

AutowareV2X：自動運転における V2X 通信と協調認知の実現

浅部 佑[†] エフサンジャワーンマーディ[†] 中里 仁[†] 塚田 学[†] 江崎 浩[†]

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

あらまし 近年、自律型自動運転の研究開発と社会実装が着々と進む中、その技術的な課題や限界点も指摘され始めている。そこで、最先端の無線通信技術やネットワーク技術を活かして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の分野が注目されている。特に、多くのコネクテッドな交通参加者が自らのセンサーで認識した物標情報を共有することで、ネットワーク全体の環境の認識率の向上を図る「協調認知」の活用は大きく期待されている。本研究では、自動運転ソフトウェアに統合可能な V2X 通信機能の要求事項を検討し、オープンソースの自動運転ソフトウェアである「Autoware」に外部接続性を提供できる V2X モジュール「AutowareV2X」を提案した。本提案では、自律型自動運転の基本機能に加え、汎用性のある標準化された V2X メッセージでの通信を可能にすることにより、協調型自動運転アプリケーションを実装、実証実験できる基盤を実現した。さらに、協調認知のアプリケーションを実装し協調認知メッセージ (CPM) による物標情報の共有を可能とした。AutowareV2X を活用することで路側機で認知した物標情報を自動運転車両に 30 ミリ秒以内で伝達することを実証実験により証明することができた。また、死角から歩行者や車両が飛び出てくるシナリオにおいては、道路脇に設置された路側機から物標情報をリアルタイムに共有されることにより、自動運転車両が減速・停止という危険回避動作を実現できた。本実証実験より、協調認知に限らず行動調停などの他のアプリケーションへの AutowareV2X の活用も期待される。

キーワード V2X, Cooperative-ITS, Collective Perception Message, Autoware, Dual-channel Redundancy

AutowareV2X: Enabling V2X Communication and Collective Perception for Autonomous Driving

Yu ASABE[†], Ehsan JAVANMARDI[†], Jin NAKAZATO[†], Manabu TSUKADA[†], and Hiroshi ESAKI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 152-8657 Japan

Abstract For cooperative intelligent transport systems (C-ITS), vehicle-to-everything (V2X) communication is utilized to allow autonomous vehicles to share critical information with each other. We propose AutowareV2X, an implementation of a V2X communication module that is integrated into the autonomous driving (AD) software, Autoware. AutowareV2X provides external connectivity to the entire AD stack, enabling the end-to-end experimentation and evaluation of connected autonomous vehicles. The Collective Perception Service was also implemented, allowing the transmission of Collective Perception Messages (CPMs). A dual-channel mechanism that enables wireless link redundancy on the critical object information shared by CPMs is also proposed. Performance evaluation in field experiments has indicated that the E2E latency of perception information is around 30 ms, and shared object data can be used by the AD software to conduct collision avoidance maneuvers. Dual-channel delivery of CPMs enabled the CAV to dynamically select the best CPM from CPMs received from different links, depending on the freshness of their information.

Key words V2X, Cooperative-ITS, Collective Perception Message, Autoware, Dual-channel Redundancy

1.. はじめに

近年、研究開発や社会実装が着々と進んでいる自律型走行車 (CAV: Connected Autonomous Vehicle) は、次世代のモビリティサービスを開発・展開するための重要な要素の一つであ

る。正確で信頼性の高いセンシング、加速された計算、汎用的な計画アルゴリズムからフェイルセーフな作動システムまで、サイバーフィジカルシステムの複数のドメインに及ぶ技術的課題の組み合わせを提示している。また、Autoware [1] や Baidu Apollo [2] などの自律走行 (AD: autonomous driving) ソフト

ウェアスタックのオープンソース実装は、スタンドアロンの AV に対して必要な機能およびモジュールの実装を提供している。一方で、協調型知能輸送システム (C-ITS : Cooperative Intelligent Transportation System) では、V2X (vehicle-to-everything) 通信を活用し、自律型車両を接続することができる。これにより、CAV 同士が重要な情報を共有し、環境意識の向上や協調的な意思決定の強化を図ることができます。このように、従来は排他的であった情報が付加されることで、AV 単体では不可能な安全性と効率性を実現することができます。C-ITS 技術と V2X 通信の普及は、世界的または地域的に広く受け入れられている一連の標準に大きく依存している。欧州電気通信標準化機構 (ETSI : European Telecommunications Standards Institute) と国際標準化機構 (ISO : International Organization for Standardization) が提唱する ITS ステーションアーキテクチャ [3],[4] は、様々な ITS アプリケーションとサービスを設計・実装するための共通のインタフェースや実装方針を提供する。ここで、ITS システムやアプリケーションが設置される物理的なノードを ITS ステーション (ITS-S) と表現し、CAV も路側機 (RSU) も ITS-S と見なすことができる。

