

協調認知におけるセンシング情報を活用した未来予測向け 通信システムの研究

研究代表者	中 里 仁	東京理科大学	工学部	助教
共同研究者	丸 田 一 輝	東京理科大学	工学部	教授

1 研究背景・目的

日本における未来の社会のビジョンとして「Society 5.0」が提唱されている。これは、人工知能（AI）、ロボティクス、ビッグデータ、モノのインターネット（IoT）などの先進的な技術を活用して、経済発展と社会の課題解決を両立させることにより豊かな社会全体を目指す概念である。自動運転は、Society 5.0 の実現に向けて重要な役割を果たす技術の1つとされている。また、現在の自動運転は「自律型自動運転」の分類に属し、活発な研究開発・社会実装が進められているが、局所的な情報に基づき走行するため、運転者と同一の限界が存在する。このような「自律型自動運転」に対し、様々な交通システムが協調的に認知、判断、実行を担える「協調型自動運転」向けの通信機能を具備した協調型インフラが重要な役割を担う。無線通信の観点からは、増大するモバイルトラフィックを限られた周波数資源下で効率的に収容する手段として基地局のカバレッジ狭小化（スモールセル化）に加え、広帯域を確保可能なミリ波帯への移行が進んでいる背景がある。第5世代移動通信（5G）では、新たに4～5GHz帯の周波数と28GHz帯の周波数が割り当てられたが、その周波数の高さに従来システムと比較して電波の到達距離が短い。スモールセル化との親和性は高い一方、設置コストの観点から2020年の5G導入以降、ミリ波スモールセル基地局の展開は未だに進んでいない現状がある。協調型自動運転車両にはLiDARや4Kカメラなどの高精細センサ群が搭載され、それらの取得情報を無線通信ネットワーク経由で周辺の車両に共有する。そのため大容量通信を可能とするミリ波の活用は必須であるが、常時移動環境にある車両に対しカバレッジの狭いミリ波通信を安定的に提供するには多くの課題がある。その中で我々はこれまで、基礎検討についてシミュレーション及び実証実験を既に開始している。2022年には自動運転ソフトウェアを介したネットワーク協調システムを実車両へ構築（AutowareV2X）し、大学キャンパス内において実証実験を成功している[1]。また、交通シミュレータと無線通信システムを連携したビームフォーミング制御の研究開発に取り組み、道路情報と車両の位置情報を元にした高速ビーム追従機能の研究開発をしている[2][3]。協調型自動運転と無線通信システムが相互連携することにより、路側機（RSU）と車両間で対向・隣接車両がダイナミックな遮蔽物となり、通信品質劣化が課題となる。本課題に対して、未来時刻で遮蔽物を事前に予測することでの解決策を調査する。具体的には、協調型自動運転から得られるセンサ、予測・計画、認知等（他車両含む）を無線通信システムが利用し、未来の時点での通信に対する制御の支援を受けることができる。同時に、無線通信システムから得られるデバイス接続数、ビームID、電波品質等を協調型自動運転が利用し、未来の走行経路や交通システム全体の制御の支援を受けることができる。そのため、第一に、本研究の独自性は、無線通信システムと協調型自動運転システムが独立した管理・制御から、相互連携可能なプラットフォームへの転換を試みる点にある。次に、道路形状の地理情報や協調型自動運転の未来の走行計画情報を利用して、対向・隣接車両による遮蔽物予測アルゴリズムの研究の取り組みにも独自性が認められる。従来の無線通信システムでは動的に変化する遮蔽物の検知に、確率モデルによる検知手法が一例として挙げることができるが、未来の時刻での検知予測を実施する点で異なる。このアプローチは、これまでの研究では取り組まれていなかったものであり、学術的独自性と創造性が高いと言える。そのため、本研究における無線通信システムとアプリケーションの相互連携については、今後の横断型研究における次世代の通信技術としての新しい潮流を築くものである。

