

Everything to Network(X2N) : 5G 網を前提としたコネクテッドモビリティ 環境下における複数の ITS ユースケースの性能評価

佐藤雅明^{1,4} 西田亘¹ 広田和也¹ 渡辺諒² 石原匠² 古本裕一³ 中村修³

概要: 高度道路交通システム(ITS)分野では、車単体での自律制御に加え、車と車(V2V)、車と路側機(V2I)、さらには車と広域ネットワーク(V2N)を活用した協調型 ITS が注目されている。従来の V2N には通信遅延等の課題から、制御を伴う協調型 ITS の多くは V2V、V2I を前提としたものが多い。一方、V2V/V2I で用いられる通信方式は国毎に異なる仕様であり、実用性は普及率や路側機敷設状況に依存する。自動車にとって、V2N のサービス範囲や、歩行者などの車以外のモビリティ、道路付帯物などの接続性はメリットが大きく、5G に代表される技術革新により問題の改善が見込まれる。本研究では、自動車主体(V2X)ではなく全ての機能がネットワークに接続されていること(Everything to Network)を前提としたコネクテッドモビリティ環境として X2N を提案する。また、そのコンセプト実証のため 5G SA 構成のテストフィールドを構築し、想定される 5 つのユースケースを同時に動かす実証実験を実施した。テストフィールドおよび各ユースケースの性能評価を通じ、X2N のコンセプト実証と課題、および展望を考察した。

X2N:Real filed trial of multiple ITS use cases in a connected mobility environment utilizing 5G cellular network

MASAAKI SATO^{1,4} TORU NISHITA¹ KAZUYA HIROTA¹ AKIRA
WATANABE² TAKUMI ISHIHARA² YUICHI FURUMOTO³ OSAMU
NAKAMURA³

1. はじめに

自動車を用いた道路交通は、現在の生活に欠かす事が出来ない社会基盤として我々に様々な利便性を提供している。その一方、自動車は普及に伴い交通事故や渋滞のもたらす時間と資源の浪費、環境汚染などの問題も発生させる。こうした問題を解決するために、道路交通に関する総合的な取り組みとして高度道路交通システム(Intelligent Transport Systems: ITS) の構築が世界規模で盛んに行われている。

ITS では自動車の安全性向上から無人による移動サービスに至るまで、様々な研究開発と普及展開がおこなわれているが、特に現在注目を集めているのは自動運転分野である。自動運転では、車単体での自律制御支援に加え、車と車(Vehicle to Vehicle : V2V)、車と路側機(Vehicle to Infrastructure : V2I)がコミュニケーションして実現する協調制御支援、すなわち協調型 ITS が重要視されており、V2V/V2I に加えて、車と広域網(携帯電話網)を接続する V2N(Vehicle to Network)を活用した取り組みも盛んである。

従来の V2N は通信速度や遅延、信頼性などの技術的課題があるとされ、制御を伴う自動運転システムの多くは、V2V/V2I の ITS 専用通信を前提として検討されている。しかし、ITS 専用通信は国毎に異なる仕様となっており、ITS

専用通信による自動運転支援は、その普及率や路側機敷設状況に依存する。一方、主に携帯電話による V2N はグローバルに利用可能であり、そのサービス範囲の広さや、自動車以外の歩行者、自転車などのモビリティ、さらには道路付帯物などとも比較的容易に接続できる利点がある。さらに、技術的課題は 5G に代表される技術革新で近い将来の改善が見込まれている。これからのモビリティを支える協調 ITS、ひいては自動運転の実用化に際しては、従来の ITS 専用通信に加えて、V2N も積極的に活用していくことが求められる。

2. 協調型 ITS とコネクテッドカーの現状

2.1 ITS の概要

道路交通の知能化・情報化に関する大規模なプロジェクトは、1980 年代に欧州で実施された PROMETHEUS (PROGRAMME FOR A EUROPEAN TRAFFIC SYSTEM WITH HIGHEST EFFICIENCY AND UNPRECEDENTED SAFETY)[1]や、米国カリフォルニア州の PATH (Partners for Advanced Transportation Technology)[2]などが先駆けである。自動車交通の情報化、すなわち ITS の目的は、通信技術と情報処理技術とを道路交通に取り入れることで、道路交通

1 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Graduate school of Media and Governance, Keio University

2 慶應義塾大学 総合政策学部
Faculty of Policy Management, Keio University

3 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

4 東海大学観光学部観光学科
Department of Tourism, Tokai University

自体をシステムとして知能化することである。それは、自動車の運転者が、自分の取得出来る範囲の情報だけを処理して判断するのに比べ、遥かに効率的である。

2.2 協調型 ITS (Cooperative ITS)

交通事故・交通渋滞の抜本的削減や、運転能力の低下した高齢者等の移動支援等のためには、自動車に設置したレーダー等で走路環境を認識する技術(自律型システム)による単体での運転支援に加え、自動車と自動車(V2V)、自動車と路側(V2I)等をネットワーク化して走路環境を認識する技術(協調型システム)を活用することが必要である。このような運転支援に用いられる通信を総称して V2X(Vehicle to Everything)通信と呼び、V2X 通信を用いた協調型システムは「協調型 ITS(Cooperative-ITS : C-ITS)」と呼ばれる。協調型 ITS で主に検討されている通信方式の多くは、それぞれの端末同士が直接通信をする方式である。代表的な通信方式には ITS 専用の狭域通信である DSRC(Dedicated Short Range Communication)が挙げられる[3]。DSRC は小さいオーバーヘッドによって少ない通信遅延でのデータ転送が可能であり、有料道路の料金収受から安全運転支援まで多くの ITS で利用されている。米国で検討されている IEEE802.11p や、欧州の標準化団体である ETSI(European Telecommunication Standards Institute)において検討されている ITS-G5[4]などはこの DSRC をベースとした通信方式である。加えて、ETSI では車両や路側機の動的な情報を交換するメッセージセットの CAM(Cooperative Awareness Message)[5]や道路交通のイベント情報を交換するための DENM(Decentralized Environmental Notification Message)[6]などの規格化が進んでいる。

