確認された。一方で、500kbps 時の設定では人の検

出ができない場合があることが確認された。今回の画像解析システムを用いた画像解析のためには、1Mbps 以上のビットレートを確保する必要があったと考えられる。

- Cradio に関し、本実証では、ローカル 5G とキャリア 5G の最適なハンドオーバーポイントを導出することで品質劣化を軽減することができたが、電波品質の変動に対して、品質劣化未然にローカル 5G とキャリア 5G を切り替えることで、目標とするフル HD 映像が安定的に伝送できるスループットが得られたものと考えられる。また、キャリアの利用状況によって変化するスループットを予測し、最適なハンドオーバーポイントを時間に応じて手動設定しておくことで、安定的な映像伝送を可能とした。今後、計算結果をシステムへ自動で更新設定するためには、品質予測機能と遠隔監視装置とリアルタイムに API 連携する必要があると考えられる。
- WiGig 中継に関し、適用効果に関する評価では、ローカル 5G の基地局を 2 箇所設置した結果、当初 LTE 接続により得られていた上りリンクの最大スループットが、各基地局ともに倍以上の最大スループットとすることが出来た（実験の後半では、基地局アンテナの調整を行い、ローカル 5G エリア全体でのスループット向上を図っている）。ここで、このスループットの増分は、基地局の違い、すなわち WiGig 接続の有無によらず倍以上となっている。これらのスループットは、WiGig 中継システムにおける無線伝送を含むものであるが、次項 2. の評価を通して、WiGig 伝送区間の通信速度が当該スループットの 50～100 倍の値となっており、通信速度の面では、スループットへの影響は無視し得るものであった。また、設置性に関する評価では、WiGig モジュールの設置直後、および、初期運用期間において、通信速度に関する中継区間 A の測定結果は、中継区間 B の測定結果の 1/2 以下となっていたため、その原因調査を行うべく、対向する WiGig モジュール間の見通し（LOS）が確保できているかをモジュールの設置位置からのカメラ撮影した動画を解析した結果、モジュールを取り付けている水平ポール突き出し量によって、街路樹の枝葉の影響が残存することが判明した（設置直後、初期運用では、枝葉の間を通過した一部のミリ波電波による通信となって速度低下が生じていたものと考えられる）。この影響に対して、さらに降雨減衰が重畳することとなる。

6.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

6.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証

本ユースケースについては本コンソーシアムでの実施無し

6.7 レベル 4 の社会実装に向けた検討

6.7.1 運用検証

(1) システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価（特に監視員の軽減負担等）

1) 実施結果

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（定性評価と遅延データの比較）】

番号 1 ～ 5 の各便を比較し、「AV-QoS」、「Mobile-QoS」、「Mobile-QoS×AV-QoS」、「無線併用の評価」の比較を実施した。

表 47 比較検証の概要

番号	システム名称	通信システム構成	評価観点	遅延に関する結果
1	キャリア閉域網活用システム	docomoMEC 閉域網	—	※評価用の比較対象
2	AV-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+AV-QoS	AV-QoS の評価 ※1,2 便の比較	遅延時間のベースラインに復旧するまでの時間が 1 と比較して短くなっている。また、遅延量のピークも相対的に小さくなっている
3	Mobile-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+Mobile-QoS	Mobile-QoS の評価 (③④) ※1,3 便の比較	弱電界でもスループットが低下しにくく、1 と比較して遅延時間が目標値を超えてしまう回数が減ることが確認できた。
4	Mobile-QoS、AV-QoS 活用システム	docomoMEC 閉域網+AV-QoS+Mobile-QoS	Mobile-QoS×AV-QoS の評価 ※1,4 便の比較	遅延時間が目標を超えてしまう回数と、遅延した場合のベースラインまで復帰するまでの時間とピークの改善が確認でき、Mobile-QoS と AV-QoS の双方の改善効果が確認できた。
5	ローカル 5G/キャリア通信併用システム	docomoMEC 閉域網/ローカル 5G 併用+AV-QoS	無線併用の評価 ※3,5 便または 4,6 便の比較	平均の遅延時間について 1~4 便と比較してローカル 5G 環境ではさらに小さくなっていることが確認できた。ただし、今回採用した伝送パスをアプリケーションレイヤで切り替える方式において、実無線環境において切り替えべきポイントとの精度誤差があるため遠隔監視に影響が出る結果となった。

① 「AV-QoS」に関する評価

1 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 無) と 2 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 無) の比較を行い、「AV-QoS」に関する評価を実施した。

※図表内 AQoS (AV-QoS)、MQoS (Mobile-QoS)

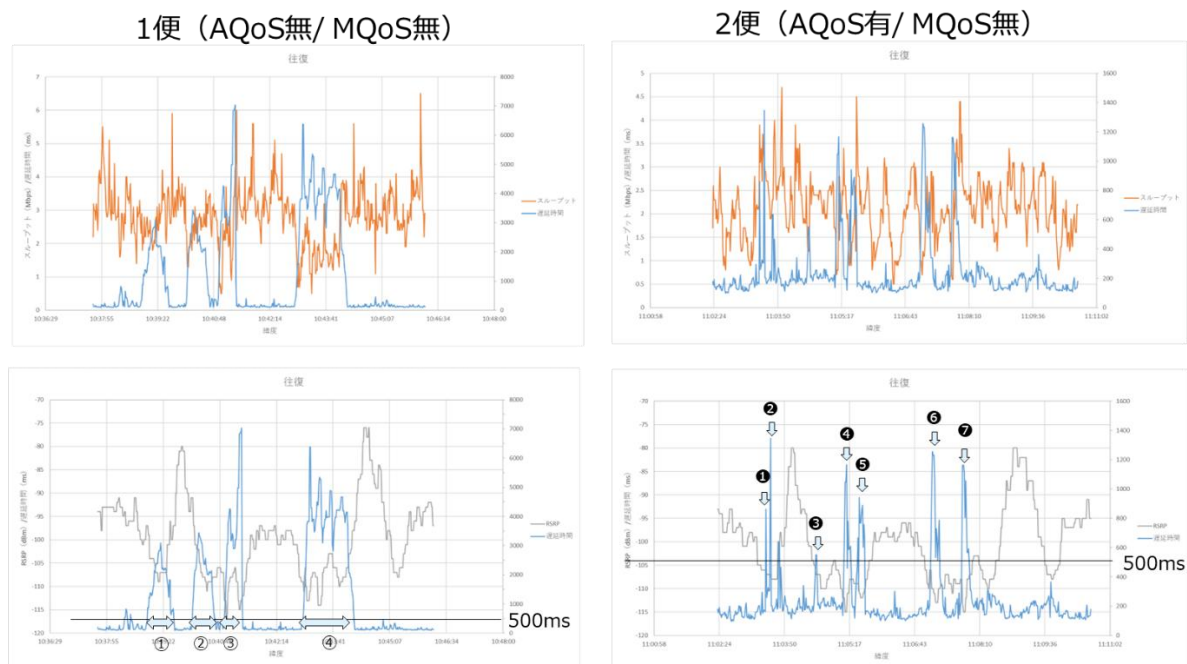


図 42 1 便と 2 便の比較

1 便について、モニタ遅延 (106ms) を除く伝送部分における遅延時間 294ms を超える遅延が発生している割合は走行時間ベースで 41%(211s/513s) で、プロットデータ中の①～④について遅延時間のピーク値は、それぞれ 3093ms, 3442ms, 7029ms, 6377ms となっている。無線帯域低下による遅延時間増加について、アプリケーション側に与える影響時間が相対的に長い。また、遅延時間のピークも相対的に大きくなっており、解消にはより大きなパケットバッファやジッタバッファを設ける必要があることが分かる

2 便について、遅延時間 294ms を超える遅延時間が発生している割合は走行時間ベースで 14%(71s/496s) で、プロットデータ中の①～⑦について遅延時間のピーク値は、それぞれ 862ms, 1347ms, 551ms, 1167ms, 942ms, 1231ms, 1163ms となっている。抽出した測定ポイントにおいて、無線帯域低下による遅延時間の増大がアプリケーション側に与える影響時間は相対的に短い。また遅延時間のピークも相対的に小さくなっている。理由としては AV-QoS より無線帯域にしたがってアプリケーション側がネットワークに要求するスループットが調整され、パケットバッファの早期の解消を実現しているためだと考えられる。

② 「Mobile-QoS」に関する評価

1 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 無) と 3 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 有) の比較を行い、「Mobile-QoS」に関する評価を実施した。

※図表内 AQoS (AV-QoS)、MQoS (Mobile-QoS)

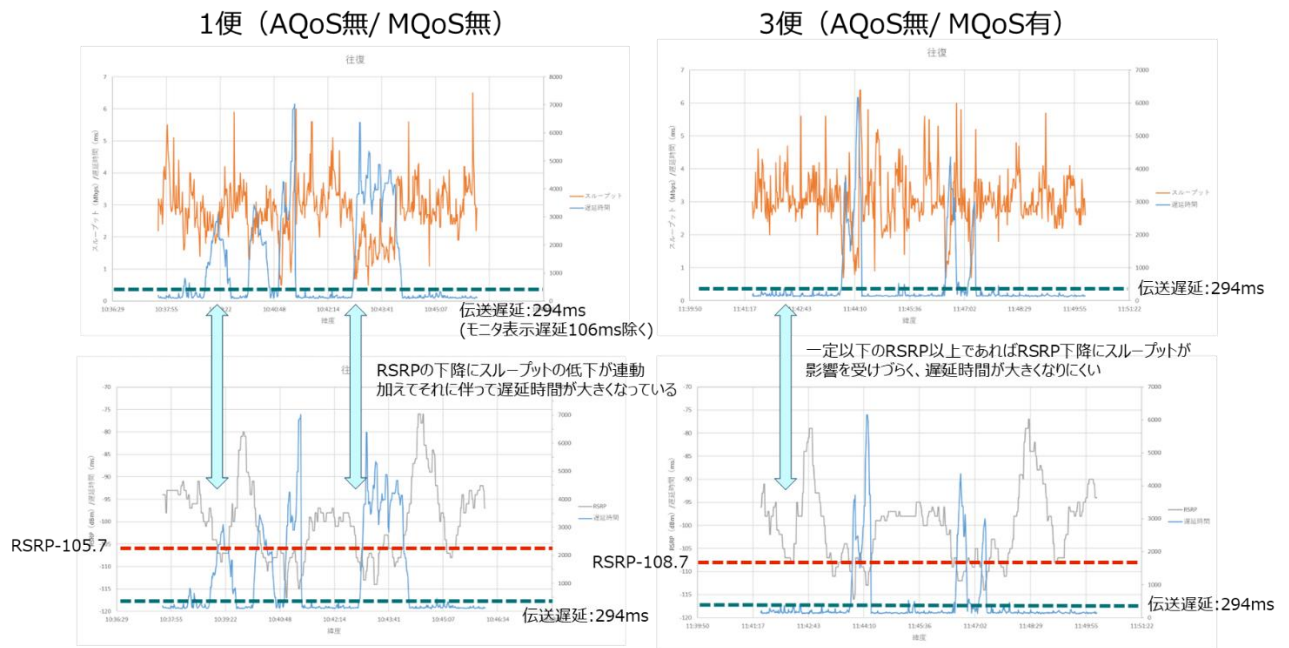


図 43 1 便と 3 便の比較

1 便について、伝送遅延:294ms を満たさない地点の平均 RSRP は、-104.9(往路)、-107(復路)、往復平均-105.7、上記の中で最も RSRP が大きい場所で RSRP-91 を確認した。3 便について、伝送遅延:294ms を満たさない地点の平均 RSRP は、-107.8(往路)、-109.8(復路)、往復平均-108.7、上記の中で最も RSRP が大きい場所で RSRP-98 を確認した。本実証の遅延目標において、アプリケーション側から、必要スループットが 3Mbps を要求した場合、Mobile-QoS なしだと自動運転フィールドは RSRP-91dBm を下限とした無線環境を必要とする。

一方で Mobile-QoS ありだと RSRP-98dBm を下限値とした無線環境まで条件を引き下げることができる※測定タイミングにおける同エリアの無線リソース利用状況を再現した場合

これは、Mobile-QoS を利用した場合、少ないチャネルリソース内でも優先的に割り当てられた結果、セルエッジ等の弱電界においてもアプリケーション側が要求するスループットを維持でき、バッファリングや再送処理が起こりづらい状況だったからだと考えられる。

③ 「Mobile-QoS×AV-QoS」に関する評価

1 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 無) と 4 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 有) の比較を行い、「Mobile-QoS×AV-QoS」に関する評価を実施した。

※図表内 AQoS (AV-QoS)、MQoS (Mobile-QoS)