2 関連研究

現在の5G RAN（Radio Access Networks）においては、装置毎に固定ベンダーによる市場の独占を防ぐべく、RANの機能間をオープン化させることによるマルチベンダ化やソフトウェア化を促進している国際的な団体である「O-RAN（Open RAN）アライアンス」が世界的に着目を浴びている。この団体が策定した技術基準に基づき、2022年12月に国内においても検証・認証可能な設備としてJapan OTICが設立された。本団体に

において、RAN をインテリジェントに制御する RIC (RAN Intelligent Controller) については、「0-RAN Global Plug Fest Fall 2022」や「Fall 2022 OpenAir Interface North American Workshop」においても 1 つの重要な技術であると認知されている[4]。RIC の特徴としては、RAN 以外のアプリケーションとの連携が可能であり、10 ミリ秒以下を制御可能な Realtime RIC とそれ以外の Non Realtime RIC で機能が分類される。この RIC が無線通信システムと協調型自動運転の相互連携に関係し、本研究の着想に至った。また、現在進められている研究開発では、各参加機関にて、RAN 側の機能開発のみが重視されており、RAN 側と連携するアプリケーション部分の具体的なユースケースを含めた検討及び実装が不足している。このため、RIC を活かしたアプリケーションユースケースの研究及び概念実証が必要であることから、本研究の無線通信システムと協調型自動運転の相互連携により高速なビーム追従と遮蔽物の事前予測を行う取り組みは先進的かつ独創的と言える。一方で、標準化が進められている 3GPP TR 22.837 Release 19 において検討されている内容としてセンサ情報を活用した無線制御に焦点が当てられており、本研究が目指す内容と類似しているが、本研究ではより具体的なアプリケーションとして協調型自動運転に焦点を当て、かつ、高速なビームフォーミング追従と動的な遮蔽物の予測検知による見通し環境の確保に関する研究を行う点で独自性がある。

3 研究課題および実施内容

本研究では、下記の課題に対して、2 年間実施してきた。センサから認識した物標情報に加え、車両側で保持する経路予測、経路計画情報を基に、動的な遮蔽状況を予測する技術を確立する。さらに、複数 RSU 環境において、予測情報を利用して、車載側のビームフォーミングの切り替えを行い、見通し環境の確保を行う。具体的に本研究で扱う研究課題および実施内容について説明する。

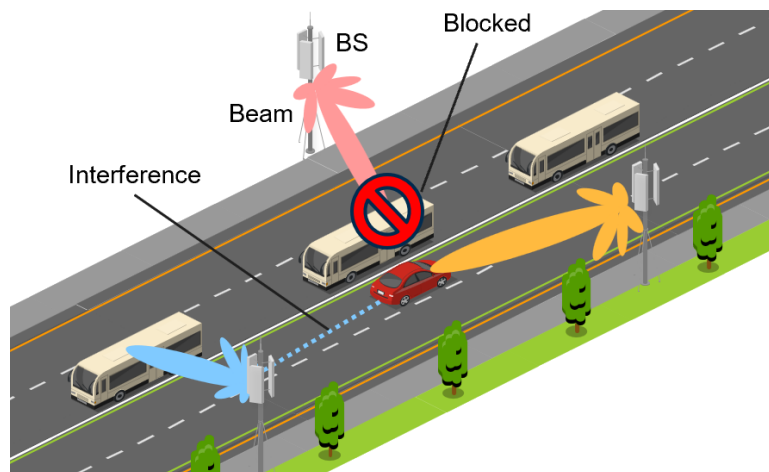
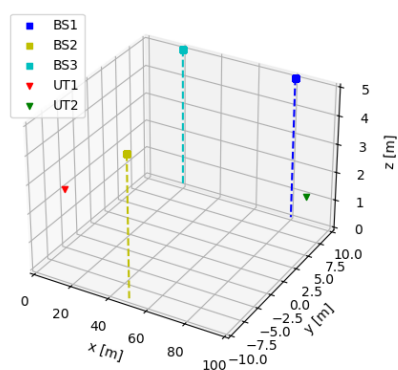