日本では、既に高速道路による安全運転支援や交通情報収集のシステムである ITS スポット[7]や、路車間だけでなく世界に先駆けて車-車間通信を活用したサービスを実現する ITS connect[8]が実用化されている。ITS connect は専用周波数(760MHz 帯)を使用し、車-車間通信を利用した協調型 ACC(Cooperative ACC:CACC)や路車協調システムなどを実現している。

2.3 コネクテッドカー

ドイツのメルセデスベンツ社が 2016 年に掲げた「CASE」は、「C:Connected」「A:Autonomou」「S: Shared & Services」「E: Electric」からなる自動車の存在・価値拡張を実現するビジョンである。CASE の先頭に掲げられている「Connected」、すなわちコネクテッドカーとは通信をはじめとした ICT 機能を搭載した自動車の総称である。コネクテッドカーの実現に向けて、協調型 ITS においては、V2V/V2I の ITS 専用通信に加えて、自動車と広域通信網(主に携帯電話)を接続する V2N(Vehicle to Network)を含めて議論されることが主流である。

コネクテッドカーの一つが、日本が世界に先駆けて取り組んできたプローブ情報システム[9][10]である。プローブ情報システムは、専用の ITS 通信を必要としていた既存の ITS に対し、自動車をインターネットノードの一つとして捉え情報化し、その通信基盤にインターネットを活用することで様々な事業者が多様なサービスを提供出来るオープンなプラットフォームを提供する。例えば、速度情報から渋滞状況を生成したり、ワイバ動作状況や外気温から降雨などの気象情報を生成することが可能である。情報ソースである自動車自身から取得される形で一元的に集約・共有化され様々なサービスの基礎となるという概念は、現在の IoT(Internet of Things)やビッグデータ・オープンデータなどの先行事例ともいえる。

3. 運転支援のためのコネクテッドモビリティ

3.1 自動運転の区分

自動走行や安全運転支援システムの分類は、様々な国や研究機関が取りまとめていたが、米国の運輸省(DOT: Department of Transportation)内の組織である米国運輸省道路交通安全局 (NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration) が自動運転のシステムレベルの分類を米国自動車技術会(SAE : Society of Automotive Engineers)の表記に統一することを決めたため、現在では 5 段階での分類が主流となっている。例として国土交通省が 2020 年に策定した自動運転車に対する分類[11]を表 1 に示す。

表 1 自動運転の分類

Lv	概要	操作* 主体	対応呼称
1	アクセル・ブレーキ操作またはハンドル操作のどちらかが、部分的に自動化された状態	運転者	運転支援車
2	アクセル・ブレーキ操作およびハンドル操作の両方が、部分的に自動化された状態	運転者	
3	特定の走行条件を満たす限定された領域において、自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態。ただし装置作動中正常に動作しない恐れがある場合は警報が発せられ、運転者が適切に応答しなければならない	自動運行装置 /運転者	条件付自動運転車 (限定領域)
4	特定の走行環境条件を満たす限定された領域において自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態	自動運行装置	自動運転車 (限定領域)
5	自動運行装置が運転操作の全部を代替する状態	自動運行装置	完全自動運転車

* 車両の操縦のために必要な、認知、予測、判断及び操作の行為を行うこと

3.2 自動運転の現状とV2Xによる運転支援の必要性

自動運転，ドライバーレス車両によるサービスの社会実装に向けて世界各国で様々な取り組みがされており，日本では2020年に施行された自動運転の実用化に向けた保安基改正施工を受けて，本田技研工業株式会社が自動運転のレベル3に該当する型式指定を世界で初めて取得し2021年3月に市販している．また，国立研究開発法人産業技術総合研究所は，福井県吉田郡永平寺町にて無人自動運転の実証を重ねた結果，V2Nを用いた遠隔監視・操作型のレベル3自動運転の認可を受けた[12][13]．これは将来的なレベル4以上の自動運行装置の実現に向けた大きな貢献である．

一方，自動運転技術のメリットは無人だけではない．人的ミスに起因する交通事故や交通渋滞の低減等が期待される運転支援システムとして，既に衝突被害軽減ブレーキ，ドライバの負担軽減に資するACC(Adaptive Cruise Control)や車線維持支援システム(Lane Departure Warning (LDA))等の普及が進んでいる．こうした運転支援がV2X機能を活用した協調型ITSとなることで，より高度で安全性の高い走行を可能とすることができる．

また，1949年に制定されたジュネーブ道路交通条約においては「自動車には運転者がいなければならない」と定められている．操作の主体が自動運転装置となる自動車が公道を走行するには法制度の改訂に加えて，自動運転車が事故を起こした場合の責任のあり方や保険制度についても十分な検討が求められる．

これらの問題を解決するまでは，レベル3以下の運転支援，あるいは条件付きの自動運転車が公道を走行することとなる．したがって，コネクテッドモビリティ環境において支援すべきは，自律制御による自動運転車のみではなく，レベル3以下の運転者が主体の運転支援であるといえる．

4. 運転支援のためのコネクテッドモビリティ環境：Everything to Network(X2N)