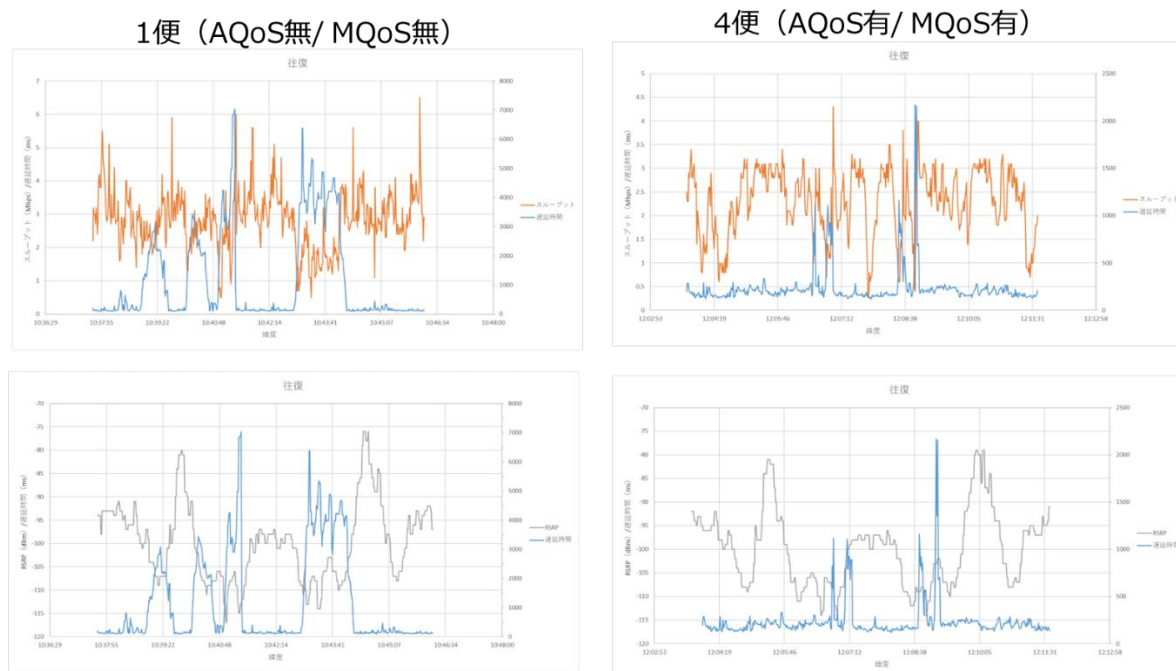


図 44 1 便と 4 便の比較

1 便について、伝送遅延:294ms を満たさない地点の平均 RSRP は、-104.9(往路)、-107(復路)、往復平均-105.7、上記の中で最も RSRP が大きい場所で RSRP-91 を確認した。遅延時間 294ms を超える遅延時間が発生している割合は走行時間ベースで 41%(211s/513s)、プロットデータ中の①～④について遅延時間のピーク値は、それぞれ 3093ms, 3442ms, 7029ms, 6377ms となっている。

4 便について、伝送遅延:294ms を満たさない地点の平均 RSRP は、往復平均-108.8。上記の中で最も RSRP が大きい場所で RSRP-81 を確認した。プロットデータ中の①～④について遅延時間 294ms を超える遅延時間が発生している割合は走行時間ベースで 8%(37s/477s)、遅延時間のピーク値は、それぞれ 1104ms, 1109ms, 1162ms, 2169ms となっている。

4 便については Mobile-QoS の RSRP 下限値を下げる効果により、遅延時間が目標値を超えてしまう時間割合が減少 (41%→8%) している効果が認められる。また、遅延時間が超えてしまう場合でも、AV-QoS の効果により、遅延時間がベースラインに復帰するまでの時間、ピークの遅延量が小さくなっており、Mobile-QoS、AV-QoS の双方の効果が確認できた

④ 「無線併用」に関する評価

4 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 有) と 6 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 有/ローカル 5G 併用) の比較を行い、「無線併用」に関する評価を実施した。

※図表内 AQoS (AV-QoS)、MQoS (Mobile-QoS)

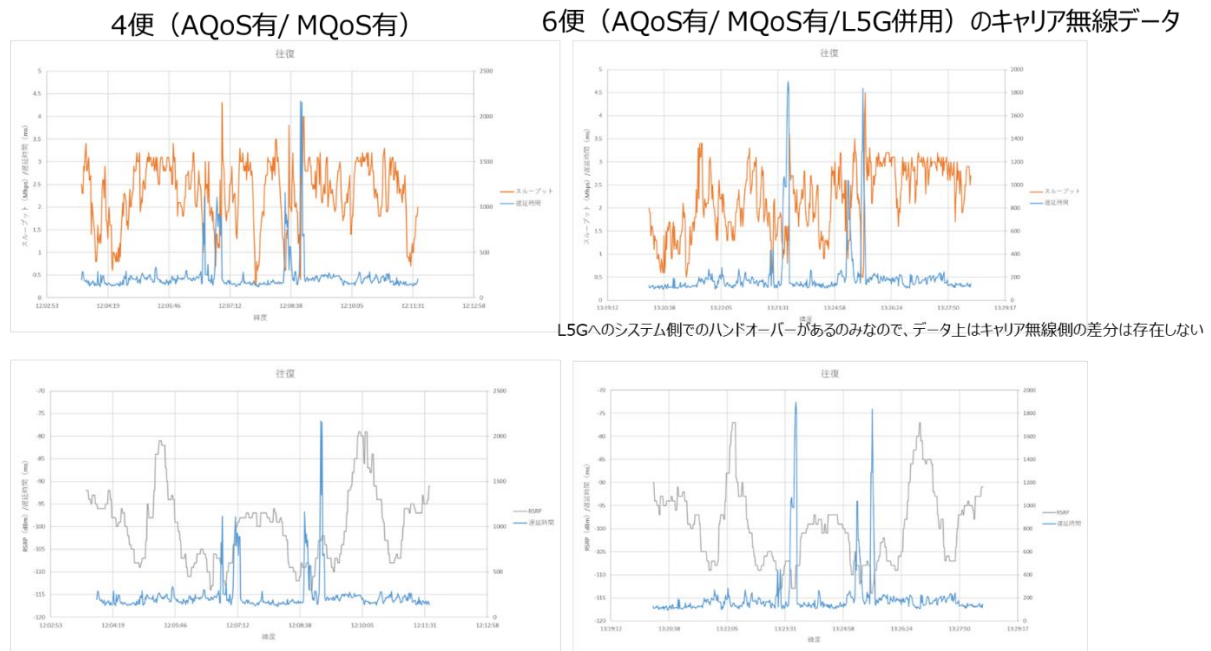


図 45 4 便と 6 便の比較 (キャリア無線部分)

4 便と 6 便についてのネットワークの差分はローカル 5G へのシステム側でのハンドオーバーがあるのみなので、キャリア無線側の差分はない

また、1 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 無)、3 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 有)、5 便 (AV-QoS 無/ Mobile-QoS 有/ローカル 5G 併用) と、4 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 有)、6 便 (AV-QoS 有/ Mobile-QoS 有/ローカル 5G 併用) を用いてローカル 5G のロータリエリアのスループット、遅延時間の比較を実施した。

ローカル 5G による占有チャネルリソースの割り当てにより、同エリア 1 便のキャリア無線通信よりも高いスループットが確認できた。また同様の理由により、スループット帯域が十分に確保され、伝送遅延についてもローカル 5G が最も小さいことが確認できた。3 便についてはローカル 5G スループットより高いが、無線部分の優先制御により電力受信強度によってはローカル 5G のスループットを超える箇所も生じていることが想定される。

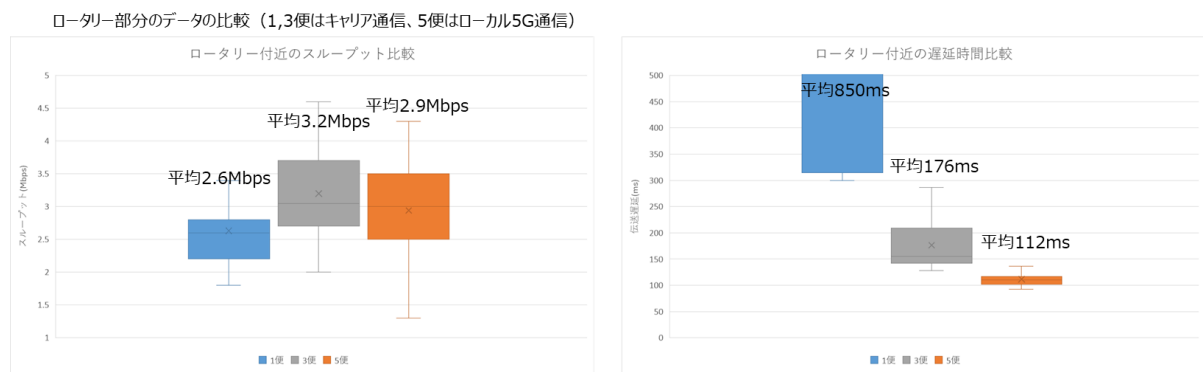


図 46 ロータリー付近のスループットと遅延時間の比較 (1、3、5 便)

また、6 便についても同様にローカル 5G による占有チャネルリソースの割り当てにより、4 便のキャリア無線通信よりも高いスループットが確認できた。同様の理由により、帯域が十分に確保され、伝送遅延についてもローカル 5G の方が小さいことが確認できた。

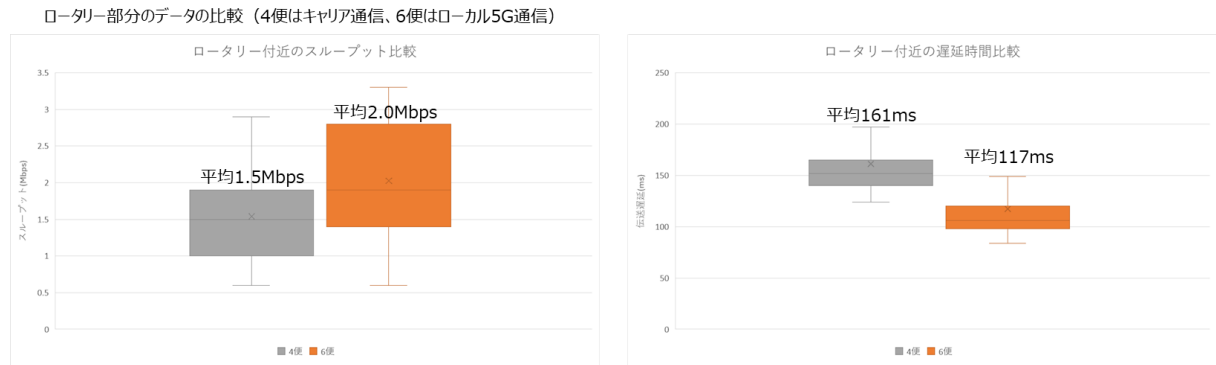


図 47 ロータリー付近のスループットと遅延時間の比較（4、6 便）

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（システム遅延時間及び解像度）】

① 「システム遅延時間」に関する評価

自動運転バスに取り付けた遠隔監視用カメラの前にて LED ライトを点滅させ、その映像を遠隔監視装置で閲覧。LED ライトと遠隔監視装置で映る映像とをビデオカメラで撮影し、LED ライトが光る/消えてから、遠隔監視装置画面内で LED が消える/光るまでの時間を計測した。Mobile-QoS 使用時には 2 系統同時に、ローカル 5G 使用時は 1 系統で伝送することとし、評価条件は以下のとおりとした。4 回の遅延時間を計測した。その平均値を以下の図に示す。

表 48 評価条件

No.	条件の概要	条件	
		I	II
1	閉域同士で異なる周波数帯（非混雑）	Mobile-QoS On ・ 1.7G 帯	Mobile-QoS Off ・ 800M 帯
2	ローカル 5G	-	ローカル 5G
3	閉域同士で同じ周波数帯（混雑）	Mobile-QoS On ・ 800M 帯	Mobile-QoS Off ・ 800M 帯