図 1：システムモデル

3-1 複数 RSU 間のハンドオーバー制御技術

RSU にミリ波を適用する場合、ミリ波はカバレッジが狭いことから車両の走行時に複数 RSU 間でのハンドオーバーによる影響を最小限にする必要がある。一方で、これまでの研究開発では 1 台の RSU 環境下でのアルゴリズムを想定しており、ハンドオーバー制御技術の確立が行われていないという課題が存在する。本課題に対して、車両の位置情報を保持する協調認識メッセージを RSU に定期的に送信することで、RSU 側で車両の位置情報を管理する。また、RSU に搭載するセンサ情報で認知する物標情報を用いて、動的に変化する遮蔽物を認知し、協調認識情報と協調認知情報を用いた車両のハンドオーバー先を決定するアルゴリズムを開発した。図 1 に示すように、3 台の基地局 (BS1, BS2, BS3) が直線道路沿いに交差的に配置され、2 台の移動端末 (UT1 (大型トラック), UT2 (普通車)) に加え、遮蔽となる大型トラック 2 台が走行する V2X シナリオを対象とする。基地局はそれぞれフェーズドアレイアンテナを備え、アナログビームフォーミングおよびヌル形成機能を有する。複数 BS が同時送信し、他 UT への信号成分が干渉となる。各車両は一定速度で移動し、それに対して各基地局は 10 ms 間隔でビーム方向を更新できるものとする。干渉抑圧には他 UT 方向の放射方向に基づくステアリングベクトルをチャネル情報 (CSI) として直交化によりヌル空間を形成する。高速移動環境におけるマルチユーザ MIMO 空間多重伝送であることから、車両の移動方向



(a) 路側機 (BS) 及びユーザ (UT) 配置



(b) 遮蔽物の例 (トラック)

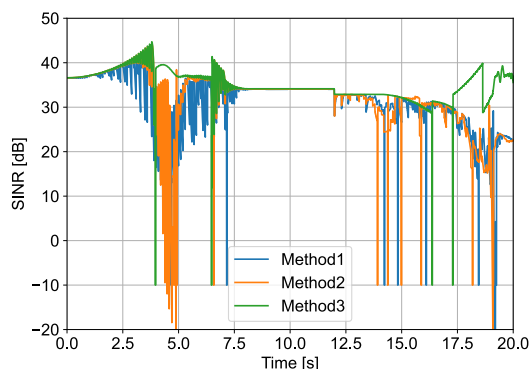
図 2：シミュレーション環境

ヌルを追加で形成することで性能改善を図る。車両の位置や速度情報を扱う Cooperative Awareness Message (CAM) の取得間隔 (100 ms) 毎にプリコーディングを行う。基地局との通信においては、UT1 と UT2 が互いに遮蔽物となる場合に加え、複数台存在する大型車両 (UT3, UT4) が追加の遮蔽物として作用する。これらの影響により電波の見通しが阻害され、Line-of-Sight (LoS) 経路と Non-Line-of-Sight (NLoS) 経路が混在する環境が形成される。ミリ波 V2X 通信において、車両の走行による LoS/NLoS のダイナミックな変化や複数路側機 (RSU) 間の干渉 によって通信品質が大きく変動するという課題に対し、3 台の RSU を対象にした ハンドオーバー (HO) 制御方式を検討した。特に、

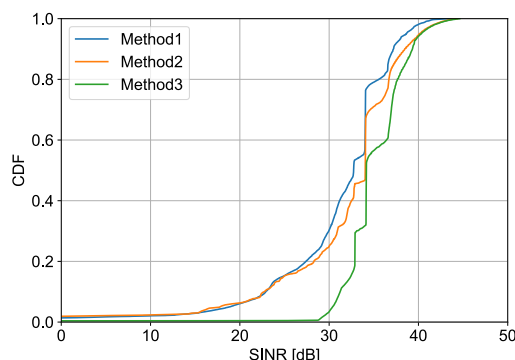
- ①各 RSU から各ユーザ (車両) に対し、互いに通常のヌル形成のみを実施
- ②ユーザ移動方向へ $\pm 1^\circ$ の追加ヌルを形成する ヌル空間拡張
- ③3 台の RSU が同一データを同期送信し干渉を無効化する協調送信 (提案方式)