4.1 現状のV2Xに関する課題と考察

これまでの携帯電話回線を前提としたV2Nは，DSRCなどを用いるITS専用通信に比べて通信容量は比較的大きいものの，オーバーヘッドが大きいため通信遅延や信頼性には技術的な課題があり，安全運転支援，特に自動運転などの制御を伴うシステムの多くには適さないとされていた．そのため，運転支援や自動運転システムの多くは遠隔監視以外の通信にはITS専用通信を前提としている．

しかし，ITS専用通信は日本，米国，欧州などで仕様が異なっており，各国毎のサービス検討と設計が必要となる．さらに，サービスの適用エリアや有効性は，車載器の普及率や路側機の敷設状況に大きく依存しており，各国の展開シナリオや情勢によってサービス実施の可否が影響を受ける．自動運転のインフラとして想定するには限定的とせざるを得ず，例え制御を伴わない注意喚起のようなサービスであっても，その導入は容易ではない．

ITS専用通信の状況に比べて，V2Nが前提とする携帯電話網はグローバルな統一基盤として期待することができ，多くの国においてサービスエリアの広さはITS専用通信のそれを凌駕している．また，その普及率と技術のコモディティ化により，自動車以外の歩行者，自転車，信号機や街灯などの道路付帯構造物なども容易に接続できるメリットは大きい．新規サービスの導入についても，QoS制御や移動透過性などの課題はあるが，オープンプラットフォームであるため専用通信に比べて容易である．

さらに，V2Nにまつわる前述の技術的課題は，5Gに代表される技術革新によって改善が見込まれている．これからのモビリティの協調支援に関しては，ITS専用通信に加えて，V2Nも有効に活用し，それぞれの強みを活かした整備が求められる．

さらに，V2Nにまつわる前述の技術的課題は，5Gに代表される技術革新によって改善が見込まれている．これからのモビリティの協調支援に関しては，ITS専用通信に加えて，V2Nも有効に活用し，それぞれの強みを活かした整備が求められる．

4.2 Everything to Network(X2N)コンセプト

本研究では，コネクテッドモビリティ環境として，従来の自動車を全てと接続する(V2X)から，全てのものをネットワークで接続する(Everything to Network:X2N)へと拡張することを提案する．協調型ITSによる自動運転では，自動車の周辺状況の補完はもちろん，歩行者や自転車，信号灯器などの自動車以外の情報も含めた総合的な判断による安全性の向上，効率化が必要となる．一方，自動車以外のモビリティにITS専用通信を搭載することは現実的でない．

X2Nにおいては，自動車を含む全ての移動体をモビリティとして定義し，モビリティとそれに付帯する機器の全ては携帯電話網などの広域通信で接続されていることを前提とする．既存のV2X環境とX2Nの概念を図1に示す．

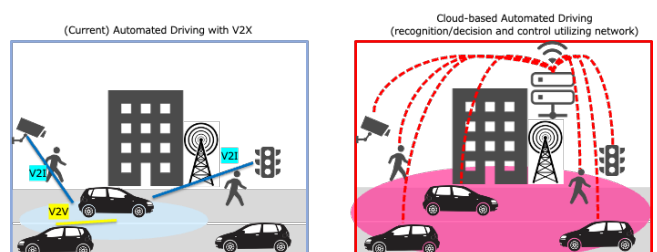


図1 X2Nによるコネクテッドモビリティ環境

X2N環境においては，モビリティに関する情報を全てネットワーク経由で集約・共有する．協調型ITSが対象とする自動運転車はもちろん，運転支援を受けている運転者の「認知・判断」能力を拡張する．また，必要に応じた調停やネゴシエーションをネットワーク上でおこない，指示をモビリティに伝えることで円滑で安全な交通を可能とする．

なお，X2NはV2V/V2Iを用いた従来のV2Xと共存・連携することを想定している．従来のV2V/V2Iを用いるシス

テムは、常に広域通信によるサービス支援や周辺状況の補完を受けられることで、自動車の制御を伴うユースケースなどでさらなる精度や信頼性の向上を図ることが出来る。

5. コンセプト実証のためのフィールドテスト

5.1 想定ユースケースの選定

X2N のコンセプトを実証するために、本研究では 5G 網を用いた実証フィールドを構築し、コンセプト実証(PoC)のためのフィールドテストをおこなった。まず、PoC に際しての想定ユースケースの選定について述べる。

X2N は原則的には、Lv3 以下の運転者が操作主体となっている状況、すなわち運転支援のためのコネクテッドモビリティ環境である。そこで、想定するユースケースを選定するにあたり、日本の協調型自動運転のユースケースを検討している SIP の分類[14]を参考とした。SIP では、想定する自動運転の 25 のユースケースを、3 つの要件、8 つの機能に分類している。SIP ユースケースの機能分類を以下に示す。なお、括弧内の数字はユースケースの数を示す。

1. 車載センサー検知外情報の入手が必要なユースケース
 - A) 合流・車線変更支援 (2)
 - B) 信号情報 (2)
 - C) 先読み情報：衝突回避 (4)
 - D) 先読み情報：走行計画変更 (5)
 - E) 先読み情報：緊急車両回避 (1)
2. 自車が保有する情報の提供が必要なユースケース
 - F) インフラによる情報収集・配信 (4)
3. 車車間および路車間の意思疎通が必要なユースケース
 - A) 合流・車線変更支援 (4)
 - G) 隊列・追従走行 (2)
 - H) 遠隔操作 (1)