Cooperative Awareness Message (CAM) [5] は、ITS-S の安全指向の基本情報を放送範囲内にある近くの ITS-S に提供する。米国では、Basic Safety Message (BSM) [6] が同様の機能を提供している。また、環境認識を協調的に向上させるために、ITS-S が認識した対象を他の ITS-S と共有する Collective Perception Service (CPS) [7] などの新しい標準化の議論が行われている。

Contribution: 本稿では、AD スタックと完全に統合可能な V2X ルータのオープンソース実装の課題と要件について検討する。これらの要件を満たし、AD スタック内の全てのモジュールに外部ネットワーク接続を提供できる V2X ルータ「AutawareV2X」を提案・実装する。

図 1 には、AutawareV2X を用いた大規模 V2X 通信の概要を示している。本実装により、既存の AD ソフトウェアモジュール上に V2X アプリケーションを構築することができ、柔軟で拡張性の高い開発・実験プラットフォームが実現される。また、自律走行アルゴリズムと V2X ネットワーク機能の End-to-End (E2E) での検証が可能であり、将来のコネクテッドモビリティアプリケーションをより包括的に評価することができる。また、Collective Perception Service (CPS) が実装され、フィールド実験によりその有効性が証明した。さらに、集団的な協調認知の信頼性を高めるために、CPM が共有する重要な物体情報においてリンクの冗長性を実現するデュアルチャネル機能を追加提案する。本研究の成果である AutawareV2X のソースコードは <https://github.com/tlab-wide/AutawareV2X> で公開している。

本稿の残りの部分は以下のように構成されている。第 2 章では、関連研究について説明する。次に第 3 章では、既存の V2X 実装の問題点を議論し、本システムにおける必要機能を説明する。第 3 章では、V2X の実装である AutawareV2X を紹介し、さらに CPM の可用性を向上させるためのデュアルチャネル配信方式を提案する。第 4 章では、実験構成を説明し、フィールド実験での結果を示す。最後に、第 5 章で結論を述べる。

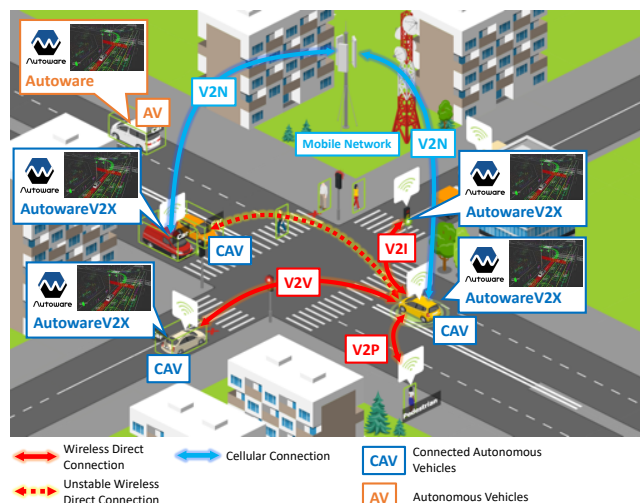


図 1: High-level Overview of AutawareV2X Use Cases

2.. 関連研究

CAV の研究開発プラットフォームは広く研究されており、主に V2X 通信の実現と特定のユースケースへの適用に焦点を当てた様々な実装が行われている。OpenC2X [8] や Vanetza [9] などのオープンソースのプラットフォームでは、ITS Station Architecture をベースに、ITS-G5 [3] という欧州 V2X 通信アーキテクチャ標準に準拠したソフトウェアパッケージがそれぞれ提供されている。また、V2X 通信スタックには、他の独自規格も存在するが、以下のような問題点がある。(i) オープンソースコードが利用できないことによるブラックボックス的な動作 - ETSI などの組織によるオープンな標準化が進んでいるにもかかわらず、実装の詳細が明らかにされていない場合、ソフトウェアの検証が困難である点 (ii) ソフトウェアが提供する API の機能更新が遅いことによるカスタマイズ性の欠如している点 (iii) 研究コミュニティにとって特に重要な修正コードや拡張機能の共有が不便である点 (iv) 商業ソフトウェアスタックの製品料金が比較的高い点などが挙げられる。