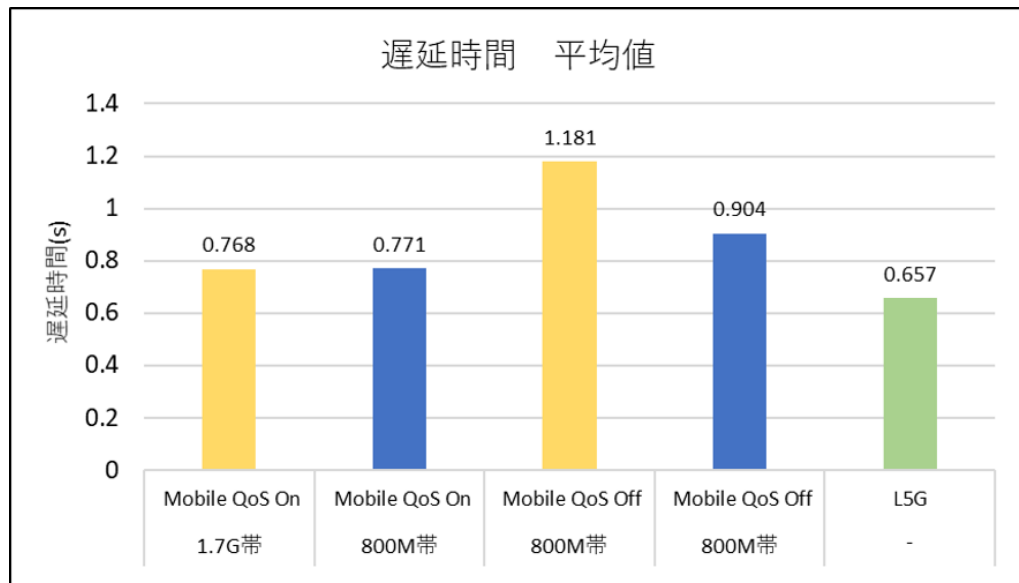


図 48 システム遅延時間の平均値

遅延時間が短い順に並べると、ローカル 5G(0.657s)、Mobile-QoS On 非混雑時(0.768s)、Mobile-QoS On 混雑時(0.771s)、Mobile-QoS Off 混雑時(0.904s)、Mobile-QoS Off 非混雑時(1.181s)となり、時間が最も短い条件はローカル 5G であった。次いで Mobile-QoS On 800MHz、Mobile-QoS On 1.7GHz となった。

② 「解像度」に関する評価

実証実験中の自動運転バス走行中に映像伝送した映像を遠隔監視装置で画面録画した動画を見て解像度に関する主観評価を行った。条件は評価①と同じとした。主観評価を行うものは、遠隔監視映像に見慣れている男性 4 名とした。各区間のおおよその映像の長さも示す。

表 49 評価条件

No	帯域幅	Mobile-QoS	No	帯域幅	Mobile-QoS
1	1.7GHz	ON	2	800MHz	Off
3	3800MHz	On	4	4800MHz	Off
			5	ローカル5G	

各区間のおよその時間

①45s ②54s ③44s ④38s

なお、ハンドオーバーによる映像品質への影響を極力減らすこと、映像時間が短い方が主観評価の信頼度が増すことを考慮し、走行ルートを①～④のエリアに区切って、それぞれの区間で主観評価を実施。よこはま動物園北門付近で別帯域幅を掴んでしまう事があった為、評価対象は往路の一部を対象とした。評価対象区間及び、各エリアの区間は以下の図を参照。

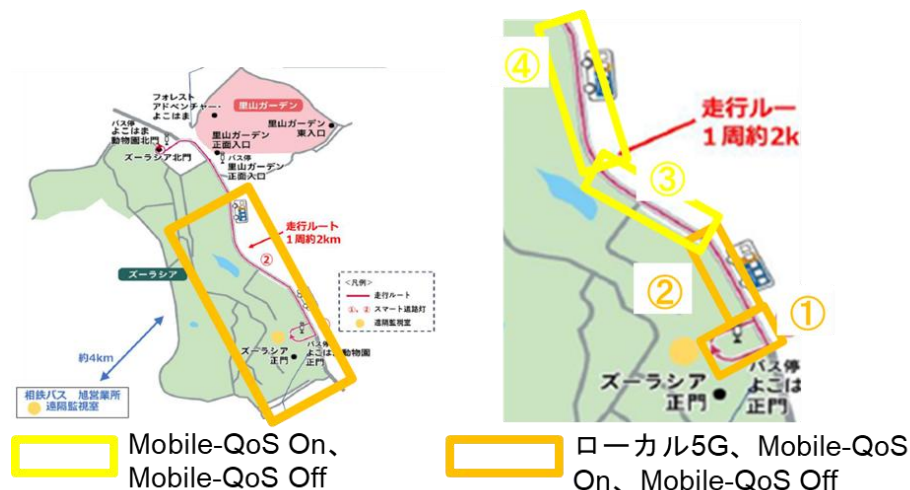


図 49 評価対象区間

主観評価項目は2つに分類して設定した。1つは映像の品質に関して内容、2つめは映像の確認のしやすさに関する内容である。

映像の品質については、カクツキ、粗い画質、色調の乱れの3項目。それぞれ1点～4点で回答してもらった。

1点は全く見られなかった、2点は少し見られた、3点は頻繁に見られた、4点は常時見られた、として設定し、最も近い印象の点数を回答してもらった。

映像の確認のしやすさに関しては、遮断物がない場所での状況確認、静止物（500 cm位）の存在確認、他の車両（車・バス）の通行状況の確認、人物の存在確認、人物の振る舞いの確認、人物の表情の確認の6項目。それぞれ1点～6点で回答してもらった。

1点からとても確認しづらい、確認しづらい、どちらかというところ確認しづらい、どちらかというところ確認しやすい、確認しやすい、6点がとても確認しやすいとし、最も近い印象の点数を回答してもらった。

以下にエリア毎の主観評価の結果を示す。

<映像の品質>

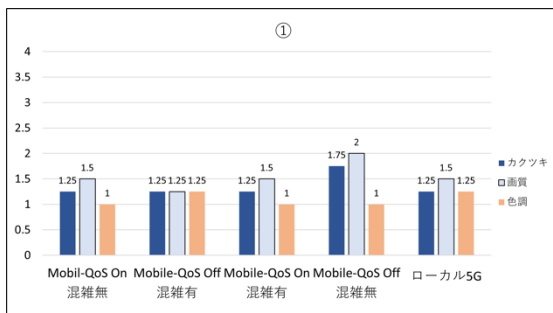


図 50①の主観評価の平均値

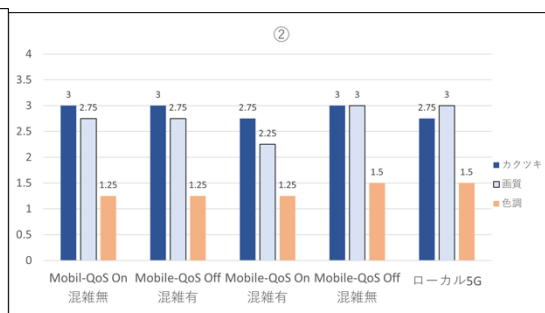


図 51②の主観評価の平均値

①どの条件においてもカクツキ、画質、色調は2点以下。

⇒①エリアについては、どの回線を使用しても問題ないことが確認でき、このエリアではローカル5G回線を使用する必要が無い可能性がある。

②色調の品質については、全条件映像品質に問題ないことが確認できた。カクツキについては、「Mobile-QoS On_混雑有条件以外」は問題がある。画質に関しては「Mobile-QoS Off_混雑無」、「ローカル 5G」は問題がある。

⇒全条件ハンドオーバー区間を含んでおり、映像の品質を下げる影響を与えたと推測される。また、Mobile-QoS の On/Off であまり映像の品質に影響がなさそう。

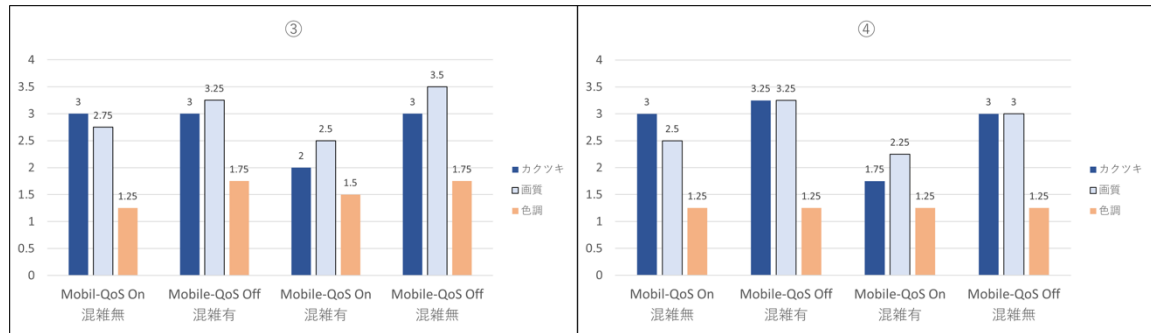


図 52③の主観評価の平均値

図 53④の主観評価の平均値

③カクツキに関して「Mobile-QoS On_混雑有以外」は問題がある。画質に関しては「Mobile-QoS Off_混雑有」「Mobile-QoS Off_混雑無」の条件は問題がある。色調に関しては品質に問題ない。

⇒エリア全体で通信品質が映像の伝送に適した環境でなかった可能性がある。しかし、混雑時の条件において Mobile-QoS の On/Off が解像度に大きな影響を与えており、映像品質の担保のために必要になりそう。

④カクツキに関して「Mobile-QoS On_混雑有以外」は問題あり。画質は「Mobile-QoS Off_混雑有」、「Mobile-QoS Off_混雑無」の条件は問題があり。色調に関しては品質に問題ない。

⇒エリア全体で通信品質が映像伝送に適した環境でなかった可能性がある。その中でも③エリア同様に混雑時の条件において Mobile-QoS の On/Off が解像度に大きな影響を与えており、映像品質の担保のために必要になりそう。

<映像の確認のしやすさ>

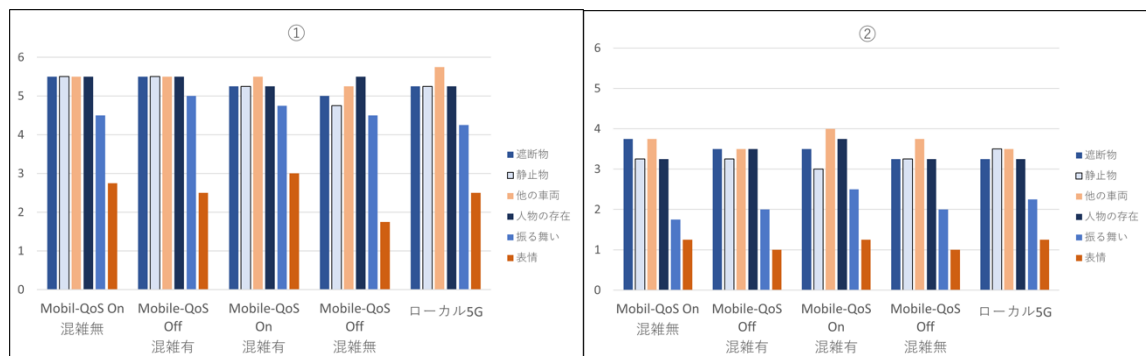


図 54 ①の主観評価の平均値

図 55 ②の主観評価の平均値

①「人物の表情の確認」に関しては全条件確認することは難しい。しかし、これ以外の項目については全条件確認できそうであることが分かった。

⇒映像品質の観点と同様にエリアについては、どの回線を使用しても問題ないことが確認でき、このエリアではローカル 5G 回線を使用する必要が無い可能性があった。

②「人物の表情の確認」、「人物の振る舞いの確認」については全条件確認することは難しい。その他の項目については「Mobile-QoS On_混雑有」の「他の車両（車・バス）の通行状況の確認」のみ映像の確認ができそう。

⇒振る舞いまでの確認は難しいが、人間や障害物の確認については確認できそうであり、更にはどの回線を使用しても確認のしやすさが変わらない。

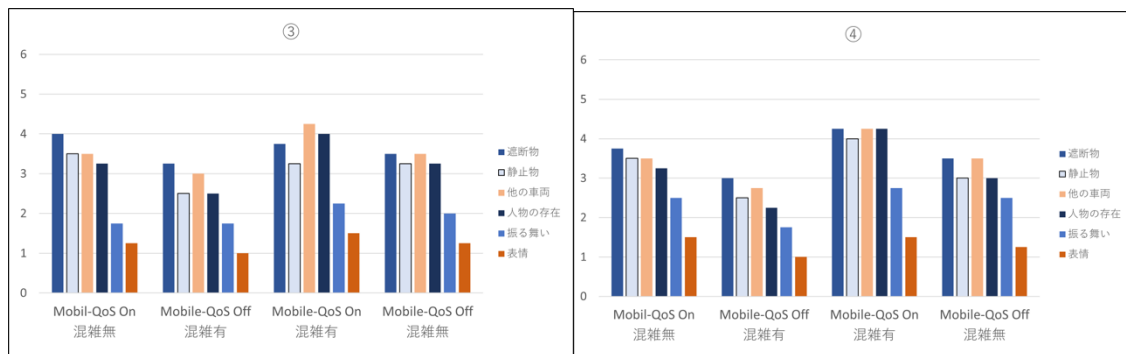


図 56 ③の主観評価の平均値

図 57 ④の主観評価の平均値

③「人物の振る舞いの確認」と「人物の表情の確認」は全条件確認が難しい。「Mobile-QoS Off_混雑有」条件の「遮蔽物が無い場所での状況確認以外」確認が難しい。しかし、「Mobile-QoS On_混雑無」条件の「遮蔽物が無い場所での状況確認」、「Mobile-QoS On_混雑有」の「他の車両（車・バス）の通行状況の確認」、「人物の存在確認」のみであった。

