

協調型自動運転のためのネットワーク状態分析・可視化

神原 滉一[†] EhsanJavanmardi[†] 中里 仁[†] 山田 峻也^{††} 高田 広章^{††}

渡辺 陽介^{††} 佐藤 健哉^{†††} 塚田 学[†]

[†] 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

^{††} 名古屋大学大学院 情報学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

^{†††} 同志社大学 〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3

E-mail: [†]kambara@hongo.wide.ad.jp, [†]{ejavanmardi,jin-nakazato}@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ^{††}{s_yamada,hiro}@ertl.jp,
^{†††}watanabe@coi.nagoya-u.ac.jp, ^{††}ksato@mail.doshisya.ac.jp, [†]tsukada@hongo.wide.ad.jp

あらまし 近年、協調型の自動運転が交通安全や交通流の効率化につながるとして注目されている。協調型自動運転とは、自動運転車が周囲の車両や道路に設置した路側機と通信を行い、自車の車載センサでは認識できなかった情報やタスクを共有するシステムのことである。協調型自動運転の重要な要件の一つは、すべての車両が適切なタイミングで適切なメッセージを受信することであり、そのためには、一定以上の通信性能の担保が必要である。事前に通信性能を把握しておくことによって、自動運転車が適切な認知方法の選択や、経路計画を行うことができる。そこで、本研究では、協調型自動運転のための地理的特性を考慮した通信性能分析、可視化システムを提案する。このシステムでは、車両が一度通過した場所の通信性能を分析、可視化し、クラウドに保存することによって、次に同じ場所を通過する車が、事前に通信性能を参照し、移動ルート決定ができるようになる。本提案システムを自動運転のためのオープンソースソフトウェアである Autoware とダイナミックマッププラットフォームである DM2.0PF を用いて実装し、東京大学柏キャンパステストコースにて、アウトドア実験、評価を行った結果を報告する。

キーワード 協調型 ITS, ダイナミックマップ, ネットワーク分析, 可視化

Network Performance Analysis and Visualization for Cooperative Automated Driving

Koichi KAMBARA[†], Ehsan JAVANMARDI[†], Jin NAKAZATO[†], Syunya YAMADA^{††}, Hiroaki

TAKADA^{††}, Yousuke WATANABE^{†††}, Kenya SATO^{†††}, and Manabu TSUKADA[†]

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

^{††} Graduate School of Informatics, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

^{†††} Doshisya University 1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto-fu, 610-0321 Japan

E-mail: [†]kambara@hongo.wide.ad.jp, [†]{ejavanmardi,jin-nakazato}@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ^{††}{s_yamada,hiro}@ertl.jp,
^{†††}watanabe@coi.nagoya-u.ac.jp, ^{††}ksato@mail.doshisya.ac.jp, [†]tsukada@hongo.wide.ad.jp

Abstract In recent years, cooperative automated driving has been attracting attention to improve traffic safety and streamline traffic flow. Cooperative automated driving is a system in which an automated vehicle communicates with surrounding vehicles and roadside units installed on the road to share information and tasks that the vehicle's onboard sensors cannot recognize. One of the critical requirements for cooperative automated driving is that all vehicles receive appropriate messages at appropriate times. For this purpose, measurement and visualization of network performance are essential. Knowing the communication performance in advance allows an automated vehicle to select appropriate cognitive methods and plan its route. Therefore, we propose a communication performance analysis and visualization system that considers geographical characteristics for cooperative automated driving. The system stores the communication performance of a location once passed by a vehicle in the cloud so that the next vehicle that passes by the same location can see the communication performance in advance.

