

東京大学大学院
情報理工学系研究科 電子情報学専攻
修士論文

路側装置ネットワークによる安全を優先した車両認識
メッセージの広域送信

Safety Oriented Wide Dissemination of Roadside-assisted Cooperative
Awareness Message

北沢 昌大
Masahiro Kitazawa

指導教員 江崎 浩教授
落合 秀也 准教授

2019年1月

概要

自動車の技術が発展し、自動運転車が実際に公道を走り出す世界が現実味を帯び始めている。自動運転は車両に取り付けられたセンサーから得た情報によって AI が運転の判断を行う。しかし、自動運転によって最高速度の引き上げ、信号機の廃止などが行われた世界では、運転の判断に必要な情報の地理的な範囲が広範囲となり、自律型の自動運転技術では補いきることは不可能である。そのため、外部との通信による情報の共有を行うことによって情報の補填を行うことが不可欠となる。この交通情報を複数台の車両で共有するシステムを CITS (Cooperative Intelligent Transport System) と呼び、車両間での通信、車両と路肩設備、さらにはインターネットを介してサーバーとの通信を行うことによってより安全で快適な交通を作り出す研究が多くなされている。CITS で用いられるメッセージのひとつとして CAM (Cooperative Awareness Message) がある。これは安全に関わる重要なメッセージであり、自車の存在を周囲に認識させるためのメッセージである。このメッセージに関わる研究のひとつに Proxy CAM システムがある。このシステムは、CAM を生成できない車両、歩行者等の存在、CAM の送信範囲の狭さ、死角の問題を解決するため、路肩設備による代理で CAM を生成し、送信を行うシステムとなっている。本研究では、この Proxy CAM システムを用いて、快適性のための送信範囲の拡張、安全性の最優先、低遅延という要件のもと、Grid Proxy CAM システムとそのシステム内で動作する Distance Priority アルゴリズムを提案する。このシステムは Proxy CAM 装置が有線を用いて相互に接続することによって路側ネットワークを構築し、Proxy CAM 情報を送受信するシステムである。また Distance Priority アルゴリズムは Proxy CAM の位置情報と送信地点の位置情報の距離を用いて Proxy CAM の送信優先度を付与するアルゴリズムである。これらの提案手法の評価をパケット到達率と遅延の観点から行い、従来手法に比べ大幅な送信範囲の拡張と許容しうる遅延を達成することを示した。

Abstract

With improved technology of driving, autonomous cars running on public roads are becoming reality. Autonomous cars make driving decisions with the information from the sensor attached to themselves. However, since autonomous driving does not need manual control, traffic lights will be abolished and the speed limit will be raised. For these reasons, it is necessary to get geographically wider traffic information. And it can not be done by own sensors. To get the information, wireless communication with other nodes to share each nodes' information is essential. CITS (Cooperative Intelligent Transport System) is the system to share the traffic information among vehicles. And many studies have done to create safer and more comfortable traffic with V2X (Vehicle to anything) communication. CAM (Cooperative Awareness Message) is one of the message kinds in CITS. This message is an important message for safety and is for informing the sender's existence. One of the studies related to this message is Proxy CAM system. This system solves the problems that are the existence of nodes that are not able to create CAMs, the short range of wireless communication used for sending CAMs, the blind spots of the communication by creating and sending CAMs on behalf of vehicles and pedestrians. In this work, first, we set three requirements which are the expansion of disseminating the range of Proxy CAM for comfort, prioritizing safety the most and achieving a low latency. Then, for those requirements, we propose Grid Proxy CAM system and Distance Priority algorithm functioning in the system by leveraging Proxy CAM system. This system connects Proxy CAM devices installed on each intersection with wire and organizes a roadside network to share Proxy CAMs. Also, Distance Priority algorithm prioritizes the Proxy CAMs to broadcast according to the distance from the location information of Proxy CAM to the dissemination point. We evaluated in terms of Packet Delivery Ratio (PDR) and delay, and concluded that the proposed method achieved great expansion of the dissemination range and acceptable delay.

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	道路交通における通信	5
2.1	CITS	5
2.2	CAM	8
2.3	IEEE802.11p	10
第 3 章	安全性に関する研究	12
3.1	VANET	12
3.2	Hybrid Network	17
3.3	Proxy CAM	20
第 4 章	Grid Proxy CAM	22
4.1	要件定義	22
4.2	手法の概要	24
第 5 章	実装	31
5.1	仮想環境	31
5.2	想定シナリオ	32
5.3	地図	33
5.4	実装環境変数	37
第 6 章	評価	40
6.1	評価内容	40
6.2	数学的解析	41
6.3	Grid 状の道路を用いたシミュレーション評価	44
6.4	文京区の道路を用いたシミュレーション評価	49
第 7 章	結論	52
7.1	まとめ	52
7.2	今後の課題	52

vi 目次

参考文献

54

目次

2.1	ITS アーキテクチャ概要 (出典: [1])	6
2.2	CAM の一般的な構造 (出典: [2])	8
3.1	Collision avoidance system (出典: [3])	18
3.2	Multitier Heterogeneous Adaptive VANET Framework system (出典: [4])	19
3.3	Proxy CAM システム (出典: [5])	21
4.1	Proxy CAM システムの問題点	24
4.2	Grid Proxy CAM の概要	25
4.3	Grid Proxy CAM システムの Detector に着目した概要	26
4.4	Grid Proxy CAM システムの Disseminator に着目した概要	27
4.5	Distance Priority アルゴリズムを含む Grid Proxy CAM システムのフロー チャート	29
5.1	Grid 状の地図	34
5.2	文京区の地図	36
6.1	サンプリング地点の概要	40
6.2	Proxy CAM を送信する際の時系列	42
6.3	Grid 状地図の LOS での Delay	45
6.4	Grid 状地図の Non LOS での Delay	46
6.5	Grid 状地図の LOS での PDR	47
6.6	Grid 状地図の Non LOS での PDR	48
6.7	文京区の地図での Delay	49
6.8	文京区の地図での PDR	50

表目次

2.1	無線 LAN 規格の比較	10
5.1	実装に関わる環境変数	37
6.1	MAC 層、物理層に関する定数	42

第 1 章

はじめに

車の技術に大きな変化が起き始めている。その変化の中心といえる技術が自動運転である。欧州では 2020 年までにかけて行われる研究やイノベーションプロジェクトを助成する EU の制度である Horizon 2020 において、AdaptIVe (Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles) [6] と呼ばれるプロジェクトが現在進行中である。このプロジェクトでは、自動運転がどのような使われ方をするのか、またどのようなシチュエーションが想定されるかを高速道路の走行時、都市一般道の走行時、さらに駐車時や渋滞走行時についてそれぞれ定義している。これに加え、それらの定義を実現、解決するために必要な技術の開発や実際に車両を用いての実証、更には必要となる法の整備までといった様々な観点から自動運転の実現を進めている。

国ごとで見ても、ドイツでは 2015 年にインフラ、法、技術革新、情報通信、サイバーセキュリティ・データ保護の 5 分野に関する“自動運転戦略”を発表、2017 年に道路交通法の改定案を可決し、自動運転システムが一定期間または特定の状況において直進・車線変更を引き受け、運転手は常時システムを監視する必要はないが、適切な時間内に完全かつ安全に運航任務を引き継ぐことができるという条件のもと自動運転の実用化を認めた。またイギリスでは 2017 年に自動運転車両が事故を起こした場合の保険適用に関する法案である“自動運転と電気自動車に関する法案”を議会に提出している。

アメリカにおいてはそれまで自動運転車に関する法、制度は各州が独自に制定を行っていたが、その相違をなくすために連邦法として“SELF DRIVE act” [7] が 2017 年に可決された。この法律では主に自動運転車両の安全性保証に関しての決まりが制定されている。また同年、NHTSA(運輸省国家道路交通安全局) が自動運転車両に関する改訂版ガイドラインを発表した。このガイドラインは改定前と比べて NHTSA への情報提供の不要化など開発研究をしている企業等に寄り添ったガイドラインとなっている。さらにカリフォルニア州では 2018 年に車両を遠隔で監視、必要であれば遠隔操作できることが条件のもと、運転者が乗車していない自動運転車両の公道での試験走行を許可すると発表された。

日本においては法制度の整備がまだされておらず、自動運転の実用化に向けてはまだまだ世界に対して遅れをとっていると言わざるをえないが、技術研究に関しては現在“戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム”プロジェクトのもと大規模実証実験と呼

2 第1章 はじめに

ばれる開発された技術の実証実験が行われている。また政府としては2020年に行われる東京オリンピック、パラリンピックに合わせて自動運転のバスを公道で走行させ、2023年ごろには一般車両の自動運転化を可能とする技術を確認し、2025年ごろの実用化を目標としている。このように欧州、アメリカ、日本でそれぞれ様々な政策、法制度の整備、研究が急速に進んでいる。

ここで自動運転の進展状況を語る上で重要になる自動運転のレベル分けについて述べる。自動運転のレベル分けにおいて世界的に広く使われているものとしてSAE (Society of Automotive Engineers) J3016 [8]がある。レベル0はAIによるアシストが一切されていない、いわゆる自動運転が一切されていない現在の一般的な自動車である。レベル1は運転支援であり、ハンドル操作、加速、減速などの操作をどれか1つのみをAIが自動的に行う。レベル2は部分運転自動化であり、レベル1では操作のうち1つのみを自動的に行うことしかできなかったが、この操作を同時に複数実行することができる。しかし、ドライバーは常に周囲の状況の確認が求められ、AIの判断を監視する必要がある。レベル3は条件付き自動運転となり、緊急時に人間が介入して運転を代わることかつ高速道路などのある程度限られた環境でのみ人間に代わり全ての運転を行う。レベル4は高度自動運転となり、全ての運転をAIが行う。しかし、高速道路などのある程度限られた環境でのみ走行可能という制約が存在する。レベル5は完全自動運転となり、どのような条件や状況であっても人間の介入なしに運転が可能である。

自動ブレーキの機能や車間距離を一定に保つAdaptive Cruise Control(ACC)などはレベル1にあたり、高速道路において前方車両と白線を認識し、前方車両との車間距離を一定に保つように自動でアクセルとブレーキをコントロールし、かつ道路中央を走行するようにハンドルを制御する日産のプロパイロットなどはレベル2にあたる。現在は主にレベル1、2が実用化されており、レベル3、4が現在、研究段階では技術として確立されつつある。

自動運転の技術はこのように確実にレベルを引き上げつつあるが、これを評価するにあたり、自動運転車による事故が何度か起きていることは考慮しなければならない。特に、2018年3月18日にアメリカのアリゾナ州で発生したUber社の自動運転車による死亡事故である。自動運転車が関わる死亡事故としては2016年に発生したテスラ社の車両が高速道路の分岐点で現れるコンクリートの壁の前に置かれるバリアへ衝突することによって運転者が死亡する事故があった。しかし、この事故は運転者に運転を引き継ぐよう警告をシステムが出していたにもかかわらず運転者が無視をして映画を見ていたことが原因であることが判明し、自動運転車の責任は問われなかった。それに対し、Uber社が起こした事故は自動運転システムの責任が大きく問われている。この事故は自動運転のレベル4の高度自動運転に属するシステムのテスト走行中に発生したものである。横断歩道のないところを被害者は自転車を押しながら歩いて横切っており、その被害者をテスト車両はおおよそ40mile/h(約64km/h)ではねてしまったという内容である。レベル4のシステムであり、自動運転が本来全ての運転を操作するため、この事故は自動運転車両が原因といえる。

事故当時、テスト車両には運転席に安全のため車両操作員が乗車していたが、事故が発生したのが夜であったこと、被害者は上半身に黒の服を着ていたこと、操作員が車両を信用してし

まっており前方をあまり注意して見ていなかったことの3点が原因で事故が発生する前に手動で停車することができなかった。さらに、このテスト車両では不規則な動きをする可能性を低下させるため、自動運転システム下の運転では急ブレーキ操作が有効にされておらず、衝突する1.3秒前(約25m手前)にシステムが衝突を検知していたものの、ブレーキを作動することができなかったといわれている。しかし、60km/hで走行している車両の制動距離は27mであるといわれているため、システムがその時点でブレーキを作動できたとしても衝突を回避することができなかったといえる。つまり、システムの検知自体が遅かったのである。現場は見通しの良い一方通行で2車線の直線の道であり、信号機もなかった。また、街路樹等の歩行者の認識がしにくい障害物も存在せず、事故当時は事故車両と被害者の間及び被害者の前方には車両が存在せず、車両が被害者を検知するのを妨げる障害物は一切存在しなかった。

その後のUber社による事故の原因調査によって、この事故は自動運転車両に取り付けられていたセンサー等のハードウェアの問題ではなく、検知するソフトウェアの問題であることが判明した。この車両ではLiDARと呼ばれるセンサーが発するレーザーパルスの反射、さらにレーダー、カメラによる可視光の観測によって周囲の情報を手に入れている。LiDARとレーダーは電波を発することにより周囲の物体からの反射をセンサーで観測しており、これらのセンサーから得られるデータは点群となっており、カメラからのデータは画像となっている。自動運転システムはこれらのデータを元に物体を検知し、その物体と衝突の危険性があるかを判定する。この判定時に車両にとって衝突しても問題ないもの(ビニール袋、空き缶、紙など)には反応して過剰に衝突回避行動を起こさせないためにある程度物体を無視するプログラムになっている。今回のUber社のテスト車両では無視する程度が大きかったため、被害者を遠くから検知していたのにもかかわらず、接近するまで衝突回避行動を起こさなくて良いと判定したことが事故の原因であるとされている。この事故によりUber社は全ての都市で自動運転車の走行試験を中止することになった。

この事故からわかる通り自動運転によって安全性を保証し交通事故が一切発生させないという目的を達成するためには技術の進歩が依然必要となる。事故が発生する原因として物体検知アルゴリズムによる周囲の車両及び人の検知が確実にできていないこと、センサーによる車両及び人を検知できる自車からの範囲が安全性を保証するのに必要な範囲よりも小さいこと、十字路やカーブ等の地理的要因による自車のセンサーの死角部分に存在する車両及び人の認識ができないこと等があげられる。特に自車のセンサーの死角部分に存在する物体認識は技術がいかに進歩したとしてもその車両のみによる認識は困難であるといえる。また、自動運転によって安全性が保証されるにつれ自動運転サービスの新たな目標の一つとして目的地への到達時間のさらなる短縮を行うことが予測される。つまり車両の走行速度の上昇である。これにより危険な状況を検知し、ブレーキをかけ衝突を起こす前に停止するまでに必要な停止距離が長くなる。したがって危険な状況を検知するタイミングをさらに早める必要がある。その判断を下すためにはより遠くの車両及び人の状態を認識している必要がある。これもやはり自車のみによる解決は困難であるといえる。

このように自動運転では車両に取り付けられている光学センサーによる物体検知だけでは解決することが困難な問題が存在する。この問題を解決するために研究されているのが、車両同

4 第1章 はじめに

士または車両と路肩設備との通信、CITS (Cooperative Intelligent Transport System) [9] である。この通信により他の車両、路肩設備からそれらの周辺に存在する物体の情報を受け取ることができ、検知範囲の拡大、死角部分の可視化が可能となる。例えば、路肩に車両が駐車されており、その背後から歩行者が道路を横断しようとしている。そこに自動運転の車両が接近しているというケースを考えてみる。他車や路肩設備と通信を行っていない場合、自動運転の車両は路肩に駐車されている車両により自車のセンサーからでは直接歩行者を認識することができない。そのため自動運転車両は歩行者が路肩に駐車された車両の背後から出てきてから検知し、衝突回避行動を行おうとするため歩行者が出てくるタイミングによっては衝突を回避することができない。

しかし、他車や路肩設備と通信を行っている場合、路肩に駐車されている車両より先を走行している車両や、歩行者を観測できる位置にある路肩設備から歩行者が背後にいるという情報を受け取ることができる。これにより衝突の可能性を事前に知ることができ、衝突回避の可能性を大きく上げることができる。また、車両同士、路肩設備との通信のみではなく歩行者の所持する携帯電話を用いてクラウドサーバーを設置することによって歩行者と車両の位置を常に監視して衝突を検知するという研究も多くなされている。

本研究は自動運転車の普及により最高速度の引き上げ及び信号機の廃止が行われた社会を想定している。また、車両間でやり取りされるメッセージのうち安全性に大きく関わるメッセージである CAM (Cooperative Awareness Message) [2] に焦点を当てた研究となっている。先に述べた環境において、故障車や通行人等の通信できない対象が死角部分にいる場合に検知されない問題、欧米においてこのような車両、路肩設備との通信の研究で主に使われている IEEE802.11p [10] の問題点である耐障害性を解決するために提案された Proxy CAM システム [5] を用いて、Proxy CAM の快適性の追求のための広域配信、安全性の追求のためにパケット到達率が高いこと、配信時の遅延が低いことの3つを本研究の目的とする。これらの目的を達成するために複数の Proxy CAM 装置を道路に沿って有線で接続した Grid Proxy CAM とそのネットワークでやり取りされるパケットの取捨選択のアルゴリズム、Distance Priority アルゴリズムを提案する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では道路交通における通信技術の紹介を行い、第3章では第2章で紹介した技術、メッセージの安全性に関する問題点の改善を図った研究を紹介する。第4章では本研究の要件定義、その要件を満たす Grid Proxy CAM システム、そのシステム内で動作する Distance Priority アルゴリズムを提案する。第5章では提案手法の実装の説明、第6章では実装を用いた評価と考察を行う。最後に第7章では本研究のまとめと今後の課題を述べる。

第 2 章

道路交通における通信

この章では道路交通においてヨーロッパで標準化されている通信システムの概要、そのシステムで使用されている自己位置を周囲に知らせるビーコンとしての役割を果たすメッセージ、さらにこのシステムで車両間で使用するために策定された無線技術について説明する。

2.1 CITS

より安全、効率的、快適な道路交通を実現するシステムとして高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems, ITS) がある。日本ではこのシステムは 1996 年に初めて構想が作成され、その後様々な研究、実用化が行われている。開発分野として国土交通省はナビゲーションシステムの高度化、自動料金収受システム、安全運転の支援、交通管理の最適化、道路管理の効率化、公共交通の支援、商用車の効率化、歩行者等の支援、緊急車両の運行支援の 9 つの分野を定義している。中でもナビゲーションシステムの高度化は道路交情情報通信システム (Vehicle Information and Communication System, VICS)、自動料金収受システムは ETC (Electronic Toll Collection System) として実用化されており、我々に馴染み深いものとなっている。

近年、ITS の中でも自動運転が技術的に目覚ましい発展を遂げており多くの注目を浴びている。第 1 章で述べた Adaptive Cruise Control やプロパイロットのようなすでに実用化されている技術も多数存在する。これらの技術は多くは自律型であり、一車両内でシステムが完結している。このような自律型のシステムに対してそのシステム同士が通信によるネットワークを構築することによってより多くの情報を共有できるようにすることを目的としたシステムを CITS という [9]。CITS では他車や路肩設備との通信が必要になるためその通信アーキテクチャの世界的な標準化が求められる。図 2.1 に ETSI (European Telecommunications Standards Institute) により標準化された ITS のアーキテクチャを示す。ITS アーキテクチャは主にアプリケーション層、ファシリティ層、ネットワーク&トランスポート層、アクセス層、マネジメント層、セキュリティ層の 6 層に分けられる。アプリケーション層は ITS システム上で提供されるサービスが動作する層、ファシリティ層は他の ITS システムノードから受信した情報とシステム内のセンサーから取得した情報をアプリケーション層に渡しやすい形に整

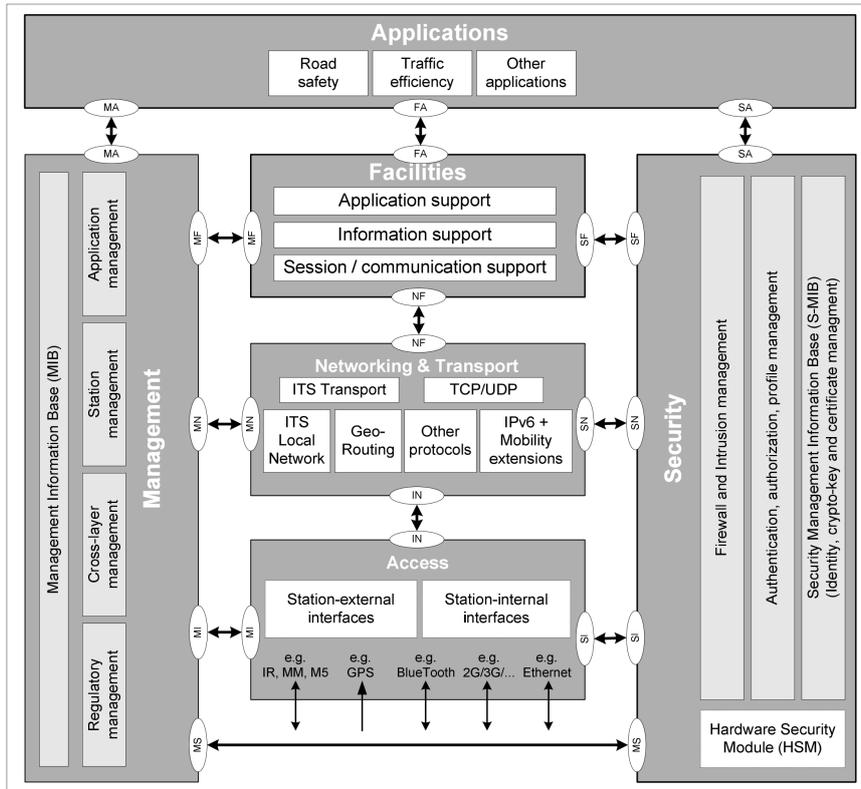


図 2.1. ITS アーキテクチャ概要 (出典: [1])