⇒Mobile-QoS が確認のしやすさに影響を与えた。ただし、表情や振る舞いの確認までは難しくそう。

④「人物の振る舞いの確認」と「表情」は確認が難しい。「Mobile-QoS Off_混雑有」条件は、その他項目も確認が難しい。「Mobile-QoS Off_混雑有」条件の「静止物（50 cm位）の存在確認」、「人物の存在確認」も確認が難しい。しかし、「Mobile-QoS On_混雑有」の条件は「人物の振る舞いの確認」と「人物の表情の確認」以外の項目は確認ができる。

⇒③同様に Mobile-QoS が確認のしやすさに影響を与えた。

ロータリー付近では映像品質が最も良く、各条件間で差があまりみられなかった。ロータリーを出てから駐車場入り口付近までは各条件間で差が無く、品質が1段階落ちる結果となった。その他の場所では Mobile-QoS On 混雑有の条件が最も映像品質が良い結果となった。

【AI カメラのセンシングデータ・画像を可視化するダッシュボードの運用性】

6.2.1 (2) 3)に記載したとおり、路車協調システムを自動運転バスの監視員が活用することを想定し、以下の評価を行った。2024年9月～10月にかけて計3回、監視員の監視業務に関する行動観察およびインタビューを行った。対象者は相鉄バスの4名で、いずれも運行管理経験者、路線バス運転経験者である。調査結果のサマリーは図 58 調査結果のサマリーに示すとおりである。詳細な調査結果は、6.2.1 (2) 3)の e～h に記載している。

表 50 ダッシュボードの運用性に係る調査項目

運用性評価	調査項目	調査内容
B 運用性評価 路車協調システムを 活用できる利用シー ンの調査	B1. 事故の未然防止	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点の死角にいる飛び出しの可能性がある自転車や子供の存在を道路灯で検知し、監視員は自動運転バスに徐行の指示を出す。
	B2. 停止後の事後対応	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行中に何らかの原因により停止した場合、監視員は道路灯による映像から周囲の安全を確認し、走行再開の指示を出す。
	B3. 運行管理	以下のシーンを想定し、その際に路車協調システムをどのように活用し得るかを調査。 自動運転バスが走行予定の交差点内で事故が発生し、故障車が停車している状況を道路灯で検知し、監視員が状況確認後自動運転バスに迂回の指示を出す。

B : 運用性評価

路車協調システムを活用できる利用シーンの調査

B1. 事故の未然防止

- ・路側情報の活用は、遠隔監視者を介さずに車両システムと直接連動させるのが望ましい
- ・車両からは検知できない死角情報により、急ブレーキを回避することで車内事故防止につなげたい
- ・「かもしれない運転」実現にむけた検討余地あり

B2. 停止後の事後対応

- ・車載カメラでは捉えきれない、事故発生時の状況確認や原因遡及に活用したい
- ・走行再開を判断する際は、死角の先も含めた周囲の状況を入念に確認したい

B3. 運行管理

- ・乗客への説明や迂回の判断など運行管理の迅速性向上の可能性あり

図 58 調査結果のサマリー

2) 考察

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（定性評価と遅延データの比較）】

1 便に対し、2,3 便はそれぞれスループット低下によるパケット伝送遅延の発生する回数の減少やパケット伝送遅延は発生している時間の短縮により、遠隔監視に多少の改善効果をもたらしている。さらに 2,3 便で活用した AV-QoS と Mobile-QoS を併用することによる相乗効果が定量、定性評価の両面で向上が確認された。また、ローカル 5G 区間においては特に遅延時間の減少の効果が遠隔監視の映像品質、カクツキ低減に対する定性評価に寄与することも確認できた。

一方で、ハンドオーバを伴う区間においてはシミュレーションおよび試走を通して切り替えポイントを策定し、アプリケーション制御での切り替えを実施したが、周辺環境のシミュレーション条件と本番時の構造物差分やアプリケーションで制御したハンドオーバータイミングと実無線環境との精度誤差が影響して 6.4.2(1) 記載のフレーム飛びが発生し、遠隔監視に影響を与えないハンドオーバーの実装に課題が残った。

そのため、今後はハンドオーバを行うファンクションをネットワーク機器側の実装し、確実かつ動的なハンドオーバを実現することや、複数のモバイル網を同時に使用することで通信の信頼性を高めるボンディング等の検討が必要である。

【自動運転バスのカメラ映像の伝送品質（システム遅延時間及び解像度）】

① 「システム遅延時間」に関する評価

ローカル 5G が映像伝送遅延時間の低減に最も効果があるが、Mobile-QoS も映像伝送遅延の低減にでき、どちらも映像伝送の品質担保に必要な技術であると考えられる。ローカル 5G 及び Mobile-QoS が遅延時間の低減に効果があった。映像遅延をどれだけ抑えたら良いかかの考え方や基準が定まっていない為、遠隔監視装置のより詳細な役割や要件、使われ方を明確にすることが残課題である。

② 「解像度」に関する評価

どのエリアにおいても映像のカクツキがロータリー付近以外で発生してしまっている。映像が途切れることは無かったが、カクツキが許容される範囲であるかの判断ができない。システム遅延時間と同様に、遠隔監視装置のより詳細な役割や要件、使われ方を明確にすることが残課題である。

【AI のセンシングデータ・画像を可視化するダッシュボードの運用性】

6.2.1 (2) 3) に記載したとおり、本調査から、自動運転バスの走行における複数の利用シーンにおいて、路車協調システムが利用し得ることが示された。インタビューでは、バス運行において、「乗客の安全が一番大事」との声やバス内で乗客が自由に立ち動きできる環境であるため、「急ブレーキをかけると一番後ろの人が前まで飛ぶ」といった状況も聞かれ、利用シーンの中でも、B1. 事故の未然防止から実装されていくことが望ましいと考える。ただし、前述したように、「監視員」が事故の未然防止のために活用することは、現実的ではなく、監視員を介さず、路車協調システムで検知されたデータを元に、自動運転バスを直接制御させる必要がある。

(2) データの処理・管理に係る運用などのセキュリティ対策

1) 実施結果

【AI カメラを用いた必要な情報の見える化（ユースケース 2）】

6.2.1 (3) 5)に記載したとおり、クラウドサーバ上のログデータとエッジコンピュータ上のログデータの不整合がないこと、閉域網が構築できていることの確認ができた。

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

4.7.1 (3) ユースケース 4 部分の記載の通り、基地局切替の成功率の評価のため、基地局切替の失敗時に残るログの確認を行った。実証中、バスの移動に伴いバスに搭載したローカル 5G 端末の基地局切替が発生していることを NW 運用ログから確認、いずれの試行においても基地局切替は成功していることを確認し、遠隔運転に必要な情報を円滑に伝送するための通信品質としては条件を満たしていることを確認した。

5G コアのログから基地局切り替えの記録を確認。実証期間中、殆どのケースで基地局間ハンドオーバ(ログ上は PATH SWITCH)で切替わっていたが、1 度だけ再接続(ログ上は REGISTRATION)で切替わったケースがあった。そこで、再接続事象が出力映像に与える影響を確認すべく、再接続時とハンドオーバ時での切替時の監視映像を目視で確認。結果、両者に差異が感じられなかったことから基地局切替が遠隔監視に影響を与える事象は無かったことを確認した。



図 59 ハンドオーバによる切替と再接続による切替の映像比較

2) 考察

【AI カメラを用いた周辺環境情報（車両情報・路車協調データ）の見える化（ユースケース 2）】

上記結果のとおり、セキュリティ対策が有効に機能していることを確認できた。

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

基地局切替で一部再接続が発生していた箇所があったが、監視映像を確認して問題ないことを確認した。

また、閉域ネットワークの相互接続機能を用いて既存システムへ接続することで同一システムの MEC 環境への開発工数を削減し、構築期間の短縮が可能であることが確認できた。

(3) 通信システム（路車協調システムや端末を含む）の維持管理・保守

1) 実施結果

【AI を活用した周辺環境情報の見える化（ユースケース 2）】

6.2.1 (3) 6)に記載したとおり、新たな維持管理・保守人員の増加抑制効果は約 12%、維持管理・保守業務対応稼働削減効果は約 19%であった。KPI（50%以上）と比較すると、運用保守管理業務に要する工数削減の効果は限定的であった。

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

4.7.1 (4) ユースケース 4 部分の記載の通り、日毎の実証終了時にログの確認を行い障害発生の有無を確認した。アラートは発生したが、運用外の時間での発生であった。ログについての見直しを実施し認識通りの運用ができたことを確認した。

アラートは基地局 B（下記表記載の Zoorasia_002）で発生。大きく 2 度発生した。10/3 深夜の非運用時に発生したアラートは、22-24 時に豪雨があり、基地局 A と B を中継する WiGig 通信に豪雨が影響したためと推察される（なお、翌日 10/4 には解消していたため運用を開始している）。10/6 9 時に発生したアラートは、直後に解消したため運用に支障ないと判断（その後アラートの発生は無かった）。

表 51 実証運用中(9/30～10/8)の基地局アラートログ

Change Time	Alarm Type	Node Name	Alarm Info
2024/10/6 9:07	5G AMF NLink Connection Lost	Zoorasia_002	NG_Link_IP=192.168.40.11,Service_status=CONNECTED
2024/10/6 9:06	5G AMF NLink Connection Lost	Zoorasia_002	NG_Link_IP=192.168.40.11,Service_status=NOT_CONNECTED
2024/10/3 23:42	5G Cell Out of Service	Zoorasia_002	Cleared: Cell was in service consistently for 10 seconds
2024/10/3 23:32	5G Cell Out of Service	Zoorasia_002	Cell Out Of Service
2024/10/3 23:29	Node Lost Comms	Zoorasia_002	Connection State = Comms
2024/10/3 23:25	Node Lost Comms	Zoorasia_002	Connection State = NoComms
2024/10/3 22:11	Node Lost Comms	Zoorasia_002	Connection State = Comms
2024/10/3 22:08	Node Lost Comms	Zoorasia_002	Connection State = NoComms

また、通信のセキュリティ性の向上を図る技術（MEC）を適用し、通信経路の正当性を評価すべく、UTM の通信ログを確認し、インターネットとの通信が行われていないこと、及び遠隔監視が問題なく動作していることを確認した。以下のとおり、FW より各宛先 IP へ通信ログを抽出したところ、外部への通信は全て遮断されており、検証期間において、インターネットへの通信は行われていないことを確認した（169.254.127.1 は本実証の内部ネットワークセグメントのため、内部通

信である。）。実証中の遠隔監視装置に機能不具合は発生しておらず、通信経路の正当性が保たれていることを確認できた。

行ラベル	合計 / count	
2024/10/3	341112	
accept	49	
169.254.127.1	49	
deny	341063	
2024/10/4	284919	
accept	52	
169.254.127.1	52	
deny	284867	
2024/10/5	253032	
accept	46	
169.254.127.1	46	
deny	252986	
2024/10/6	243408	
accept	42	
169.254.127.1	42	
deny	243366	
2024/10/7	287227	
accept	50	
169.254.127.1	50	
deny	287177	
2024/10/8	150502	
accept	44	
169.254.127.1	44	
deny	150458	
総計	1560200	

deny	341063
1.1.1.1	2336
10.125.64.16	141
10.125.64.17	140
10.125.64.18	137
10.125.64.20	139
10.125.8.16	139
10.125.8.17	141
10.125.8.18	140
10.125.8.20	138
10.217.132.74	17
10.217.137.195	10
10.75.20.116	5933
13.107.42.16	323
13.225.183.100	783
13.225.183.42	778
13.225.183.47	779
13.225.183.73	787
13.251.208.253	48
142.250.196.106	842
142.250.196.138	859
142.250.207.42	769
142.251.222.10	823
142.251.42.138	802
142.251.42.170	771
142.251.42.202	758
147.161.192.39	439
153.143.229.1	12
162.159.36.2	2
165.225.110.23	259
165.225.110.37	198
167.103.9.130	270
168.63.217.197	625
169.254.169.254	298
170.247.170.2	19352