Key words Cooperative ITS, Dynamic Map, Network Analyzer and Visualizer

1.. はじめに

自動車は私達の日常生活において移動手段や輸送手段として、欠かせないものとなっている。平日における交通手段のうち、自動車を利用する人の割合が三大都市圏の場合、約32%で、地方都市圏の場合約61%に達する[1]。一方で、自動車にはいくつか問題もあり、その一つが交通事故である。警察庁交通局のデータによると、令和3年中に発生した交通事故（人身事故）件数は305196件で、2636人の人が亡くなっている[2]。そのような背景から、運転操作からの解放や交通事故の防止、燃費向上のための近接距離での隊列走行といった安全・安心・快適・環境対策を目的として、自動運転技術に対する関心が高まっている[3]。例えば、千葉県柏市柏の葉地区では柏ITS推進協議会の主導のもと2019年11月1日から、柏の葉キャンパス駅から東京大学柏キャンパスの間で自動運転バスの長期営業運行実証実験が行われている[4]。本実証実験では、レベル2の自動運転が実現されており、走行領域は限定的で、運転手も人であるが、部分的な運転自動化が行われている。また、HondaのSENSING Eliteが搭載されたLEGENDは、レベル3の自動運転であり、高速道路や渋滞時などの一定の条件下において、システムがドライバーに代わり、運転操作を行うことができる[5]。

上記で説明した自動運転の事例は、自車両に搭載されたセンサ情報のみを使用する自律型の自動運転である。自律型の自動運転では、交差点などの死角に存在する車両や歩行者を認知することができないという問題点が存在する。現状だと、自律型の自動運転で、死角から車両や歩行者が飛び出してくる可能性のある場所では、一時停止するのが一般的となっている。これに対して、協調型の自動運転では、周囲の車両や、道路上に設置された路側機と自車両が通信を行う。リアルタイムでCAM (Cooperative Awareness Message) [6]やCPM (Cooperative Perception Message) [7],[8]のような、自車両の位置や認識した物体の情報を共有するため、自車のセンサでは得られない情報を得ることができる。

2015年9月に発売されたトヨタのITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) Connectは、ITS周波数向け760MHz帯を利用した車両と車両、車両と道路をつなぐ無線システムである[9]。既に市販車として一般向けに発売されており、緊急車両の存在を通知したり、対応交差点で赤信号の注意喚起、信号待ち時間の目安表示、右折時の対抗車両や歩行者の存在の検知による注意喚起を行うことができる。

移動体である自動運転車両の通信状況は、通信先との距離やネットワークの干渉、混雑等により常に変動しており、協調認知、遠隔運転のために十分な通信性能を維持できないことがある。通信性能が低いと、パケットロスによって、死角の先の情報が得られないことや、遠隔運転での遅延によって操作が間に合わないなど、危険が存在する。事前に通信性能を把握することによって、通信性能の悪い場所を通らない経路計画や、通信性能が悪いため、協調型の自動運転ではなく、自律型の自動運転に切り替えることで安全を確保することができるようになる。協調型の自動運転のためだけではなく、自動運転車の通信

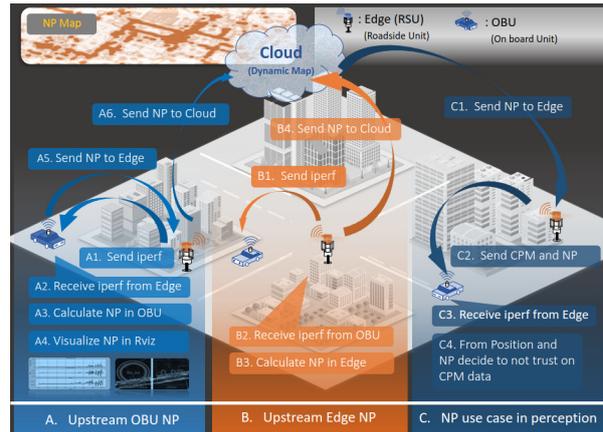


図1 提案システム概要

性能は非常に重要な要素となっている。例えば、自動運転車の緊急時対応手段として、遠隔運転による、操作支援が期待されている[10]。遠隔地の人間の知能と局所的な自律制御の組み合わせにより、安全で効率的なモビリティの開発を加速させることが可能である。一方で、遠隔支援を期待通りに動作させるためには、通信性能や通信密度等を含むODD (Operational Design Domain) を適切に設定することが重要である。