まず一般道でのユースケースを検討対象とし、さらに Lv4 以上の自動運行装置による自動運転を対象とするものを除外し、運転支援においても有効なケースを抽出した。

さらに、本研究では X2N のコンセプト実証(PoC)のための実証として同時に実施可能なケースを集約し、SIP に無い道路付帯構造物との連携として歩行者向けのグラウンドライト連携のユースケースを追加した。その結果、以下に挙げる 5 つのユースケース(UC1-UC5)を選定した。なお、括弧内は SIP のユースケース分類との関連性を示す。

- UC 1：周辺移動体情報通知 (A, C, D, E)
各移動通信体へ自身の周囲の移動通信体の情報を共有することで警戒を促し運転の安全性を向上

- UC 2：道路上危険物通知 (C, D)
交差点内の障害物情報を交差点へと向かう各移動通信体へ共有することで運転の安全性を向上
- UC 3：車両交差点右折支援通知 (C)
車両右折時に対向車歩行者その他と情報を共有することで運転の安全性を向上
- UC 4：信号機制御 (B)
移動通信体が接近した場合に信号機を適切に制御することで交通の効率を向上
- UC 5：グラウンドライト動的変化 (B)
路面の標示としてグラウンドライトを動的に変化させることで歩行者へ情報を提供し安全性を向上

5.2 テストフィールドの構築

本研究では、「全ての機能がネットワークに接続されている (X2N)」を前提としたテストフィールドを構築した。フィールドは慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスとし、キャンパスの周回道路の内、前述の 5 つのユースケースへの適応と他交通への影響などを鑑み、全周の 1/4 となる約 220m と周辺路を実験エリアに設定した。

この実験エリア全体で 5G SA(Stand Alone)方式の通信を可能とするために、慶應義塾大学 SFC 研究所のデジタルツイン・キャンパスラボと連携して 5 階建研究棟の屋上にアンテナを設置した。BBU(Base Band Unit)や MEC(Multi-access Edge Computing)サーバなどの付帯設備は別棟に収容し、建物間の機器は大学構内の光ファイバ網で接続した。本テストフィールドのコアネットワークは、本フィールドから直線距離で約 40km 離れた地点に設置されているものを利用した。選定した実験エリア、および実験エリアに設置されたネットワーク機器の位置関係を図 3 に、屋上に設置したアンテナの様子を図 3 に示す。



図 2 実験エリアと機器の配置
(Map data ©2022 Google)



図3 屋上に設置したアンテナの様子

テストフィールドにおいて、PoCのために3台の自動車、1台のバイク、1台の自転車、および1人の歩行者の計6つのモビリティを用意した。また、X2Nによって接続される付帯設備として、信号灯器、障害物検知用のカメラ、および歩行者向けのLEDグラウンドライトを準備し、それらを5G端末によって接続する環境とした。テストベッドにおける機器構成のイメージを図4に、実験に利用した信号灯器を図5に示す。

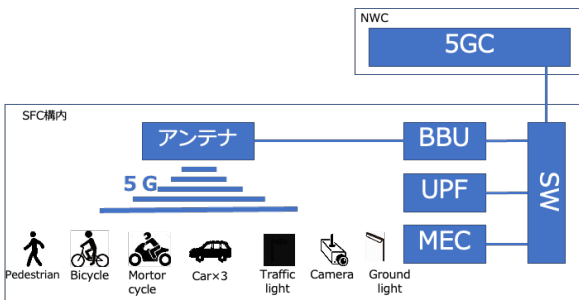


図4 実験エリアにおける機器構成



図5 実験に利用した信号灯器（エリア内に設置）

6. システム設計・実装

PoCのため、前述の5つのユースケースを同時に実施可能なリファレンスシステムの設計と実装をおこなった。

自動車などのモビリティや信号灯器などのデータ転送や共有には様々な方法が考えられるが、X2Nのコンセプトである1) 全てのモビリティおよび付帯物による情報連携が前提であること、2) 一定エリア内のモビリティに関してはleave/joinが頻繁におこなわれること、3) データサイズには様々なものがあること、という点に加えて将来的なサービス拡張性の観点から、Pub/Subモデルによるオープンな情報共有による設計を採用した。

具体的なプロトコルとしては、IoTを対象としたPub/Subモデルとして代表的なMQTT(Message Queuing Telemetry Transport)[15][16]を採用し、MECサーバにMQTT brokerを構築した。全てのノードとシステムは、TLS上でMQTT brokerを介して[17]情報の発信と受信をおこなう。システムの全体設計を図6に示す。

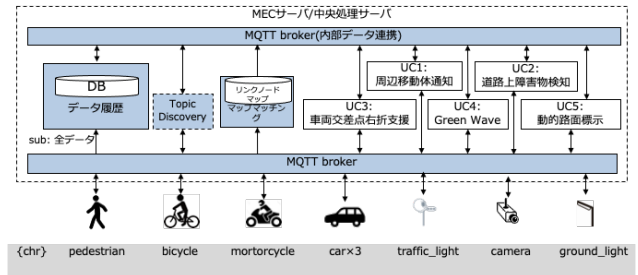


図6 システムの全体設計

設計に基づき、各ユースケースのシステム設計と、それらを満たすノードの機器構成の設計、および実装をおこなった。今回のPoCでは利用するGNSS受信機の性能から自動車のみ10Hz、他のモビリティについては1Hzの情報発信となるため、それに即したシステム設計と実装をおこなった。MECのMQTTではサービス毎のトピックが設定されており、各ノードは必要なトピックを購読することで必要なメッセージを受信することとなる。5つのユースケースの内、他のベースとなるUC1と、最も処理が複雑となるUC3のシステム設計をそれぞれ図7、図8に示す。