図 60 FW の通信ログ

2) 考察

【AI を活用した周辺環境情報の見える化（ユースケース 2）】

運用保守管理業務に要する工数削減の効果は限定的であった。一方で、自動運転以外にも道路灯自体の点検作業の省略化、道路状況の異常可視化などを行うことで、一定の稼働削減効果をもたらすことができる可能性がある。

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

ログによる障害発生の確認を日毎に実施することで、滞りない運用が実施できた。また、併せて実施した通信経路の正当性を評価において、インターネット通信がなくとも検証期間における遠隔監視の機能面への影響はなく、閉域通信のみのネットワーク設計の正当性が確認できた。また本通信システムに通信ログを具備することでリアルタイムにシステムを監視し、全体の信頼性やメンテナンス性を向上させることを確認できた。

(4) 遠隔監視の監視台数の増加を実現する要件の検討

3) 実施結果

調査概要

自動運転バスの社会実装・普及を現実的にするには、監視員：自動運転バスが 1:1 ではなく、監視員が多数のバスを監視できるようにする必要がある。遠隔監視の将来のあるべき姿の策定（7.1.2 に記載）に向け、相鉄バスへのインタビューを通し、遠隔監視の業務や監視者の要件などを整理する。なお、調査および要件整理にあたっては、以下の前提をおいた。

表 52 実施手法と参加者

実施手法	インタビューおよび、ディスカッション
参加者	・相鉄バス：4 名 - いずれも ・運行管理経験者 ・路線バス運転経験者 ・NTT コミュニケーションズ デザイン部門：4 名 ・デザインリサーチャー/UX デザイナー

表 53 検討項目

検討項目	検討内容
A 遠隔監視の目的	遠隔監視は何を目的とするか
B 監視員の業務	監視員はどのような業務を担うか
C. 監視員の要件	コスト削減するために、監視員は、二種免許や運行管理資格などないような人でも可能か
D 遠隔監視の初見地域への対応	遠隔監視で、日常的に監視していない場所を初見でも監視できるか
E. 遠隔監視装置の汎用化	複数事業者の遠隔監視装置を監視員が扱えるようにする“汎用化”の必要性はあるか



図 61 検証風景

4) 調査結果・考察

A 遠隔監視の目的

自動運転バスの遠隔監視における目的は、「事後対応」・「運行管理」「事故の未然防止」は、遠隔監視以外でカバーする必要あり、という結論に至った。

遠隔監視の対象として、大きく以下の2つに大別できるが、相鉄バスへのインタビューの結果、事故の未然防止は、「コストに見合わない」、「遠隔地からの瞬時の対応の限界」という意見が聞かれ、将来的に1:Nを監視する際の遠隔監視の目的は、②事後対応・運行管理に絞らざるを得ないと判断した。ただし、路線バスは、「車内での転倒も人身事故扱いで警察へ届出が必要」、「急ブレーキをかけると一番後ろにいる人が前まで飛ぶ」、など、一般車両やタクシーより、車内事故などにも注意が求められる現状がある。将来の1:Nの監視に向けては、特定自動運行主任者の義務事項である「常時監視」に対し、システムでの監視を許容する法整備とともに、事故の未然防止は、車両側で偽陽性（危険がないのに誤って危険と判断すること）を許容し、異変が検知されればすぐに減速・停止するなどや路車協調システムと連携した自動制御など、さらなる技術の改良/社会実装が必要と思われる。

表 54 遠隔監視の目的

目的	概要	遠隔監視の対象	インタビュー時のコメント
①事故の未然防止	事故の予兆を元に、事故を未然に防ぐ対処	対象としない	【コストに関するコメント】 “未然防止をするためには、常時監視することになるが、「社会実装」を考えると未然防止まで含めるのはコストメリットなく非現実的。” ”事後対応のみを目指さないと（費用対効果が悪く）やる意味がない” 【遠隔地からの瞬時の対応の限界に対するコメント】 ”未然防止は、常時見ていないといけませんが、そもそも見ても事故は起きる。” ”（監視員が、） どうしようと言っているうちにぶつかってしまうと思う。”
②事後対応・運行管理	遅延、事故などイレギュラーな事項が発生した際の対応・運行管理	対象とする	

B 監視員の業務

特定自動運行主任者の義務事項に加え、以下の表 55 監視員の業務と資格・経験のような業務が必要という結論に至った。

表 55 監視員の業務と資格・経験は、特定自動運行主任者が単独で担うものではなく、円滑な自動運転バス運行を支える業務としての位置付けで記載している。具体的な分担や人数は、自動運転車両数や機能、路線の環境状況などを含めた検討が必要である。また、通信途絶などにより、自動運転バスの状況が把握できなくなった場合や、継続した運行ができないと判断された場合は、自動運転バス自体で待避ができるような仕組みが必要である。例えば、EDSS（Emergency Driving Stop System）の路肩等待避型などが普通車にも一部実装され始めており、それらを活用することが望ましいと思われる。

表 55 監視員の業務と資格・経験

遠隔監視者の業務		資格・経験 () 内は、必須ではないがあると望ましいもの
大項目	小項目	
システム正常性監視	・自動運転システムの監視 主任者義務 ・遠隔監視システムの監視 ・通信の監視	—
安全監視	・車外/・車内 主任者義務	(運行管理)
自動運転バス操作	・自動運転の終了 主任者義務 ・自動と手動運転の切り替え ・自動運転の始動指示操作（再開ボタン操作/自動路肩待避ボタン操作）	(運行管理)
事故対応指示・連絡	・現場措置対応指示 主任者義務 ・緊急連絡（消防/警察） 主任者義務	運行管理
運行管理	・対象車両自体 ・他の車両（運行経路上の自動運転バスおよび手動運転バス）	運行管理
乗客対応	・料金や質問対応など	(運行管理)

主任者義務：自動運行主任者の義務事項となっている項目

監視者の体制に関しては、バス毎の担当者を決めるのではなく、チームで複数バスを監視するという結論に至った。理由としては、バスに監視者が固定されていると、「監視者が多数必要になってしまう。さらに、交代を考えると人が多く必要」であるためである。そのため、1人ずつ担当するバスを決めて運用するのではなく、チーム全体で、バスを監視することが、理想であると考え。具体的な分担や人数は、自動運転車両数や機能、路線の環境状況などを含めた検討が必要である。

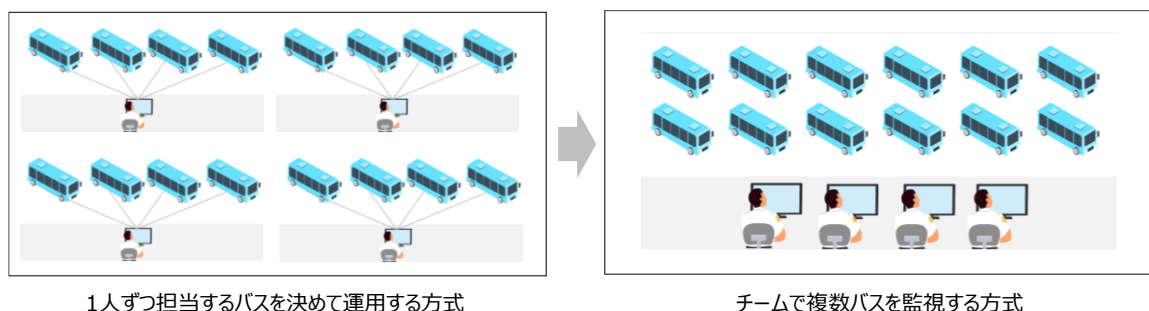


図 62 遠隔監視の運用方式

C. 監視員の要件

自動運転バスの監視員は、運行管理などの知識を有した“専門職”としての採用・教育が必要である。また、コスト削減には、バス会社の連携や、委託など、より広範に検討する必要あり、という結論に至った。

本事業の計画書では、「将来的に二種免許を持っていない人でも遠隔監視ができるように」と仮説を立てていたが、相鉄バスへのインタビューの結果、監視員は、前述した業務で全体的に「運行管理者の資格や経験が必要」との意見があげられた。また、「運転操作が伴うものについては、大型二種免許を保有していることと、大型車両の運転経験があることが必要」とされた。理由としては、「緊急時の迅速かつ適切な対応を実現するため」、また「マルチタスクへの適性」という意見であった。現在の運行管理資格でないとしても、専門的な業務としての採用・教育が必要である。しかし、自動運転車が多数存在する将来においては、特定自動運行主任者を運行管理者相当とすると雇用のハードルが高く人材を確保できない恐れもある。現在の法律では、特定自動運行主任者と特定自動運行業務従事者の役割などが曖昧であり、特定自動運行主任者の法解釈含む、法整備や、多くの人が遠隔監視業務を可能にする体制/運用面での検討や UI/UX などの検討・開発も必要であると考ええる。

一方、コストを下げるための案として、「手動運転は、OB/OG などシニアスタッフが実施する」という案や「専門的な会社に委託する」というアイデアも上がった。システム監視や安全監視など、常時異常がないことを監視するところは専用会社に任せ、運行管理や乗客対応など、「現場」の対応や「運送サービス」としての対応は、自社で担うべきとする声があった。そもそも路線バスは、地域に根ざした運営を行うことから、大規模化していない会社も多い。一社のみでコスト削減を狙うより、複数の会社を含めての自動運転の導入やコスト削減を検討することも必要である。（参考：大規模：1500 台程度⁹、中規模：300 台程度¹⁰（一方、タクシーは大規模だと 8000 台程度¹¹））

上記を踏まえ、今後、スキル要件を具体化するとともに、システム側で補える部分などについての検討が必要である。

D 遠隔監視の初見地域への対応

初見で監視をし、適切な対応するのは限界があり、初見で適切な対応をするには、システムのサポートが必要という結論に至った。

初見で監視することに対しては、4 名中 3 名が「初見では難しい」と回答した。理由として、「たとえば、土地情報を知らないと、バスを停止させられる場所などが瞬時に考えられない」などが聞かれた。一方、一人は、「非常事態のみを対応する割り切りをしても良い」と回答した。

仮に、初見で適切な対応を求める場合は、異常事態とそれへの対応方法/対応場所などを AI で割り出すなどのシステムでのサポートが必要と考えられる。

E. 遠隔監視装置の汎用化

複数事業者の遠隔監視装置を使えるようにする“汎用化”の必要性は見出せなかった。

⁹ 東京都交通局、「交通局の概要」, <https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/about/service/bus.html>, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

¹⁰ 相鉄グループ、「グループ事業案内 運輸業」, <https://www.sotetsu.co.jp/about/services/transportation/>, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

¹¹ 日本交通、「会社概要」, <https://www.nihon-kotsu.co.jp/about/profile/>, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日

複数事業者の遠隔監視装置を使えるようにするという、汎用化に関しては、”管理や監視の上で煩雑になる”というデメリットについて4名が共通して発言していた。また、一部で”複数ベンダーを採用して、価格的に優位にコントロールできるのは大企業だけ。中規模で複数ベンダーを採用しても価格のコントロールはできない”という声もあった。

上記より、今回の調査範囲（中規模路線バス事業者）では、汎用化の必要性は見出せなかった。

上記、A～Eの結果をもとに、7.1.2に遠隔監視の将来のあるべき姿と必要な機能や取り組みを記載する。

(5) 自動運転バスに対する社会受容性の評価

1) 実施結果

【調査の概要】

10/1～4、7～8の計6日間で、試乗会参加者を対象にアンケートを実施し、自動運転バスの試乗および技術に関する説明を通して、市民の自動運転バスに対する受容性が向上するの可否かを調査した。

本調査には20代～60代の男女98名が回答した。詳細な属性は、下図の通りである。なお、回答者属性は事前に設定したものではなく、アンケートの回答結果から属性を抽出したものである。

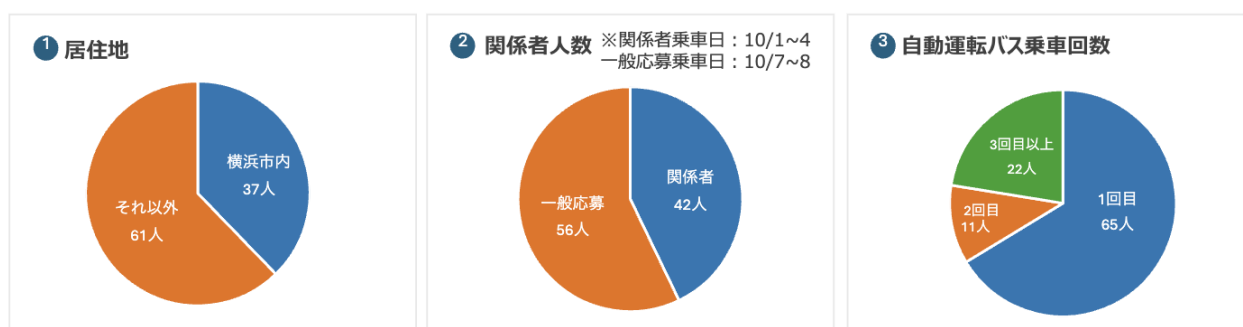


図 63 アンケート回答者の属性

【安全性に対する乗車前後の意識変容の調査結果】

乗車前と乗車後で安全性に対する意識の変化を調査したところ、安全・やや安全と回答した人の割合が大きく増加した。ウィルコクソンの符号付順位和検定の結果（ $p=0.001$ ）、乗車前後の意識変容の変化は統計的に有意であり、安全性に関する意識は、向上したと言える。