形し保持する層である。ネットワーク&トランスポート層はルーティングとパケットの管理を行い、アクセス層は通信方式を管理する層である。マネジメント層は層同士のデータの伝達や相互作用を管理し、セキュリティ層は全ての層のセキュリティを管理している。

ファシリティ層においてセンサーと他の ITS システムノードからのメッセージを整形して保存する取り組みとして LDM (Local Dynamic Map) [11] があげられる。この LDM は動的情報、準動的情報、準静的情報、静的情報の 4 つのレベルの情報によって構成されている。それぞれは全道路交通情報において 1 秒、1 分、1 時間、1 ヶ月程度で変化する情報のことを指している。どの情報がどのレベルに値するのは様々な見解がある。例えば、動的情報には周辺の車両、歩行者についての情報、信号機の情報等、準動的情報には交通事故の情報、渋滞情報、短時間で変化する気象情報、準静的情報には交通規制情報、道路工事情報、気象情報、静的情報には車線情報、道路情報、ランドマークとなる建築物の情報等が含まれている。

ネットワーク&トランスポート層ではルーティングプロトコルとして GeoNetworking (GN) [12] が使用できる。この GN を説明する前に我々が普段よく利用しているネットワークであるインターネットと無線 LAN について説明する。インターネットでは一つの組織によって管理されるネットワークである AS (Autonomous System) と呼ばれる集合が存在する。この AS が相互に通信を行うことによってインターネットが構成され、AS 同士には上下関係はなく、お互いにデータの送受信を行うことができる。このようにノード間の接続において上下関係がなく、どちらからでも通信を開始することができるネットワークを Ad-Hoc network

と呼ぶ。また、AS は新たに追加されたり削除されたりといったトポロジーの変化の頻度が高くない。そのため、ルーティング情報を定期的に交換することにより各 AS がルーティングをテーブルで管理している。

それに対し、無線 LAN は AP (Access Point) と呼ばれる無線と有線の通信を変換する機器にノードが接続することによりインターネットを利用することが可能である。そのため、このネットワークは AP が中心のスター型かつ外部と接続するためのゲートウェイとなるようなインフラ (AP 等) が必要となる。このタイプのネットワークの各コネクションは基本的にノードから通信が始まり、AP を経由した通信の開始はあっても AP が通信を始めることはない。つまりノードと AP の機能は同等ではなく区別されている。また、無線環境の特徴でもあるノードが地理的に移動することはよく発生するが、これによる AP との接続が切れる、再接続するといった接続の変化の頻度は高くない。そのため、このネットワークも AS の Ad-Hoc network と同様にネットワークのトポロジーが変化しにくい。

車両同士の通信において無線 LAN のようなネットワークを用いると、どの車両が AP の役目を担うのか、AP の役目を負っている車両が十分全ての道路に分散しており AP に接続していない車両が一つもないかという問題を解決するのが困難である。そのため車両同士の通信では Ad-Hoc network を使用している。このネットワークは VANET (Vehicle Ad-Hoc Network) と呼ばれている。このように無線通信において Ad-Hoc network を使用している同様のネットワークとして MANET (Mobile Ad-Hoc Network) がある。しかし、MANET と違い車両同士のネットワークは自動車が非常に高速に移動しているという特徴から車両の地理的な相対位置が短期間に変化する。これにより車両同士の接続が張られる、切られるといったトポロジーの変化が非常に激しい。そのため MANET に使用されている OLSR [13] や AODV [14] といったトポロジーのテーブル管理という方法ではルーティングを常に最新の状態にしておくことは困難である。

GN ではトポロジーを各ノードで管理するのではなく、パケットヘッダに宛先の地理位置を記述する。受信した中継ノードは自身の周辺のノードの地理位置と宛先の地理位置を比較して宛先の地理位置に近づけるノードを選択していくという方法で転送を行うため、トポロジーの管理を行わなくて良い。また、この GN 上で IPv6 を使用できるようにする GN6ASL [15] の標準化もなされている。GN 上で IPv6+UDP/TCP を使用する代わりに ETSI では BTP (Basic Transport Protocol) [16] も標準化されている。このプロトコルは GN 上で動作し、ファシリティ層で動作している様々なプロセスが送信するメッセージを一つの通信路で通信するために多重化を行っている。具体的には UDP/TCP のように 16 ビットのポート番号を採用しており、これによりファシリティ層のプロセスを区別している。また UDP と同様に BTP はコネクションレス型のプロトコルであり、パケットの順序、同一パケットの複数受信、パケットロス等の信頼性も保証されていない。

2.2 CAM

CITS では周囲の車両の情報を手に入れることにより安全性、快適性、効率性を保証している。この車両の情報を手に入れるために考案されたメッセージが CAM [2] であり、この CAM は送信元の存在を示すメッセージである。このメッセージはその車両の周囲に影響しうる重大な情報を周囲の ITS ステーションに伝えることが目的である。情報の例としては、送信元の GPS 等による位置情報、速度、進行方向等がある。そのため CAM はその ITS ステーションが車両である場合、車両が起動してから電源が落ちるまで常に定期的に送信しなければならない。このメッセージを受信することによって周囲の車両はその車両と衝突の危険がないかやその車両との協調的な動作を取ることによってより効率的な交通を目指すことが可能である。CAM はその目的から送信元から地理的に近い範囲にいる車両にのみ影響を与えうると考えられるためシングルホップのみで送信することになっている。また、ITS のネットワークに参加している全ての ITS ステーションが CAM を生成、送信、受信できることが求められている。

CAM はファシリティ層の CA basic service (Cooperative Awareness basic service) で生成、管理、処理されている。CA basic service は CAM を生成するとネットワーク&トランスポート層のプロトコルサービスに転送する。また CAM を受信すると CA basic service は CAM を処理してアプリケーション層にその情報を転送するかファシリティ層の LDM 等の他のサービスにその情報を提供する。CAM のパケット構成を Fig2.2 に示す。

CAM は大きく分けると ITS PDU (Packet Data Unit) header、Basic Container、HF (High Frequency) Container、LF (Low Frequency) Container、Special vehicle Container の5つで構成されている。また ITS PDU header と Basic Container の間にはタイムスタンプが挿入される。LF Container と Special vehicle Container は必須ではなく、また Special vehicle Container は必要に応じて複数含まれることがある。ITS PDU header は CAM のプロトコルバージョンとメッセージタイプを示す messageID と送信元の ITS ステーションの stationID が含まれている。CAM のプロトコルバージョンは現状 1 になっており、messageID は CAM を示す 2 が入れられている。タイムスタンプは generationDeltaTime とも呼ばれており、車両であれば CAM に使用する車両の位置情報を取得した時刻を 2004-01-

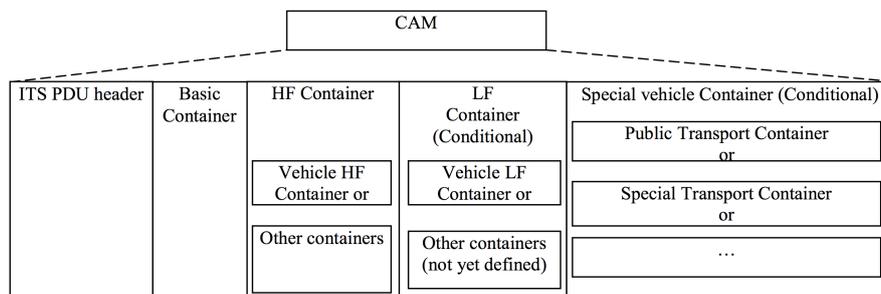


図 2.2. CAM の一般的な構造 (出典: [2])

01T00:00:00:000Z からの経過時間として ms で表現した値を 65536 で割った余りを使用している。

Basic Container には、ETSI TS 102 894-2 [17] に示されている、送信元の種類 (車両、路肩設備、通行人等) を示す station type と、送信元の位置と位置情報の精度を示す reference position の 2 つのどの ITS ステーションも保持している基本情報が含まれている。station type は車両であれば値は 3~11 となる。また、reference position は車両であれば bounding box の前部分の midpoint の位置が入力される。

HF Container には、車両の前進・後退を含む進行方向、スピード、車両の大きさ、加速度やハンドルの回転角等の非常に短時間で変化しやすい車両の情報が含まれている。LF Container には、車両の種類、例えば一般車両、公共交通機関、道路整備車両、救急車等の緊急車両を示す vehicle role、車両のヘッドライトが点灯しているかの状態を示す exterior lights、車両の最近の走行の軌跡を示す path history が含まれている。path history は path point と呼ばれるものから成り立っており、データ量の増大を防ぐため path point が 23 点以下までの軌跡が含まれている。Special vehicle Container には、LF Container に含まれる vehicle role において一般車両でない場合、それぞれの車両の種類に応じた車両情報が含まれており、この CAM のメッセージは約 200byte ほどの大きさになる。

次に CAM の送信頻度について説明する。CAM の送信頻度は [2] では CAM 同士の間隔が 100ms 以下にならないかつ 1000ms 以上にならないように CA basic service がコントロールすべきだと推奨されている。つまり CAM を 1~10Hz の範囲で送信することを意味する。また、CA basic service はこの CAM の送信周波数を固定にせず、周囲の ITS ステーションの状況や通信の不可を考慮して変動させても良いとしている。しかしこの時、以下の条件 1)、2) を満たす時は必ず CAM を生成、送信しなければならないとしている。事前にシステム内で CAM 同士の間隔の最小値 T_GenCam_Dcc が設定されているとする。この値は 100ms 以上 1000ms 以下である。また T_GenCam は条件 1) によって CAM が生成された場合はその CAM と 1 つ前の CAM の間隔が、条件 2) によって N_GenCAM 回連続で CAM が生成された場合は 1000ms が代入される。T_GenCam の初期値は 1000ms で N_GenCAM は初期値かつ最大値が 3 になっており周囲の環境によって変動するとなっている。

1. 1 つ前の CAM からの経過時間が T_GenCam_Dcc より長く、かつ以下の条件のうち一つ以上を満たす時
 - 現在の車両の進行方向が 1 つ前の CAM に含まれていた車両の進行方向に比べ 4 度以上変化していた場合
 - 現在の車両の位置が 1 つ前の CAM に含まれていた車両の位置に比べ 4m 以上変化していた場合
 - 現在の車両の速度が 1 つ前の CAM に含まれていた車両の速度に比べ 0.5m/s 以上変化していた場合
2. T_GenCam_Dcc と T_GenCam より経過時間が長い時

また、CAM の情報はリアルタイム性が重要である。このため CAM を生成し始めてから

CAM がネットワーク&トランスポート層に転送されるまでの時間は 50ms 以下でないといけないとされている。

CAM に対して交通事故、道路規制などといったイベント発生時に送られるメッセージとして DENM (Decentralized Environmental Notification Message) [18] がある。

2.3 IEEE802.11p

ITS ステーション同士の通信技術として DSRC (Dedicated Short Range Communications) の一種である IEEE802.11p [10] がある。この 11p は IEEE が車車間の通信のために新たに策定したもので 2004 年に策定が開始され 2010 年に規格が公開された。また 11p は容易に実装でき、低コストかつ IEEE により確立された技術であるという利点がある。この規格は 5GHz 帯の周波数と OFDM を用いた無線 LAN 規格で狭い帯域幅で高いデータレートを実現していた IEEE802.11a をもとにしており、アメリカでは 11p と IEEE1609.x [19] とを合わせた WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) が ITS の通信プロトコルスタックとして標準化されている。またヨーロッパの ETSI もこのアメリカの規格に沿った形で策定をし、日本では 5.8GHz 帯の ARIB STD-T75 [20] という規格が策定されている。Table.2.1 に IEEE802.11a と IEEE802.11p の規格の比較を示す。

表 2.1. 無線 LAN 規格の比較

	IEEE802.11a	IEEE802.11p
Bit rate	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Mbit/s
Modulation mode	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Number of subcarriers	52	52
OFDM Symbol Duration	4 μ s	8 μ s
Guard Period	0.8 μ s	1.6 μ s
Occupied Bandwidth	20MHz	10MHz
Frequency	5.15-5.35/5.47-5.725GHz	5.850-5.925 GHz

11a に比べて 11p は通信速度が半分となっている。また 11p は 5.850~5.925GHz 帯と高い周波数帯を使用している。この周波数帯は 7つのチャンネルに分かれており各チャンネルは帯域幅が 10MHz となっている。7つのチャンネルのうち 1つは Control Channel (CCH) と呼ばれており、安全性に関する情報を優先的に送信することができるチャンネルであり、残りの 6つのチャンネルは Service Channels (SCH) と呼ばれており、CCH より優先度の低いその他の情報の送信を扱っている。また、ITS ステーションは 11p で策定された WBSS (WAVE Basic Service Set) を構成して通信を行う。この WBSS では BSSID(BSS Identifier) が 48bit 全て 1 であるワイルドカード BSSID をどの ITS ステーションでも使用している。ITS ステ

ション同士の通信、車両同士や路肩設備との通信は相対速度が大きいため通信可能距離内にいる時間が短い。このことから通信が可能な時間が短いという環境下にある。この特徴から、11p はできるだけ接続確立のための時間を短縮させるという目的のもと設計された。そのため通信前に Authentication、Association を行わないで通信をする。このためデータの信用性、秘匿性は保証されていない。これらは上位の層で必要があれば行うとされている。また周波数バンドが他の IEEE802.11 の規格に比べ狭いためデータ転送速度は遅いがマルチパスに強いという特徴がある。

しかし、このような利点に対して IEEE802.11p はアドホックネットワークを構築するためにマルチホップブロードキャストを必要とする DENM に対してスケーラビリティが弱く、また EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) の特徴により都市部などの ITS ステーションが比較的多く存在すると考えられる地域ではデータの遅延が発生してしまう可能性があるという特徴があり、CAM 等のリアルタイム性が求められるかつ多量になりうるメッセージの通信の際に問題点となる。また、5.85-5.925GHz 周波数帯を使用していることから、周波数帯が高周波であるために回折の性質が弱い。そのため障害物による電波障害が起りやすく、長距離の通信に対して弱いといえる。このため自動車のような位置が常に変化している ITS ステーションとは安定した通信を行うことができない、通信時間が限られてしまうという問題もある。

第3章

安全性に関する研究

この章では前章で紹介した CAM や DENM をその目的である安全性をより確かなものにするために必要であるパケットの PDR(Packet Delivery Ratio) の向上や到達範囲の向上、リアルタイム性に関して課題となる通信技術、IEEE802.11p の問題点、構成するネットワークの問題点を解決する研究を紹介する。

3.1 VANET

車両同士が Ad-hoc connection を形成し、構成されるネットワークを VANET と呼ぶ。このネットワークを用いて前述した CAM パケットの問題点の解決を図った研究をこの節で紹介する。

このネットワークは以下の特徴を持っている。

- 非常に動的なトポロジー

VANET のノードである車両は非常に高速で移動している。そのため車両同士の地理的な位置関係も非常に変化が激しい。このことから各車両が広範囲のトポロジーを常に把握していることは困難であり、トポロジーに依存しない通信が必要となる。

- 十分な電力と計算資源

IoT デバイスが形成する MANET と違い、車両によって形成される VANET はそれぞれのノードが十分な電力と計算資源を保有していると考えられる。そのため MANET のようにノードの計算の制限をかけなくて良い。

- 潜在的な電波干渉

VANET で使用されている無線技術である IEEE802.11p は安全に関わるメッセージは CCH を使用することが推奨されている。CAM のような定期的なメッセージに加え事故発生等のイベントによって DENM 等のマルチホップメッセージが送信された場合、メッセージの大量発生によるフラッディングが起こる。これにより車両密度が高い道路では複数の車両が同時にメッセージを送るため、電波干渉が発生しやすくなっている。

- ブロードキャスト

VANETは無線での通信である。ユニキャストを行うときにはルーティングが必要となるが、先述の通りトポロジーが非常に動的であるため一度経路を生成しても短時間でその経路が利用できなくなる。そのためユニキャストは非常にに行にくい環境となっている。VANETではユニキャストではなくブロードキャストが基本的に利用されている。そのため1回の送信で周囲の車両はその車両からのメッセージを受け取ることができる。

このような特徴を考慮してCAMパケットの問題点の解決をしなければならない。

解決の手法としてはじめに考えられるのはIEEE802.11pの送信電力の調整である。IEEE802.11pはAd-hoc connectionを形成するため接続可能なITSステーションを検知すると自動的に接続を行う。そのため常に一定の送信電力で通信を行っていると都市部などの交通量が多い場所では多くのITSステーションと接続が行われてしまい、近隣のITSステーションのみならず、自車の安全性に関して重要度の低い2台先、3台先のITSステーションとの通信が行われ、結果通信量が増大しパケットロスや遅延の発生が起きる。[21] [22] [23]ではこの送信電力に着目して解決を行なっている。

[24]ではFPAVアルゴリズムを提案している。FPAVでは2段階のプロセスで構成されている。1段階目でははじめ全てのITSステーションは最小の送信電力で通信を行う。その後徐々に送信電力を上げていきコネクションを増やしていく。送信電力を増加させるたびに送信するメッセージの総データ量と事前に設定したネットワークの最大負荷、MaxBeaconingLoad(MBL)を比較し、超過しない最大電力まで増加させる。この1段階目によってネットワークに所属する全ITSステーションの最小送信電力を最大化にするという問題、Beaconing Max-Min Tx Power Problem(BMMTxP)を解決することができる。

2段階目では2種類の手法が挙げられているが、どちらもそれぞれのITSステーションの送信電力を徐々に上げて通信の総データ量がMBLを超えない範囲で最大化する。この2段階目によって各ITSステーションの通信リソースを最大まで使用することができるようになる。

次に考えられる手法としてメッセージの送信周波数の調整である。CAMのような自車の情報を発信するメッセージは送信周波数が高い。そのためこのようなメッセージがネットワークの帯域を圧迫してしまうといえる。[25] [26] [27]ではこの送信周波数に着目して解決を行なっている。

[28]では周囲の状況に応じて周波数を上下させることによって帯域を圧迫しないようにした。周波数を低下させる際に考慮しなければならない問題として情報の時間的な精度がある。例えばCAMは車両の位置情報が含まれている。そのため車両が40km/hで走行していた時にメッセージの送信周波数が10Hzであったら実際の車両の位置と周囲のITSステーションが認識している位置の誤差は最大1.1mである。それに対し送信周波数を1Hzにした場合、位置の誤差は最大11.1mになる。この情報の更新頻度の低下による情報の新鮮さの変化が各ITSステーションに対して危機的な状況を起こす可能性がないか、アプリケーションを運用する上で問題にならないかの2点を考慮する必要がある。

[28]ではこの問題を次のBeacon interval time adaptation algorithmで解決を図った。こ

のアルゴリズムは周囲の車両からメッセージを受信すると、現在のメッセージ送信周波数と周囲の環境から次に自身のメッセージを送信するタイミングを算出するアルゴリズムとなっている。このアルゴリズムは以下の式を元に次のメッセージ送信タイミングを算出している。

$$BR_n = BR_c + \gamma(BR_r - BR_c)$$

ここで BR_c は現在のメッセージ送信周波数、 BR_r は後述する Fuzzy Inference System より出力された理想とされるメッセージ送信周波数、 γ は現在の送信周波数 BR_c から理想的な周波数 BR_r へどれほど近づけるのかという重み、 BR_n は新しく設定された送信周波数である。 γ は様々な試行を繰り返した結果 0.45 としている。

この式を用いて算出された BR_n の逆数を Beacon Interval Time (BIT) として新しく設定する。Fuzzy Inference System は車両が衝突する可能性が高い状態か、交通事故を起こしてしまったのかといった緊急事態なのかそうでないのかという状態 Vehicle status(VS) と、周囲の同じ方向に向かって走行している車両の密度 Percentage of same directional neighbour vehicles(PDN) の2つの要因を元にしてファジー理論を用いて BR_r を出力している。このように周囲の車両の密度のみで送信周波数を決めるのではなく、自車の緊急度も考慮して決めることによって情報の新鮮度が強く求められる状況においては送信周波数をできるだけ高くすることができるようになっている。