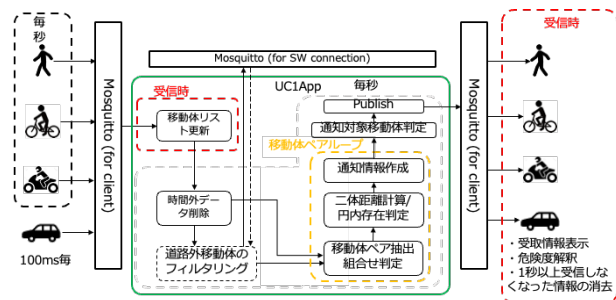


図7 個別システム設計（UC1：周辺移動体情報通知）

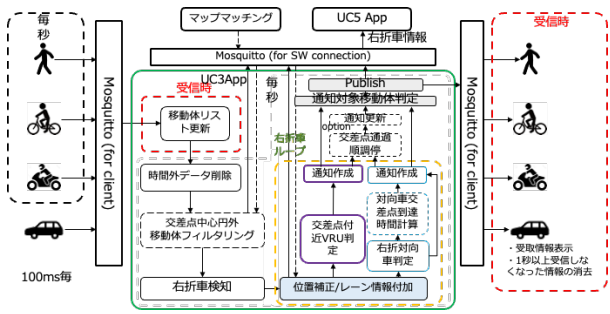


図 8 個別システム設計 (UC3: 車両交差点右折支援)

システムの実装は、システムの動作検証および有効性が確認できるように、自動車には車載ディスプレイを想定した複数の情報表示ディスプレイを搭載した。自動車の機器の設置状況を図 9 に、機器構成を図 10 に示す。また、バイクには HUD 型の情報表示ディスプレイを用意した。バイクの機器設置状況と構成を図 11 に示す。



図 9 自動車の機器設置状況

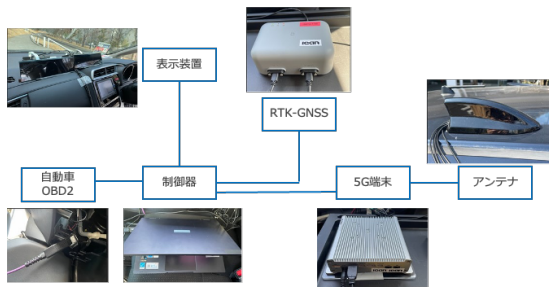


図 10 自動車の機器構成



図 11 バイクの機器設置状況と構成

歩行者、自転車には、一般的なスマートフォンの端末を準備し、それらの GPS の情報を 5G 端末を介して発信し、同時に MEC からの情報を購読する。

信号灯器とグラウンドライトには、Raspberry Pi を用い、それぞれの灯火を MEC からの指示に従って制御した。グラウンドライトの外観と機器構成を図 12 に示す。実験に用いた機器の構成を表 2 に示す。



図 12 グラウンドライトの外観と機器構成

表 2 実装に用いた主な機器の構成

	自動車	バイク	自転車	灯火制御
CPU	Intel Core-i7 1165G7	Intel Core-i3 10110Y	XPERIA 5 II / Pixel 6	Raspberry Pi 4
主記憶	16GB	4GB		
補助記憶	512GB SSD	256GB SSD		
OS	Ubuntu 20.04LTS	Ubuntu 20.04LTS		

7. 性能評価

7.1 フィールドの通信性能の評価

まず、PoC のために構築したテストフィールドにおける電波環境を評価した。計測には電測車両に GPS を搭載した 5G 端末を搭載し、他の通信端末がエリア内に存在しない状況での RSRP と、電測車内の PC から MEC までの RTT とスループットを、ping と iPerf コマンドを用いて測定した。

その結果、実験エリア内の RSRP は -70dbm から -100dbm 程度、MEC までの RTT は 15msec-40msec 程度であることが分かった。RTT の測定結果を図 13 に示す。



図 13 実験エリアの RTT 測定結果
(Map data ©2022 Google)

実験エリア内の移動端末から MEC までのスループットは TCP では UP/DOWN がそれぞれ 60Mbps/600Mbps 程度, UDP では UP/DOWN がそれぞれ 80Mbps/700Mbps 程度であることが分かった。スループットの測定結果を図 14 に示す。

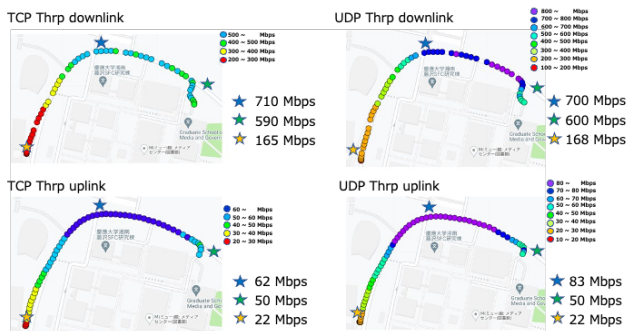


図 14 実験エリアのスループット測定結果 (Map data ©2022 Google)

7.2 ユースケースの性能評価(PoC)

次に、想定する 5 つのユースケースを同時動作させた際の性能について評価するための実証実験をおこなった。

実験に際しては、X2N のコンセプトである全てのノードの情報共有、およびそれに基づく判断・指示が含まれる以下のような想定シナリオを構築した。

- ① 移動体同士の接近 (UC1)
- ② 交差点への車両接近 : Green wave (UC4)
- ③ 交差点内の危険物落下・検出 (UC2)
- ④ 交差点内の車両右折 (UC3)
- ⑤ 歩行者通行後、車両右折完了 (UC5)