そこで本研究では、自動運転のための通信性能の分析と可視化を行うことで、1.1節で述べた課題を解決し、協調型自動運転車や遠隔運転者の走行を支援することである。そのために、地理的特性を考慮した通信性能の分析、可視化を行うシステムを提案(図1参照)し、自動運転用のオープンソースソフトウェアであるAutoware [11]を使用して実装した。実装したシステムを、東京大学柏キャンパステストコースにて、車両を走らせながら、通信性能を測定し、評価を行った。

本論文の構成は次のようになっている。2章では関連研究を述べたのち現状の課題を明らかにする。3章では、課題を解決するためのシステムアーキテクチャ及び実装方法について述べる。4章では、実験した結果とその評価について述べる。5章では、本研究の結論を述べる。

2.. 関連研究と現状の課題

自動運転車の緊急時対応手段として、遠隔地にいるオペレーターが車両を操作する遠隔運転機能が期待されている[10]。遠隔運転の操作性の低下要因は数多く存在し、中でも遅延時間は遠隔運転の操作性に大きな影響を与える要因として挙げられる[12]。特に、遅延時間が700ms以上のとき、遠隔運転の操作性が大きく損なわれることが明らかとなっており[13]、170ms以下のとき、遅延時間が遠隔操作の操作性に与える影響が小さいことが示されている[14]。文献[15]では、遠隔操作卓と遠隔運転車を無線ネットワークで接続し、通信遅延を可視化し、遅延の可視化機能によって遠隔運転の操作性が向上することを示した。

一方で、V2X通信のフィールド実験を行った研究では通信性能の分析にpingやiperfなどのツールを採用している場合も

ある [16],[17]. しかし, ping や iperf などのツールにはフィールドの地理的特性を反映していない, V2X 通信で使われるプロトコルの特性を反映していないなどの問題がある. そこで, 地理的特性を考慮した V2X 通信分析ツールとして AnaVANET (Analyzer for Vehicular Ad-hoc Networks) [18] がある. このシステムは V2X の通信プロトコルである GeoNetworking の解析を可能としており, GPS ログと TCP DUMP ログを入力として gnuplot によるグラフ化や Google マップによる可視化をしている. GeoNetworking とは, 送信元車両から宛先の車両に情報を送信する際に, 直接は通信できない場所にいるときでも, 他の車両を中継してマルチホップすることで, 宛先まで情報を届ける通信方式である. AnaVANET は GeoNetworking に対応しているが, データをすべて収集した後に, テストデータの処理を行うという性質上, iperf や ping に存在していたリアルタイム性という利点を失っている.

AnaVANET ではリアルタイム性が失われていたが, V2X 協調型運転システムにおける通信性能のリアルタイム可視化ツール [19] ではリアルタイム性を残しつつ, フィールドの地理的特性を反映した通信性能可視化をすることができる. このツールでは, 送信パケット数を動的に変更しているため, パケットロスを算出するためには両者の接続が必要となっており, 接続が切れている場所ではネットワークの分析, 可視化ができない. また, 1 秒間の通信性能を測定して, 各地点にプロットをしているという性質上, プロット間の通信性能がわからないという問題がある.

3. システムアーキテクチャ

本章では, 2 章で述べた課題を解決するためのシステムのアーキテクチャを説明する. まず, 3.1 節でシステムの要求事項をあげ, 次に 3.2 節で提案したシステムアーキテクチャの実装について説明する.

3.1 要求事項および本研究の設計方針

協調型自動運転車の通信性能 (NP: Network Performance) を分析, 可視化する上での要求事項と要求に対する設計方針を以下に示す.

3.1.1 協調型自動運転のための NP 分析と可視化

ping や iperf では, 対応できない, 協調型自動運転に特化した NP 分析, 可視化システムを作成する. 具体的には, 遮蔽物や斜面などの地理的特性を反映する. NP を計測する際に, 常に車両の位置情報と紐づけて保存する. これによって, どの地点でどの程度通信ができるのかのデータが取得できるため, 地理的特性を考慮した NP 分析, 可視化が可能となる.