CAM メッセージの送信範囲の拡大の方法としてマルチホップを行う方法が考えられる。[29] [30] ではマルチホップに着目したメッセージ到達範囲の拡張を行なっている。[31] では CAM の到達範囲と通信量の問題を解決するために CoopSZ プロトコルを提案した。この CoopSZ プロトコルは主に Adaptive Transmit Power Control と Cooperative Piggybacking の2つからなる。まず、この研究では Safety Zone、Awareness Range を定義している。Safety Zone は自車が走行している車線上の前後各1台の車両と、隣接している車線を走行している自車からみて前後各1台の車両全てを含む最小の範囲のことを示している。またこれらの車両を Critical neighbours と呼んでいる。Awareness Range は Safety Zone に加え Critical neighbours の Safety Zone を加えた範囲を示している。

筆者らは Safety Zone に属する車両には自車の CAM が到達すべきであるとし、これらの車両に CAM を送信できるように Adaptive Transmit Power Control で送信電力を調整する。まず、どの車両も事前に設定された自車と相手に対する危険となりうる事象を検知する範囲の最大値 maximum safety distance で CAM の送信を行う。次に、車両が送信を行う際に車両は自車が受け取った CAM から Critical neighbours となる車両を探索する。全ての Critical neighbours を探索することができた場合、その車両は Safety Zone の範囲を算出しその範囲の値を CAM の送信範囲として送信電力を調整する。Critical neighbours を探索することができなかった場合、maximum safety distance を超えないように一定値ずつ送信電力をあげていく。また、通信においてノイズによるパケットロスを考慮し、通信範囲にその 50% を上乘せした距離に CAM が到達するように送信電力を調整するようにしている。

Cooperative Piggybacking では CAM を送信する際に Critical neighbours から受信した CAM を後ろに付属させて送信する。これにより受信した車両はその車両の Critical

neighbours の情報だけでなく Awareness Range 内の車両の情報を取得することができる。つまり自車から 2 ホップ内の車両の情報を取得することができ、かつ Cooperative Piggybacking ではなくマルチホップによりこれを実現しようとした場合に比べ総通信量を CA service 以下の層で動作しているプロトコルのヘッダのサイズ分だけ削減することができる。

マルチホップを行う際にその中継車両の選定の研究も行われている。DENM 等のメッセージは事故の発生等を知らせるメッセージであり、イベントドリブンなメッセージである。また、このような広範囲に影響を及ぼす可能性があるメッセージはマルチホップをする必要がある。しかしマルチホップをする際に受信した全ての車両が同時に再ブロードキャストを行うと電波が干渉してしまいパケットロスに繋がってしまう。[32] ではマルチホップを行う車両を地理的な要因により限定することでパケットのフラッディングを抑制している。まず、高速道路において道路を特定の距離 D_c で分割する。各車両は DGPS と事前に設定された道路の位置の基準である D_{ref} によって自車が現在どのセグメントに所属するかを計算する。また車両は CAM 等のメッセージから周囲の車両の位置情報、速度、進行方向を取得しているとし、その情報からセグメント内に存在できるのが自車が最長かどうかを判定する。自車が最長でセグメント内に存在できると判定した場合、その車両を segment leader とする。またセグメント内の車両で segment leader の認識の違いを是正するために CAM 等のメッセージに segment leader が誰か等の情報を含めている。

全ての車両は DGPS によって時刻が同期されているとし、長さ T_{mslot} のタイムスロットを保持している。この各タイムスロットの開始時刻、終了時刻は全ての車両で同期されている。各車両はタイムスロットごとに自車がマルチホップを必要とするパケットを保持しているかを確認する。保持している場合、その車両はそのパケット以外の全てのパケットの送信を次のタイムスロットまで延期する。車両はランダム長の時間 T_b の間周囲にチャンネルジャミング信号を送信する。複数の車両が同時にこの信号を送信した場合、最長の信号を送信した車両がパケット送信権を得る。ジャミング信号によって周囲の車両はパケット衝突を検知し、パケット送信を中止する。マルチホップパケット送信車両はジャミング信号送信直後に周囲の車両がパケットを送信していないことを確認し、CLEAR パケットを送信する。このパケットを受信した車両はそのタイムスロット内でマルチホップパケットが送信されると判断し、自車の一切のパケットの送信を次のタイムスロットまで延期する。CLEAR パケットを送信後車両はマルチホップパケットを送信する。受信した各 segment leader は送信元の位置、パケットの送信範囲、自車の位置から ACK パケットを送信する前の遅延時間 T_{cnt} を計算する。この T_{cnt} は送信元から遠くなればなるほど短くなるようにされている。 T_{cnt} 以内に他の segment leader からの ACK パケットを受信しなかった場合、その segment leader は ACK パケットを送信し、次のタイムスロットで受け取ったマルチホップパケットを送信する。

次にメッセージの分類に着目する手法が考えられる。CITS で扱われる安全に関するメッセージは CAM メッセージのみではなく DENM 等のイベントドリブンのメッセージも存在する。それぞれのメッセージでは遅延や PDR 等の求められる条件が異なる。このような様々なメッセージの送信の管理方法も問題点の 1 つといえる。[33] [34] ではこの管理方法に着目し

て解決を行なっている。[35]では安全に関する CITS のサービスから生成される通信メッセージを3つのレベルに分類しそれぞれに対して送信時の DSRC のチャンネルコントロールを変更することによって通信の信頼性と、通信の短い遅延の実現を行い、安全の質をより良いものにした。まず、3つのクラスのメッセージの分類方法として、ホップ数とサイクル数(筆者らは同じメッセージを繰り返し送信する回数をサイクル数と呼んでいる)を基準として、1ホップで2サイクル以上のメッセージを Class-one、2ホップ以上で1サイクルのメッセージを Class-two、1ホップで1サイクルのメッセージを Class-three と分類した。

次にそれぞれの Class に対して遅延を管理する手法を説明する。まず MAC 層において Class-one と Class-two のメッセージはサイズが0のバックオフウィンドウ、Class-three のメッセージにはサイズが0でないバックオフウィンドウを与える。また、バックオフカウンタが同時に0になった Class-one、two のメッセージ、Class-three のメッセージが存在する場合を想定して、Class-one、two の DIFS (DCF Inter Frame Space) を IEEE802.11p の DIFS より小さくしている。これによって Class-one、two のメッセージが必ず優先されて送信されるようになっている。これに加え Class-one、two のメッセージを送信する際に同時に busy tone と呼ばれるメッセージを発する。この busy tone はデータ通信で用いられる周波数帯を使用せず、データ通信の周波数帯で2ホップ分の範囲に到達することができるそれ以外の周波数帯を使用する。これによって2ホップ内の車両が優先度が低いクラスのメッセージの送信を中止し、速やかに緊急メッセージを伝搬させることができる。

次に Class-one、Class-two においてパケットの PDR を保障する手法を説明する。Class-one のような PDR をあげるために同じパケットを複数回送信するというメッセージは、例えば遮蔽物や電波干渉などによって本来届けられるべき範囲内に存在する車両に対しては複数回送信を行なっても PDR は変化しないと考えられる。そのため筆者らは Class-one のメッセージに対して、メッセージパケット受信車がパケットのコピーを送信することによりそのような車両に対してもメッセージが到達するようにした。このコピーを送信する際、メッセージ発信源の車両との距離を GPS を用いて計算し、以下の式を用いて先述した DIFS に加え、新たな送信前の遅延を挿入している。

$$t_{AD} = T_{max}(1 - \frac{d}{R})$$

ここで t_{AD} は assessing delay と呼ばれる遅延、 R は無線の通信可能距離、 d は発信源と受信者の距離、 T_{max} は事前に設定した t_{AD} の最大値である。この式は発信源から遠ざかるほど遅延が短くなっている。これは発信源から遠ざかるほど PDR が低くなる傾向があることから、離れた車両に対して優先的に送信を行うためである。発信源の車両は受信車が発するコピーの受信数がしきい値を超えなかった場合メッセージの期限がきれていなければ再送信を行う。

Class-two のような PDR ではなく到達範囲を重視するメッセージに対しては同様の手法を用いるとホップごとにコピーが大量に送信されることになり、フラッディングが発生してしまう。これを避けるために、メッセージ受信車は他の車両からコピーメッセージを受信した場合、AD timer を中止しコピーメッセージを送信しない。これによってコピーの大量送信を防ぐことができる。また先述した式の d を d_d に替えて遅延計算を行なっている。この d_d は送

信者と受信者の距離ではなく、その距離の道路に沿った方向の成分の値となっている。これによって直線の道路において受信した車両の中で最も送信車から離れている車両がはじめに送信を行うことになる。そのため1ホップあたりの距離が最長になるといえる。また、全ての受信車がコピーメッセージの送信を試みようとするため、冗長性が確保されており PDR もあげることができる。

3.2 Hybrid Network

この節では車両とその車両が発する IEEE802.11p によって形成される VANET に加えて、他のノードとの通信、他の無線通信である 4G、LTE を用いた複数のネットワークを用いた安全性に関わるメッセージの問題点の解決を図った研究を紹介する。

まず 4G、LTE を用いたネットワーク、携帯網の特徴を述べる。

- インターネットへの接続

携帯網はインターネットを経由している。そのためインターネットを利用して様々なサービスに接続することが可能である。

- 速い通信速度

IEEE802.11p の通信速度は最大 27Mbps である。それに比べ、LTE は下り 100Mbps、上り 50Mbps と非常に高速である。そのため比較的データ量が多いメッセージであっても IEEE802.11p に比べ短時間で送受信することができる。

- 不安定な遅延

後述する通り、LTE での通信はユニキャストとなっている。そのため送信先の IP アドレスを入手しなければメッセージを送信することができない。このことから LTE での通信は基本的にサーバーが存在し、サーバーを経由してメッセージの送受信が行われる。また、車両の密度や送受信されるメッセージの種類によってサーバーへの負荷が変化することが考えられる。これによってサーバーでの処理時間が変化してしまうため遅延が常に一定ではない。

- ユニキャスト

VANET と違い LTE を介した通信はユニキャストとなっている。そのため、安全に関わるメッセージのように送信車の周囲にいる車両全てにメッセージを送信するためにはユニキャストによって車両の台数分同じメッセージを送信しなければならない。

VANET では安全に関わるメッセージを作成するノードは車両であり、そのメッセージをもとに安全に関わる判断を下すアプリケーションも同様に車両内で動作することになる。しかし、携帯網を使用した場合、メッセージを作成するのは車両であるが、そのメッセージを元に判断を下すアプリケーションは車両のみならず、クラウド上のサーバーで動作することが可能である。

[3] ではクラウド上のサーバーで衝突検知を行うシステムを提案している。Fig.3.1 にシステムの概要を示す。このシステムでは車両や歩行者の携帯が常に 10Hz で CAM を LTE 経由

でサーバーに送信している。また、サーバーでは CAM から得た情報を保持しているテーブルとそのテーブルの情報を入力として衝突検知アルゴリズムが動作している。

まずサーバーは CAM を受信するとその生成時刻を確認し、現在時刻より 0.8 秒以上過去であればそのメッセージによる擬陽性の判定を回避するために破棄する。受信した CAM が有効であると判断した場合、CAM を処理して抽出した情報をテーブルに格納し、格納すると同時にサーバーはその CAM の送信元のノードに対し衝突検知アルゴリズムを実行する。実行する際にサーバーは広範囲に存在する多数のノードから CAM を受け取っており、全てのノードに対してアルゴリズムを実行するのは処理時間と効率の関係で避けなければならない。そこで筆者らは以下に示す range of action という範囲を設けた。

$$Radius = \max\{Speed \cdot t2c_t, s2c_t\}$$

ここで $Speed$ は送信元のノードの速度 $t2c_t$ と $s2c_t$ は事前に設定された基準値であり、それぞれアルゴリズムが警告を送信すべきか判断するために探索すべき現在からの時間間隔とノード同士の距離である。この Radius の範囲内に存在する各ノードに対して衝突アルゴリズムを実行する。このアルゴリズムはサーバーのテーブルにある送信元のノードと対象のノードの情報に含まれている位置、速度を元に t を変数とする 2 つのノード間の距離を求める。この距離の微分値を用いて極値を取る時の t が現在から $t2c_t$ 時間内であればその極値が $s2c_t$ 以下であるかを確認する。 $s2c_t$ 以下である場合、サーバーは衝突の危険があると判断し対象のノードに対し警告メッセージを送信する。

全ての車両が LTE を用いてサーバーと通信を行うと、通信量が膨大になる。これによって

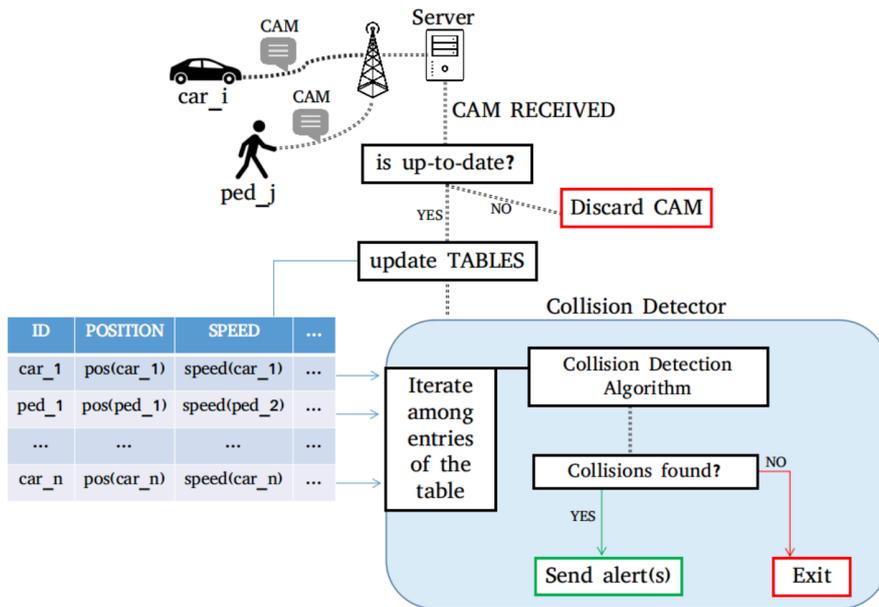


図 3.1. Collision avoidance system (出典: [3])

通信の遅延が発生し、安全に関わるアプリケーションには重大な影響を及ぼす。[4] ではこの通信量の膨大化を防ぐため、車両の種類に応じて通信の役割を分けることによって改善を行っている。筆者らは道路上の車両をバス、タクシー、ゴミ収集車等の公共交通機関や公共機関の車両、一般的な個人車両の2種類に分け、それぞれを HTN (High Tier Nodes)、LTN (Low Tier Nodes) と呼んでいる。HTN、LTN のどちらも LTE、DSRC (IEEE802.11p) を使用することができる。Fig.3.2 にシステムの概要図を示す。VSA (Vehicular Safety Application Server) と TCC (Traffic Control Centre Server) はそれぞれインターネットに接続されており、車両は LTE を通じて VSA、TCC に接続することができる。HTN は毎秒ごとに自車の位置、速度、ID を DSRC を用いて周囲にブロードキャストする。LTN はこのメッセージを複数の HTN から受け取ると、それらを用いて最適な HTN を導出し、その HTN に対し自車の登録を行う。一度登録が行われると LTN は VSA、TCC との通信は HTN を介して行われる。また、LTN が HTN からメッセージを受け取れなかった場合は、LTE で直接 VSA、TCC と通信を行う。

VSA で動作している安全に関わる様々なアプリケーションはそれぞれ SAI (Safety Application Identifier) を保持しており、車両はその SAI を用いてどのアプリケーションの情報が必要なのかを示す。HTN に登録した LTN は HTN に対して SAI を必要となる範囲、周波数と共にメッセージとして送信する。受信した HTN は受け取ったメッセージを元に登録されている全ての LTN の車両の位置情報等を入手する。HTN はこの情報を TCC に送信することで交通状況等をアップデートする。また、VSA から SAI を用いて情報を取得するとその情報を必要としている LTN に対し送信を行う。この時、同じ SAI に関するアプリケーションの情報の要求を1回にまとめることによって通信の効率化を図っている。

携帯網を使用することによってインターネット上の様々なサーバーに車両はアクセスできるようになる。これにより安全性に関わるメッセージのみならず、車両の乗客車の快適性、利便性を向上させるための通信も可能になる。例えば、VICS のように渋滞情報を配信することによってより良い経路を検索可能にすること、ETC のような道路交通に関わる決済を可能にす

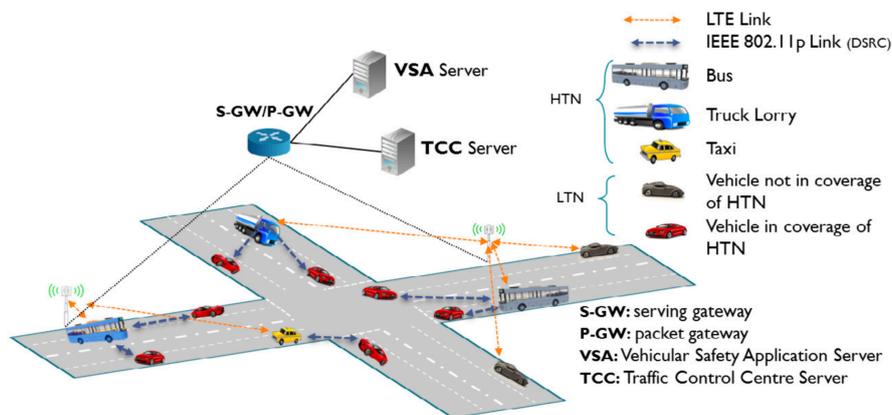


図 3.2. Multitier Heterogeneous Adaptive VANET Framework system (出典: [4])

ることができる。また、道路交通に関するものだけでなく動画配信、広告等の様々なサービスを利用することが可能になる。しかし、これらのパケットは通信量の増加へとつながり、通信の遅延、パケットロスへと繋がる可能性がある。この際、安全に関わるメッセージはその影響を受けずに必要とする車両全てに届けられなければならない。このようにやりとりされるパケットは、その内容によって優先されなければならないという特徴がある。

VANETのみを使用して安全性に関わるメッセージを送受信した場合、それらのメッセージのみで通信が飽和状態になってしまうことが考えられる。また、自動運転になることによって乗客への新たなサービスの提供が想定される。そのようなサービスが通信を使用する場合、VANETを用いて通信を行うと通信帯域以上のデータが送受信されることからパケットが届かない、遅延が発生するという可能性が生じる。[36]では、車両が通信に用いるメッセージの種類によって通信媒体を使い分けることにより通信負荷の分散を行なった。筆者らは通信メッセージを安全に関わるメッセージの Safety messages と関わらない Non-safety messages に分け、Safety messages は IEEE802.11p を用いて周囲にブロードキャストを行い、Non-safety messages は LTE を用いて通信を行うことにより、Safety messages は非常に重要となる遅延を短くし、Non-safety messages は安定した高品質の通信の実現を可能にしている。

3.3 Proxy CAM

[5]ではCAMを使用したシステムの問題点として2つ取り上げている。1つ目は車社会のCITSへの移行の過渡期についてである。この過渡期では従来の車両であるCITSの設備が実装されていない車両とCITSの設備が整っている新たな車両が混在することが想定される。この状況においてCITSを使用している車両は自車のセンサーで検知できた車両以外に関してはCAMから得られた情報により認識する。裏を返せば、自車のセンサーで検知できない死角に存在するCAMを送信していない従来の車両、自転車、歩行者等に関しては認識をすることができず、これらの存在が事故につながる危険性がある。2つ目は、CAMのパケットロスである。これはCITSにおいて通信に使用されているIEEE802.11pによるものである。前述の通り、IEEE802.11pは障害物に遮蔽されやすい特性と通信範囲が短いという特性を持つ。そのため、建物、大型トラック等により11pが遮蔽され、CAMが十分な範囲に送信されないという問題が生じる。

これら2つの問題点を解決するため筆者らはProxy CAMシステムを提案した。Fig.3.3にProxy CAMシステムの概要を示す。このシステムは主に4つの機能に分けられ、それぞれ車両、歩行者等の検知、検知データの集約、検知データからProxy CAMの生成、生成したProxy CAMの送信である。

車両、歩行者等の検知ではセンサーを用いて周囲の車両を全て検知し、CAMに必要な情報を取得する。基本的なデータに加え可能であれば追加のデータを取得すし、このデータを取得する際にそれぞれの車両にIDを付与する。このIDはセンサーから得た情報、例えば車両のナンバープレート等を用いて付与を行う。IDを付与するのに必要な情報を取得できればその情報からIDを付与し、できなければランダムなIDを付与する。このIDは継続的に検知して