シナリオスタート時のモビリティの位置、およびノード機器の配置を図 15 に示す。

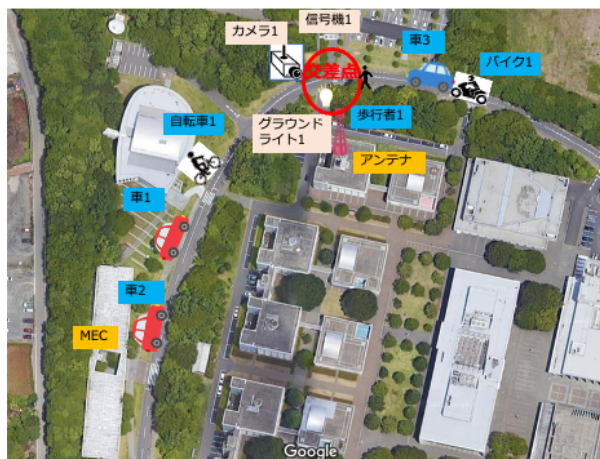


図 15 シナリオに基づく初期配置の様子 (Map data ©2022 Google)

初期配置から、全てのモビリティがあらかじめ想定した移動を実施していくことで、上記シナリオに基づく以下のフェーズが発生する。

- 1) モビリティ同士の間での接近通知 (UC1)
- 2) 車 1, 車 2 への信号灯火の通知、および車両接近に伴う青灯火延長 : Green wave(UC4)
- 3) 車 1 が交差点通行後に障害物を交差点内に設置。カメラによって危険物の検出が行われ、車 2, 車 3, バイク 1 へ交差点内危険物通知 (UC2)
- 4) 車 2 が交差点で右折シグナルを発信。MEC は直進する車 3, バイク 1 からの情報と統合し、車 2 には 2 台の直進車接近通知、車 3, バイク 1 には右折車両通知 (UC3)
- 5) 車 2 の右折シグナルを受け、グラウンドライトが歩行者向けに注意喚起の点滅を実施。その後、車 2 が右折完了後、通常灯火に戻る (UC5)

このシナリオに基づき、実証エリアにおいて実証実験をおこなった。実証実験の様子を図 16, および図 17 に示す。



図 16 実証実験の様子

(フェーズ 3 : 手前停止車両が車 2, 交差点内が車 3)



図 17 実証実験の様子

(フェーズ 4, 車 2 が右折待ちをする交差点にて、直進する車 3 の後方からバイク 1 が接近)

シナリオに沿って各ノードから発信されるデータのメッセージサイズとトラフィック量を表3に示す。なお、UC2の危険物検知については、画質を優先するモード(4K)と検出速度を優先するモード(FHD)の2種で実験をおこなったため併記する。実験エリアに配置した全てのノードからアップロードされるデータ量の合計は、UC2を4Kモードで動作させた場合、約22Mbpsであった。

表3 メッセージサイズとトラフィック量(Uplink)

	自動車	歩行者/ バイク/ 自転車	クラウド ライト	信号 灯火	カメラ (4K/FHD)
Bytes	286	246	99	2012	2.6M/441K
Hz	10	1	1	1	1/4
bps	22.9K	2.1K	792	16.1K	21.1M/13.5M

ダウンリンクについては、MECから局面毎に情報伝達が行われるためにフェーズ毎に異なるが、今回の実証においてはMECからのデータ総量は1.4Mbps程度であった。

次に、シナリオに基づく通信遅延についての評価について述べる。X2NのPoCとして遅延を評価する場合には、“各ノードから発信されたメッセージに基づき生成されたメッセージが対象とするノードに届くまで”をEnd-Endの遅延(E2E Latency)と定義した。本評価におけるE2E Latencyの考え方と計測区間を図18に示す。

今回実装したシステムに関する設計上のE2E Latencyの値を表4に示す。E2E LatencyはMECがユースケース毎の情報生成を行う頻度に依存することとなる。歩行者や自転車への情報提供を想定するユースケースについては②の待受を長く設定したため、他のケースよりも大きな所要時間が発生することとなる。

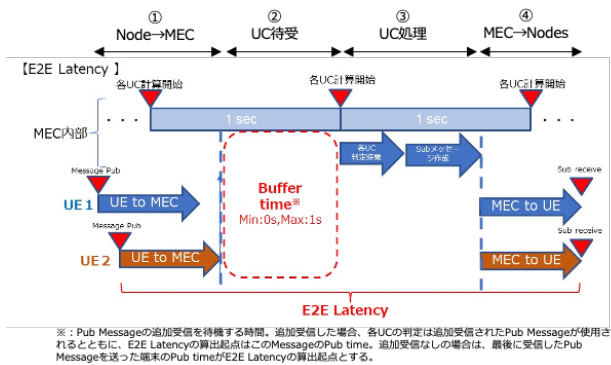


図18 本PoCにおけるE2E Latencyの考え方

表4 E2E Latencyの理論値(Ave/Max)

	区間毎所要時間(msec)				所要時間 (msec)
	①	②	③	④	
UC1(V2V)	15/20	50/100	35/187	15/20	115/327
UC1(P2P)*	15/20	500/1000	35/187	15/20	565/1227
UC2(4K)	15/20	50/100	170/373	15/20	250/513
UC2(FHD)	15/20	50/100	32/249	15/20	112/389
UC3	15/20	50/100	10/100	15/20	90/240
UC4	15/20	50/100	150/203	15/20	230/343
UC5	75/220**	500/1000	3/3	15/20	593/1240

*P2P: 歩行者-自転車など、自動車を含まないケース

** UC5はUC3からのメッセージを受けて発生するため

次に、各ユースケースにおける許容通信遅延の想定について述べる。実環境においてサービスが有効であることを示すためには、それぞれのユースケースにおいて許容される実時間においてサービスが発動することが必要となる。今回は自動車とバイクの走行速度を時速25km、自転車の速度を時速12km、歩行者の速度を時速4kmと仮定し、乾燥したアスファルト路面における運転支援によって注意喚起を促す想定(舗装路の摩擦係数を0.7秒、空想時間を0.75秒と想定)で許容遅延を試算した。