また, 協調型自動運転の NP 分析, 可視化のためには V2X の通信プロトコルである, GeoNetworking によるマルチホップ対応が不可欠である. マルチホップに対応させるため, 通信経路とその経路ごとの NP 分析, 可視化を行うことができるように設計をする. 具体的には, 流れてくるパケットをパケットキャプチャでキャプチャすることによって, それぞれの経路間の NP を計測する. 例えば, 送信元の車両 A が中継車両 B, C を経由して, 宛先車両 D へと GeoNetworking でマルチホップして通信

した場合, AB, BC, CD 間の NP を計測することができる.

一般的に, Autoware を用いた自動運転の実験では, 実験時に rosbag ファイルを保存しておき, 実験後に rosbag ファイルを再生することによって, いつでも実験時の状況を再現することが可能となる. NP 分析した結果も ROS メッセージとして, バブリッシュすることによって, rosbag ファイルに保存することができるようになり, NP に関するデータも実験後に再現できる. また, ROS メッセージとしてバブリッシュすることによって, Autoware の標準可視化ツールである RViz 上に通信性能を可視化することができる.

3.1.2 汎用性

NP 分析, 可視化のシステムを作成するにあたって, 汎用的に利用できるように設計する. 限られた場所やシナリオだけでなく, どんな場所, どんなシナリオでも動作するシステムを作成する. V2X 協調型運転システムにおける通信性能のリアルタイム可視化ツールでは, RSU と車両間の両者の接続が切れた場合, 通信性能の可視化ができなかった. 本システムでは, 接続が切れた場合や, パケットロスが 100% の場合でも, 持続的に分析, 可視化可能なものとする. 通信性能を分析する際に, 接続が切れても, 送信側でパケットを流し続けるようにする. また, 受信側で, 接続が切れていても, パケットが 1 つも届かなかったとみなすようにする.

NP 分析, 可視化システムの使用用途として, 実験後の NP 分析だけでなく, 実験中にも, NP が確認できるように, リアルタイムで動作するシステムとする. リアルタイムで, パケットロスを計算するためには, 送信パケット数と受信パケット数を把握することが必要である. しかし, 送信パケットが動的に変化する場合, 受信側で送信パケット数を把握することが難しい. そこで, パケットロスをリアルタイムで計測するため, 送信側で送信する単位時間あたりのパケット数を固定する.

また, NP の分析, 可視化は双方向に行うものとする. RSU から車両への NP だけでなく, 同時に車両から RSU の NP も分析, 共有する. RSU, 車両の両方で, NP 分析用の ROS ノードを作成する.

3.1.3 クラウドでの NP マップの管理, 共有

分析した NP を他車両に共有することによって, 次に同じ場所を通る車両が NP を事前に参照できるようにする. 自動運転車は走行中に, NP を分析しながら, ダイナミックマップと付随して, その位置でどの程度通信できるのかをクラウドへアップロードする. クラウドで, NP の情報を集約, 管理することで, NP マップ (位置情報と合わせて, NP の情報を集約した地図データ) を生成する. これによって, 作成した NP マップを自動運転車はいつでもクラウドから参照することができる. NP マップの生成と共有に関する部分が本研究の新規性である.

3.2 実装

提案したシステムでは, 車両で計測した RSU から車両への NP を RSU やクラウドへ送信し, 情報を共有する. また, 他車両で計測した NP をクラウド, RSU を通して, 車両で受信する設計となっている. そこで, 本実験では, 車両と RSU での情報共有, クラウドでのデータ収集のために DM2.0PF を使用する.