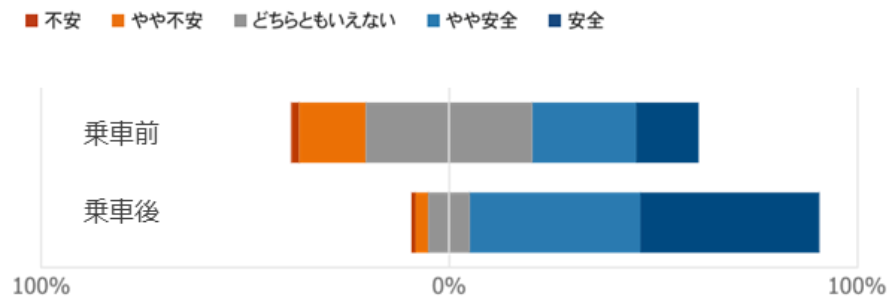


図 64 自動運転の安全性に対する乗車前後の意識の変化

また、乗車前後の安心度を、安全、やや安全、どちらともいえない、やや不安、不安の5段階で評価すると特に、初めて自動運転バスに乗車した人では、安心度のポイントが大きく上昇し、に安全性に関する意識の向上が多く見られた。

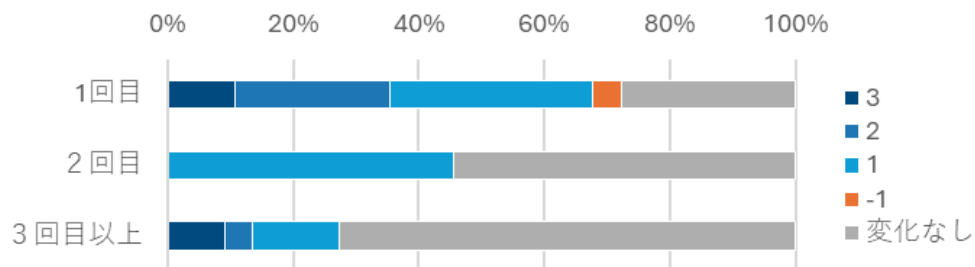


図 65 乗車経験回数別の本実証での乗車前後の安心度の増減

さらに、自動運転バスの日常的な利用、在住する街での走行については、いずれも8割超の回答者が、そう思う、ややそう思うを選択し、自動運転バスを受容する結果となった。

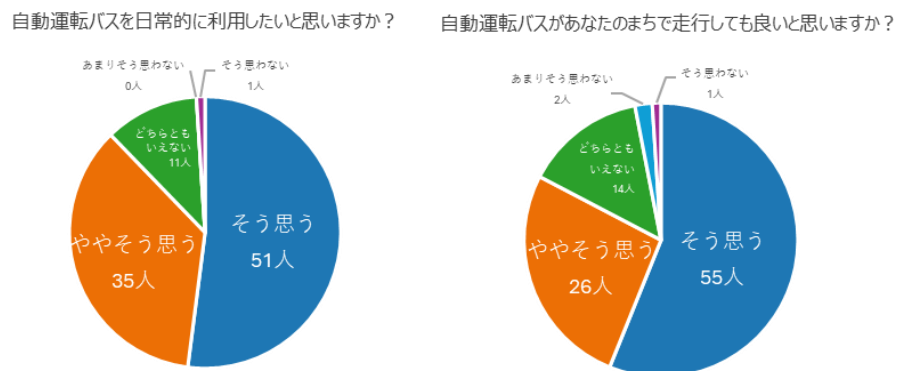


図 66 試乗会を通じた自動運転バスに対する受容性の評価

安全性に関する意識の向上には特に寄与している技術としては、「路車協調」と「高度通信技術」が挙げられた。

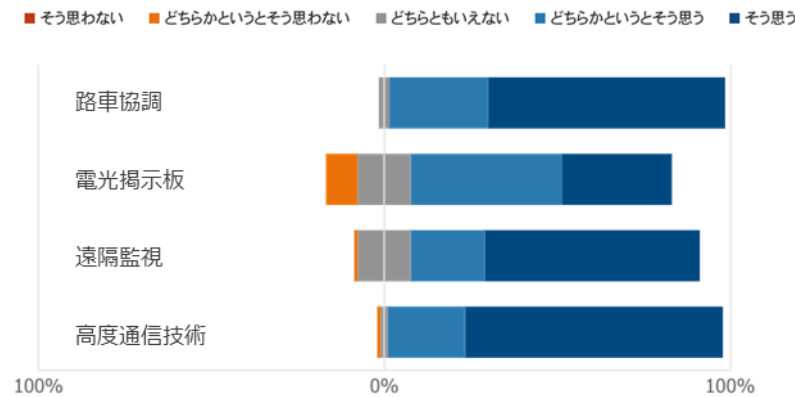


図 67 各システムにおける乗車に対する安心感への貢献度

【受容性向上に関するアイデア】

乗車に対する安心感を高めるために、あれば良いと思う技術やサービスについて、自由記述で回答を募ったところ、「遠隔監視」だけでなく、「遠隔操作」まですべきという意見や、路車協調による制御、また乗客向けの車内案内や自動運転情報の公開などが挙げられた。

通信（1名）

- ・信頼性の高い通信。

自動操縦の改善（2名）

- ・自動操縦の車両制御を人間の操作に近づける必要がある。
- ・周囲に配慮できる走行技術。
（警備員の側を通る時でも速度が落ちていないと感じた）

遠隔操作（7名）

- ・緊急時にネットワーク側からも操作や制御による安全性の確保。
- ・遠隔からの運行アシスト

路車協調（4名）

- ・路車間情報による車両制御。
- ・周辺状況を分析し、事故発生の可能性がある場合にアラートを発信。
- ・カメラ以外の乗員監視システム、死角検知。

環境対応（2名）

- ・天候や路面状況が変化しても走行に影響がない技術。

車車間通信（2名）

- ・自動運転自動車間の連携、協調
（合流・交差点における進路の譲り合い、互いの走行速度の最適化）

コミュニケーション（4名）

- ・アバターやデジタルヒューマン、AIオペレーターを使用した遠隔案内。
- ・車内で表示されていたerror rateを乗客向けに表示。
- ・車両と遠隔監視双方向のコミュニケーション
- ・譲り合いなどの交通文化の醸成

情報公開（3名）

- ・車両や歩行者横断時の自動運転動作を一般に公開。
- ・手動運転と自動運転タイミングを乗客へ可視化。
- ・自動運転についての初心者向けPR

その他（2名）

- ・将来的に無人になった時、降車等に時間がかかった場合の判断基準の設定。（年配の方への配慮等）

図 68 乗車に対する安心感を高めるために、あれば良いと思う技術やサービス（n=27）

【乗車体験後の感想・気づき】

実際に乗車体験をしたことにより、「運行がスムーズだった」「不安が払拭された」等のポジティブな意見が多く見られた。

また、道路側の整備とともに進める必要性や、情報を車両側へもフィードバックできると良い、等の気づきが挙げられた。

コメントの例

- ・ 実際に見てみないと感覚的に分かる/分からないはあったのでとても参考になった。また停車動作や画面の安定性なども中々スムーズで良かった。
- ・ 初めての試乗で自動運転にやや不安を感じていたが、運転士が実際に操作していないところ、3D マッピングルートや各視点カメラの画面を視聴しながら快適な運行を体感でき、不安を拭うことができた。
- ・ 道路環境の整備(都市計画)と共に進める必要があると感じた。
- ・ クラウドに集約された情報を車両にもフィードバックすることで更に安全性が確保できると思った。
- ・ ローカル 5G の映像のなめらかさは体感できたが、環境造成のコストや、遠隔制御のハードル高さなど事業者だけでは解決できない課題が多いと感じた。
- ・ 電光掲示板は他の一般的な物と明確に違う物が必要ではないかと感じた。交通標識のように法定の専用の物が必要だと思う。
- ・ 最終的なゴールイメージがあると差分も含め全体像が見えるので良いと思う。ゴールに必要な要件が明確になっていると技術的に掴みやすいと思った。
- ・ 路線バスを自動運転にし、路線と本数が増やせれば高齢者の免許返納につながるのではないかな。

2) 考察

調査では、乗車体験前後で安全性に対する意識が統計的に有意に向上していることが示された。特に、初めて試乗した参加者で安心度が大きく上昇したことは、自動運転および周辺の技術に対する不安の払拭に、直接的な体験や技術の理解が重要であり、試乗会や説明会が有効な手段となることを示唆していると言える。

また、安全性向上に寄与する技術として、「路車協調」、「高度通信技術」が参加者の評価が高かった。これらの技術が信頼構築の鍵となる可能性が高い。一方、「電光掲示板」については、一部の参加者から安心感のへの向上に、どちらかというと貢献しないと評価されたが、これは、6.2.1 (5) で示したように、視認性や可読性の課題に加え、そもそも注意喚起手段として認知がされていない現状があると評価された結果と関連していると思われ、6.2.1 (5) で記載したような改善が求められる。

社会受容性を高めるために、今後も技術的な課題解決とあわせ、市民等を巻き込んだ、試乗体験/説明会などを通じた安心度向上を図ることが必要である。

6.7.2 効果検証

(1) 本実証における自動運転率の評価

1) 実施結果

4.7.2 記載の通り、MQTT Broker に記録された通信のログから、運行状況や自動運転モードを集計し、自動運転率（運行距離のうち自動運転で走行した割合）を検出した。平日では走行ルート

(約 2.2km、ロータリー5 番バス停～北門～ロータリー5 番バス停までの全区間)のうち、平均して約 97.26%を自動で走行することができた。

表 56 平日走行における各便の自動運転率

日付	9:30発	9:45発	10:00発	10:15発	10:30発	10:45発	11:00発	11:15発	11:30発	11:45発	12:00発	12:15発	12:30発	12:45発
9月30日(月)	100	100	99.98	100	94.37	85.68	99.99	—	—	—	—	—	—	—
10月1日(火)	—	—	—	—	100	99.99	100	99.99	100	—	99.98	—	99.98	—
10月2日(水)	—	—	—	95.24	97.89	99.99	—	90.41	94.44	95.46	99.99	—	82.20	—
10月3日(木)	—	—	—	99.98	100	—	99.99	95.25	100	100	94.64	95.01	—	—
10月4日(金)	—	—	—	99.99	99.98	95.17	99.99	—	—	99.99	99.99	99.99	99.99	—
10月7日(月)	—	—	—	—	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	—	94.42	94.03	74.64	78.34
10月8日(火)	—	—	—	—	99.99	92.74	94.44	99.99	99.99	99.99	100	99.99	100	—
平均(%)	—	—	—	98.80	98.89	95.59	99.07	97.13	98.88	98.86	98.17	97.26	91.36	—

13:00発	13:15発	13:30発	13:45発	14:00発	14:30発	14:45発	15:00発	15:15発	15:30発	15:45発	16:00発	16:15発	平均(%)
99.99	99.97	99.99	99.99	99.99	99.98	—	90.83	—	99.99	—	100	99.99	98.28
100	—	—	—	—	93.50	—	100	94.42	99.99	100	100	—	99.13
99.99	95.78	—	—	—	92.19	93.90	91.19	96.21	86.01	91.89	90.27	90.89	93.55
99.99	99.98	—	—	—	99.99	99.96	99.99	99.99	99.99	94.41	100	—	98.77
—	—	—	—	—	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	—	93.08	78.48	97.77
95.07	99.99	—	—	—	99.99	84.29	95.03	99.99	99.99	99.99	99.99	—	95.32
99.99	99.98	—	—	—	94.01	99.98	100	—	97.11	99.99	99.99	—	98.72
99.17	99.14	—	—	—	97.09	95.62	96.72	98.12	97.58	97.26	97.62	89.79	97.26

また、休日では、走行ルート(全区間のうち、正門ロータリーの出口～北門～正門ロータリー入口)のうち平均して約 97.50%を自動で走行することが出来た(休日はロータリー内で自動運転を行わないことから、算定対象から除外した。)