まず、モビリティの相対速度が高くなるUC1についての試算の結果を図19に示す。本PoCにおいて、UC1では相対距離30mの時点でMECによる判断がなされるとしたため、最も厳しいケースで400msecが許容遅延の限界となる。

各UC	各UC	許容E2E Latency
実行開始距離X	通知完了必須距離Y	
UC1 (Car-Car/Bike)	30 m	24.48 m (車速手動制御想定、相対速度50km/h)
UC1 (Car-Ped)	30 m	13.5 m (車速手動制御想定、相対速度29km/h)
UC1 (Car-Bicycle)	30 m	9 m (車速手動制御想定、相対速度25km/h、 特にBicycleがレーン外れた場合など)
UC1 (Bicycle-Ped)	30 m	5 m (車速手動制御想定、相対速度16km/h)
UC1 (Bicycle-Bike)	30 m	15 m (車速手動制御想定、相対速度37km/h)

図19 許容E2E Latency(UC1)

次に、UC2からUC5までの試算の結果を図20に示す。UC2については見通し外の時点で注意喚起がなされることが理想であるため、実行開始距離を60mとし、交差点侵入前30mまでにMECによる判断がなされると想定した。UC4については、信号灯火の変更には多方向との調整が必要であるためその最小時間を6秒と仮定し、交差点進入前までに灯火変更が行われると想定した。結果、UC2からUC5については1secが許容遅延の限界となる。

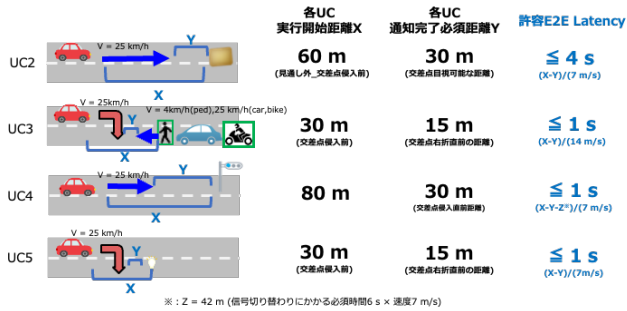


図 20 許容 E2E Latency(UC2 から UC5)

これらの想定値に対して、実際の実験エリアにて測定した値との比較評価をおこなった。実験による計測値は、実走行においてシナリオ通りに走行できた3回分のデータを集約したものを利用している。なお、全実験データにおいて歩行者が受信すべきメッセージの1つにおいて、MQTT Broker から BBU の区間において他と大きく異なる遅延が計測されたため、それを外れ値とした場合の結果となることに留意して頂きたい。

UC1 の実測値を表 5 に示す。歩行者-自転車間で遅延が大きくなるケースが見られたが、平均値、最大値共に許容遅延内に収まる結果となった。

表 5 UC1 接近通知の PoC 実測値 (Ave/Ma, 単位 msec)

	UC1					
	車 1	車 2	車 3	自転車	歩行者	バイク
車 1	-	-	123/161	110/169	118/149	112/145
車 2	-	-	124/243	113/243	115/151	114/243
車 3	20/79	76/195	-	137/179	135/197	-
自転車	162/303	210/292	223/320	-	492/683	402/603
歩行者	149/199	200/340	272/380	491/745	-	616/945
バイク	125/203	141/144	-	320/540	339/540	-

*理論値を超えたものを赤字で記載

次に、UC2 の実測値を表 6 に示す。今回の実験環境下においては許容遅延内に収まる結果となった。

表 6 UC2 障害物通知の PoC 実測値 (Ave/Ma, 単位 msec)

	UC2 (カメラ画質)	
	4K	FHD
車 2	130/645	304/369

*理論値を超えたものを赤字で記載

ついで、UC3 の実測値を表 7 に示す。今回の実験環境下においては許容遅延内に収まる結果となった。

表 7 UC3 右折支援の PoC 実測値 (Ave/Ma, 単位 msec)

	UC3
	車 2
車 3	38/71
歩行者	209/299
バイク	149/205

*理論値を超えたものを赤字で記載

さらに、UC4 の実測値を表 8 に示す。今回の実験環境下においては許容遅延内に収まる結果となった。

表 8 UC4 Green wave の PoC 実測値 (Ave/Ma, 単位 msec)

	UC4
	車 1
信号機	292/392

*理論値を超えたものを赤字で記載

最後に、UC5 の実測値を表 9 に示す。今回の実験環境下においては許容遅延内に収まる結果となった。

表 9 UC5 歩行者注意喚起 (グラウンドライト) の PoC 実測値 (Ave/Ma, 単位 msec)

	UC5
	車 2
グラウンドライト	534/732

7.3 考察

実験エリアにおける PoC 実証においては、5つのユースケース全てを同時に稼働させた状況において、全てのサービスの E2E Latency が遅延許容時間内に収まる事が確認できた。

アップリンクについての評価は、UC2 の障害物検知を 4K 画像でおこなう条件下においても通信環境としては十分な品質を示すことが出来たが、検出頻度を高める必要がある場合にはパラメータの調整が求められる。

ダウンリンクについての評価は、今回の実験で利用したデータ量は十分ではない。エリア内におけるモビリティ台数の増加に伴う処理遅延や輻輳などの影響などの規模性を評価するには、より多数の自動車による実証実験か、あるいは今回の実験データに基づくシミュレーションなどを実施する必要がある。