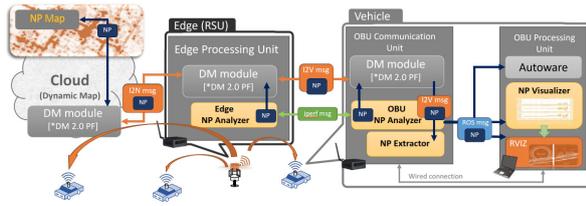


図2 提案システムと DM2.0PF の統合

得られた情報（本研究では NP）を車両の DM2.0PF に保存することで、付近の RSU、クラウドへと通信され、情報共有される。また、必要に応じて、車両側で RSU、クラウドの持つデータを参照することができる。

提案したシステムは 3.1 節で説明した要求事項を満たすため、ROS ベースで構築する。ROS では、出力のフォーマットとして ROS メッセージが一般的に使用されているが、DM2.0PF で扱うデータはストリームデータとなっている。そのため、提案したシステムと DM2.0PF を統合するためには、ROS メッセージをストリームデータに、あるいはストリームデータを ROS メッセージに変換する機能が必要になる。

実際に実装したシステムの構成図を図 2 に示す。灰色で示された部分が、既存のシステムを利用した部分で、色がついている部分が提案システムである。システムの動作中は車両と RSU の間で常時 iperf でパケットを流し続ける。車両、RSU の両方で NP Analyzer によって NP を計測し、ストリームデータに変換することで、DM2.0PF のデータベースにアップロードする。アップロードされた情報は、クラウド、エッジ、車両に DM2.0PF の通信機能によって共有される。車両側で他車両や RSU から、DM2.0PF を介して共有されたデータを参照する場合は、NP Extractor によって、DM2.0PF 内を流れるストリームデータを ROS メッセージに変更することで車両内の Autaware で扱うことができるようになる。車両では、自動運転用の処理端末と通信用の端末に分けている。自動運転用の処理端末では、GPU を搭載し、Autaware の処理や NP の可視化を行う。通信用の端末では、NP の計測や、DM2.0PF による RSU、Cloud との通信を行う。2 台の端末は有線接続することによって ROS メッセージが共有されている。実験時は 2 台とも車載器として扱う。

より具体的な ROS ノードとメッセージの流れを図 3 に示す。オレンジ色で示したものが本研究で実装した ROS ノードである。車両の NP Analyzer では、双方向に iperf を送受信し、受信側で NP の計測、分析を行う。分析した NP をパブリッシュするために、NP をやり取りするための独自の ROS メッセージ NetworkPerformanceMsg を表 1 のように定義する。定義した、NetworkPerformanceMsg を利用して、トピック/network_performance/local に NP の情報と車両の位置情報を 1 秒に 1 度パブリッシュする。車両の現在位置は Autaware がパブリッシュしている ROS トピック/tf から取得する。tf は、Autaware で Sensing して得たデータから自己位置推定を行った結果のデータであり、タイムスタンプ、車両の座標、向きなどの情報が含ま

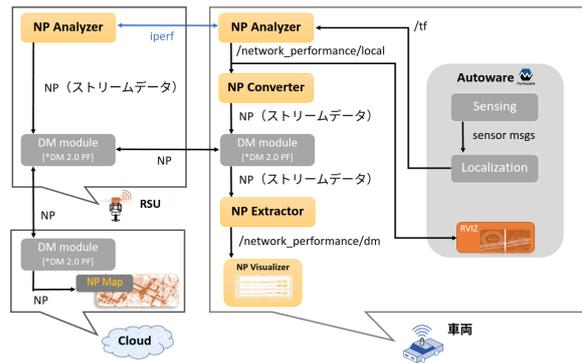


図3 提案システムの ROS ノードとメッセージの流れ

表 1 NetworkPerformanceMsg の定義

データ型	変数名	用途
string	id	MAC アドレス
string	src	パケットの送信 IP
string	dst	パケットの受信 IP
float32	x	位置座標 x
float32	y	位置座標 y
float32	z	位置座標 z
float32	packetloss	パケットロス
float32	bandwidth	帯域幅
float32	jitter	ジッター