また、OpenC2X は ETSI ITS-G5 のプロトコルスタックを実現し、CAM と DENM メッセージをサポートしている。しかし、V2X アプリケーションの設計と実装に限定されており、自律走行ソフトウェアスタックとの統合は将来の開発者の仕事に委ねられている。さらに、Cooperative Automation Research Mobility Application (CARMA) platform [10] もオープンソースのソフトウェアスタックで、Autaware ベースの自律走行車の上に接続機能を実現するものである。本ソフトウェアは、米国標準規格をベースにしており、最近では協調型認知に関する PoC も実施されている [11],[12]。X-CAR 実験車両プラットフォーム [13] は CARMA を搭載しており、より安価で高品質なハードウェアで実装している。上記で説明した関連研究は全てではないが、Vanetza が V2X 通信スタックを実装したオープンソースの主要なもの 1 つであるという事実を示している。

一方で、協調認知 [14] [15] や経路計画 [16] など、AD スタックの特定のモジュールへの V2X 通信の統合にのみ焦点を当て

た研究もある。文献 [17] は、V2X 通信を利用した自動車の自律走行システムを提案し、知覚、計画、制御のためのアプリケーションを提示している。V2X 通信の効果を単一モジュールや AD スタックの限られた範囲で評価するには十分であるが、E2E AD ソフトウェア全体に対する V2X 通信の効果を実験・評価するためには、より汎用的な AD スタック統合の設計が必要である。

上記より、各実装は、その特定のユースケースや展開シナリオにおいて有望な結果を示しているが、AV ソフトウェアスタックと完全に統合され、複数の無線アクセス技術 (RAT) インタフェースを通じて異なるプロトコルを発信できる包括的な V2X 通信ルータはまだ見出されていないという課題が存在する。そのため、本稿では、V2X モジュール「AutowareV2X」を提案する。

3. 問題定義

3.1 スケーラビリティと拡張性

既存の多くの V2X 活用システムでは、自動運転ソフトウェアスタック内の異なるモジュールそれぞれに外部接続性を提供する無線ルーターやセルラーインタフェースが搭載されていた。そのような設計の場合、外部との接続を可能とするハードウェアと自動運転モジュールが密結合となっているため、同じ V2X ルーターの資源を複数の自動運転モジュールやアプリケーションが共有することが困難となっていた。ハードウェアを効率的に活用するためには、自動運転モジュールと外部接続性を提供するネットワーク部分は切り離しが可能な疎結合になっている必要がある。そうすれば、複数の自動運転アプリケーションが同じネットワークインタフェース越しに外部と通信することが可能となり、ネットワーク資源のより効率的な活用にもつながる。本研究の提案アーキテクチャにおいても、自動運転ソフトウェアと疎結合な V2X ルーターを用いることにより、スケーラビリティと拡張性を持ち合わせたデザインとすることができた。

3.2 標準化動向

V2X の通信規格は、すでに欧米や日本などでさまざまなものが制定されている。V2X 通信ルーターが様々な環境下で正しく機能するためには、使用するプロトコルが既存の規格に準拠していることはもちろん、最新の変更に対応する必要がある。ITU (International Telecommunication Union) の ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) [18] で定義されたプロトコルを簡単に取り込むことができるため、幅広い規格に対応でき、更新も容易になる。

3.3 パケットロスに対するロバスト性

CPS 情報を利用した協調システムの安全性は、CPM を送信するために使用する無線ネットワークの信頼性にに基づいている。輻輳、電波干渉、大きな障害物などの問題によるネットワーク状態の悪化は、CPM のパケットロスを大きくし、結果として CPM 受信ノードが環境認識を完全に行えなくなる可能性がある。本提案システムでは、マルチ RAT (Radio Access Technology) 方式を採用し、CPM 送信に使用する接続に 2 チャンネルリンク