いる車両に対しては一貫した値を使用する。

次に、検知データの集約では SFLDM (Sensor Fusion Local Dynamic Map) と呼ばれるデータベースに検知したデータを格納する。格納する際に、複数のセンサーから車両の情報を得ることを想定し、重複する車両のデータを位置や速度、進行方向等を用いて集約する機能も担う。

検知データから Proxy CAM の生成では基本的には CAM の生成方法と同様に生成を行う。しかし、CAM と違い Proxy CAM は外部のシステムによって生成されるものであり、全ての情報を埋めることはできない。そのため、取得できていない情報は 'unknown' とする。

PDU ヘッダーの stationID は上位 24bits を 1 としたプレフィックスを、下位 8bits をランダム値とした値を使用し、生成した Proxy CAM の送信では、送信機は IEEE802.11p を物理層で、GN/BTP をネットワーク層に使用して送信を行う。また送信機は 1 台に限らず、複数台設置することによって送信範囲の拡大を行なっている。

この提案手法によって、交差点で交差する各道路上に車両が存在した場合、従来手法の、車両のみが自らの CAM をブロードキャストする方法に比べ、建物等の遮蔽物を結果的に回避できる提案手法は、大幅に送信可能範囲を広げることができ、交差点からより手前の地点で相手の車両を認識することが可能となっている。また、我々の先行研究として携帯網を利用した UDP/IPv6 での遠隔地への配送 [37] を行う Proxy CAM システムの拡張を提案した。さらに、[38] では Proxy CAM システムの要求事項を分析している。

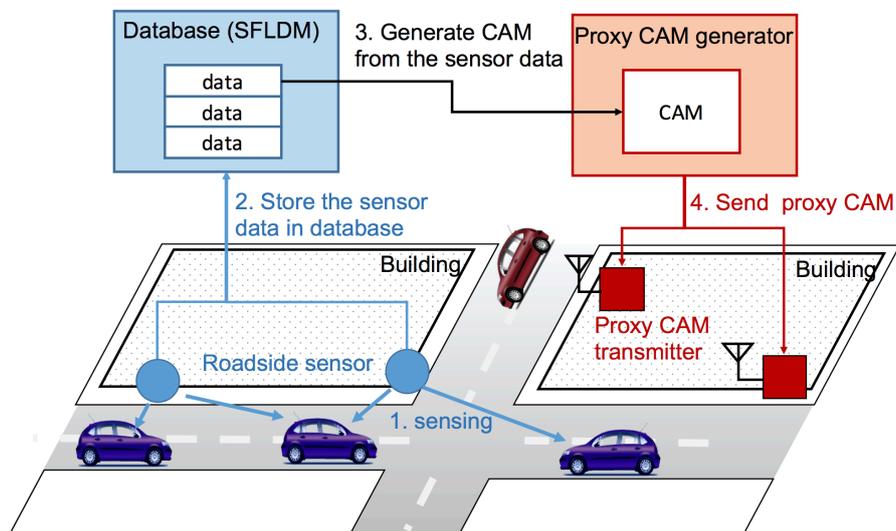


図 3.3. Proxy CAM システム (出典: [5])

第 4 章

Grid Proxy CAM

この章では交差点における事故防止のため、従来の車両が自車の CAM を作成し周囲の車両にシングルホップで送信を行う手法での問題点を述べた後、その問題点から導かれる要件を示す。次に、その要件を満たす路肩ネットワークを構築する Grid Proxy CAM システム [39] を提案し、このシステムの構成を詳細に述べる。また、この Grid Proxy CAM システム内で新たに生じる IEEE802.11p の帯域に関する問題を解決するために、このシステム内で動作する Proxy CAM パケットの選択を行う Distance Priority アルゴリズムについてその詳細を述べる。

4.1 要件定義

はじめに、本研究では交差点に信号機が設置されていない環境を想定している。このような環境は現在は大通りでは少ないと考えられる。しかし、今後自動運転技術が発展、普及することにより全ての車両が自動運転車となった場合、人間にとっては必要であった信号機は交通の効率化の妨げとなることが考えられる。信号機の目的は交差する各道路を走行中の車両同士、右折する車両、歩行者が衝突しないようにすることである。この目的は各車両が交差点付近の車両、歩行者の位置を把握していればシステムが速度を変えたり、停車することにより達成することが可能である。そのため、今後自動運転技術の発展によって信号機が廃止されることを本研究では想定している。

このような交差点において交差点付近の車両、歩行者を認識する方法として、車両の CAM をその車両のみが生成しシングルホップでブロードキャストするという従来手法では、以下の 2 つの問題点が考えられる。

- 故障車と歩行者の存在

CITS では各車両が必ず CAM を定期的に送信している前提で安全に関わるサービスが動作している。しかし、仮に機械の故障で CAM を送信できていない車両がいた場合、この車両を発見する方法は車両につけられているカメラなどによるセンサーのみとなる。これは直線の道路であれば有効であるが、カーブ、交差点の右折時、前方に大型車

が存在する時は検知できない可能性が高い。また、歩行者に関しては携帯電話を用いて CAM を送信する研究もなされているが、電池切れ、携帯電話を所持していない場合は同様に検知することができない。

- 電波の減衰による CAM 受信範囲の死角

IEEE802.11p は周波数帯が 5.9GHz である。この高周波数帯は障害物によって遮蔽されやすい。そのため交差点において交差する各道路に車両が存在する場合、交差点に面する建物によって IEEE802.11p が遮蔽されてしまい、CAM を受信できなくなることがある。また、カメラ等のセンサーも同様に建物によって視界を遮られてしまい、検知することは不可能である。これによって車両がお互いの存在を認識することができない。

この 2 つの問題を解決するため、本研究では前章で紹介した Proxy CAM システムを用いる。しかし、この Proxy CAM システムを用いても問題が 3 つ残る。Fig.4.1 にそのうちの 2 つの問題点を示す。

- 快適性の追求

Proxy CAM システムは交差点において衝突を起こさないために考案されたシステムである。安全面においては従来手法に対し改善されたが、このシステムを利用して、例えば交差点の交通情報を遠方の車両に知らせることにより渋滞回避のための経路変更を行える等の更なる道路交通の効率化、快適性の追求を行うことができない。この効率化、快適性を高めるために可能な限り遠方まで Proxy CAM を送信する必要がある。

- 依然と残る CAM 受信範囲の死角

Proxy CAM システムによって交差点付近にいる車両の CAM を代理で生成しブロードキャストを行なっているので建物による遮蔽は交差点付近ではなくなった。しかし Fig.4.1 のように 2 台の車両が直進しており、同時に図の上部、中央の交差点に差し掛かる場合、快適な減加速度で交差点前で速度を落とすためにはお互いの車両の位置を十分事前に知っておく必要がある。しかし、図の下部、中央の Proxy CAM 装置の Proxy CAM は建物によって遮蔽されてしまい受信することができない。

- 通信範囲の短さ

IEEE802.11p は平野部で 800~1000m [40] まで到達可能である。しかし、都市部では建物や大型トラック等の遮蔽物、マルチパスによって到達範囲が短くなることが考えられる。これによって安全に必要である送信範囲に CAM を送信することができない可能性が生じる。送信電力の増幅によって解決することはある程度可能であるが、前述した死角部分を克服するのは困難である。

以上の 3 つの問題点を解決するため Proxy CAM システムを用いて更なるシステムの拡張を行う。これらの問題点から導かれるシステムに求められる要件を以下に示す。

1. 快適性を追求するため、可能な限り死角の少ない広範囲に Proxy CAM が送信できること

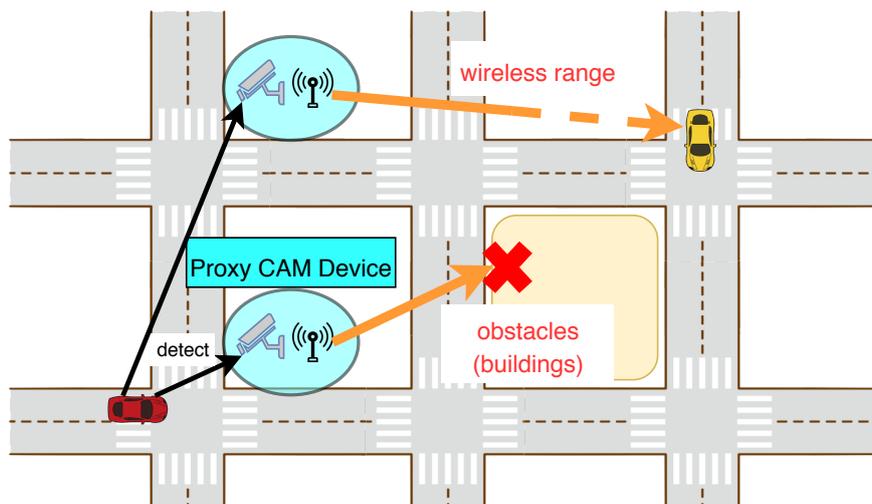


図 4.1. Proxy CAM システムの問題点

2. 安全性を最優先させるため Proxy CAM のパケット受信率が受信する車両から近い範囲は非常に高いこと
3. Proxy CAM の生成から受信までの遅延が短いこと

これら 3 点を解決するため本研究では Grid Proxy CAM システムとそのシステム内で動作する Distance Priority アルゴリズムを提案する。

4.2 手法の概要

この節では前節で述べた 3 つの要件を満たすために本研究で提案する Grid Proxy CAM とそのトポロジー内でパケットの選択を行う Distance Priority について詳しく述べる。

4.2.1 用語定義

はじめにこの手法で用いる用語の新たな定義、再定義を行う。

- Proxy CAM

[5] で紹介されている、各車両の CAM を外部の装置が代理で生成を行なったメッセージのことである。メッセージの構造、内容は CAM と同様であるが、外部の装置が取得できる情報のみが挿入されている。
- Proxy CAM 装置

Proxy CAM を生成する装置のことである。この装置は交差点に存在する車両、または歩行者をセンサー等で検知し、Proxy CAM を生成し、IEEE802.11p でブロードキャストを行う。本研究ではセンサーの検知範囲が重ならないとし、SFLDM (Sensor Fusion Local Dynamic Map) は本研究の範囲外とする。同様にブロードキャストを行う送信

機も1台としている。これはCAMのブロードキャストを行うIEEE802.11pのチャンネルがCCHであり、チャンネル数が1であるため、送信機を増設しても相互に干渉してしまい機能向上には繋がらないと考えられるからである。

- Detector

Proxy CAM装置を本研究の提案手法のために機能別に2つに分解したうちの1つである。Detectorは周囲の車両、歩行者を検知し、Proxy CAMを生成する機能を担う。検知装置として、カメラ、レーダー、ライダー、またはその他のいかなる検知装置を使用しても良い。検知装置は複数存在してもよいが、検知範囲は重ならないように配置されているとする。

- Disseminator

Proxy CAM装置を本研究の提案手法のために機能別に2つに分解したうちの1つである。DisseminatorはそのProxy CAMをIEEE802.11pを用いて周囲にブロードキャストする機能を担う。

4.2.2 Grid Proxy CAM

まず、1つ目の要件、“快適性を追求するため、可能な限り死角の少ない、広範囲にProxy CAMが送信できること”を達成するためにGrid Proxy CAMを提案する。Fig.4.2にGrid Proxy CAMの概要を示す。

このシステムはProxy CAM装置をGrid状に接続することによってネットワークを形

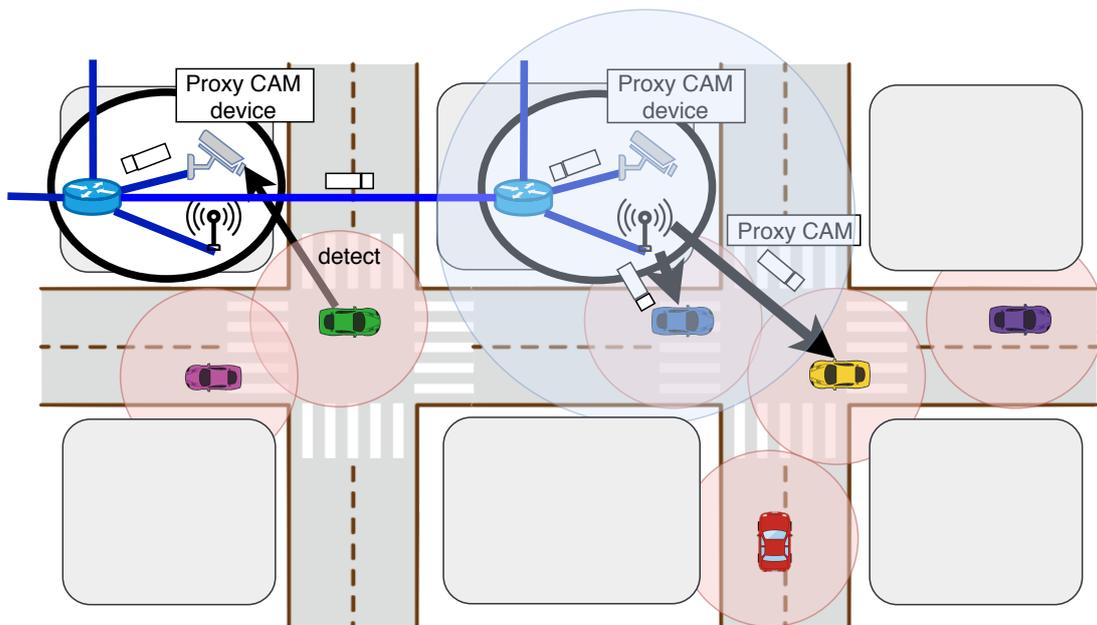


図 4.2. Grid Proxy CAM の概要

成している。はじめに、Proxy CAM 装置をその機能を元に Detector と Disseminator の 2 つに分解する。また、この Detector と Disseminator はルーターに繋がっており、Detector と Disseminator は直接は接続されていない。各 Proxy CAM 装置は交差点に設置されており、互いに道路に沿ってイーサネットケーブルによって接続されている。これにより各 Detector で生成された Proxy CAM は装置内の Disseminator に送られてブロードキャストされるだけでなく、ルーター間で送受信され、他の Proxy CAM 装置の Disseminator でもブロードキャストされるようになる。ルーターは固定 IP を保持しており、ルーティングプロトコルを用いて各ルーターが各 Proxy CAM 装置までの経路を取得している。各 Detector は事前に送信先の Disseminator のリスト `dest_IP_list` を保持しており、このリストには任意に設定された Detector からの送信距離の範囲内に存在する Proxy CAM 装置の Disseminator が登録されている。

このシステムを Detector 側の手順、Disseminator 側の手順に分けた図を Fig.4.3、Fig.4.4 に示す。まず、Fig.4.3 の Detector D に着目すると、CAM の最高送信周波数である 10Hz に合わせるため、D は 0.1 秒毎に検知装置を作動させ、交差点付近の車両、通行人等の交通事故に繋がる物体の検知を行う (図中緑色の線)。この検知の範囲や精度は検知装置に依存すると考えられるが、本研究では交差点から半径 50m 以内の物体の検知を 100% 行える検知装置としている。検知した物体に対しては ID を付与し、前回の検知時に同じ物体を検知していた場合は同じ ID を使用する。この ID は、ナンバープレート等のセンサーから得た物体固有の情報、例えば車両のナンバープレート等を用いて付与を行う。ID を付与するのに必要な情報を取得できればその情報から ID を付与し、できなければランダムな ID を付与する。

検知装置は装置の位置を原点としたそれぞれの物体の 2 次元座標の位置や進行方向、さらに以前も検知していればその差分からわかる速度、減加速度等を算出する。また、それ以外にも

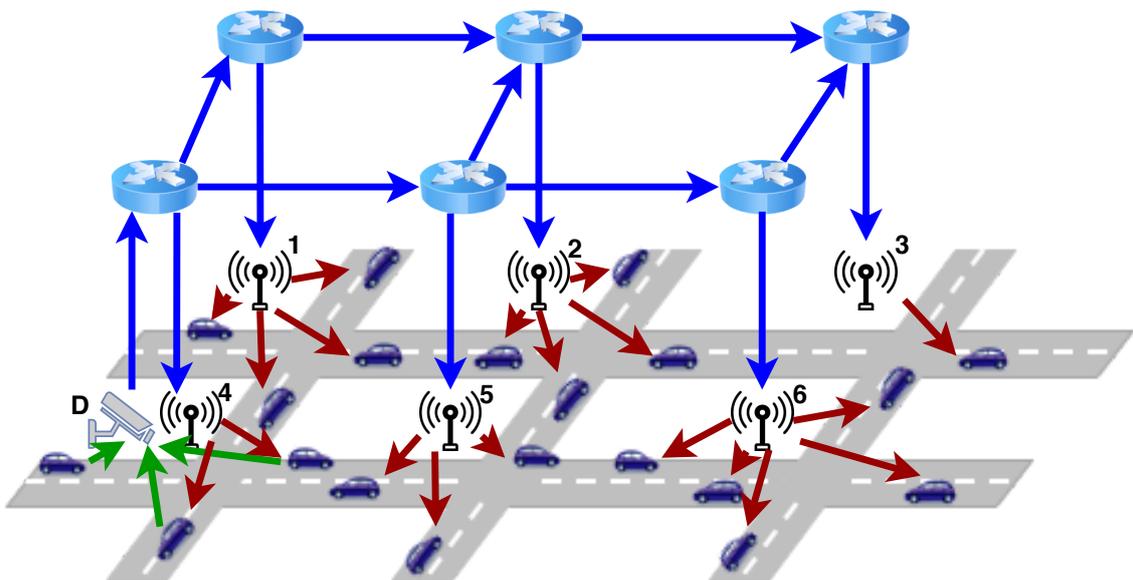


図 4.3. Grid Proxy CAM システムの Detector に着目した概要

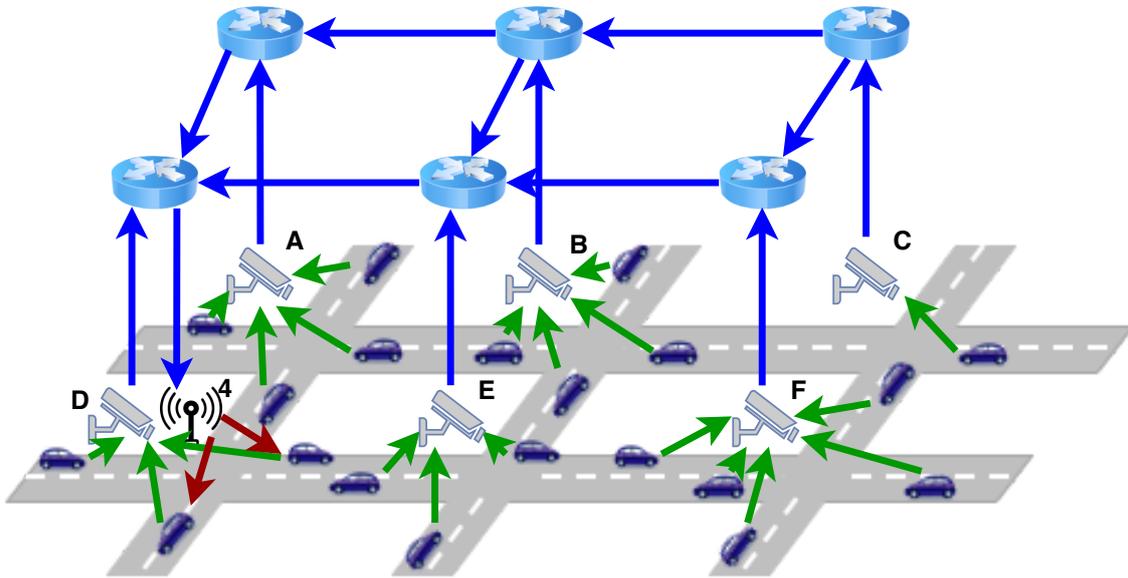


図 4.4. Grid Proxy CAM システムの Disseminator に着目した概要

CAM の情報として使用可能な情報、例えば物体の種類 (通行人、車両、自転車等) や、車両であればその種類 (緊急車両、公共交通機関等) などを可能な限り取得する。D はその後検知装置から得た情報を元に、Proxy CAM の前身となる UDP パケットの作成を行う。この時、そのままでは使用できない情報が存在する。例えば位置情報に関しては CAM では緯度、経度で示す必要がある。予め Detector は検知装置の緯度、経度情報を保持しているとして、それを元に物体の位置情報を緯度、経度に変換する。このような情報の変換を行い、UDP パケットのデータ部分に Proxy CAM に必要な情報を挿入する。データ部分の形式は可読性の高い json 形式や、配列など様々な形式が考えられるが、後述する本実装では各情報を “,” で区切った文字列にして挿入している。また、取得できなかった情報は ‘unknown’ を挿入する。