れている。パブリッシュした/network_performance/local は RViz でサブスクライブされて、可視化を行う。また、ROS ノードである NP Converter で、サブスクライブし、ROS メッセージからストリームデータに変換して、DM2.0PF にアップロードする。このとき、DM2.0PF で、NP が扱えるように表 1 と同様にストリームデータの定義を行う。DM2.0PF にアップロードしたデータは、RSU、クラウドへと共有され、NP マップが生成される。同様に、クラウドや RSU が持つデータが車両に共有され、共有されたデータは NP Extractor で、ストリームデータから ROS メッセージに変換して、トピック/network_performance/dm にパブリッシュする。パブリッシュした/network_performance/dm を NP Visualizer でサブスクライブし、グラフで可視化する。

4. 実験と評価

4.1 実験概要

本研究では、NP 分析と可視化の評価のため、RSU と車両間の通信実験を行う。通信方式は、IEEE802.11g [20] の AP モードで、RSU を AP とした。また、2.4GHz のチャンネル 1 (2401MHz-2423MHz) を使用した。実際に、使用した機材のスペック、ソフトウェアのバージョンを表 2, 3 に示す。車載器として、自動運転用の GPUPC と、NP 分析のための NUC の 2 台を使用し、RSU では、NP 分析のための NUC を 1 台のみ使用する。屋外にて、RSU を設置して、車載器を載せた車両を動かすことによって、位置情報を考慮した可視化を行う。東京大学柏キャンパステストコースで、取得した位置情報とその場所の NP を補間し、可視化する。取得した NP のデータから、補間精

表2 車載器のスペックとソフトウェアのバージョン

項目	車載器	
PC	G-Tune H5	Intel NUC11PAHi5
CPU	Core i7-10875H 2.30GHz 16core	Core i5-1135G7 4.20 GHz 4core
GPU	NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER	-
RAM	64GB	64GB
アンテナ	-	TP-Link Archer T3U Plus
OS	Ubuntu20.04	Ubuntu18.04
NVIDIA Driver	510.108.03	-
CUDA	11.6	-
Autoware	Autoware.universe 最新バージョン (2023年1月13日時点)	-
ROS	galactic	dashing
wireshark	-	2.6.10
iperf	-	2.0.20

表3 RSUのスペックとソフトウェアのバージョン

項目	RSU
PC	Intel NUC11PAHi5
CPU	Core i5-1135G7 4.20 GHz 4core
RAM	64GB
アンテナ	TP-Link Archer T3U Plus
OS	Ubuntu18.04
ROS	dashing
wireshark	2.6.10
iperf	2.0.10



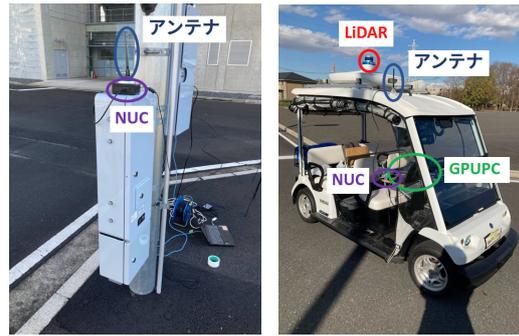
図4 柏の葉キャンパステストコース俯瞰図

度、動的物体によるNP変動の2点を評価する。

4.2 屋外実験

屋外において専用区画の実証フィールド（東京大学柏キャンパステストコース）で実験した結果と評価を述べる。柏キャンパステストコースは、大学内にある実証フィールドであり、他の車両が通らないため、動的物体の影響を受けない理想的な環境下での実験となる。