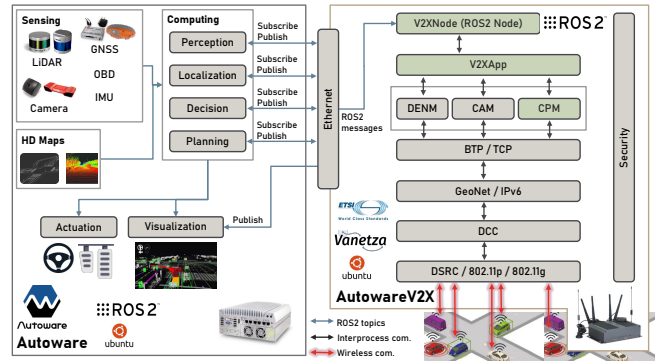


図 2: システムアーキテクチャ及び設計

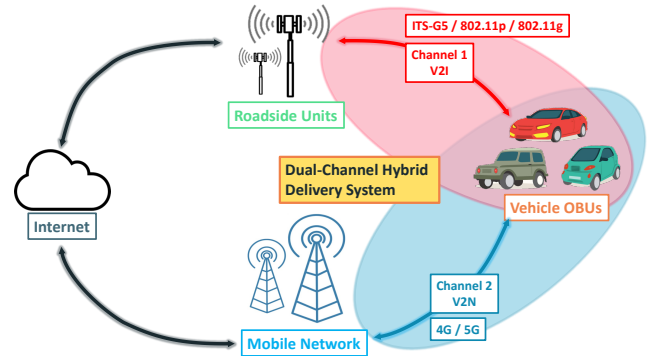


図 3: CPM におけるデュアルチャンネルによる高信頼システム

の冗長性を持たせている。これにより、片方のチャンネルでパケットロスが発生した場合でも、CPM の送信に成功する。

4. 提案アーキテクチャ

AutowareV2X は、広く普及しているオープンソースの AD ソフトウェアスタック「Autoware」[1] に統合して、CAV を実現できる V2X 通信モジュールである。本実装のシステムアーキテクチャを図 2 に示す。Autoware は、センシングと HD マップ情報を用いて、知覚、定位、判断、計画から制御までの AD スタック全体を実行するためのものである。また、ROS2 ミドルウェア [19] をベースとしているため、内部メッセージは全て Publish-Subscribe アーキテクチャで共有されています。AutowareV2X は ETSI C-ITS プロトコルスイート Vanetza [9] に基づいており、イーサネットインタフェースを通じて Autoware に統合することが可能である。Autoware からのすべての関連メッセージは、V2X メッセージに変換してパックすることができる。Autoware と AutowareV2X の両方が緩やかに切り離されているため、2 つのコンポーネントを別々のハードウェアに配置することで、より多くのユースケースに対応することができる。

V2XNode 機能は、V2X 通信スタックと ROS2 ベースの Autoware のインタフェースとして機能し、V2X 通信ルータに必要な共通タスク、クロスレイヤーのネットワーク構成、CAM や CPM などの各種ファシリティの管理は "V2XApp" が担っている。また、AutowareV2X のユースケースを実証するアプリケーションとして Collective Perception Service (CPS) を実

Algorithm 1 CPM Acceptance and Rejection at Receiver ITS-S

```

1:  $T_{GT} \leftarrow$  generationTime of most recently accepted CPM
2: while CPM is received do
3:    $T'_{GT} \leftarrow$  generationTime of newly received CPM
4:    $GTD = T'_{GT} - T_{GT}$ 
5:   if  $GTD > 0$  then
6:     Accept(CPM)
7:      $T_{GT} = T'_{GT}$ 
8:   else
9:     Reject(CPM)

```

装し、Collective Perception Messages (CPM) の発信・受信を可能としている。CPM を介して共有された物体情報は、直ちに Autoware の Perception モジュールや Planning モジュールに入力することができ、CAV の E2E 実験・評価を可能にする。

4.1 CPM におけるディアルチャンネルによる高信頼方式

AutowareV2X 上でより信頼性の高い CPS を実現するために、また、3.3 で述べた要件に対応するために、CPM 伝送に接続に 2 チャンネルのリンク冗性を持たせるマルチ RAT (Radio Access Technology) アプローチをさらに提案する。提案するコンセプト、すなわち「Dual-Channel Hybrid Delivery System」を図 3 に示す。

V2X の主直接通信路 (CH1) での CPM 配信と並行して、4G などのより安定した副通信路 (CH2) でも同じ CPM が送信される。ここで、CH2 は CH1 よりもかなり高いパケット到達率を持つが、帯域幅が制限されたり、遅延が増加したりする可能性がある想定する。したがって、CH2 での CPM の最適な配信間隔も考慮する必要がある。