の 3 方式を、同一の A3 トリガー及び time-to-trigger (TTT) ベースの HO ロジックの下で公平に比較した。シミュレーションは、3GPP TR 38.901 に基づく LoS/NLoS モデルと、2 台の通信対象車両と 2 台の遮蔽物車両 (トラック) の走行を直線道路モデル上に実装した (図 2)。

さらに、中心周波数 28 GHz、帯域幅 100 MHz を想定し、RSU 間の同一チャネル干渉と遮蔽を模擬したシナリオで信号対干渉雑音電力比 (Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio, SINR) を評価した。評価の結果を図 3 に示す。干渉のみの環境では、ヌル空間拡張 (Method 2) は車両接近時に干渉ピークを抑制する場面がある一方、干渉方向と所望方向が重なると主ローブ利得が低下し性能悪化が見られた。対して提案方式である協調送信 (Method 3) は、他の RSU から届く信号を干渉ではなく合成利得を持つ有用信



(a) 移動方向に対する SINR の変化



(b) SINR の累積分布

図 3：3 台 RSU による各 HO 方式の比較

号として扱えるため、全領域で最も高いSINRを安定的に維持した。遮蔽が生じる場合であっても、A3+TTTに基づき適切にH0を行うことで、LoS→NLoSの伝搬環境変化による急激なSINR低下を抑制できる。図3(b)のSINR累積分布より、現実的な干渉及び遮蔽を考慮した複合環境では、従来方式(Method 1)とヌル空間拡張(Method 2)は低・中SINR領域で挙動が分かれる一方、提案する協調送信(Method 3)は全てのSINR領域で最も高い性能を示し、特にセル境界や遮蔽直前直後など変動の激しい区間において大きな優位性を持つことが確認された。結果として、ヌル空間拡張は特定条件下で部分的に有効であるものの、mmWave V2Xのハンドオーバー安定化においては協調送信が最もロバストな手法であることが示されている。

2-2 未来予測制御技術の実現

車両の移動時において基地局と車両間の見通しが常に確保できるとは限らない。特に、他車線においてバスやトラックの大型車両の割り込みや交差点においての左折/右折において、遮蔽が動的に発生する場合には、ミリ波では直進性が強く電波の減衰が大きくなる。遮蔽物により伝搬損失が発生し、パケット損失率が劣化する課題がある。本課題に対して、路側機または周囲の車両からの協調認識メッセージで通知される通信対象の位置と今後の予測経路情報から移動経路を推定し、その周辺遮蔽物を認識し、数秒後の情報を予知し、見通し環境の確保可能性時間を算出することで他の通信可能な路側機への切り替えをすることで通信品質の改善を行う。車両が近づいている環境など路側機基地局では識別できない動的な遮蔽状況の変化について協調認知メッセージを用いたアルゴリズムを開発した。

道路交通シナリオにおけるミリ波通信では、建物や周囲車両に起因する反射・遮蔽を含む到達モデルを三次元環境で考慮することが重要である。特に、遮蔽の発生により自動運転車両が見通し(Line-of-Sight, LoS)区間を十分に確保できないことが課題となる。協調型を実現可能なデジタルツインの実装した。自動運転の有用性が顕在化する代表例として、視覚的に見通し外となる領域の映像情報等を高精細に車両間で共有する交差点シナリオを対象とする。また交差点は建物および他車両が混在し、無線伝搬における遮蔽が頻発する現実的な環境でもある。道路交通と無線の電波伝搬の状態をシミュレーションで評価可能な無線・交通デジタルツイン(Wireless ITS Digital Twin, WI-DT)の実装と構築を行った。要件としては、BIM, PLATEAU, IFC等の3D都市データを収集・統合し、実都市環境を再現可能な仮想都市環境を構築する。構築する都市モデルでは、道路構造、建築物、車両や歩行者等の交通オブジェクトについて、形状情報および材質情報を反映することで、現実に近い都市空間を生成する。さらに、SUMO等の交通シミュレータを用いて、車両移動や人流を再現し、時間的に変化する交通環境を仮想空間上に表現する。また、3Dレイトレーシングを用いることで、建物や車両による反射、遮蔽、回折等を考慮した無線通信路評価機能を実装する。これにより、地理座標に基づく無線伝搬マップを生成し、アプリケーション層から当該マップを利用可能とするためのアクセスAPIを整備する。さらに、V2X通信を想定したアプリケーションシナリオを設計し、各シナリオに応じた通信制御アルゴリズムの設計および実装を行う。加えて、各アプリケーションから得られる情報、例えば重要領域、人流密度、優