柏キャンパステストコースでNP分析、可視化実験を行った。テストコースの俯瞰図を図4に示す。RSUは図4のAの位置



柏キャンパス RSU 柏キャンパス車両

図5 柏キャンパス使用機材

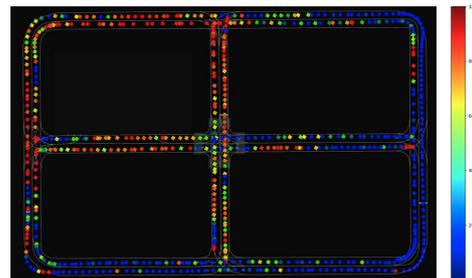


図6 柏キャンパステストコース可視化結果

に図4.2のように、NUCとアンテナを設置する。このときアンテナの地面からの高さは約155cmである。また、図4.2のように車にLiDAR (VLP-16)、アンテナ、NUC、GPU (G-Tune H5)を取り付けて、車両を動かしながら、RSUと車両間のパケットロス可視化を行ったときの結果を図6に示す。図6はパケットロスの値に応じて、パケットロスが低い場合、青で、高くなるにつれて緑、黄色、オレンジ、赤と色分けしながら一秒に一度、現在位置にプロットしたものである。本図からRSUと車両の距離が近いほど、パケットロスが小さい傾向があることがわかる。一方で、距離が遠い位置でも、距離の近い位置よりもパケットロスが小さくなっている地点もある。原因としては、電波干渉が考えられるため、周波数帯域を2.4GHzから5GHzに変更し、実験を実施した結果図7になった。このときのRSUの位置は図4のAの位置とした。2.4GHzから5GHzに変更するとパケットロスがほとんどなくなっており、2.4GHzでは電波干渉が起きていたと考えられる。

実際にVIAMIのスペクトラムアナライザ[21]を使用して、テストコースを1周して他の電波の計測を行った。周波数ごとの電波強度は図8となっており、使用していた帯域(2400MHzから2423MHzの間)で全体的に-70dBm程度の電波が存在していたことがわかる。また、テストコースを1周したときの電波の分布は図9となっており、テストコースでは、周波数帯や場所に応じて、飛んでいる電波の電波強度が異なっていたが、多くの場合-69dBmから-83dBm程度の強さであった。また、最大で-64dBm、最小で-86dBmの電波強度が計測されており、これらが実験時の電波を阻害していたことがわかる。飛んでいた電波は、東京大学柏キャンパス内にあるテストコースであるた

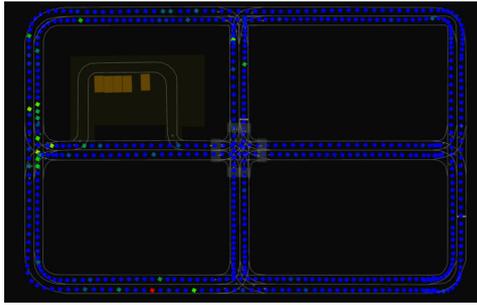


図7 柏キャンパステストコース可視化結果 (5GHz)

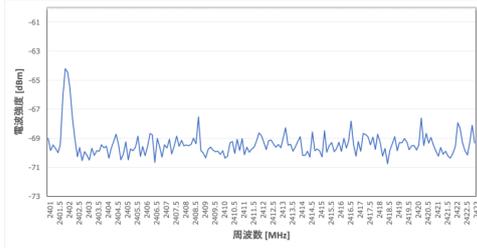


図8 周波数ごとの電波強度

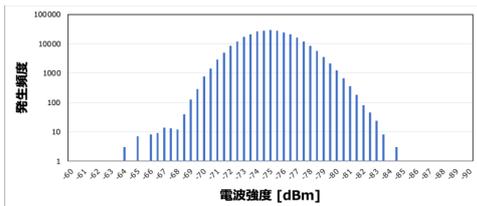


図9 電波強度分布

め、学内ネットワークである可能性や、付近が住宅地であるため、住宅地から来ていた電波である可能性が考えられる。

5. 結 論

協調型自動運転車は、V2X 通信によってリアルタイムで情報やタスクを共有し、安全で効率的な自動運転を行う。しかし、移動体である車両の通信性能は、通信先との距離やネットワークの干渉、混雑等により常に変動しており、協調認知、遠隔操作のために十分な通信性能を維持できないことがある。通信性能が低いと、パケットロスによって死角の先の情報が手に入らないことや、遠隔運転での遅延などによって操作が間に合わないなどの危険が存在する。事前に通信性能を把握することで、協調型自動運転や、遠隔運転で、適切な認知方法の切り替えや経路計画ができるようになるが、現状では、適切な通信性能を分析、可視化を行うシステムが存在しない。そこで本研究では、要求事項を満たす、通信性能の分析、可視化システムを実装した。実装したシステムの動作と精度を評価するため、移動を制限した環境下での実験、専用区画の実証フィールドでの実験を行った。本実験により、実装システムが問題なく動作できることを確認した。また、生成した NP マップは、電波干渉や動的物体の影響を受けるため、必ずしも未来の通信性能と一致する