CH1 と CH2 の両方で CPM が送信された場合、受信者は受信した CPM のうちどれを AD システムに受け入れるかを選択しなければならない。最新の CPM 規格にある *generationTime* というフィールドを利用する。これは CPM 送信者の位置が決定された時の基準時刻で、CPM 内のすべての時間関連情報の基礎となるものである。受信機は CH1, CH2 のいずれかから CPM を受信したとき、以前に受け入れた CPM よりも新しい *generationTime* を持つ場合のみ、その CPM を受け入れる。Algorithm 1 はこの処理を記述している。ここで、Generation Time Difference *GTD* を以下のように定義する。

$$GTD = T'_{GT} - T_{GT} \quad (1)$$

このとき T'_{GT} は新しく受信した CPM の *generationTime* を表しており、 T_{GT} は最も最近に受け入れた CPM の *generationTime* を示す。正の *GTD* は、新しく受信された CPM が最後に受け入れた CPM よりも新しい情報を含んでいることを示し、負の *GTD* は、より古い情報を保持していることを示す。

5.. 実証実験

本実証実験では、東京大学の柏キャンパスにある ITS RR テストフィールドで実施する。Lidar やセンサーカメラを搭載し CAN

表 1: Hardware for CAV

| Device | Specifications |
|-------------------------------------|--|
| Intel NUC Model: 11Pro | OS: Ubuntu 20.04, ROS: Galactic, Software: AutowareV2X |
| Netgear Model: A6210 | Dual-band: 802.11b/g/n (2.4GHz), 802.11a/n/ac (5GHz) |
| IDY IoM 5G Gateway Model: iR730B | Bands: 3G, 4G, 5G, nano PSIM, 4x high-performance active antennas |
| Gigabyte PC Model: AERO-15 | OS: Ubuntu 20.04, ROS: Galactic, Software: Autoware.universe |
| Vehicle Model: Yamaha G30Es-Li | Speed: ≤ 20 km/h, Sensor: VLP16 3D LiDAR (Rooftop) |

表 2: Hardware for RSU

| Device | Specifications |
|-------------------------------------|--|
| VLP16 3D LiDAR | Range: 100 m, Accuracy: +/- 3 cm, Rotation rate: 5-20 Hz, 16 channels |
| Intel NUC Model: 11Pro | OS: Ubuntu 20.04, ROS: Galactic, Software: AutowareV2X |
| Netgear Model: A6210 | Dual-band: 802.11b/g/n (2.4GHz), 802.11a/n/ac (5GHz) |
| IDY IoM 5G Gateway Model: iR730B | 4G, 5G, nano pSIM, 4x high-performance active antennas |
| Gtune PC Model: H5 | OS: Ubuntu 20.04, ROS: Galactic, Software: Autoware.universe |

が生成可能な自動運転可能な車両 (CAV) と仮説で設置した RSU を用いて実施する。また、実証実験において CAV と RSU それぞれにて使用する機器情報を表 1 と 2 に示す。

交差点に設置された RSU が近くの物体を感知し、その情報を CPM という形で接近する CAV にブロードキャストするシナリオを検討した。CAV は左側から交差点に接近するが、右側から接近する歩行者 2 人と車両は建物の壁の陰に隠れているため (死角状態)、局所的に検知することができない。しかし、RSU は死角にある物体を検出し、その情報を CPM を介して CAV に送信することができるため、CAV は死角情報を認知し停車などの制御を行うことができる。図 4 に本実証実験の結果を示す。図に示すように CAV は車載センサと CPM で共有される物体情報の両方によって、これまで死角とされていた場所など、より広い範囲を認識することができるようになった。

AutowareV2X で送信された CPM の E2E における合計遅延とその内訳を図 5 に示す。図より、RSU の AD スタックから CAV の AD スタックに知覚情報が約 30ms で配信された。レイテンシ内訳を見ると、2 つのルータ間の通信レイテンシ $T_{r_1r_2}$ は約 18ms、両ルータの実行時間を合わせた T_{r_1} は約 30ms であることがわかった。その結果、 T_{r_2} の実行時間は約 12ms 程度で実現することができた。

CH1 と CH2 の両方で受信したすべての CPM の "Generation Time Difference" *GTD* を図 6 に示す。また、CH1 での PDR (Packet Delivery Ratio) の変化を赤線で示す。正の *GTD* をもつ CPM はすべてシステムによって受け入れられた。CH1 の PDR