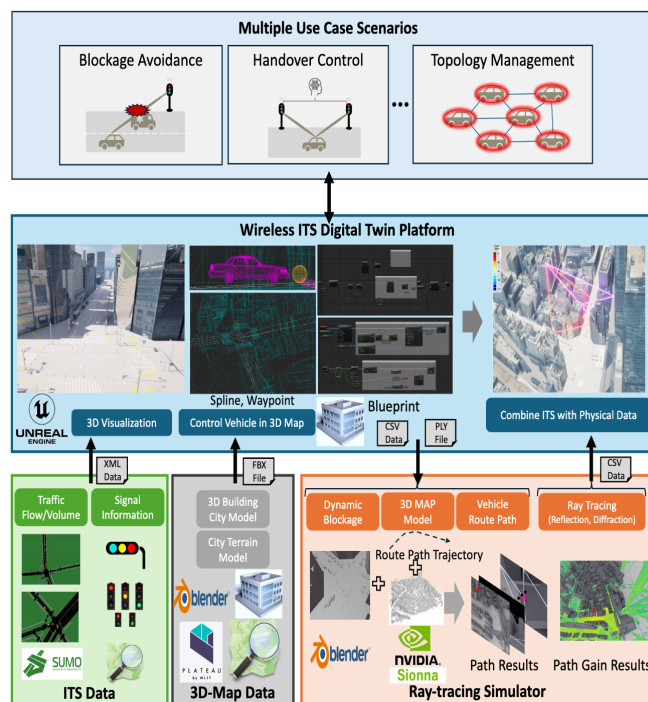
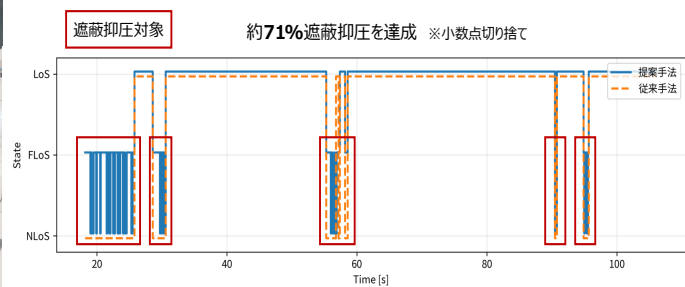