表 57 休日走行における各便の自動運転率

日付	10:15発	10:30発	10:45発	11:00発	11:15発	11:30発	11:45発	12:00発	12:15発	12:30発	12:45発
10月5日(土)	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—	—
10月6日(日)	—	99.99	—	99.99	—	96.57	100	—	—	—	99.99
平均(%)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

13:00発	13:15発	14:30発	14:45発	15:00発	15:15発	15:30発	15:45発	16:00発	16:15発	平均(%)
91.62	99.99	98.42	100	91.44	99.99	93.95	94.41	94.41	—	96.42
99.99	99.97	—	—	94.33	—	—	—	—	—	98.85
95.81	99.98	—	—	92.89	—	—	—	—	—	97.50

走行ルート及び目標速度は以下のとおりである。

走行ルート	よこはま動物園正門5番バス停 → 北門バス停（乗降なし）→ 正門5番バス停 （1周 約2.2km）
実証期間	2024/9/30～10/8 計9日間
運行本数	1日最大22便 Total 134便
中間バス停	なし
設定最高速度	25km/h



図 69 走行ルート

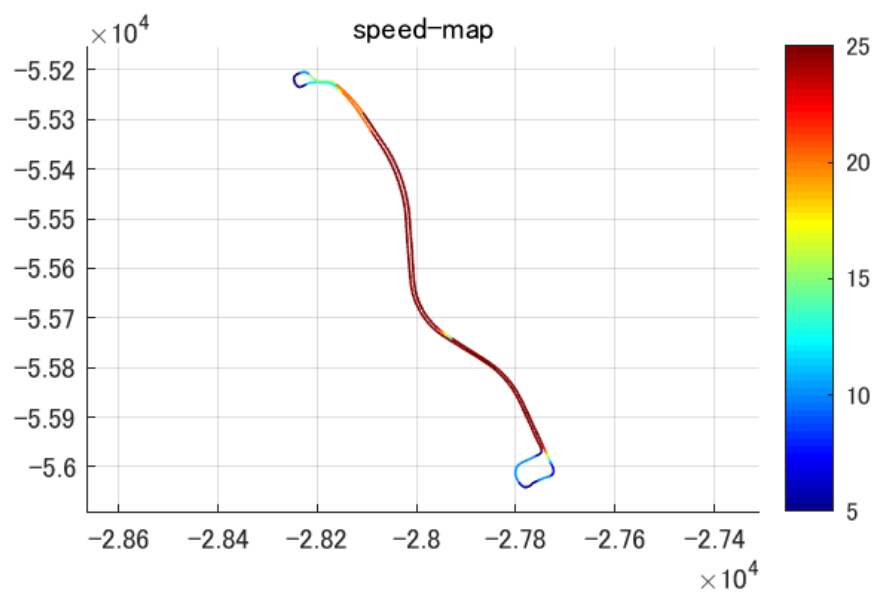


図 70 地点ごとの自動運転時における目標設定速度

手動介入があった場合の介入方法(アクセル、ブレーキ、ステアリング、ブレーキ・アクセルの同時介入等)を明確化するため、平日の状況をカラーマップで表示すると以下となる。

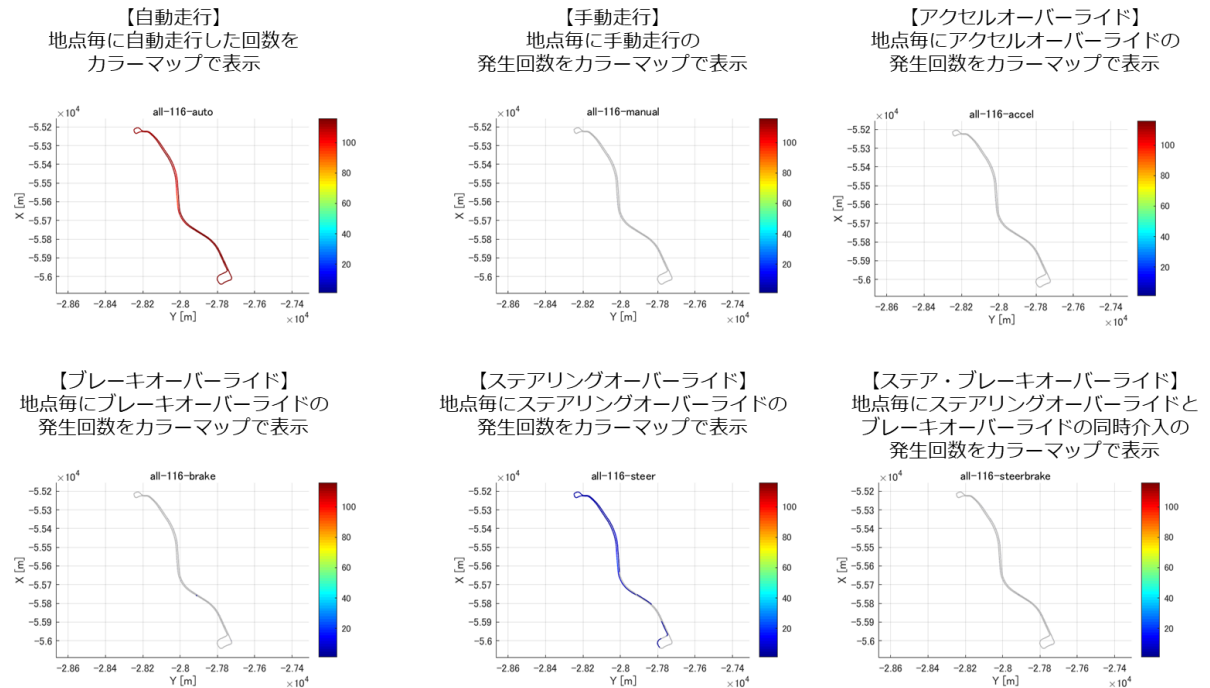


図 71 自動・手動・オーバーライド種類毎の発生地点と発生回数（平日走行）

また、休日の状況をカラーマップで表示すると以下となる。

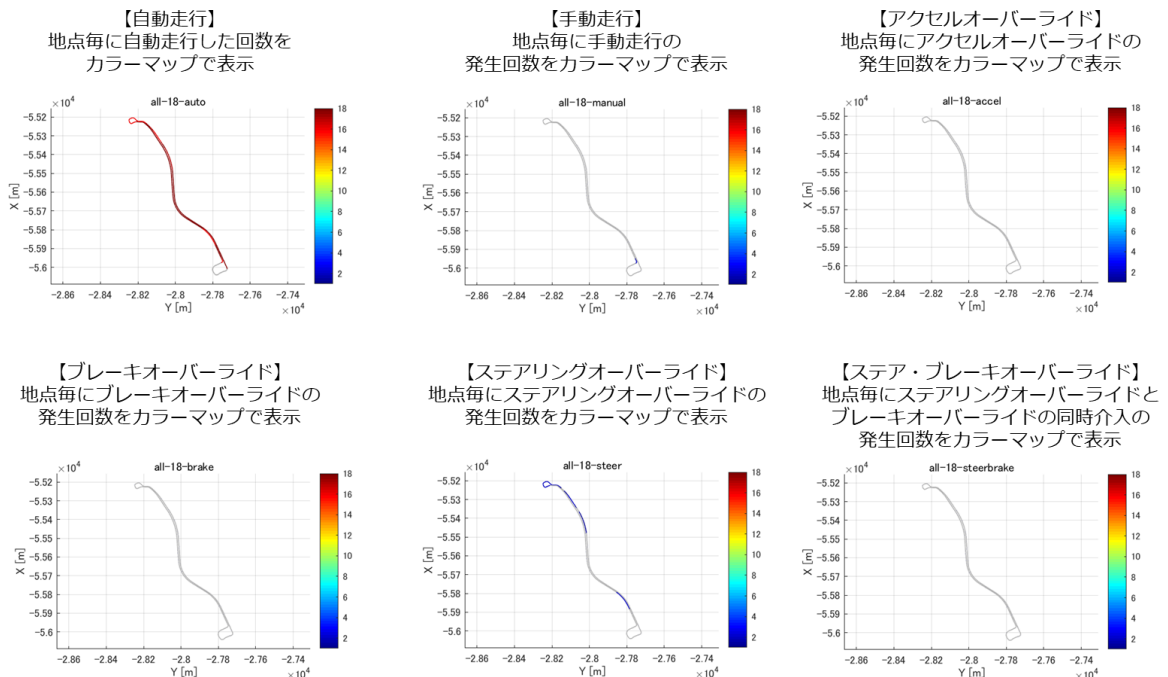


図 72 自動・手動・オーバーライド種類毎の発生地点と発生回数（休日走行）

バス乗務者の記録にて、手動介入の理由について確認すると、9/30～10/8 の間に試走 8 便を含め、計 142 便の自動運転バスを運行し、手動介入回数は延べ 70 回となった。平均すると、2 回の運行に約 1 回の割合で手動介入が必要な状況であった（ステアリング手動介入 58 回、ブレーキ手

動介入 10 回、ステアリング・ブレーキ同時介入 2 回）。手動介入理由と手動介入方法は以下のとおりである。

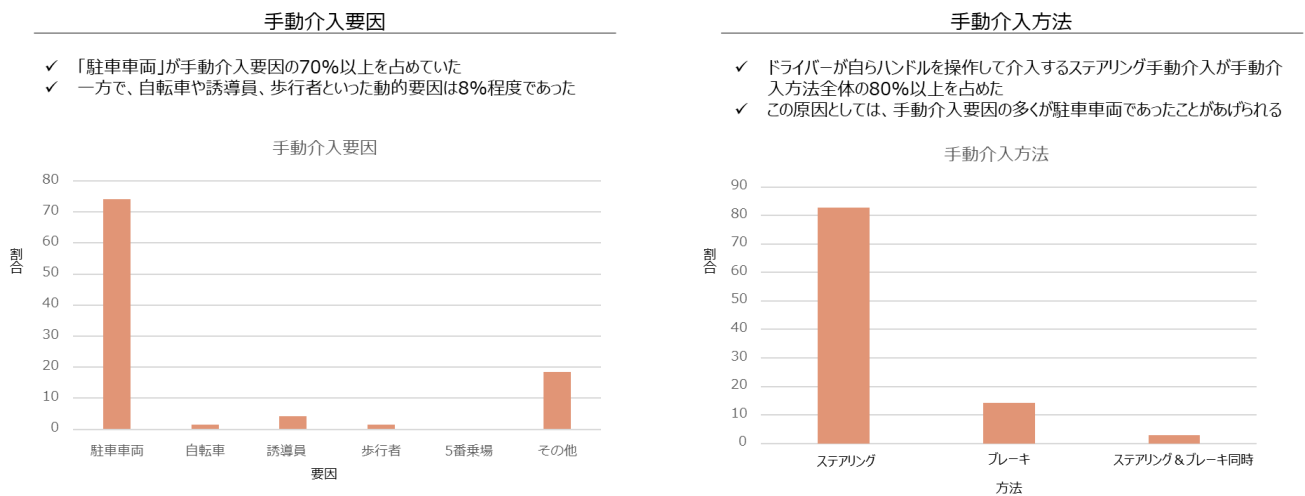


図 73 手動介入方法と手動介入理由

上記の通り、手動介入は駐車車両によって引き起こされることが多く、車両を回避するためにステアリング手動介入が多くを占めていた。

なお、平日と休日とで、手動介入回数や理由等の大きな違いは見られなかった。

2) 考察

前述の通り、平日、休日とも走行ルートのうち、いずれも平均して約 97%を自動で走行することができた。運行区間は、ほぼ全区間で歩車分離されており、また、途中信号の無い横断歩道が 1 箇所あるが、原則警備員による誘導がされており、歩行者が車道にはみ出しての歩行することや車道への飛び出しなどを回避するというケースはほぼ無いに等しく手動介入の要因の大半は路上駐車車両の回避のためであった。平日と休日とで、手動介入の回数や理由に大きな違いはなかった。手動介入を減らすためには、車両側での路上車両の自動回避等の実装は必要であるが、同時に、自動運転バスの走行区間には路上駐車をしないなどの周知や住民の協力や理解も必要不可欠であると思われる。

(2) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

1) 実施結果

路側インフラによる車両の検知、歩行者の検知、及びそれら交通参加者の特定エリアへの侵入検知を過度な遅延なくスマート道路灯により行い、監視室経由で自動運転車運転手との円滑な連携が出来るかを設定した KPI/KGI に基づき行った。