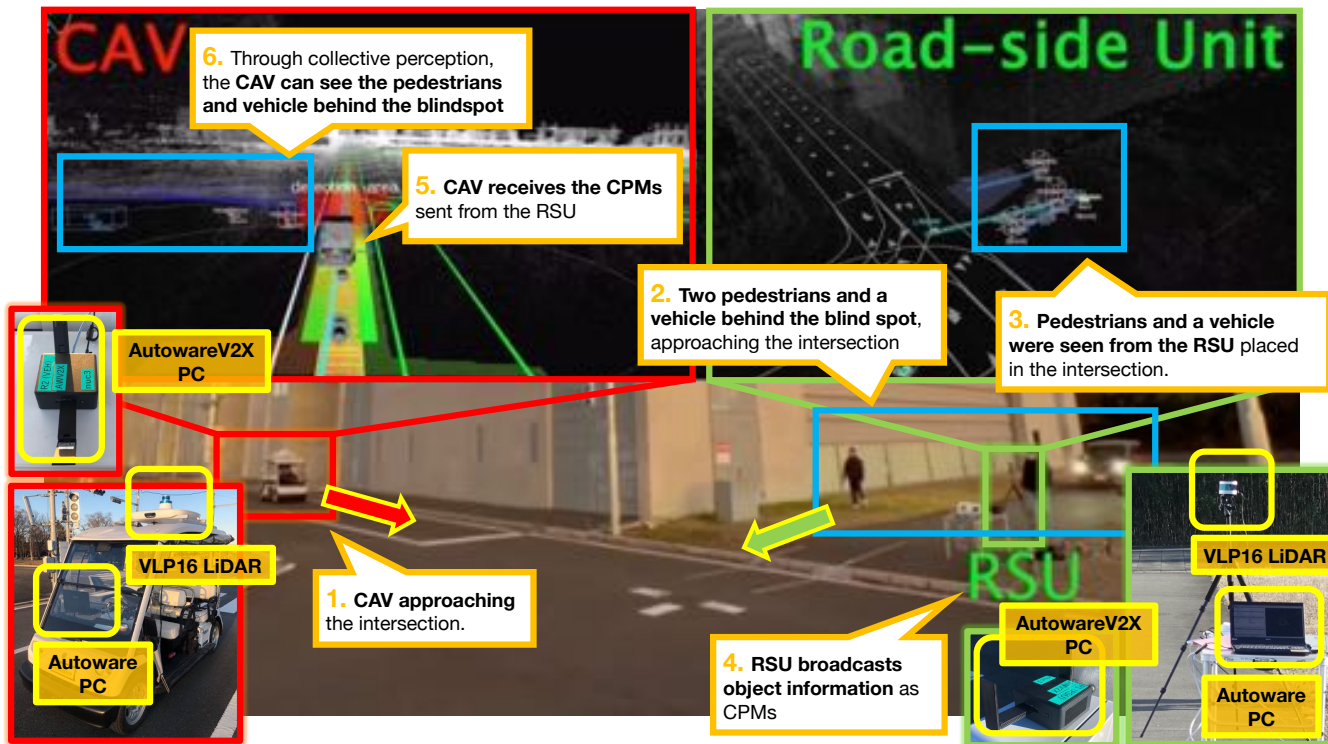


図 4: Collective perception scenario using a blindspot

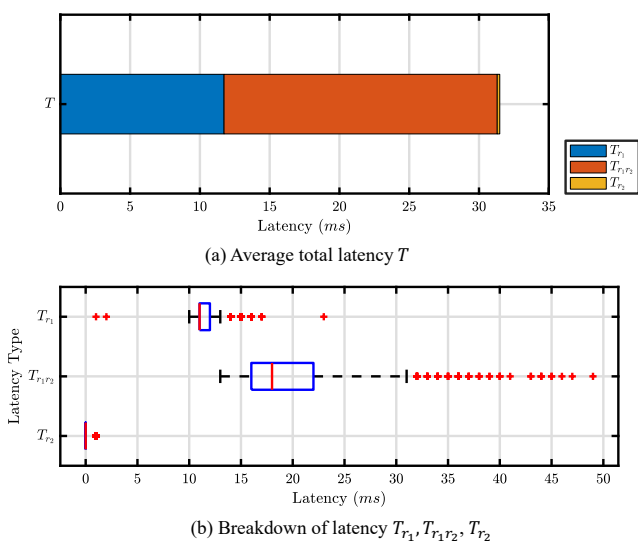


図 5: Total E2E latency and its breakdown

が低下すると、CH2（オレンジ色で表示）で送信される CPM は正の GTD 値を示す傾向がある。これは、Wi-Fi で送信された CPM が高いパケットロスに耐えた場合、4G で送信された CPM はより新鮮な情報を持つ CPM としてシステムによって正常に受け入れられたことを意味する。したがって、Wi-Fi チャネルでパケットロスが多い場合でも、4G チャネルでロスを補い、新しいオブジェクト情報を受信者に提供することに成功している。

フィールド実験における死角シナリオでの CAV の速度と位置を図 7 に示す。赤線は RSU から CPM が送信されない場合の CAV の速度である。CAV は死角にある物体に気づかず、減

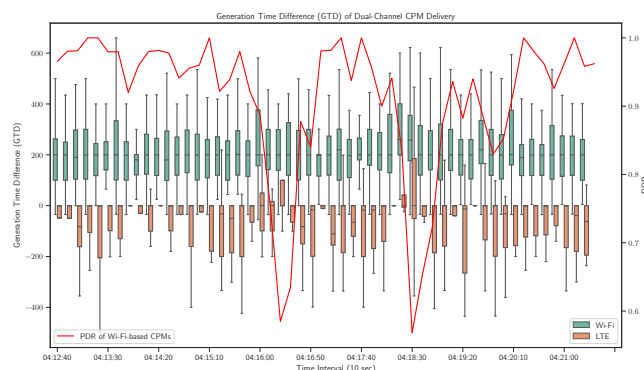


図 6: CH1 及び CH2 で受信された CPM の "Generation Time Difference" GTD