UDP パケットを作成後、D は保持している `dest_IP_list` に挙げられている Disseminator の数の分だけ各 UDP パケットを複製し、各 Disseminator の IP アドレスを送信先として UDP パケットの IP ヘッダに挿入し、イーサネットケーブルで直接接続されているルーターに送信する。ルーターは UDP パケットを受信すると、ルーティングテーブルを用いて各 Disseminator (図中では Disseminator 1~6) へパケットをフォワードする (図中青色の線)。Disseminator は UDP パケットを受信すると、UDP パケットの情報から Proxy CAM を生成し、GN/BTP プロトコルヘッダを付け、即座に IEEE802.11p でブロードキャストを行うために MAC 層の EDCA の AC_BE クラスの queue に入れる。この時、queue が埋まってしまっていた場合、生成した Proxy CAM はドロップされる。ブロードキャストされた Proxy CAM はその Disseminator がある交差点付近にいる車両等で受信される (図中赤色の線)。このことによって図中の Disseminator 1~6 の周辺にいる車両は Detector D 付近の車両情報を手に入れることができる。

同様に、Fig.4.4 の Disseminator 4 に着目すると、先述の様に Detector A~F が Proxy

CAMの前身であるUDPパケットを作成後、保持している送信先のDisseminatorのリストに従って各Disseminatorにパケットを送信する。そのひとつであるDisseminator 4はUDPパケットを受信すると、UDPパケットの情報からProxy CAMを生成し、即座にqueueに入れる。この際、queueが埋まってしまっていた場合、生成したProxy CAMはドロップされる。4でブロードキャストされたProxy CAMはその設置されている交差点付近の車両等で受信される。このことによって図中のDetector A~Fの設置されている交差点付近の車両の情報が全てDisseminator 4周辺の車両で共有されることになる。

4.2.3 Distance Priority

次に、2、3つ目の要件、“安全性を最優先させるためProxy CAMのパケット受信率が受信する車両から近い範囲は非常に高いこと”、“Proxy CAMの生成から受信までの遅延が短いこと”を達成するため、Disseminator内で動作する、受信したProxy CAMの選択を行うDistance Priorityアルゴリズムを提案する。

まず、本研究ではDetector、Disseminator、ルーターでの処理による遅延は十分に小さくかつイーサネットケーブルも十分にProxy CAMパケットの送信量に耐えうるものとしている。Grid Proxy CAMシステム内でProxy CAMパケットの遅延や、パケットのドロップが発生する箇所はDisseminatorのIEEE802.11pのスループット部分である。IEEE802.11pの通信速度は3~27Mbpsとなっている。しかし、Proxy CAMは各メッセージのサイズがとても小さい。そのため、ヘッダー部分のサイズの影響が大きくなり実際の通信速度は大幅に落ちると考えられる。ここで11pの通信速度よりも多くのProxy CAMをDisseminatorが他のDetectorから受信してしまうと、送信できるようになるまでDisseminatorのMAC層のqueueにためられることになる。そのためqueueでの待ち時間の分遅延が発生すると考えられる。また、queueが埋まってしまった場合、新たに受信したProxy CAMは破棄されてしまい、これがパケット到達率に影響を及ぼすと考えられる。

遅延が発生すると、受信した車両は遅延の長さ分だけの過去の情報を得ることになる。そのため、遅延が長くなってくるとその情報に含まれている位置情報と受信時の位置は大きく異なってくる。例えば50km/hで走行の車両の情報が0.5秒の遅延で受信された際、その位置の誤差は約7mとなる。これは交通の安全に大きく影響を及ぼすと考えられるため、できるだけ短くしなければならない。パケット到達率も同様に低下が激しいと各車両の認識率が下がってしまう。認識率の低下は交通事故に直結するため、できるだけ高いパケット到達率を保たなければならない。しかし1つ目の要件である交通の快適性の向上を達成するためにより広範囲の交通状況の情報が求められるが広範囲になるとその分Proxy CAMパケットの量が増大してしまう。そのため安全性の向上と快適性の向上のトレードオフの関係をうまく両立させなければいけない。また、交通量は例えば、日中と夜間では大きな差があるのと同様に常に変化するものである。その変化に応じて各Detectorが生成するパケットの量も変化する。そのためリアルタイムでProxy CAMパケットの数を監視し、その量に応じて安全性の向上に重きを置くか、快適性の向上に重きを置くかを変化させる必要がある。

そこで、この queue に入れるパケットを受信した Proxy CAM の情報を用いて選択を行う。Fig.4.5 に Distance Priority アルゴリズムを用いた Grid Proxy CAM システムのフローチャートを示す。このアルゴリズムは受信車両から近い範囲に関する情報は交通安全に重要な影響を及ぼすと考えられることから、“受信車両に近い”とほとんど同義である、“ブロードキャストする Disseminator から近い”範囲の Proxy CAM はパケット到達率を常に 1 に近い値を保持し、安全に影響を及ぼしにくい遠くの範囲の Proxy CAM は交通の快適性の向上のために、通信帯域が余っていれば送信を行うという距離に応じてリアルタイムで優先度に傾斜をかけるアルゴリズムである。

Proxy CAM にはその対象の車両、歩行者の位置情報が含まれている。この位置情報は緯度、経度で表されているので、この位置情報と受け取った Disseminator の緯度、経度情報を元に送信を行う地点から Proxy CAM の対象となっている車両、歩行者までの距離、distance を計算する。また同時に Disseminator は queue の占有率、queue_occupancy を取得する。こ

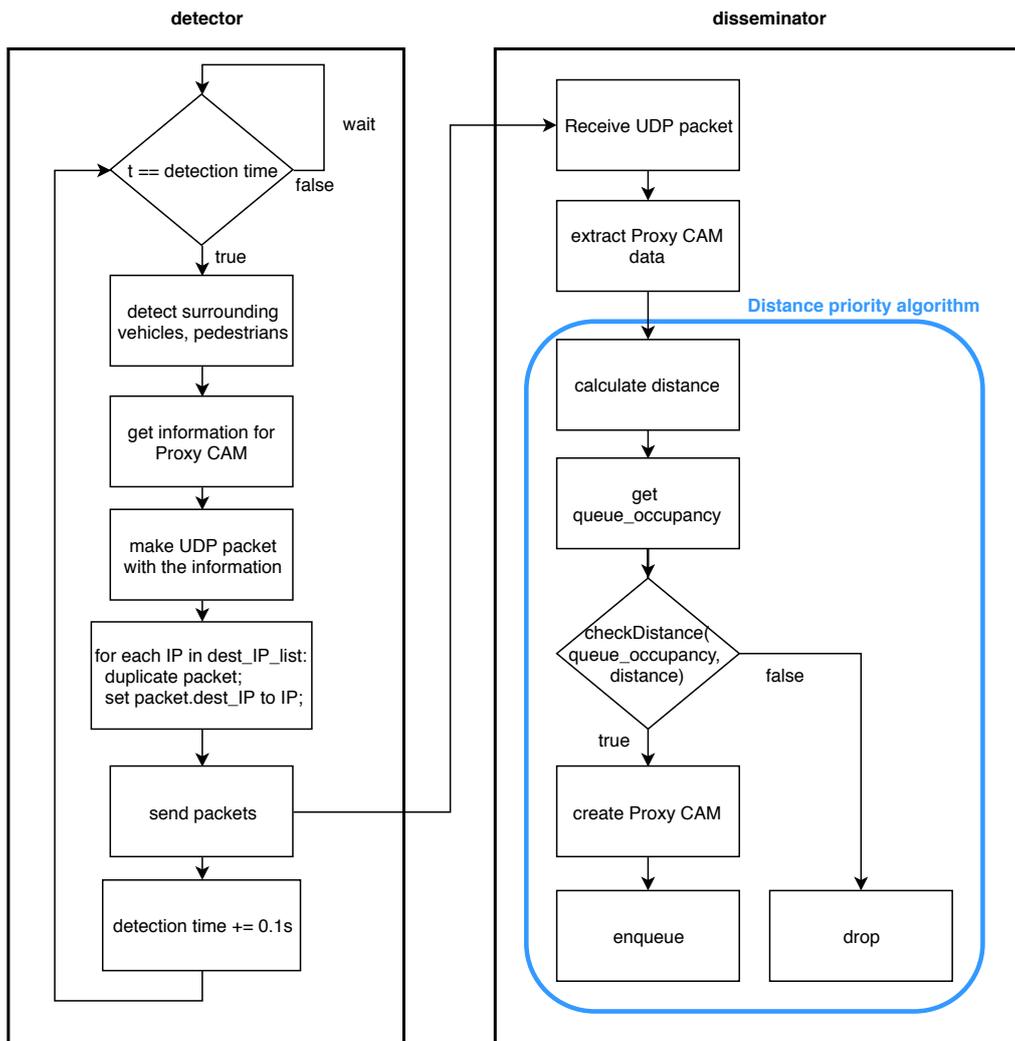


図 4.5. Distance Priority アルゴリズムを含む Grid Proxy CAM システムのフローチャート

の2つの値 *distance*、*queue_occupancy* を入力として *checkDistance* を行う。*checkDistance* は Proxy CAM の距離と *queue* の占有率を元に Proxy CAM を生成するかパケットをドロップするか判定する関数である。この関数は様々な関数が考えられるが、本研究では以下の式で判定を行う。

$$queue_occupancy < 1 - distance / max_dist$$

ここで *max_dist* は事前に設定された値であり、各 Disseminator が受け取る Proxy CAM の最大距離である。この判定式が true であれば Proxy CAM を生成し、false であればパケットをドロップする。この判定式によって *queue* の占有率が高くなると、Disseminator から遠い位置情報を含む Proxy CAM から順にパケットがドロップされる。また、*queue* が埋まる前からドロップを始めるので、Distance Priority を使用しない場合に比べ、*queue* の占有率が低くなる。そのため遅延を短くすることができる。

第 5 章

実装

5.1 仮想環境

5.1.1 SUMO

SUMO (Simulation of Urban MObility) [41] は広域の道路のネットワークにおいて自動車に関わる様々な交通シミュレーションを行うシミュレータである。仮想的な道路を作成する、OSM (Open Street Map) から道路を抽出することにより道路を作成し、道路上で車両を走行させることができる。また、経路を作成することにより任意の経路を車両に走行させたり、車両の出現周期を定義することで車両の密度を変化させることができる。さらに、片側 2 車線の道路や交差点等での車両の衝突回避、信号機の設置等を行うことができるとも自由度の高いシミュレータとなっている。このシミュレータを用いて車両の挙動を出力し、後述する Artery での入力として使用する。

5.1.2 OMNet++

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) [42] はネットワークシミュレーションの作成に特化した C++ で書かれているライブラリとフレームワークである。有線、無線の通信ネットワークのみならず半導体チップ内のネットワーク、待ち行列ネットワーク等もシミュレーション可能である。OMNeT++ には複数のプロジェクトがあり、その内に有線、無線、モバイル端末のネットワークをシミュレーションできる INET、SUMO を用いて車車間通信のシミュレーションができる Veins などが含まれている。

5.1.3 Artery

Artery [43] は OMNeT++ のプロジェクトのひとつであり、車両と車両、設備等の様々な通信を表す V2X 通信のシミュレーションが行える。このプロジェクトは INET、Veins、車車間通信に関するプロトコルの実装である Vanetza を統合したものとなっている。また、SUMO を用いて自動車の交通シミュレーションを行い、同時にその出力を受け取ることで車両の

通信をシミュレーションしている。本研究では Artery を用いて Grid Proxy CAM システム部分を INET、車両の通信、通信の建物による遮蔽を Veins、CAM 等の生成を Vanetza を用いてシミュレーションを行なっている。

5.2 想定シナリオ

本研究では比較実験のため3つの想定シナリオを実装した。この節では各想定シナリオについて詳細を述べる。

5.2.1 Proxy CAM

[5] で提案されている Proxy CAM を用いたシナリオである。各交差点に1台 Proxy CAM 装置を設置する。各 Detector は0.1秒ごとに周囲の車両、歩行者を検知し、Proxy CAM に必要な情報である、位置情報、速度等を計算し、その情報をデータ部に入れた UDP パケットを生成する。また、Detector は同じ Proxy CAM 装置内の Disseminator の IP アドレスを事前に保持しており、その IP アドレスを UDP パケットの宛先 IP アドレスに挿入する。ルーターは Detector から UDP パケットを受信後、Disseminator にフォワードする。Disseminator は Proxy CAM の UDP パケットを受信するとデータ部分から Proxy CAM の情報を取得し、Proxy CAM パケットを生成する。Proxy CAM パケットを生成後、IEEE802.11p を用いて送信を行う。

5.2.2 Non Priority Grid Proxy CAM

本研究で提案する Grid Proxy CAM システムを使用し、Disseminator 内で Proxy CAM の UDP パケットを受信時に Distance Priority を使用しないシナリオである。同じ Proxy CAM 内の Detector、Disseminator、ルーターは L2 スイッチングハブを介してイーサネットで接続されている。また、各 Proxy CAM 内は LAN となっており、ネットマスクは 255.255.255.0 となっている。さらに各ルーター、Detector、Disseminator は固定 IP アドレスを保持している。ルーター間も同様に各ルーターは固定 IP アドレスを各 NIC に対し保持している。また、ルーター間ではルーティングプロトコルにより経路の交換が行われている。各 Detector は0.1秒ごとに周囲の車両、歩行者を検知し、Proxy CAM に必要な情報である、位置情報、速度等を計算し、その情報をデータ部に入れた UDP パケットを生成する。また、この UDP パケットは事前に作成されている送信先の Disseminator のリストに含まれている IP アドレスの数だけ複製され、宛先 IP アドレスにはリスト内の各 IP アドレスが挿入される。この Disseminator のリストは送信元の Detector から半径 1000m 以内にある Disseminator 全てを含んでいる。

UDP パケットの作成後、Disseminator はパケットをルーターに送信する。ルーターは Detector から UDP パケットを受信後、Disseminator にフォワードする。Disseminator は Proxy CAM の UDP パケットを受信すると、データ部分から Proxy CAM の情報を取得し、

Proxy CAM パケットを生成する。Proxy CAM パケットを生成後、IEEE802.11p を用いて送信を行うが、送信ができない場合、MAC 層の queue に enqueue される。queue のサイズは 1000pkts とし、queue が埋まっている場合は新たに受け取った Proxy CAM パケットはドロップする。IEEE802.11p は queue を確認し、パケットが入っていればパケットを順に取り出し、ブロードキャストを行う。

5.2.3 Distance Priority Grid Proxy CAM

Non Priority Grid Proxy CAM に比べ Distance Priority アルゴリズムが加えられたシナリオである。Proxy CAM 内、ルーター間のトポロジーと IP アドレスの設定、RIP 等は Non Priority Grid Proxy CAM と同じである。また、Detector の車両、歩行者検知、UDP パケット作成も同様の動作を行う。Disseminator は Proxy CAM の UDP パケットを受信するとデータ部分から Proxy CAM の情報を取得する。この情報から Proxy CAM の対象となっている車両、歩行者の位置情報を取得し、Disseminator の位置情報と比較して距離を計算する。

同時に Disseminator は現在の queue の Proxy CAM パケットによる占有率を計算し、checkDistance 関数の入力とする。各 Disseminator が受け取る Proxy CAM の最大距離、max_dist は 1000m として計算を行う。checkDistance 関数が false を返した場合、受け取った Proxy CAM の情報はドロップする。true を返した場合、UDP パケットの Proxy CAM の情報を用いて Proxy CAM パケットを作成し、queue に入れる。Non Priority Grid Proxy CAM のシナリオと同様に queue のサイズは 1000pkts とした。IEEE802.11p は queue を確認し、パケットが入っていればパケットを順に取り出し、ブロードキャストを行う。

5.3 地図

この節では前節で述べた 3 つのシナリオのシステムを前述した SUMO、OMNET++, Artery を用いてシミュレーションを行なった。シミュレーションに用いた地図は理想的な地図である Grid 状の地図と実際の文京区の地図を用いた。また、シミュレーションは 2 次元で行なっており、高さによる地形の変化は考慮しないとし、それぞれについて説明する。

5.3.1 Grid 状の地図

この地図は仮想的な地図であり、Grid 状に作成されている。Fig.5.1 にその地図を示す。図中央に設置されている rsu は次章で述べるが、評価のため設置したノードであり、シナリオには影響を及ぼさない。同様に図中の A、B は次章で述べるが、評価実験時の車両の走行経路である。赤く示されている図形は建物を表し、一辺が 90m の正方形となっている。この建物は電波に対する障害物として利用しており、送信元、受信先を直線で結んだ際に建物の辺を通過していた場合は辺 1 つにつき 9db 電波が減衰する。また、建物内を通過している場合は 1m あたり 0.4db ずつ電波が減衰する。建物の間には縦横に道路が引かれており、交差する地点には Proxy CAM 装置が設置されている。各 Proxy CAM 装置の間隔は 100m となっている。

Grid Proxy CAM システムを使用する場合は道路に沿って隣接する Proxy CAM 装置同士をイーサネットケーブルで接続している。図中の黒い線がイーサネットケーブルを表す。

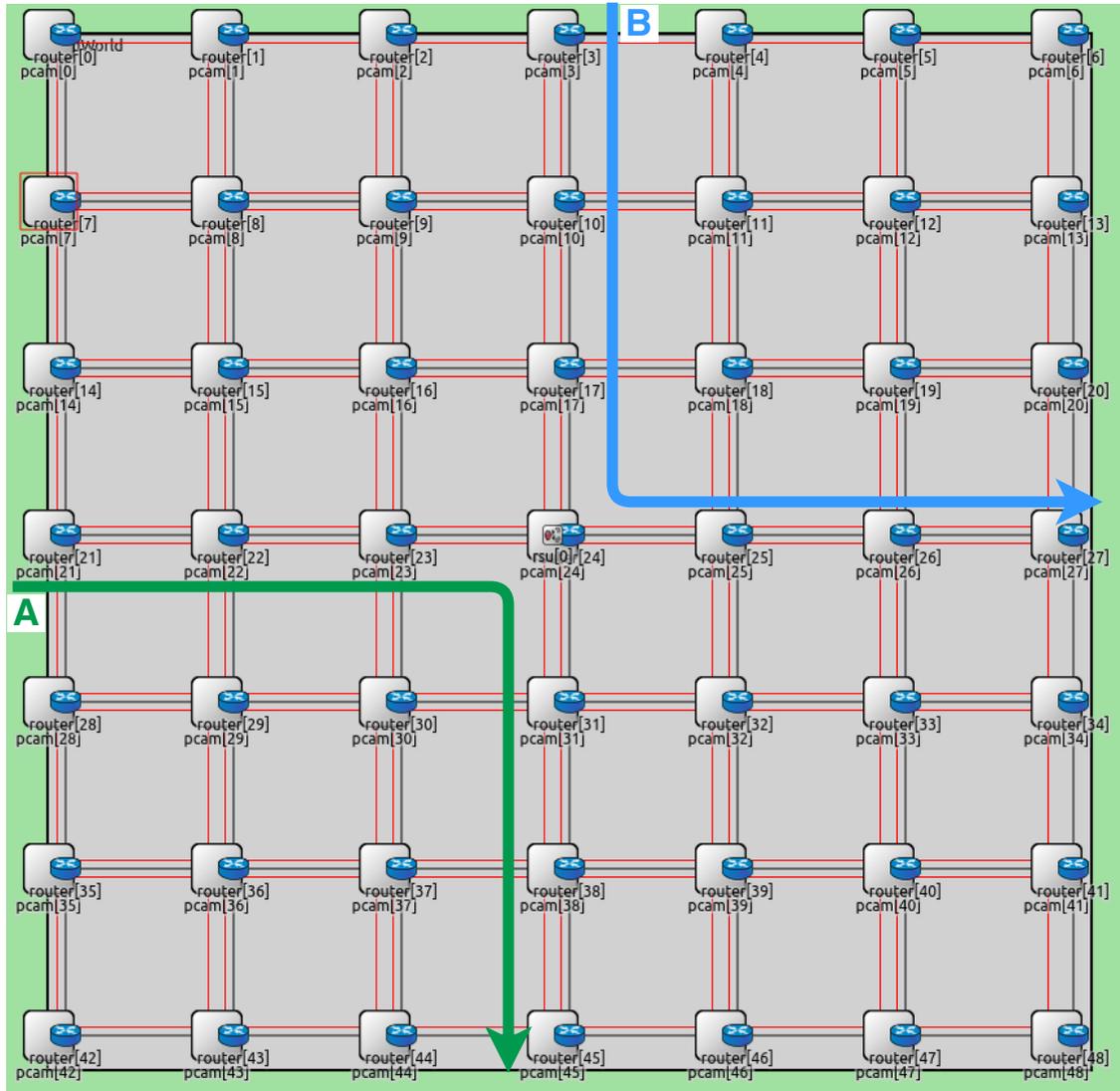


図 5.1. Grid 状の地図

5.3.2 文京区の地図

この地図は実際に文京区の地図を使用している。Fig.5.2 にその地図を示す。範囲を経度、緯度で表すと左下の地点が (139.629624,35.640444) で、右上の地点が (139.834852,35.783414) となっている。距離で表現すると縦約 1.9km、横 1.7km となっている。図中央に設置されている rsu は次章で述べるが、評価のため設置したノードであり、シナリオには影響を及ぼさない。同様に図中の A、B は次章で述べるが、評価実験時の車両の走行経路である。Grid 状の地図と同様に赤い線で示されている図形は建物を表す。建物の特性は Grid 状の地図と同様に壁部分を示す辺を通過する場合 9db、建物内を通過する場合は 1m につき 0.4db ずつ電波が減衰する。この地図では任意に選択した交差点に Proxy CAM 装置を設置した。Grid Proxy CAM システムを使用する場合は道路に沿って隣接する Proxy CAM 装置同士をイーサネットケーブルで接続している。図中の黒い線がイーサネットケーブルを表す。