また、実測データにおいて1件とはいえ MQTT Broker から BBU の区間において他と大きく異なる遅延が計測されたことは無視できない。実環境における運転支援には高い信頼性が求められる。X2N においては、対象とする自動車は自律による運転支援システムが導入されていることが前

提ではあるが、MECによる判断や指示による円滑な交通や安全性のさらなる向上を実現するためには、実験エリアにおいて多数のデータを収集してシステムの動作検証や分析をおこない、信頼性やエラー発生率の追求をすることが不可欠である。併せて、データ転送手法としての Pub/Sub 方式の妥当性や、MQTT 以外のプロトコルの導入についても検討の余地がある。

X2N の実用化を論ずるためには、本評価結果とテストフィールドを基にしたより詳細な実験とデータ分析が不可欠といえる。

8. おわりに

ITS において注目を集めている自動運転分野では、自動車単体での自律支援に加え、V2V、V2I による協調支援、すなわち協調型 ITS が重要であり、近年では主に携帯電話による V2N を加えた V2X の複合的な連携による自動運転支援の必要性が高まっている。

従来の V2N は、通信速度や遅延、信頼性などに技術的課題があるとされており、自動運転システムの多くは、V2V、V2I の専用通信(ITS 通信)を前提として検討がなされている。しかし、ITS 通信は国毎に異なる仕様、普及率や路側機敷設状況にサービス環境が依存してしまい、自動運転の実用化に際して前提とし難い側面がある。一方、携帯電話を主とした V2N はグローバルに利用可能であり、サービスエリアの広さに加えて、5G 等によって技術的課題の改善が見込まれている。

そこで本研究では、「自動車のための(V2X)」ではなく「全ての機能がネットワークに接続されている (Everything to Network:X2N)」前提としたモビリティ支援通信基盤というコンセプトを提案し、X2N における運転支援の高度化について検討をおこなった。また、そのコンセプト実証のため 5G SA 構成のテストフィールドを構築すると共に、X2N 環境下で想定される 5 つのユースケースを選定した。テストフィールドにおいて実証実験を実施し、ネットワーク環境と各ユースケースの性能評価をおこない、コンセプト実証についての考察を行うと共に、実環境における運転支援の高度化に必要な課題と今後の展望を示した。

謝辞

本論文の執筆に際してご支援頂いた WIDE プロジェクトの皆様、並びに中村修研究会インターネット自動車研究グループの皆様へ感謝します。また、テストフィールドの構築に際してご協力とご支援を賜った慶応大学 SFC 研究所 デジタルツイン・キャンパス・ラボの各位に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Xie, L. Trassoudaine, J. Alizon, M. Thonnat, J. Gallice : Active and intelligent sensing of road obstacles: Application to the European Eureka- PROMETHEUS project, Proc. of Fourth International Conference on Computer Vision, pp.616-623, May 1993
- [2] C. Rodier, R. S. Finson, J. Lidicker, S. A. Shaheen : An Evaluation of the Consequences and Effectiveness of Using Highway Changeable Message Signs for Safety Campaigns, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2010-3, March 2010
- [3] J.B. Kenny : Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States, Proceedings of the IEEE 99(7), pp.1162-1182, June 2011
- [4] ETSI, ETSI EN302 663 V1.3.1, Intelligent Transport Systems (ITS);ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band, January 2020
- [5] ETSI, ETSI EN 302 637-2 V1.3.1, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, April 2019
- [6] ETSI, ETSI EN 302 637-3 V1.2.2, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, November 2014
- [7] 岩武宏一, 鈴木一史, 松田奈緒子, 牧野浩志, "ITS スポットサービス概要及びモニタ調査結果の有効性検証", 第 12 回 ITS シンポジウム, December 2014
- [8] ITS コネクト推進協議会, <https://www.itsconnect-pc.org/> (参照 2022-5-23)
- [9] 砂原秀樹, 佐藤雅明, 植原啓介, 青木邦友, 村井純, "IPCar: インターネットを利用した自動車プローブ情報システムの構築", 電子情報通信学会 B 論文誌 Vol.J85-B No.4, pp.431-437, April 2002
- [10] 佐藤 雅明, 村井 純, "スマートフォンを活用したプローブ情報システムの構築", 自動車技術, Vol. 68 No.2, pp.69-76, February, 2014
- [11] 国都交通省, ASV 進計画関連資料 "自動運転車両の呼称", <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/documents.html> (参照 2022-5-23)
- [12] 加藤晋, "ラストマイル移動サービスを社会実装するための自動運転と実証評価", サービスソロジー Vol. 6 No.3, pp.22-28 October 2019
- [13] 国立研究開発法人産業技術総合研究所, ニュースリリース"無人自動運転移動サービスが永平寺町で本格運用を開始", https://www.aist.go.jp/aist_j/news/au20210323.html (参照 2022-5-23)
- [14] SIP 自動運転(システムとサービスの拡張) システム実用化 WG 協調型自動運転通信方式検討 TF, "SIP 協調型自動運転ユースケース -2019 年度協調型自動運転通信方式検討 TF 活動報告- (第 1 版)", September 2020
- [15] D. Soni, A. Makwana, "A SURVEY ON MQTT: A PROTOCOL OF INTERNET OF THINGS(IOT)", 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), May 2017
- [16] A. Hugo, B. Morin, K. Svantorp, "Bridging MQTT and Kafka to support C-ITS: a feasibility study", 2020 21st IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), August 2020
- [17] M. Singh, MA. Rajan, VL. Shivraj, P. Balamuralidhar, "Secure MQTT for Internet of Things (IoT)", 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, April 2015