速することなく交差点を通過している。青線は RSU から CPM が送信され、CAV が死角の物体を認識できたときの CAV の速度である。CAV は、AutawareV2X から CPM という形で共有された情報により、死角の後ろの歩行者と車両が交差点に近づいていることを推測することができる。そのため、交差点に入る前に減速し、完全に停止した後、安全が十分に確認できた時点でゆっくりと再出発することができる。

6. 結 論

本研究では、自動運転ソフトウェアに統合可能な V2X 通信ルータの要求事項を検討し、オープンソースの自動運転ソフトウェア「Autaware」に外部接続性を提供できる V2X モジュール「AutawareV2X」を提案した。自律型自動運転の基本機能に加え、汎用性のある標準化された V2X メッセージでの通信を

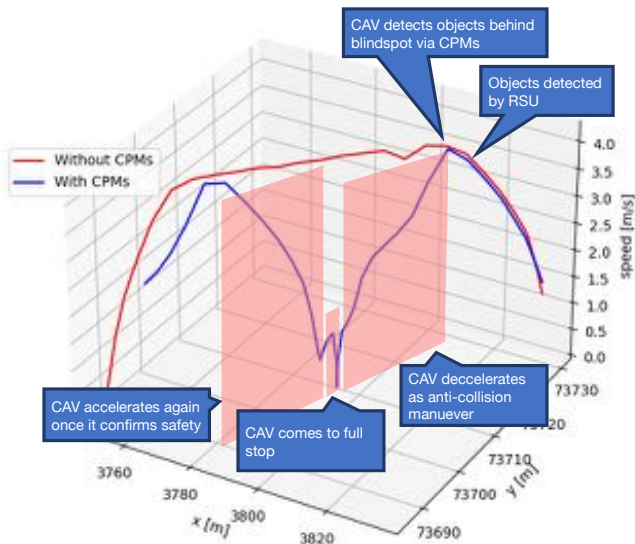


図 7: 死角シナリオにおける CAV の速度と位置の変化

可能にすることにより、協調型自動運転アプリケーションを実装、実証実験できる基盤を実現した。さらに、協調認知のアプリケーションを実装し協調認知メッセージ (CPM) による物標情報の共有を可能とした。AutowareV2X を活用すると路側機で認知した物標情報を自動運転車両に 30 ミリ秒以内で伝達することができた。また、死角から歩行者や車両が飛び出てくるシナリオにおいて、道路脇に設置された路側機から物標情報をリアルタイムに共有されることにより、自動運転車両が減速・停止という危険回避行動を取れるようになった。協調認知に限らず行動調停などの他のアプリケーションへの AutowareV2X の活用も期待される。