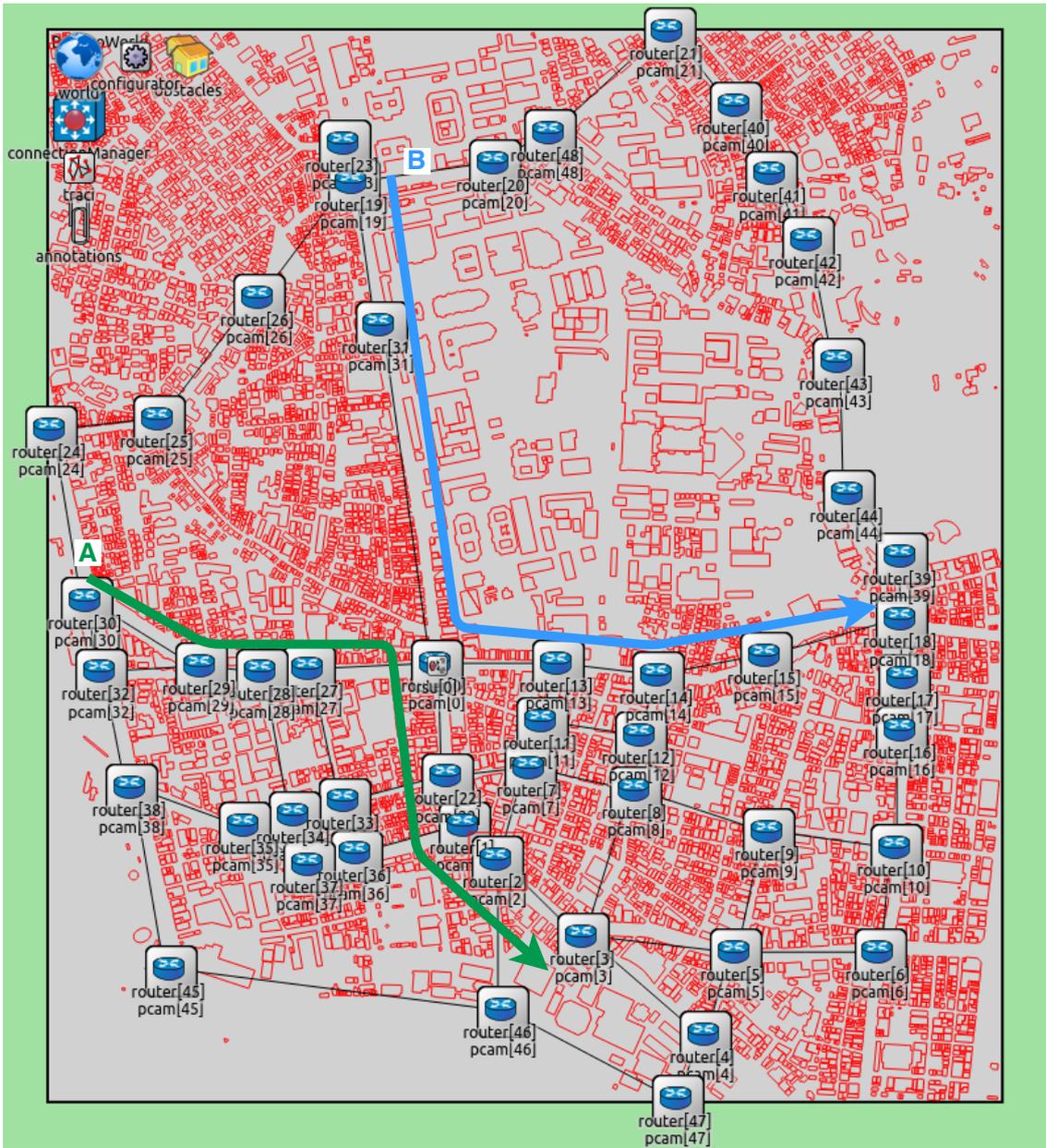


图 5.2. 文京区の地図

5.4 実装環境変数

シミュレーションに関わる重要な変数を Table.5.1 にまとめる。またそれぞれの変数について、及びネットワーク構成について説明する。

表 5.1. 実装に関わる環境変数

Type	Variable name	Value
Proxy CAM	queue size	1000pkts
	dst Disseminator range	1000m
	max.dist	1000m
	generate frequency	10Hz
Traffic	vehicle speed	14m/s
	vehicle num per sec per intersection	2
Radio model	IEEE802.11p datarate	18Mbps
	attenuation per building edge	9db
	attenuation through building	0.4db/m
	wireless range	150m

5.4.1 通信メッセージ

Proxy CAM は CAM に比べてメッセージの内容が異なる。CAM は車両が自車の情報を取得してデータを挿入するのに比べ、Proxy CAM は Proxy CAM 装置がセンサー等で検知をした情報を元にデータを挿入する。そのため、挿入できるデータが CAM に比べて少なくなっている。例えば、ITS PDU header の stationID である。stationID は 0~4294967295 の 4byte の整数となっている。これはカメラ等のセンサーで取得することはできないとし、本実装において、Proxy CAM ではこの値は 0 としている。更に Proxy CAM はそのほとんどが代理で生成を行えない LF Container、Special vehicle Container を含まないとした。また本研究ではシミュレーションを行うのは車両のみとなっているため、stationType は passengerCar(5) となっている。データのサイズは IEEE802.11p での送信時には 726bit となっている。

Detector はこのデータを取得後、UDP パケットのデータ部分に値を“,”で区切った文字列として挿入する。メッセージの送信先のリスト dest_IP_list に含まれる Disseminator の範囲は 1000m とし、それに対応して Distance Priority アルゴリズムで使用される max.dist も 1000m とする。また、Disseminator の Proxy CAM パケットを溜める queue のサイズは 1000pkts となっている。

5.4.2 交通

実際に現実世界で稼働する時の環境に近づけるため、シミュレーションで車両を走行させる。この車両は毎秒 14m/s (約 50km/h) で走行している。また、信号機は設置していない。平成 28 年の警視庁の交通量統計表 [44] から、本郷 (本郷 3) の交差点を通過した全車計交通量は 40615 台/12h である。これは 1 秒あたり約 1 台の車両が交差点を通過していることになる。本研究では信号機が存在しない交差点を想定しているため、この値の 2 倍である 2 台/s の車両が交差点を通過している。この値を使用してシミュレーションでの車両の走行を行う。

各車両は IEEE802.11p を使用して CAM を送信しており、その周波数は 10Hz である。これにより IEEE802.11p の電波の混雑度を現実世界に近づけることができる。また、次章の評価で述べるが、本研究で実装したシミュレーションは非常に負荷が高く、実行する計算資源の関係で評価では全ての道路に車両を走らせるのではなく、評価の結果に影響を及ぼす範囲にのみ車両を走行させている。

5.4.3 電波モデル

シミュレーションで用いるアンテナは等方性アンテナとし、指向性がないものとしている。電波の周波数は IEEE802.11p を用いるため 5.89GHz としている。通信速度は 18Mbps、送信電力は 126mW、受信感度は -89dBm としている。電波の減衰モデルは自由空間伝搬であるとして、以下のフリスの伝達公式を用いる。

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4 \times \pi \times D}\right)^2 \times G_T \times G_R \times P_T$$

ここで P_R 、 P_T は受信、送信電力 [W]、 λ は電波の波長 [m]、 D は送受信間の距離 [m]、 G_T 、 G_R は送受信側のアンテナの絶対利得である。ここでアンテナは送受信側共に等方性アンテナであるため G_T 、 G_R 共に 1 となる。また、建物による電波の減衰は前述した通り、壁部分を示す辺を通過する場合 9db、建物内を通過する場合は 1m につき 0.4db ずつ減衰する。このシミュレーションではマルチパス等による電波の干渉を考慮していない。都市部では電波の干渉が起りやすいとして、シミュレーション内の車両に関しては最大 150m の範囲に電波が届くとした。

Proxy CAM シナリオでは車両と同様の範囲に電波が届くとして 150m とした。また、Grid Proxy CAM システムを用いたシナリオでは各 Proxy CAM 装置の Disseminator は周囲の Proxy CAM 装置の Detector から Proxy CAM を受け取り、それをブロードキャストしているため、送信範囲が広くなくて良い。また各 Disseminator は送信量が多いため、送信範囲が重なってしまうとその範囲はパケットの衝突が多くなってしまう。そのため送信電力を下げることによって送信範囲が重ならないようにする。自由空間伝搬、建物による遮蔽以外の要因による電波の減衰の考慮は本研究の範囲外とし、送信電力は同じ値にし、送信範囲が 50m となるように設定を行なった。

5.4.4 ネットワーク構成

Grid Proxy CAM システム内で構成されているルーター間のネットワークでは、使用するイーサネットケーブルは 10Gbps を使用している。これによりイーサネットケーブルでの遅延は非常に小さいため本研究では遅延がないものとする。また本実装では、ルーター間のルーティングプロトコルとして RIP (Routing Information Protocol) を使用した。各ルーターははじめ、自身に直接接続しているノードの IP アドレス、メトリック等を保持し、30 秒ごとに隣接するルーターと経路の交換を行う。各ルーター間のメトリックは全て同じ値の 1 とし、ルーターは RIP によって、各ルーターに対して最も近い経路を保持している。

第6章

評価

この章では前章で述べた3つのシナリオ、Proxy CAM、Non Priority Grid Proxy CAM、Distance Grid Proxy CAMを2種類の地図、Grid状の道路、文京区の道路でシミュレーションを行い、評価を行う。

6.1 評価内容

第4章で述べた3つの要件定義、“快適性を追求するため、可能な限り死角の少ない、広範囲にProxy CAMが送信できること”、“安全性を最優先させるためProxy CAMの packets 受信率が受信する車両から近い範囲は非常に高いこと”、“Proxy CAMの生成から受信までの遅延が短いこと”を評価するため、PDR (packet delivery ratio) と遅延を評価基準として実験を行なった。評価方法として、Fig.5.1、Fig.5.2の中央に示されているrsuが設置されている交差点をサンプリング地点とした。Fig.6.1にサンプリング地点の様子を示す。この

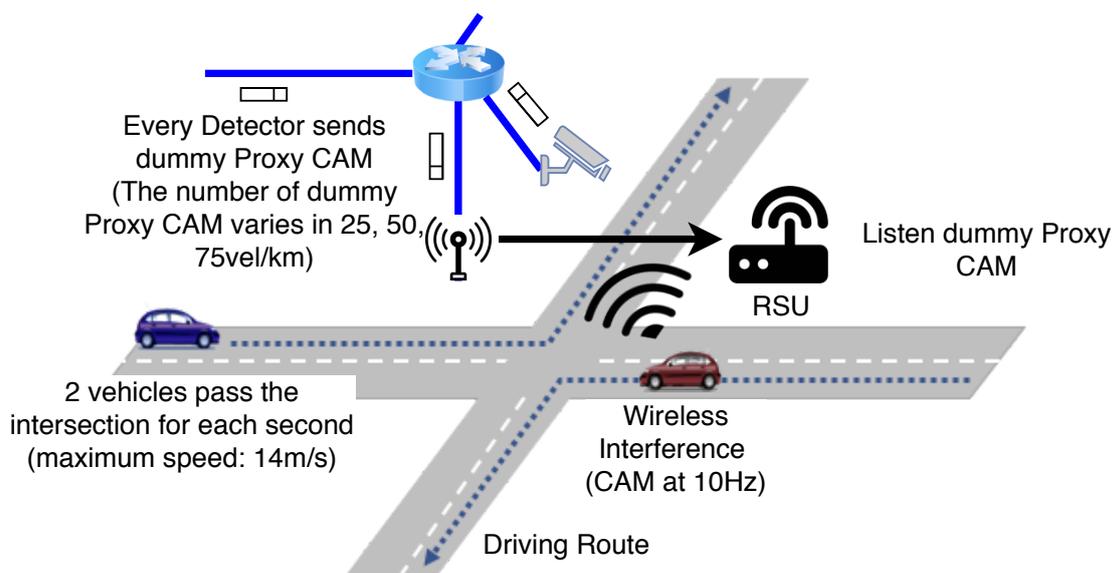


図 6.1. サンプリング地点の概要

rsu は交差点上に設置されたサンプリング装置であり、IEEE802.11p で受信した車両からの CAM と Proxy CAM 装置からの Proxy CAM を受信時刻と共に記録している。また、同様に各 Disseminator も作成した Proxy CAM を記録している。この 2 つの記録を比較することによって PDR と delay を測定した。

本研究で実装を行なったシミュレーションは実行負荷が非常に高いため、車両の地図上での分布を限定している。サンプリング地点の電波状況に影響を及ぼすと考えられるサンプリング地点の交差点に接続している縦横の道路のみに車両を分布させた。Fig.5.1、Fig.5.2 の A、B は車両の走行する経路を示す。サンプリング地点の交差点で経路 A、B 共に右左折しているのは SUMO では車両同士が衝突の危険性を検知すると停車するという車両モデルとなっているため、衝突を起こさないようにするためである。

車両の分布が限定されているため、実際の車両の Proxy CAM を作成すると評価が行えないので、車両はサンプリング地点の電波の混雑度のみを表現するために走行させ、各 Detector はダミーの Proxy CAM を作成し、送信を行う。Proxy CAM 装置が交差点から半径 50m 以内の車両を検知できるとして、14m/s で走行している車両が平均 2 台/s づつ交差点を通過することから平均約 12 台を検知することができる。また、交通が混雑している時、空いている時を想定して、各 Detector は各検知時にダミーの Proxy CAM を 5、10、15 個ずつ作成するという 3 つの状況の評価した。交差点の中心から半径 50m は道路の長さで表現を行うと 200m となる。そのためダミーの Proxy CAM はそれぞれ 25、50、75vel/km と表現する。vel は vehicle の略である。シミュレーションは各 15 秒間で 100 回行い、全てのシミュレーションの計測結果の平均と標準偏差を算出した。また各シミュレーションで定常状態のみを評価に使用するため、スタートから 5 秒後から 10 秒後までを評価の対象とした。

6.2 数学的解析

実験の結果による評価を行う前に、数学を用いてシナリオ毎の遅延と PDR がどのような値を示すか評価を行なった。Proxy CAM シナリオに関しては重大な遅延が発生しうる要因がなく、PDR も電波の減衰、電波の干渉による変化等の地図や環境に依存する要因によるもののため、数学的解析を行わない。

6.2.1 遅延の評価

はじめに遅延の評価として数学的な評価を行う。Fig.6.2 に Proxy CAM の送信時の時系列を示す。

まず、IEEE802.11p でのデータレートが 18Mbps の場合、変調方式は 16QAM、符号化率は $3/4$ となる。このため、OFDM の 1 シンボルあたりに含めることができるデータビット数、 n_{dbps} は 144bits となる。また、OFDM の 1 シンボルあたりの送信時間、 $T_{\text{SYM_80211P}}$ が $8\mu\text{s}$ となっている。Fig.6.2 より Proxy CAM パケットを 1 つ送信するのに必要な時間、interval とその算出に必要な式を以下に示す。また、式に用いられる定数を Table.6.1 に示す。

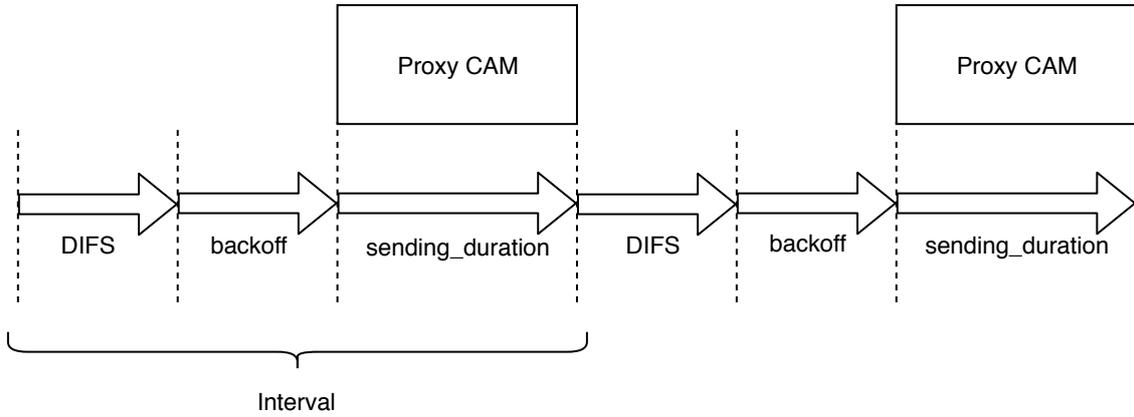


図 6.2. Proxy CAM を送信する際の時系列

$$interval = DIFS + backoff + sending_duration \quad (6.1)$$

$$DIFS = AIFSN \times SLOTLENGTH_{11P} + SIFS_{11P} \quad (6.2)$$

$$backoff = avg(contention_window_size) \times SLOTLENGTH_{11P} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} sending_duration = & RADIODELAY_{11P} \\ & + PHY_HDR_PREAMBLE_DURATION \\ & + PHY_HDR_PLCP_SIGNAL_DURATION \\ & + T_SYM_{80211P} \times ceil((16 + payloadLengthBits + 6)/(n_dbps)) \end{aligned} \quad (6.4)$$

表 6.1. MAC 層、物理層に関する定数

Layer	Variable type	Value
Mac Layer	AIFSN with OCB	6
	SLOTLENGTH _{11P}	0.013ms
	SIFS _{11P}	0.032ms
	contention_window_size	0~15
	RADIODELAY _{11P}	0.001ms
Physical Layer	PHY_HDR_PREAMBLE_DURATION	0.032ms
	PHY_HDR_PLCP_SIGNAL_DURATION	0.008ms
	T_SYM _{80211P}	8μs
	n_dbps	144bits
Other	payloadLengthBits (Proxy CAM)	680bits

式 6.3、6.4 中の avg 、 ceil はそれぞれ、平均値、入力値以上の最小の整数である。DIFS (DCF InterFrame Space) は CSMA/CA を用いた時のチャンネルがアイドル状態になってからの一定の待機時間、backoff は contention window によって決まるランダムな待機時間である。CAM は EDCA において AC_BE クラスに分類されており、[45] を元にする、AIFSN (Arbitration Inter Frame Space Number) は OCB (Offset Codebook Mode) 使用時に 6、contention_window_size は 0~15 となる。よって $\text{avg}(\text{contention_window_size})$ は 7.5 となる。IEEE802.11p のスロット長、SLOTLENGTH_11P は 0.013ms であり、IEEE802.11p での SIFS (Short Inter Frame Space)、SIFS_11P は 0.032ms である。よって式 6.2 を用いると $\text{DIFS} = 0.110\text{ms}$ となる。また式 6.3 を用いると $\text{backoff} = 0.0975\text{ms}$ である。

sending_duration は 11p の送受信切り替えの遅延、RADIODELAY_11P と、PLCP プリアンブル部分の遅延、PHY_HDR_PREAMBLE_DURATION と、PLCP のヘッダ信号のシグナル部の遅延、PHY_HDR_PLCP SIGNAL_DURATION と、PLCP のサービス部、MAC フレーム、誤り訂正符号部を合わせたデータの遅延の合計となる。それぞれ、RADIODELAY_11P は 0.001ms、PHY_HDR_PREAMBLE_DURATION は 0.032ms、PHY_HDR_PLCP SIGNAL_DURATION は 0.008ms、PLCP のサービス部が 16bits、誤り訂正符号部が 6bits である。さらに Proxy CAM の MAC フレームのフレーム長は 680bits であったため、式 6.4 を用いると sending_duration は 0.081ms となる。以上から式 6.1 の interval は 0.2885ms となる。この値から実効スループットを求めると、680bits を 0.2885ms で送信していることになるので、約 2.73Mbps となる。