図4：デジタルツインアーキテクチャ



(a) WI-DT により構築した 3 次元仮想空間



(b) WI-DT を用いた遮断抑圧結果

図 5：3 次元無線・交通デジタルツイン（WI-DT）による遮断検出

先通信要求等を抽出し、これらの情報に基づいて動的帯域制御やスケジューリング制御を行うロジックを実装する。最終的には、構築した仮想都市環境と通信制御機能を統合し、アプリケーション層から通信層へのフィードバック制御を実証することで、都市デジタルツインを活用した高度な V2X 通信制御基盤の有効性を評価する。実装したデジタルツイン基盤および提案システムのアーキテクチャについて説明する。本研究では、デジタルツイン基盤として Unreal Engine 5 (UE5) を用いて実装を行った。図 4 に、提案するデジタルツイン基盤のアーキテクチャを示す。本システムでは、昨年度用いていた交通シミュレータである Simulation of Urban Mobility (SUMO) を用いて、車両の発生数や信号機の位置情報を XML ファイル形式で出力し、初期設定として Wireless Intelligent Digital Twin (WI-DT) にアップロードする。また、3 次元都市モデルについては、オープンデータである PLATEAU を用いてファイル変換を行い、WI-DT 上に取り込む。これにより、道路構造、建築物、信号機、車両などを含む 3 次元都市環境を構築する。WI-DT にインポートした都市データに基づき、交通経路および車両モデルの 3 次元化を行い、UE5 上で動作させる。まず、車両の走行道路および走行経路の設定を行った。Waypoint を用いて車両の走行経路を構築している。各 Waypoint は車両の進行方向を定義する目標点として機能し、デジタルツイン基盤上で自然な走行挙動を実現するために用いられる。本実装では、Waypoint を道路内に配置することで、歩行者領域への干渉を避けつつ、現実的な車両走行を再現している。次に、Spline を用いて Waypoint 間を滑らかに補間し、連続的な走行経路を定義した。Spline を用いることで、制御点間を直線的に接続する場合と比較して、より自然で現実的な車両の走行軌跡を表現できる。さらに、構築したデジタルツイン環境上に車両モデルを配置した。実装した車両モデルを示す。車両の接地状態を現実的に再現するため、地表面からタイヤ中心部までの高さが約 50 cm となるように Z 軸方向の位置を調整した。この設定により、走行シミュレーション時における車両モデルの視覚的整合性および物理的整合性を確保している。UE5 の Blueprint を用いて実装した車両走行制御の構成を示す。本制御は、Spline 上に定義された走行経路に沿って車両を移動させる機能を中心に構成されている。加速度、減速度、最大速度などの各種パラメータを設定することで、自然な加減速挙動を再現可能である。また、前方車両との距離に応じて減速または停止するロジックを組み込み、複数の Spline を連続的に走行できるように設計している。これにより、複数車両が連続して走行する実環境に近い交通挙動をデジタルツイン上で再現している。車両の動作に関しては、欧州標準化団体である European Telecommunications Standards Institute (ETSI) が標準規定した協調認識メッセージ (Cooperative Awareness Message, CAM) の取得間隔である 100 ms ごとに、車両位置情報を取得可能な機構を実装した。取得した車両位置情報および地図情報は、電波伝搬計算に用いるためにエクスポートされ、Sionna RT に入力される。Sionna RT では、3D レイトレーシングにより、建築物による反射や遮蔽に加えて、交差点内を走行する周囲車両による動的遮蔽を考慮した無線伝搬解析を行う。レイトレーシングにより得られた計算結果は、再度 WI-DT に読み込まれ、交差点内における車両の走行状況と併せて可視化される。交差点内の車両配置およびレイトレーシング結果の可視化例を示す。本実装では、対象車両のみならず、周囲を走行する車両も動的遮蔽物として無線伝搬解析に組み込んでいる。そのため、1 年目において擬似的に表現していた動的遮蔽を、より現実に近い形で高精度に再現できていることが分かる。以上により、本システムでは、交通シミュレーション、3 次元都市モデル、車両走行制御、およびレイトレーシングに基づく無線伝搬解析を統合した WI-DT 基盤を実現している。対象車両だけでなく周囲の車両を動的遮蔽として組み込んだものを用いているため、1 年目においては擬似的に行