設定した具体的な KPI/KGI 及びその結果は 6.2.1 (3) に記載したとおりである。

2) 考察

上記の実施結果に関する考察は、6.2.1（4）に記載したとおりである

(3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

1) 実施結果

路側インフラより取得できるデータを活用して運行ルートの柔軟化や時間短縮について、スマート道路灯と自動運転バスによるシステム連携を見据えた机上検討および実証を行った。

データを取得する仕組みとして6.2.1（1）および(2)で使用したものを活用して様々な路側データを活用することができる。本実証では路側インフラから MEC 上に構築したシステムへデータを連携する仕組みの検証を行った。

路車協調に資するデータとして相鉄バスへのインタビューを元に表 58 路車協調に資するデータ定義を定義した。

一部可視化として、歩行者検知、車両検知、ストリーミング映像を監視室に届けて評価を6.2.1（2）および6.2.1（3）に記載したとおり行った。

表 58 路車協調に資するデータ定義

データ種別	相鉄バス目線の優先度
歩行者検知	高
歩行者と道路灯の相対距離	中
歩行者と自動運転バスの距離	高
歩行者と自動運転バスの相対速度	高
車両検知	高
車両と道路灯の相対距離	中
車速	高
走行ベクトル	高
歩行者と自動運転バスの距離	高
車両と自動運転バスの相対速度	高
車両ナンバー	中

自転車/自動二輪車検知	高
自転車/自動二輪車と自動運転バスの距離	高
自転車/自動二輪車検知と自動運転バスの相対速度	高
バイク検知	高
バイクと自動運転バスの距離	高
バイクと自動運転バスの距離	高
路上横臥者の位置情報	高
路上駐車的位置情報	中
路上駐車と駐車場待ち列の判別	高
路上落下障害物	中
道路冠水	中
道路積雪	中
豪雨	中
路面凍結	中
樹木や看板など道路への突出物	中
小動物検知	高
小動物と自動運転バスの距離	高
小動物と自動運転バスの相対速度	高

2) 考察

歩行者や自転車、小動物等と自動運転バスの距離や相対速度等のデータをスマート道路灯側で収集できるようになれば、歩行者や自転車、小動物の飛び出し等を検知しバスが減速あるいは停止をすることで急ブレーキを回避することに繋がる。「急ブレーキをかけると一番後ろの人が前まで飛ぶ」ことから、急ブレーキ後の車内対応には時間を要する。これを回避することが乗客の安全面の向上だけでなく飛び出しから走行再開までの時間を短くすることに繋がる。

今後 MEC 上の路車協調システムと自動運転バスのデータ連携について検証する必要がある、ITS 情報通信システム推進会議の自転車・歩行者事故防止支援システム向け実験用通信メッセージガ

イドライン RC-016 で策定されているメッセージ仕様を用いて実装することが望ましいと思われる。

(4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、シェアリング等によるコスト低減化方策

1) 実施結果

【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

4.7.2 (4) 記載の通り、全行程をローカル 5G 基地局によるエリアのみでカバーするのではなく、キャリア 5G エリアとの組み合わせによりカバーすることでトータルのコストを低減することが可能と考えられることから、今回の実証環境を想定した片道 3 km のエリアにおいて、以下の 3 パターンに拠る設備構築を行った際の概算費用の比較を行う。

- ① 片道 3km 区間の全区間を 5G/LTE キャリア網のみで構築する場合（キャリア網のみパターン）
- ② 片道 3km 区間の全区間をローカル 5G 網のみで構築する場合（ローカル 5G 網のみパターン）
- ③ 片道 3km 区間のうち、2 km をキャリア網、1 km をローカル 5G 網で構築する場合（併用パターン）

なお、②及び③のローカル 5G 基地局間の通信は、WiGig にて中継する。また、映像のアプリケーションは費用には含まないものとして試算した。

表 59 概算費用比較

	比較表	①キャリア網のみパターン	②ローカル 5G 網のみパターン	③併用パターン
	構成	5G/LTE 網のみで構成	ローカル 5G 基地局 6 局、ローカル 5G コア装置共用、WiGig 中継 5 セット 10 アンテナで構成	5G/LTE 網に加え、ローカル 5G 基地局 2 局、ローカル 5G コア装置共用、WiGig 中継 1 セット 2 アンテナで構成
	条件	Mobile-QoS 付与	—	Mobile-QoS 付与
	初期費用	計 3,500 円程度	計 9,750 万円程度	計 6,510 万円程度
	キャリア 5G 初期費 (1sim) ※1	3,500 円	—	3,500 円

	ローカル 5G 設備・機器費、（基地局、コア、管理サーバ、その他ネットワーク機器一式）	—	約 7,400 万円	約 5,800 万円
	WiGig 設備・機器費	—	約 300 万円	約 60 万円
	ローカル 5G、WiGig 設置工事費	—	約 2,050 万円	約 650 万円
運用費用（年額）		計 36 万円程度	計 720 万円程度	計 636 万円程度
	キャリア 5G 運用費（1sim）	約 36 万円 ※2	—	約 36 万円 ※2
	ローカル 5G 運用費	—	約 570 万円	約 570 万円
	WiGig 運用費	—	約 150 万円	約 30 万円
注意事項		※3,4,6	※5	※3,4,5,6

※1 契約事務手数料。

※2 年額料金として試算。契約通信プランに応じて変動する

※3 利用エリアにおける通信キャリアのサービス提供状況によって通信性能や利用可能機器等が変動する

※3 キャリア網閉域接続の利用は、別途契約が必要となり、費用が発生する。

※4 キャリア網内の閉域クラウドの利用は、別途契約が必要となり、費用が発生する。

※5 費用は実環境に応じて異なる。その他、光回線が必要となる場合がある

※6 キャリア 5G 通信費は移動体通信サービスの利用料のみで、ネットワーク機器に関する費用や運用監視費等は含まれていない。

①～③を比較すると、費用面での単純比較ではキャリア網に優位性があるが、6.4.2における定性評価で明らかになったとおり、「自動運転レベル4であっても、遠隔監視の役割と操作内容に応じた映像品質レベルの設定が必要」である。実際の走行環境と遠隔監視の役割に応じて、キャリア網とローカル 5G 網を組み合わせる等を実施することにより、費用負担を低減することが可能である。

2) 考察

— 【QoS、ローカル 5G、WiGig、MEC を組み合わせた必要な情報を円滑に伝送するための通信品質の向上（ユースケース 4）】

自動運転システムを導入するにあたり、キャリア網が弱いエリアや携帯電話等の端末の利用者で混雑するエリアにおいても、通信手段を維持することが重要となる。そこで、とりわけ混雑発生地域においては、より鮮明な映像伝送が求められる箇所（交差点やロータリー、横断歩道付近等）では公道にローカル 5G 基地局を設置し、ローカル 5G エリアを構築することで、周りの通信に影響されない安定した通信を確保し、映像伝送に必要な通信速度を十分に上回る速度（実測値：上り 50Mbps ※実環境に拠る）を確保できる。

要求事項の観点では、例えば、今後更にデータ量が増えるであろう複雑な交差点やバスロータリー等では、大容量のデータ通信が実現できる必要がある。

また、制限事項の観点では、周囲への通信影響、周囲からの通信影響により通信が影響を受ける可能性が高い混雑エリアでは、キャリア網とは異なるネットワークが必要である。

キャリア網の利用で要件に必要な通信性能を確保できる場合は、実装および運用コストの観点でキャリア網に優位性がある。一方で、先述の要求事項や制限事項に関わるリスクを解消する通信手段として、スポットエリア的にローカル 5G を活用する形が望ましい。ローカル 5G コアは共用設備なため、基地局が増えるほど 1 エリア構築あたりにかかるコストは按分される。また、将来的に既存設備の転用や共用化が進めば更なる実装・運用コスト低減を見込むことができる。

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

7.1.1 考察のサマリ

【ユースケース 2】

自動運転バスから死角となる箇所の車両、歩行者を検知して遠隔監視装置に通知することで、運行中のバスの安全性を向上させることを目指し実証を行った。エッジ AI を使った検知では、検知率は、KPI（車両適合率 95%、歩行者適合率 90%）を超える結果であった。監視員の負担軽減に十分に採用できる性能と判断した。検知率を向上させるには入力画像サイズを大きくすること特に歩行者の検知率向上に効果があることを確認した。検知の信頼性が向上することで他のユースケースの活用が示唆された。エッジ AI 以外にクラウド AI を使用する手法も存在するが、ユースケースによって使い分けることが重要である。

運行事業者へのインタビューから自動運転バスの走行における複数の利用シーンにおいて、センサで取得した周辺環境を利用し得ることが示された。事故の未然防止の観点では監視員を挟まず自動運転車と直接連携し制御を行うこと必要である。

今回映像配信遅延について KPI を達成した。また、複数の場所から映像を同時に確認することができ、将来的な複数拠点からのモニタリングも可能であることを確認した。前処理としてソフトウェアによる画像回転処理を行っており、最適なハードウェア・ソフトウェアの選定を行うことでさらに約 30~40msec の遅延改善が見込める。

また電波状況が十分な場所では今回の構成においてキャリア 5G を使ってローカル 5G と同等以上の遅延性能が得られることを確認した。

電光掲示板を用いて交通参加者に注意喚起を実施した。電光掲示板では視認性・可読性が低く、注意喚起手段として社会的認知がされておらず効果は限定的であった。一方で、自動運転バスの共存に向けて、交通参加者は、1. 事前に、バスが「自動」運転であることを知りたい、2. バスを含む交通参加者が、他者の「挙動を予測」できる情報を求めていることが分かった。それぞれのニーズに対して今後ソリューションの検討が必要である。

【ユースケース 4】

映像伝送システムに関する検証

通信システムごとの遠隔監視装置の「映像品質」の評価について、車両の周辺に関する「状態の監視」を見据えた場合、キャリア網通信、ローカル 5G 網通信どちらにおいても運用可能という評価を得られた。またそれぞれの通信システム間で比較した場合ローカル 5G 網通信の方がより映像の乱れが少なく、映像が確認しやすいという評価が得られた。加えて Mobile-QoS や AV-QoS についても映像品質向上に対してそれぞれ効果が確認でき、組み合わせた場合でも効果は薄まることはなく、遠隔監視の品質向上に寄与することが分かった。

本実証ではローカル 5G を用いた場合の映像品質が有用であることが分かった。キャリア網通信で Mobile-QoS と AV-QoS を組み合わせて映像品質を底上げした場合、本実証環境では一定の有用性が見込めるとも評価された。

また、無線切り替え（ハンドオーバー）の区間についてはアプリケーションレイヤで行う映像表示の切り替えと無線切り替えのタイミングに誤差が生じ、遠隔監視における映像乱れやフレーム飛びが発生したため、運用に向けて課題があることが判明した。

システム的な画像解析を伴うことを想定すると、必要な映像要件（FullHD、30fps ※4.4.3.(2)）は本実証での解析では 1Mbps 以上の通信帯域が必要となることが分かった。この通信帯域を確保するための無線設計において cradio による置局設計技術の有用性や、ネットワーク設計の柔軟性を拡張する WiGig 技術のケイパビリティも確認できた。

またシステム制御のレスポンスに影響する遅延時間については、公共のキャリア通信網を使う場合と比較してローカル 5G 遅延量の少なさや AV-QoS による遅延量の低減を確認できた。またキャリア通信網においても Mobile-QoS の帯域優先により電波が弱い環境でも遅延量を増大させづらい効果があり、加えてローカル 5G の遅延量との大きな乖離はないため、将来的な通信キャリア網のスライシングも踏まえると複数無線ネットワークも現実的であると考えられる。

実証で得られた課題の解決に向けて、同キャリア通信内でのバンド切替や、マルチキャリアによるアプリケーション毎のマルチパス通信等、無線切り替えのアーキテクチャや、シーケンス等の改善による、更なる高品質および安定した通信を目指す。また、ローカル 5G については、機器パッケージ化による構築の効率化等のコスト低減、Mobile-QoS については、活用エリアの明確化による横展開およびスライシングへの発展、AV-QoS については、通信帯域に合わせた伝送レート調整機能の精度向上および横展開を見据えたエッジ/センタークラウドにおける汎用製品へのソフトウェア導入、Cradio については、静的な制御ではなく、品質予測機能による自分の場所に準じた動的なハンドオーバーポイントの導き出し、WiGig については、ビームフォーミングによる移動端末への対応、これら通信技術の発展による課題解決を目指す。詳細は後述する。

参考資料

本報告書に使用した地図や航空写真は、国土地理院のコンテンツ（地理院地図等）を加工したものである。

安全な自動運転に資する通信システム等の検証に関する調査研究
実績報告書

地域デジタル基盤活用推進事業（自動運転レベル4検証タイプ）

2025 年 1 月

エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社・自動運転の社会実証機関