この実効スループットを用いて車両密度が 25、50、75vel/km の時にそれぞれ何台分の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM を queue に溜めることなくブロードキャスト可能かを計算する。実効スループットが 2.73Mbps から、0.1 秒間に送信可能なデータ量は 273kbits である。今回 IEEE802.11p でブロードキャストされた Proxy CAM の MAC フレームは 680bits であったため、0.1 秒間にブロードキャストできる CAM は約 401 個となる。25、50、75vel/km の場合、各 Detector が送信する Proxy CAM の数は 5、10、15 個となっている。このことからそれぞれ最大約 80、40、26 台分の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM を送信することが可能である。

本実験ではどちらの地図でも 49 台 Proxy CAM 装置が存在していたため、25vel/km では遅延がほとんどなくブロードキャストできるのに比べ、50、75vel/km では遅延が発生するといえる。また、Non Priority Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオにおいて 50、75vel/km では IEEE802.11p の実効スループットによってパケットが queue に溜まることによって queue が埋まることが考えられる。これにより、新たに queue に加えられたパケットが 11p で送信されるまでにかかる遅延は queue に溜められているパケットの送信分となると考えられる。queue の最大パケット数を 1000pkts と設定したため、 $1000 \times 0.2885\text{ms} = 288.5\text{ms}$ となり、約 290ms となることがいえる。また、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは、Distance Priority アルゴリズムによって queue が埋まることはないため Non Priority Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでの遅延より小さい値となるといえる。

6.2.2 PDR の評価

次に PDR に関して数学的評価を行う。遅延の評価で述べた通り 25、50、75vel/km の場合、それぞれ最大約 80、40、26 台分の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM を送信することが可能である。このことから、本実験で用いる Proxy CAM 装置はどちらの地図でも 49 台であるので、Non Priority Grid Proxy CAM シナリオ、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオのどちらも 25vel/km の時はどの Detector から受信した Proxy CAM であっても PDR は 1 となるはずである。

次に 50vel/km の時は最大約 40 台分の Proxy CAM を送信可能である。このことはつまり 0.1 秒毎に約 9 台分の Proxy CAM が queue に溜まっていくことになる。定常状態では queue が埋まり、約 9 台分の Proxy CAM が常にドロップされることになる。このことから、Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは PDR がどの距離でも $\frac{40}{49} \approx 0.8$ となると考えられる。また、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは Distance Priority アルゴリズムによって送信元から近い範囲では PDR が 1 となり、ある地点を境に PDR が落ち始め 0 となると予想できる。PDR が 0.5 の時、つまり定常状態時の Distance Priority アルゴリズムによってドロップするかしないかの距離のしきい値となる範囲は Proxy CAM 装置が 40 台含まれる範囲となるはずである。これは Grid 状の地図の場合では約 316m の時 37 台、約 360m の時 45 台となることから、この範囲内で PDR が 0.5 となると考えられる。

同様に 75vel/km の時は最大約 26 台分の Proxy CAM を送信可能である。つまり 0.1 秒毎に約 23 台分の Proxy CAM が queue に溜まっていくことになる。定常状態では queue が埋まり、約 23 台分の Proxy CAM が常にドロップされることになる。このことから、Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは PDR がどの距離でも $\frac{26}{49} \approx 0.5$ となると考えられる。また、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは Distance Priority アルゴリズムによって送信元から近い範囲では PDR が 1 となり、ある地点を境に PDR が落ち始め 0 となると予想できる。この時、PDR が 0.5 となる地点は Proxy CAM 装置が 26 台含まれる地点となるはずである。これは Grid 状の地図の場合では約 283m の時 25 台、約 300m の時 29 台となることから、この範囲内で PDR が 0.5 となると考えられる。

6.3 Grid 状の道路を用いたシミュレーション評価

まず、Grid 状の道路の地図を用いた実験を行なった。この実験では建物の電波の影響の評価を行うため 2 種類の評価を行なった。1 つ目は rsu の位置から rsu の位置にある Proxy CAM 装置と、西方向にある 3 つの Proxy CAM 装置の Detector から生成される Proxy CAM を rsu がどれだけの遅延で受け取っているか、どれだけ受け取れているか、delay と PDR を測定した。2 つ目は rsu の位置から rsu の位置にある Proxy CAM 装置と北西方向にある 3 つの Proxy CAM 装置の Detector から生成される Proxy CAM を rsu がどれだけの遅延で受け取っているか、どれだけ受け取れているか、delay と PDR を測定した。この 2 種類の測定方

法をそれぞれ Line of sight (LOS)、Non Line of sight (Non LOS) と呼ぶ。

6.3.1 遅延の評価

はじめに Fig.6.5、Fig.6.4 に LOS の場合と Non LOS の場合の delay を示す。delay に関して、rsu が 1 つも Proxy CAM を受信できなかった場合は -100ms としている。

LOS において Proxy CAM シナリオでは 25、50、75vel/km と同様に距離が 0、100m の Proxy CAM 装置からは Delay が 0ms で Proxy CAM を受信している。設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、200m、300m の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からは Proxy CAM は受信できていない。Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは距離に関わらず 25vel/km の時は遅延が約 10ms に対し、50、75vel/km の時は約 290ms となっている。

それに対し、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時は遅延がほぼ同等の約 10ms に対し、50、75vel/km の時は遅延が約 200ms となっている。Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオの方が遅延が短くなった要因として、Distance Priority アルゴリズムによる queue の占有率の変化があげられる。50、75vel/km で実験中の queue の占有率の平均値は Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 0.96、0.97 であったのに対し、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 0.65、0.71 であった。queue に溜まっているパケット数が少ないために遅延も短くなったと考えられる。

Non LOS において Proxy CAM シナリオでは 25、50、75vel/km と同様に距離が 0m の Proxy CAM 装置からは Delay が 0ms で Proxy CAM を受信している。しかし 141m の地点の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM は建物の遮蔽により受信できなかった。設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、283m、424m の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からは Proxy CAM は受信できていない。Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは距離に関わらず 25vel/km の時は遅延が約 10ms

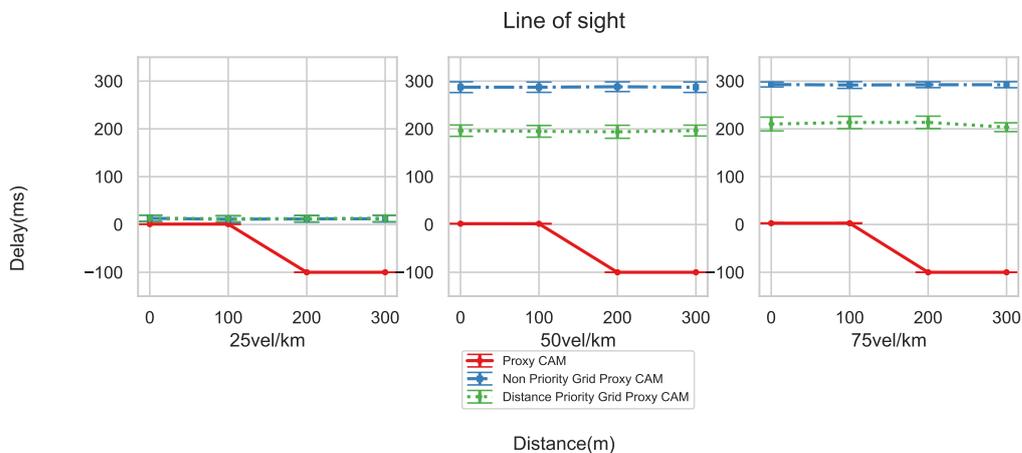


図 6.3. Grid 状地図の LOS での Delay

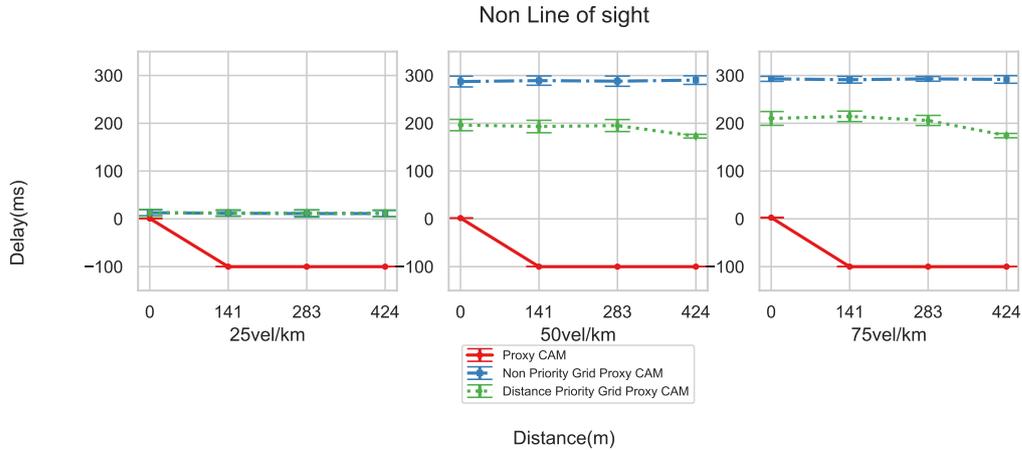


図 6.4. Grid 状地図の Non LOS での Delay

に対し、50、75vel/km の時は約 290ms となっている。

それに対し、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時は遅延がほぼ同等の約 10ms に対し、50、75vel/km の時は遅延が約 200ms となっている。Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオの方が遅延が短くなった要因は前述の通りである。このシナリオにおいて 424m の地点の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM の遅延が短くなっている。これは、Distance Priority アルゴリズムに起因すると考えられる。Distance Priority アルゴリズムは queue の占有率が高くなると取得する Proxy CAM の距離を短くする。言い換えれば、queue の占有率が低い時は遠くの Proxy CAM も取得するということである。つまり、424m の地点の Proxy CAM を取得している時と取得していない時では取得している時の方が queue の占有率が低くなる。占有率が低いということはつまり遅延が短くなるということにつながる。そのため距離が遠い Proxy CAM ほど遅延が短くなるという事象が発生する。

遅延に関して、0m 地点からの Proxy CAM に関しては Proxy CAM シナリオに対して劣っているが、Non Priority Grid Proxy CAM シナリオに対しては同等かそれ以上の改善を確認できた。0m 地点に関して、この地点からの Proxy CAM は非常に安全に直結してくる情報であり、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは十分であるとは言にくい。改善方法としては、EDCA に似た距離に応じてパケットのクラス分けを行い、クラスごとに queue を用意して溜め、距離が短いクラスほど優先して送信されるようにするという方法が考えられる。

6.3.2 PDR の評価

次に Fig.6.5、Fig.6.6 に LOS の場合と Non LOS の場合の PDR を示す。横軸は rsu からの距離となっている。

LOS において Proxy CAM シナリオでは 25、50、75vel/km と同様に距離が 0m の Proxy CAM 装置からは PDR が 1.0 で Proxy CAM を受信し、100m の地点にある Proxy CAM 装

置からは PDR が 0.7~0.8 で Proxy CAM を受信している。設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、200m、300m の地点にある Proxy CAM 装置の Detector から Proxy CAM は受信できていない。

Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時はどの距離の地点にある Proxy CAM 装置の Detector から PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。しかし、50、75vel/km の時は、どの距離の地点にある Proxy CAM 装置からも PDR がそれぞれ 0.7 付近、0.4 付近となっている。また、50、75vel/km の時は標準偏差が 0.4 前後と大きい値になっている。これは各シミュレーションで各 Detector の検知開始時間を 0~0.1 秒の間でランダムに与えている。このランダム性によって、どの Detector がはじめに検知を行い送信を行うかの順序が各シミュレーションで変化する。このためサンプリング地点の Proxy CAM 装置の Disseminator にどの順番で各 Disseminator から UDP パケットを受信するかが変化する。

このことにより、queue が埋まった直後に受信する UDP パケット、つまりドロップされるパケットが変化する。そのため各シミュレーションごとに各 Disseminator からの Proxy CAM パケットの PDR の変動が激しいために標準偏差が大きくなっている。実際にこのシナリオを現実世界で運用した場合、検知開始時間は運用開始時に定まる。または設定することにより一定時間ごとに変化させることはできるが、この値によりある Disseminator からの PDR は 1 に対して、別の Disseminator からは PDR が 0.3 となるような非常に不安定なシステムとなってしまう。

Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時はどの距離の地点にある Proxy CAM 装置の Detector から PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。50vel/km では距離が 200m までの地点にある Proxy CAM 装置の Detector からの Proxy CAM は PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。しかし、300m の地点にある Detector からの Proxy CA は PDR が 0.75 となっている。同様に 75vel/km においても距離が 100m までの地点にある Detector からの Proxy CAM は PDR が 1 となっているが、200、300m の地点にある Detector からの Proxy CAM は 0.9、0.55 となっている。これは Distance Priority ア

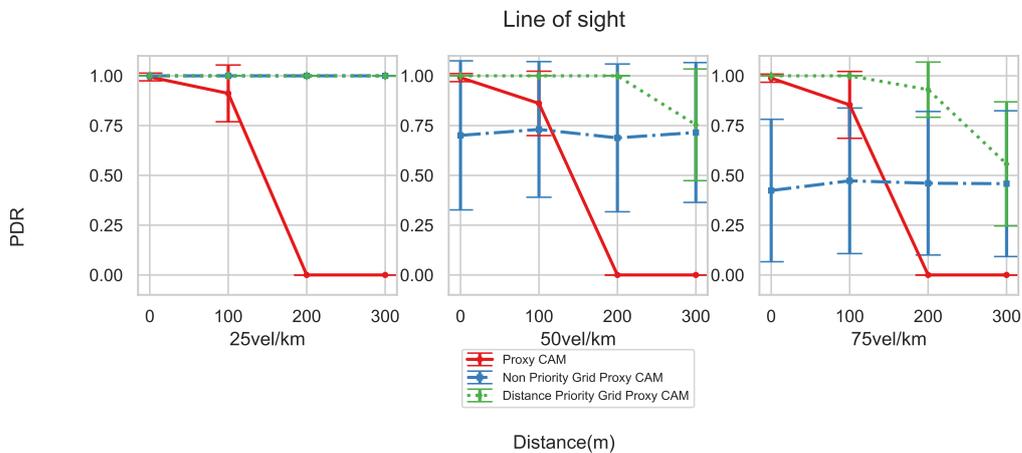


図 6.5. Grid 状地図の LOS での PDR

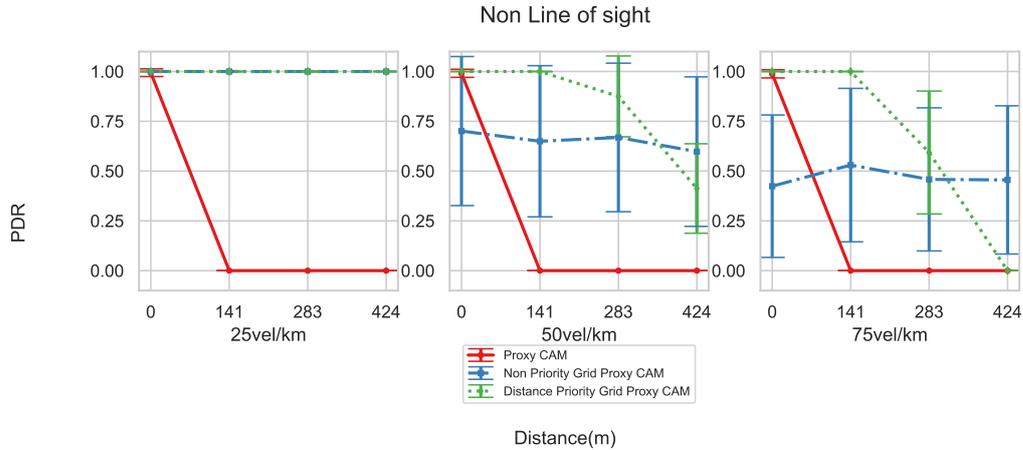


図 6.6. Grid 状地図の Non LOS での PDR

ルゴリズムにより遠くの Proxy CAM 装置の Detector からの Proxy CAM はドロップしやすいためだと考えられる。また、1つの Detector から送られてくるパケット数が増えると、queue に溜まりやすくなるために PDR が落ち始める距離が短くなるという傾向も見られる。

Non LOS において Proxy CAM シナリオでは 25、50、75vel/km と同様に距離が 0m の Proxy CAM 装置からは PDR が 1.0 で Proxy CAM を受信しているが、141m の地点にある Proxy CAM 装置からは PDR が 0 となっている。これは建物の遮蔽により電波が届かなくなっているために起こる現象だと考えられる。設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、283m、424m の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からは Proxy CAM は受信できていない。Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時はどの距離の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からも PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。しかし、50、75vel/km の時は、どの距離の地点にある Proxy CAM 装置からも PDR がそれぞれ 0.7 付近、0.4 付近となっている。また、50、75vel/km の時は LOS の場合と同様に標準偏差が 0.4 前後と大きい値になっている。この原因も LOS の場合と同じ、検知開始時間のランダム性に起因するものだと考えられる。このシナリオにおいては LOS であろうと Non LOS であろうと距離に関係なく平均値に近い値となっている。

Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時はどの距離の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からも PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。50、75vel/km では距離が 141m までの地点にある Proxy CAM 装置の Detector からの Proxy CAM は PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。しかし、283m の地点では PDR がそれぞれ約 0.9、約 0.6 となり、424m の地点ではそれぞれ約 0.4、約 0 となっている。この原因は LOS の場合と同様に Distance Priority アルゴリズムにより遠くの Proxy CAM 装置の Detector からの Proxy CAM はドロップしやすいためだと考えられる。また、パケット数が増えると、PDR が落ち始める距離が短くなるという傾向も同様に見られる。

LOS、Non LOS のどちらの場合でも、Proxy CAM シナリオ、Non Priority Grid Proxy

CAM シナリオに比べ、Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオの方が距離が短い範囲では PDR が改善されていることが確認できた。

Non Priority Grid Proxy CAM シナリオにおいて数学的解析に対して PDR が約 0.1 ほど小さいのは各 Detector から送信される Proxy CAM の UDP パケットの到着時間のスパース性に基づくと考えられる。Detector はランダムな検知開始時間で検知を始めるため、Detector 同士でのパケット到着時間はある程度拡散されている。しかし、各 Detector に着目すると 0.1 秒毎の各検知時では間隔を空けずに 5、10、15 パケットを送信している。そのため、UDP パケットの到着時間にスパース性があるため PDR が数学的解析で算出された値に対して低い結果が出ていると考えられる。

6.4 文京区の道路を用いたシミュレーション評価

次に、実際の文京区の道路の地図を用いた実験を行った。この実験では Grid 状の道路とは異なり、全ての Proxy CAM 装置の Detector から生成される Proxy CAM を rsu がどれだけの遅延で受け取っているか、どれだけ受け取れているか、delay と PDR を測定した。

6.4.1 遅延の評価

Fig.6.7 に 25,50,75vel/km の場合の 3 つのシナリオでの delay を示す。delay において、rsu が 1 つも Proxy CAM を受信できなかった場合は-100ms としている。

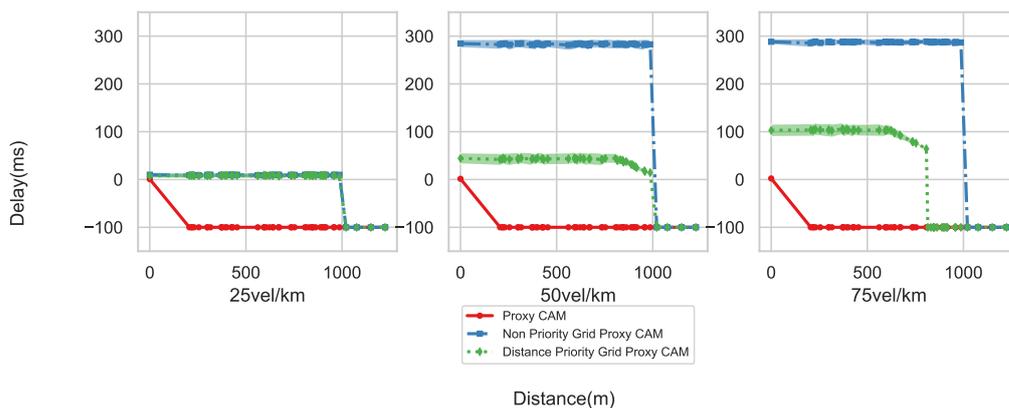


図 6.7. 文京区の地図での Delay

Proxy CAM シナリオでは 0m 地点の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM は遅延が約 0ms となっているが、設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、次に最も近い Proxy CAM 装置は約 200m となっていることから、Proxy CAM を受信できていない。Non Priority Grid Proxy CAM システムでは距離に関わらず 25vel/km の時は約 10ms、50、75vel/km の時は約 290ms となっている。距離が 1000m 以上の Proxy CAM 装置からは Proxy CAM を受け取れていない。