っていたものがより高精度に実現されていることが分かる(図5)。図において、昨年度取り組んだフレネルゾーンを確保した手法をさらに発展させ、WI-DT 内のコンピュータビジョンを含めた遮蔽検出アルゴリズムを提案した。具体的には、コンピュータビジョン内にて路側機と車両間に障害物があるかないかを識別する。識別後に障害物があった場合に、見通し外(Non Line-of-Sight, NLoS)判定するのではなく昨年度開発したフレネルゾーンベースでの検出を行い、その結果第一フレネルゾーンが60%以上確保できている場合はLoS、それ以外はNLoSと判定する。その結果、LoSとなった場合はFLoSと定義する。本アルゴリズムをWI-DTにて実装し、可視化上での出力表示に加え、実施した結果を図5に示す。動的遮蔽による見通し外は対象車両の位置によっては見通し内となりうるため、遮蔽の検出において昨年度の提案手法の一部を実装させることで遮蔽検出の性能を改善し、発生抑圧を71%達成することができた。また、遮蔽の有無についてはデジタルツイン上にフレネルゾーンとして可視化して動的に判断することができるようにしている。本処理は、センシング・認識機能または交通シミュレーションから得られる車両の3次元位置情報を用いて、RSUと対象車両間の見通し状態および通信可否を判定するものである。具体的には、カメラやLiDAR等のセンシング情報、または交通シミュレーションにより得られる車両位置に基づいて、まずRSUと対象車両、および周辺車両との距離関係を算出する。その後、RSUと対象車両間に対して初期的なLoS/NLoS判定を行い、対象リンクが見通し状態にあるか、あるいは遮蔽状態にあるかを分類する。初期判定においてLoS側に分類された場合には、遮蔽物候補となる周辺車両の進入を考慮し、フレネルゾーンに基づく幾何計算を用いてLoS/NLoS状態を再判定する。この際、RSUと対象車両間の伝搬経路に対して、周辺車両がフレネルゾーン内に侵入するかを評価し、遮蔽高さ、すなわちフレネルゾーン有効高さを算出する。これにより、軽量の演算によって、時々刻々と変化する交通環境における見通し状態を逐次更新することが可能となる。一方、初期判定においてNLoS側に分類された場合には、単純な幾何判定のみでは通信成立の可否を十分に評価できないため、レイトレーシング結果を用いた通信可否判定を行う。具体的には、建築物や車両による反射および回折を含む伝搬経路の有無を確認し、遮蔽下においても通信リンクが成立するかを判定する。これにより、完全な遮蔽状態だけでなく、反射波や回折波を利用可能なNLoS環境におけるリンク状態を評価することができる。以上のように、本処理では、LoS側に対してはFresnel-basedな幾何判定を用い、NLoS側に対してはRay tracing-basedな通信可否判定を用いる二段階分類を採用している。この構成により、常時レイトレーシングに依存することなくLoS/NLoS状態を更新できるため、動的遮蔽を含む交通流シナリオに対して、実用的な計算量で無線リンク状態を評価可能とした。

【参考文献】

- [1] Y. Asabe, E. Javanmardi, **J. Nakazato**, M. Tsukada and H. Esaki, “AutowareV2X: Reliable V2X Communication and Collective Perception for Autonomous Driving”, VTC2023-Spring, 2023, pp. 1-7.
- [2] R. Iwaki, **J. Nakazato**, M. Asad, E. Javanmardi, K. Maruta, M. Tsukada, T. Ochiai, H. Esaki, “Optimizing mmWave Beamforming for High-Speed Connected Autonomous Vehicles: An Adaptive Approach”, IEEE CCNC 2024.
- [3] Y. Sasaki, S. Ogawa, K. Arai, **J. Nakazato**, M. Tsukada, **K. Maruta**, “Location-Based Broad-Range Null-Steering in V2X Multiuser MIMO Transmission”, IEEE CCNC 2024.
- [4] 無線アクセスネットワークのオープン化とインテリジェント化, ”<https://journal.ntt.co.jp/article/19554>”

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
高周波数帯 V2X の実現に向けた モビリティネットワークへのデジタルツインの適用	電子情報通信学会 RCS 研究会	2025 年 11 月
V2X 向けデジタルツインにおける動的遮蔽物による影響と調査	電子情報通信学会 CQ 研究会	2025 年 11 月
V2X 向けデジタルツインにおける電波伝搬の可視化	電子情報通信学会 CQ 研究会	2025 年 9 月
ミリ波 V2X 通信における複数基地局からの協調伝送方式	電子情報通信学会 CQ 研究会	2025 年 9 月
6G V2X 向け相互連携を可能とするデジタルツインの設計	電子情報通信学会 CQ 研究会	2025 年 7 月
Toward 6G Mobility Networks: Cell-Free Cooperative Distributed Beamforming for Interference Management	IEEE Explore・ICUFN	2025 年 7 月
6G 移動体向けセルフリー協調分散ビームフォーミングの検討", 電子情報通信学会	電子情報通信学会 RCS 研究会	2025 年 1 月
Toward 6G Mobility Networks: A Proposal for Cell-Free Cooperative Distributed Beamforming	ACM・ICEA	2024 年 11 月