謝辞 本研究の一部は、NICT「Beyond 5G 研究開発促進事業 (#01101)」及び科研費 (19KK0281, 21H03423 and 22H03574) の助成を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表したい。

文 献

- [1] Shinpei Kato, Shota Tokunaga, Yuya Maruyama, Seiya Maeda, Manato Hirabayashi, Yuki Kitsukawa, Abraham Monrroy, Tomohito Ando, Yusuke Fujii, and Takuya Azumi. Autoware on board: Enabling autonomous vehicles with embedded systems. In *2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCP)*, pages 287–296, April 2018.
- [2] Baidu apollo. <https://developer.apollo.auto/index.html>. Accessed: 2023-1-1.
- [3] ETSI. ETSI EN 302 665 v1.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. Technical report, September 2010.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). ISO 21217:2020 intelligent transport systems — station and communication architecture. Technical report, International Organization for Standardization (ISO), 2020.
- [5] ETSI. Intelligent transport systems (ITS); vehicular communications; basic set of applications; part 2: Specification of cooperative awareness basic service; EN 302 637-2 - v1.3.1, 2017.
- [6] Dedicated short range communications - basic safety messages.
- [7] ETSI. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2; TR 103 562 - V2.1.1, 2019.
- [8] Sven Laux, Gurjashan Singh Pannu, Stefan Schneider, Jan Tiemann, Florian Klingler, Christoph Sommer, and Falko Dressler. Demo: OpenC2X — an open source experimental and prototyping platform

supporting ETSI ITS-G5. In *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pages 1–2, December 2016.

- [9] Raphael Riebl, Christina Obermaier, Stefan Neumeier, and Christian Facchi. Vanetza: Boosting research on inter-vehicle communication. *Proceedings of the 5th GI/ITG KuVS Fachgespräch Inter-Vehicle Communication (FG-IVC 2017)*, pages 37–40, 2017.
- [10] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. CARMA platform detailed design documentation. <https://usdot-carma.atlassian.net/wiki/spaces/CRMPLT/pages/196182019/CARMA+Platform+Detailed+Design+Documentation>, February 2021.
- [11] Yingyan Lou, Amir Ghiasi, Mafruhatul Jannat, Sujith Racha, David Hale, Wade Goforth, and Pavle Bujanovic. Cooperative automation research: CARMA proof-of-concept TSMO use case testing: CARMA cooperative perception concept of operations. Technical Report FHWA-HRT-22-062, April 2022.
- [12] Yingyan Lou, David Hale, Michael McConnel, Amir Ghiasi, Mafruhatul Jannat, Sujith Racha, and Leidos, Inc. FHWA cooperative automation research: CARMA proof-of-concept TSMO use case testing: CARMA cooperative perception low-level concept of operations. Technical Report FHWA-HRT-22-116, November 2022.
- [13] Goodarz Mehr, Prasenjit Ghorai, Ce Zhang, Anshul Nayak, Darshit Patel, Shathushan Sivashangaran, and Azim Eskandarian. X-CAR: An experimental vehicle platform for connected autonomy research powered by CARMA. April 2022.
- [14] Rusheng Zhang, Zhengxia Zou, Shengyin Shen, and Henry X Liu. Design, implementation, and evaluation of a roadside cooperative perception system. *Transp. Res. Rec.*, page 03611981221092402, June 2022.
- [15] F A Schiegg, I Llatser, H Tchouankem, T Frye, F Wildschutte, and F Hofmann. Removing blind spots – infrastructure-assisted collective perception. In *ELIV 2021*, pages 29–44. VDI Verlag, October 2021.
- [16] Masaya Mizutani, Manabu Tsukada, and Hiroshi Esaki. AutoMCM: Maneuver coordination service with abstracted functions for autonomous driving. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation (ITSC) 2021*. unknown, September 2021.
- [17] Chanyoung Jung, Daegyu Lee, Seungwook Lee, and David Hyunchul Shim. V2X-Communication-Aided autonomous driving: System design and experimental validation. *Sensors*, 20(10), May 2020.
- [18] X Series. Data networks and open system communications. *OSI networking and system aspects—Abstract Syntax Notation One (ASN. 1)*, International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation X.
- [19] Steven Macenski, Tully Foote, Brian Gerkey, Chris Lalancette, and William Woodall. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Sci Robot*, 7(66):eabm6074, May 2022.