Distance Priority Grid Proxy CAM システムでは 25vel/km の時は PDR が 0.8 となっている距離 950m までは約 10ms であり、950m から 1000m の間は約 0ms となっている。50、75vel/km の時も同様に PDR が約 0.8 となっている約 800m、約 600m までは遅延が約 40、約 100ms となっているが、それ以降は徐々に遅延が小さくなっている。遅延が徐々に小さくなる原因に関しては前述の通り、パケットをドロップせずに貯める時は Distance Priority アルゴリズムによる queue の占有率が小さいからである。

Grid 状の道路の地図を用いたシミュレーションに比べて遅延が短くなった原因として Proxy CAM 装置の密度があげられる。Grid 状の道路の地図の場合は 600m×600m に Proxy CAM 装置が 49 台設置されているが、文京区の道路の地図の場合は約 1.9km×約 1.7km に Proxy CAM 装置が 49 台設置されている。同じ台数の Proxy CAM 装置で比べた時分布の範囲が密度の高い方が狭くなる。これにより Distance Priority アルゴリズムによって定常状態の時の queue の占有率が高くなる。そのため Grid 状の道路の地図の方が遅延が大きかったといえる。

6.4.2 PDR の評価

Fig.6.8 に 25,50,75vel/km の場合の 3 つのシナリオでの PDR を示す。横軸は rsu からの距離、縦軸は PDR となっている。

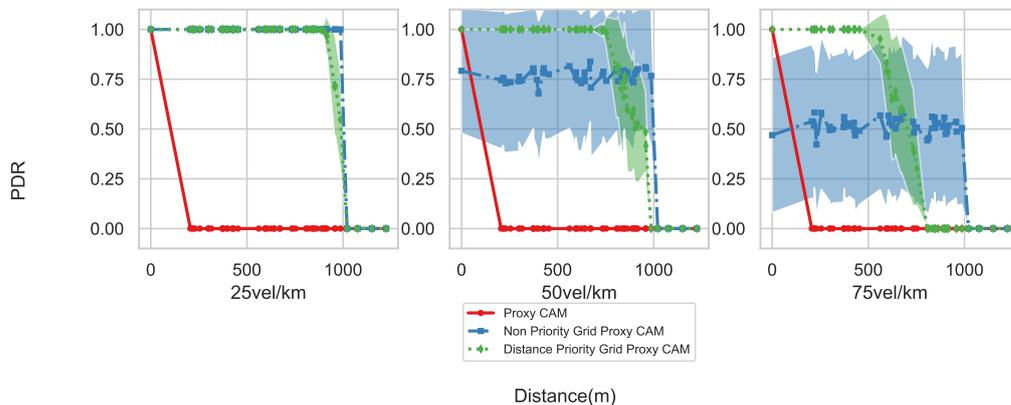


図 6.8. 文京区の地図での PDR

PDR において Proxy CAM シナリオでは 25、50、75vel/km とともに距離が 0m の Proxy CAM 装置からは PDR が 1.0 で Proxy CAM を受信しているが、設定で Proxy CAM シナリオでは Proxy CAM 装置の送信可能範囲を 150m としたため、次に最も近い Proxy CAM 装置は約 200m となっていることから、PDR が 0 となっている。Non Priority Grid Proxy CAM シナリオでは 25vel/km の時はどの距離の地点にある Proxy CAM 装置の Detector からも PDR が 1 で Proxy CAM を受信している。しかし、50、75vel/km の時は、どの距離の地点にある Proxy CAM 装置からも PDR がそれぞれ 0.7~0.8、0.5 前後となっている。

また、1000m 以降の Proxy CAM 装置からの Proxy CAM の PDR が 0 となっているのは Detector の UDP パケット送信範囲を 1000m としたため、rsu がある地点の Proxy CAM 装置の Disseminator が UDP パケットを受信できていないためである。標準偏差が大きいのは Grid 状の道路の地図のシミュレーションでの原因と同じであると考えられる。また、このシミュレーションでの PDR が微小ながら高い理由は設置した Proxy CAM 装置の数は同じでも距離が 1000m 以上の Proxy CAM 装置があったため、その分 Disseminator が受け取るパケット数が少なかったためにドロップしにくかったためと考えられる。

Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオでは、25vel/km の時、距離が約 900m までの地点にある Proxy CAM 装置の Detector からの Proxy CAM は PDR が 1 となっている。その後徐々に PDR が減少し、1000m 付近で PDR が 0 となっている。同様に 50、75vel/km の時も、距離がそれぞれ約 740m、約 450m の地点までは PDR が 1 となっているがそこから徐々に落ち始め、それぞれ約 990m、約 800m の地点で 0 となっている。標準偏差が PDR が落ちている最中に大きくなる原因は Non Priority Grid Proxy CAM シナリオと同様に検知開始時間のランダム性によって Distance Priority アルゴリズムでドロップするパケットが変化してしまうためと考えられる。

25vel/km において Non Priority Grid Proxy CAM シナリオが 900m から 1000m の間では Distance Priority Grid Proxy CAM シナリオに比べ PDR が上回っている。これは Distance Priority アルゴリズムにおいて max_dist を 1000m としたため、queue の占有率が非常に低い 0.1 であっても 900m までの Proxy CAM のみを受け取ることになっている。事実、この時 queue の平均占有率は 0.03 となっていた。そのため標準偏差が大きいと多少のずれはあるが、970m 付近で PDR が約 0.6 と 0.5 に近い値となっている。同様に 50、75vel/km の時も平均占有率はそれぞれ 0.15、0.35 であり、同様に標準偏差による多少のずれはあるが、850、650m 付近で PDR が約 0.6 と 0.5 に近い値となっている。また、Grid 状の道路の地図の時と同様にパケット数が増えると PDR が落ち始める距離が短くなる。

第7章

結論

7.1 まとめ

本研究では CITS において安全性を担うメッセージである CAM を Proxy CAM システムを用いて、快適性のための送信範囲の拡張、安全性の最優先、低遅延を達成するために Proxy CAM 装置を道路に沿って有線で接続し、路側装置ネットワークを構成する Grid Proxy CAM システムを提案した。また、この Grid Proxy CAM システム内で送受信される Proxy CAM を受信側の Disseminator が IEEE802.11p でブロードキャストを行う際に、帯域が狭いことによって発生する PDR の低下、delay の増大を防ぐため受信した Proxy CAM の位置情報と Disseminator の位置情報を比較することによって得られる距離を元に、安全性に大きく関わる距離の短い Proxy CAM を優先的にブロードキャストを行う Distance Priority アルゴリズムを提案した。

評価を行うために OMNET++ のプロジェクトである Artery を用いて提案手法の実装を行なった。また、地図として理想的な地図である Grid 状の地図と実際の文京区の地図を用い、車両のシミュレーションも加え、3つの想定シナリオ、3通りの仮想的な車両密度による Proxy CAM のパケット数を用いて比較実験を行なった。評価基準として PDR と Delay を測定したところ従来手法の Proxy CAM シナリオ、Grid Proxy CAM システムのみを用いた Non Priority Grid Proxy CAM システムに比べて、Distance Priority Grid Proxy CAM システムはブロードキャストの送信元から近い範囲に関しては建物の障害等に関わりなく非常に高い PDR を示し、遅延も Proxy CAM シナリオの Delay には劣るが Non Priority Grid Proxy CAM システムに比べ十分短い値を示した。この評価により、本研究で提案した Distance Priority Grid Proxy CAM システムはシステム要件を満たし、実際に運用可能なシステムに近づけることができたといえる。

7.2 今後の課題

本研究で提案した Distance Priority アルゴリズムは Proxy CAM の位置情報と Proxy CAM の配布地点の距離と IEEE802.11p の queue の占有率を用いて queue に入れるパケッ

トを選別するというアルゴリズムであった。しかし、このアルゴリズムは PDR に対しては大きな改善をもたらしたが、遅延に関してはある程度の改善をもたらしたとはいえオリジナルの Proxy CAM を用いた場合の遅延と比較すると大幅な遅延を発生させている。そこで今後の課題として、Distance Priority アルゴリズムに加え、EDCA のクラス分けを適切に設定することによって遅延も距離に応じて変化させることができると考えられる。また、本研究では detector の送信範囲と Distance Priority アルゴリズムで使用した最大受信距離、max.dist を定数として事前に設定した。この値は本来、道路の車両密度によって動的に変化するべきである。そのため、Grid Proxy CAM システムにおいて全ての Proxy CAM 装置の設定等の管理を行うシステムが必要となる。この課題を解決する方法として、一定の範囲ごとにサーバーを設置し、範囲内の Proxy CAM 装置から道路に関する情報を受け取り、その情報に応じて新たな設定を行う方法や、ルーティングプロトコル等を一切使用せずに SDN (Software Defined Network) を用いて全ての経路を直接コントロールするという方法も考えられる。

参考文献

- [1] En 302 665 - v1.1.1 - intelligent transport systems (its); communications architecture. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302665/01.01.01_60/en_302665v010101p.pdf. (Accessed on 11/21/2018).
- [2] ETSI. En 302 637-2 - v1.3.2 - intelligent transport systems (its); vehicular communications; basic set of applications; part 2: Specification of cooperative awareness basic service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.03.02_60/en_30263702v010302p.pdf, 2014. (Accessed on 11/20/2018).
- [3] M.Malinverno, G.Avino, C.Casetti, C.F.Chiasserini, F.Malandrino, and S.Scarpina. Performance analysis of c-v2i-based automotive collision avoidance. <https://arxiv.org/pdf/1803.08798.pdf>, 2018. (Accessed on 01/04/2019).
- [4] S. Ansari, T.Boutaleb, S.Sinanovic, C.Gamio, and I.Krikidis. Mhav: Multitier heterogeneous adaptive vehicular network with lte and dsrc. https://www.researchgate.net/publication/321703348_MHAV_Multitier_Heterogeneous_Adaptive_Vehicular_Network_with_LTE_and_DSRC, 2017. (Accessed on 01/25/2019).
- [5] Tomoya Kitazato, Manabu Tsukada, Hideya Ochiai, and Hiroshi Esaki. Archive ouverte hal - proxy cooperative awareness message: An infrastructure-assisted v2v messaging. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01341850>, 2016. (Accessed on 11/20/2018).
- [6] Automated driving applications and technologies for intelligent vehicles - adaptive fp7 project- automated driving applications and technologies for intelligent vehicles. <http://www.adaptive-ip.eu/>. (Accessed on 11/15/2018).
- [7] H.r.3388 - 115th congress (2017-2018): Self drive act — congress.gov — library of congress. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/3388>. (Accessed on 11/15/2018).
- [8] SAE. J3016b: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles - sae international. https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806. (Accessed on 11/20/2018).
- [9] ETSI. Tr 102 962 - v1.1.1 - intelligent transport systems (its); framework for public

- mobile networks in cooperative its (c-its). https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102900_102999/102962/01.01.01_60/tr_102962v010101p.pdf, 2012. (Accessed on 11/20/2018).
- [10] IEEE. 802.11p-2010 - ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments - ieee standard. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5514475>, 2010. (Accessed on 11/20/2018).
- [11] ETSI. En 302 895 - v1.1.1 - intelligent transport systems (its); vehicular communications; basic set of applications; local dynamic map (ldm). https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302800_302899/302895/01.01.01_60/en_302895v010101p.pdf, 2014. (Accessed on 11/20/2018).
- [12] En 302 636-1 - v1.2.1 - intelligent transport systems (its); vehicular communications; geonetworking; part 1: Requirements. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263601/01.02.01_60/en_30263601v010201p.pdf, 2014. (Accessed on 01/06/2019).
- [13] Rfc 3626 - optimized link state routing protocol (olsr). <https://tools.ietf.org/html/rfc3626>, 2003. (Accessed on 01/06/2019).
- [14] Rfc 3561 - ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>, 2003. (Accessed on 01/06/2019).
- [15] En 302 636-6-1 - v1.2.1 - intelligent transport systems (its); vehicular communications; geonetworking; part 6: Internet integration; sub-part 1: Transmission of ipv6 packets over geonetworking protocols. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360601/01.02.01_60/en_3026360601v010201p.pdf, 2014. (Accessed on 01/06/2019).
- [16] En 302 636-5-1 - v1.2.0 - intelligent transport systems (its); vehicular communications; geonetworking; part 5: Transport protocols; sub-part 1: Basic transport protocol. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360501/01.02.00_20/en_3026360501v010200a.pdf, 2013. (Accessed on 01/06/2019).
- [17] Ts 102 894-2 - v1.2.1 - intelligent transport systems (its); users and applications requirements; part 2: Applications and facilities layer common data dictionary. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289402/01.02.01_60/ts_10289402v010201p.pdf, 2014. (Accessed on 01/06/2019).
- [18] 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. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.02.02_60/en_30263703v010202p.pdf, 2014. (Accessed on 11/20/2018).

- [19] Ieee 1609.0-2013 - ieee guide for wireless access in vehicular environments (wave) - architecture. https://standards.ieee.org/standard/1609_0-2013.html#. (Accessed on 11/29/2018).
- [20] 標準規格概要 (std-t75) | 一般社団法人 電波産業会. https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/desc/std-t75.html, 2001. (Accessed on 01/06/2019).
- [21] Forough Goudarzi and Hamid Asgari. Non-cooperative beacon power control for vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8332530>, 2018. (Accessed on 01/02/2019).
- [22] Syed Adeel Ali Shah, Ejaz Ahmed, Feng Xia, Ahmad Karim, Muhammad Ahsan Qureshi, Ihsan Ali, and Rafidah MD Noor. Coverage differentiation based adaptive tx-power for congestion and awareness control in vanets. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11036-016-0777-6.pdf>, 2018. (Accessed on 01/03/2019).
- [23] Ghassan Samara, Tareq Alhmiedat, and Amer O. Abu Salem. Dynamic safety message power control in vanet using pso. <https://arxiv.org/pdf/1401.2405.pdf>, 2013. (Accessed on 01/03/2019).
- [24] Marc Torrent-Moreno, Paolo Santi, and Hannes Hartenstein. Fair sharing of bandwidth in vanets. <https://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1080754.1080762>, September 2005. (Accessed on 12/07/2018).
- [25] Feng Lyu, Hongzi Zhu, Nan Cheng, Yanmin Zhu, Haibo Zhou, Wenchao Xu, Guangtao Xue, and Minglu Li. Abc: Adaptive beacon control for rear-endcollision avoidance in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8397130>, 2018. (Accessed on 01/02/2019).
- [26] Fei Li and Chuanhe Huang. A mobility prediction based beacon rate adaptation scheme in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8538734>, 2018. (Accessed on 01/02/2019).
- [27] Sofiane Zemouri, Soufiene Djahel, and John Murphy. Smart adaptation of beacons transmission rate and power for enhanced vehicular awareness in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6957777>, 2014. (Accessed on 01/03/2019).
- [28] Kayhan Zrar Ghafoor, Kamalrulnizam AbuBakar, Martijn van Eenennaam, Rashid Hafeez Khokhar, and Alberto J. Gonzalez. A fuzzy logic approach to beaconing for vehicular ad hoc networks. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11235-011-9466-8.pdf>, 2011. (Accessed on 12/25/2018).
- [29] Adel Berradj and Zoubir Mammeri. Adaptive contention window scheme to improve multi-hop broadcast in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7145667>, 2015. (Accessed on 01/02/2019).
- [30] Guangbing Xiao, Haibo Zhang, Zhiyi Huang, , and Yawen Chen. Decentralized coop-

- erative piggybacking for reliable broadcast in the vanet. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7504184>, 2016. (Accessed on 01/02/2019).
- [31] Muhammad A. Javed and Jamil Y. Khan. A cooperative safety zone approach to enhance the performance of vanet applications. https://www.researchgate.net/profile/Muhammad_Awais_Javed3/publication/261148275_A_Cooperative_Safety_Zone_Approach_to_Enhance_the_Performance_of_VANET_Applications/links/578dd0cf08ae5c86c9a68716.pdf, 2013. (Accessed on 12/25/2018).
- [32] Muhammad Awais Javed, Duy Trong Ngo, and Jamil Yusuf Khan. A multi-hop broadcast protocol design for emergency warning notification in highway vanets. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186%2F1687-1499-2014-179.pdf>, 2014. (Accessed on 01/03/2019).
- [33] Sebastian Kuhlmergen, Andreas Festag, and Gerhard Fettweis. Evaluation of multi-hop packet prioritization for decentralized congestion control in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7925899>, 2017. (Accessed on 01/02/2019).
- [34] Songnan Bai, Zequn Huang, Dongyong Kwak, Sangwoo Lee, Hyunseo Oh, and Jaeil Jung. Vehicular multi-hop broadcasting protocol for safety message dissemination in vanets. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5378794>, 2009. (Accessed on 01/03/2019).
- [35] Xiaomin Ma, Jinsong Zhang, Xiaoyan Yin, and Kishor S. Trivedi. Design and analysis of a robust broadcast scheme for vanet safety-related services. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6092508>, 2012. (Accessed on 01/02/2019).
- [36] Feng Lin and Yafei Liu. An integration of wave and lte wireless transmission in vehicle networks for safety and non-safety messages dissemination. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8322563>, 2017. (Accessed on 01/25/2019).
- [37] Kitazawa Masahiro, Manabu Tsukada, Morino Kai, Hideya Ochiai, and Hiroshi Esaki. Remote proxy v2v messaging using ipv6 and geonetworking. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01578410/document>, 2017. (Accessed on 01/30/2019).
- [38] Manabu Tsukada. Roadside-assisted v2v messaging for connected autonomous vehicle. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01558066v2/document>, 2017. (Accessed on 01/30/2019).
- [39] Masahiro Kitazawa, Manabu Tsukada, Hideya Ochiai, and Hiroshi Esaki. Wide transmission of proxy cooperative awareness messages. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01879100/document>, 2018. (Accessed on 01/30/2019).
- [40] Oyunchimeg Shagdar, Manabu Tsukada, Masatoshi Kakiuchi, Thouraya Toukabri, and Thierry Ernst. Experimentation towards ipv6 over ieee 802.11p with its station architecture. <https://hal.inria.fr/hal-00702923/document>, 2012. (Accessed on

- 01/13/2019).
- [41] Sumo - simulation of urban mobility. <http://sumo.sourceforge.net/>. (Accessed on 01/15/2019).
- [42] Omnet++ discrete event simulator. <https://omnetpp.org/>. (Accessed on 01/15/2019).
- [43] riebl/artery: Omnet++ v2x simulation framework for etsi its-g5. <https://github.com/riebl/artery>. (Accessed on 01/16/2019).
- [44] 平成 28 年調査 交通量統計表 調査結果. http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/ryo.files/28_3.pdf, 2016. (Accessed on 01/15/2019).
- [45] Ieee std 802.11-2012, ieee standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: Wlan mac and phy specifications. <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.11-2012.pdf>, 2012. (Accessed on 01/22/2019).

謝辞

本論文の執筆にあたり、また研究室に配属されてから今日に至る3年間、多くの方にご指導、ご協力をいただきました。ここに心より感謝を申し上げます。

指導教員である江崎浩教授、落合秀也准教授には学びの場と機会を提供いただきました。また、研究内容について幅広い知識、深い経験から様々な観点から助言、質問をいただき、より深い考察を行うことができました。重ねて感謝を申し上げます。

学士、修士の研究において研究方針、論文執筆から学会発表全ての面で支えていただき、本研究の研究方針について多忙にも関わらず幾度となく個人面談をしていただいた塚田学特任助教授には特にお世話になりました。心から感謝いたします。また、本論文への協力及び同じ分野を研究する同志として共に活動をしてきた大井貴晴氏、長嶋秀幸氏に深く感謝いたします。

研究を行う上で様々なアドバイス、研究生活においてサポートをしてくださった先輩、後輩の皆様に感謝いたします。研究の仕方、基礎的な知識、学習方法を教えていただいた小林諭氏に感謝いたします。同期としてお互いに励まし合い様々な困難を乗り越えるだけでなく、日常生活も共に過ごした今井元太氏、大友一樹氏、幸田大智氏、須賀灯希氏、野村祐太郎氏に深く感謝いたします。諸事務を通じて研究室の生活を支えてくださった岩井愛映子秘書、高橋富美秘書に感謝いたします。

また、これまでの学生生活を精神面、金銭面、様々な面から支えていただいた両親、弟に深く感謝いたします。

最後に、これまでの人生の様々な局面で支えてくださった全てのみなさまに深く感謝いたします。

2019年1月31日

北沢 昌大