わけではないことの知見が得られた。

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] 全国の都市における人の動きとその変化. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001573782.pdf>, 2022.
- [2] 令和 3 年における交通事故の発生状況等について. <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/bunseki/nenkan/040303R03nenkan.pdf>, 2022.
- [3] 須田義大, 大口敬, 中野公彦, 大石岳史, 小野晋太郎, 吉田秀範, 杉町敏之. 自動運転システムの社会実装に関する課題と展望. 生産研究, No. 68(2), pp. 95–98, 2016.
- [4] 柏の葉地区における自動運転バス長期営業運行実証実験. https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2020/file/ra/04RA_03J_Shimono.pdf, 2020.
- [5] Honda sensing elite press information. https://www.honda.co.jp/factbook/auto/LEGEND/202103/202003_LEGEND.pdf, 2022.
- [6] Intelligent transport systems: Vehicular communications; basic set of applications; part 2: Specification of cooperative awareness basic service. *ETSI EN 302 637-2*, Vol. 1.4.1, , 2019.
- [7] Intelligent transport systems; cooperative perception services (cps). *ETSI TS 103 324*, Vol. 0.0.14, , 2019.
- [8] Intelligent transport systems (its); vehicular communications; basic set of applications; analysis of the collective perception service (cps). *ETSI TR 103 562*, Vol. 2.1.1, , 2019.
- [9] Toyota its connect. <https://toyota.jp/technology/safety/itsconnect/>, 2022.
- [10] 佐藤雄大, 榎原俊太郎, 大岸智彦. 遠隔運転の遅延時間が操作性に与える影響に関する検討. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 120, No. RCS-89, pp. 105–110, 2020.
- [11] S. Kato, E. Takeuchi, Y. Ishiguro, Y. Ninomiya, K. Takeda, and T. Hamada. An open approach to autonomous vehicles. *IEEE Micro*, Vol. 35, No. 6, pp. 60–68, 2015.
- [12] I.S. MacKenzie and C. Ware. Lag as a determinant of human performance in interactive system. INTERACT' 93 and CHI' 93 conference on Human factors in computing systems, pp. 488–493, 1993.
- [13] J. Davis. The effects of time lag on driving performance and a possible mitigation. *IEEE Trans Robotics*, Vol. 26, No. 3, pp. 590–593, 2010.
- [14] L.H. Frank. Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 30, No. 2, pp. 201–217, 1988.
- [15] 佐藤雄大, 榎原俊太郎, 大岸智彦. 遠隔運転環境の操作性向上のための遅延の見える化機能. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J105-B, No. 3, pp. 270–282, 2022.
- [16] A Napolitano, F Civerchia, K Kondepu, L Valcarenghi, and P Castoldi. Implementation of a mec-based vulnerable road user warning system. *AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, pp. 1–6, 2019.
- [17] M. Kutila, P. Pyykonen, Q. Huang, W. Deng, W. Lei, and E. Pollakis. C-v2x supported automated driving. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 1–5, 2019.
- [18] Manabu Tsukada, Jos'e Santa, Satoshi Matsuura, Thierry Ernst, and Kazutoshi Fujikawa. On the experimental evaluation of vehicular networks: Issues, requirements and methodology applied to a real use case. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–14, 2014.
- [19] 伊藤彰秀. V2X 協調型運転システムにおける通信性能のリアルタイム可視化ツール, 2020.
- [20] Ieee sa. <https://standards.ieee.org/>.
- [21] 光スペクトラムアナライザ (osa). <https://www.viavisolutions.com/ja-jp/products/optical-spectrum-analyzers-osa>.