

令和元年度 修士論文

# V2X を用いた自動車衝突警告 アプリケーションの信頼性評価

千葉大学 大学院 融合理工学府  
地球環境科学専攻 都市環境システムコース  
18WM1346 古沼 勇人

指導教員：塩田 茂雄

令和2年3月提出

# abstract

Research on ITS (Intelligent Transport Systems) is being actively conducted as part of the realization of a smart society that means "a convenient, safe and secure society using information and communication technology". Especially in the transportation field, research on autonomous driving and connected cars is being actively pursued.

V2X (Vehicle-to-Everything), a technology that implements vehicle-based communication, is attracting attention as a core technology of ITS in the transportation field. One important application of V2X is the Crash Warning Application (CWA), in which vehicles continually broadcast frames storing information on their positions and speeds to notify the collision threat to vehicles or pedestrians. In order to realize the CWA, it is necessary to evaluate and improve the reliability in terms of the probability of receiving a frame from a vehicle having a crash threat.

In this paper, we evaluate the probability of correctly receiving a frame from a vehicle having a crash threat for the reliability of the CWA from various perspectives in both theoretical and practical situations. In addition, as a method of improving the reliability of the CWA, we propose some methods of restricting the frame transmission of some vehicles, and clarify that the success rate of frame reception is greatly improved compared to the current application.

# 概要

「情報通信技術を用いた便利で安心安全な社会」を意味するスマート社会の実現の一環として、ITS(Intelligent Transport Systems)の研究が活発に行われている。特に交通分野においては、自動運転やコネクテッドカーに関する研究が活発に進められている。

交通分野における ITS の核となる技術として、V2X (Vehicle-to-Everything) という「車両を主体とした通信を実現する技術」が注目されており、その V2X の応用先の一つに、「位置や速度の情報を各車両が絶えず周囲に通知することにより、衝突の危険性のある歩行者等に危険を知らせる」衝突警告アプリケーションがある。このアプリケーションの実現のためには、ある車両が衝突の恐れのある車両からのフレームを確実に受信できるかどうかの信頼性を評価及び向上させる必要がある。

本論文では、ある車両が衝突の恐れのある車両からのフレームを正しく受信できる確率を、理論的と現実的双方のシチュエーションにおいて様々な観点から評価する。また、本アプリケーションの信頼性向上の方法として、一部の車両のフレーム送信を制限する方式を提案し、現状のアプリケーションよりもフレーム受信成功確率が大幅に向上することを明らかにする。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	問題設定	3
2.1	V2X 通信を用いた衝突警告アプリケーション	3
2.1.1	本アプリケーションの概要	3
2.1.2	本アプリケーションにおける通信技術	3
2.1.3	本アプリケーションの問題提起	4
2.2	数式モデル	6
2.2.1	通信品質を表す数式モデル	6
2.2.2	フレーム送信確率を表す数式モデル	6
第 3 章	関連研究	8
3.1	衝突警告アプリケーションの収容数増加	8
3.2	DCC(Decentralized Congestion Control) 手法	8
3.2.1	DCC の送信制御パラメータ	9
3.2.2	DCC 手法における代表的アルゴリズム	9
3.3	本研究との違い	11
第 4 章	衝突警告アプリケーションの信頼性評価	12
4.1	定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置の場合における信頼性評価	12
4.1.1	定常ポアソン点過程	12
4.1.2	定常ポアソン点過程に従う点配置における点の密度と数	13
4.1.3	フレーム受信成功確率を表す数式モデルの導出	14
4.1.4	数値実験における条件設定	16
4.1.5	数値実験 1：車両密度ごとのフレーム受信成功確率の評価	16
4.1.6	数値実験 2：車両速度に応じた 1 秒間の平均フレーム受信数	17
4.1.7	数値実験 3：異なる車両配置でのフレーム受信成功確率の分散評価	18
4.2	現実データに基づく車両配置の場合における信頼性評価	20

4.2.1	交通流シミュレータ SUMO . . . . .	20
4.2.2	使用する現実データ . . . . .	20
4.2.3	数値実験における条件設定 . . . . .	21
4.2.4	数値実験 4：ボローニャ市内の車両配置における該当交差点ごとのフレーム 受信成功確率 . . . . .	22
<b>第 5 章</b>	<b>衝突警告アプリケーションの信頼性向上</b>	<b>23</b>
5.1	重要度に応じたフレーム送信制御 . . . . .	23
5.2	条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式 . . . . .	23
5.2.1	ボローニャデータにおける車両・歩行者の速度分布 . . . . .	24
5.2.2	数値実験における条件設定 . . . . .	24
5.2.3	数値実験 5：条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた該 当交差点ごとのフレーム受信成功確率 . . . . .	25
5.2.4	本方式の課題点 . . . . .	26
5.3	代表送信車を選抜する方式 . . . . .	29
5.3.1	代表送信車選抜方式のアルゴリズム構築の難しさ . . . . .	29
5.3.2	疑似的な代表送信車選抜方式 . . . . .	29
5.3.3	数値実験における条件設定 . . . . .	30
5.3.4	数値実験 6：疑似的代表的送信車選抜方式を用いた該当交差点のフレーム受信 成功確率 . . . . .	30
<b>第 6 章</b>	<b>まとめと今後の課題</b>	<b>35</b>
6.1	まとめ . . . . .	35
6.2	今後の課題 . . . . .	36
	参考文献	37
	謝辞	39
	研究成果	40

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

「情報通信技術を用いた便利で安心安全な社会」を意味するスマート社会の実現の一環として、ITS(Intelligent Transport Systems)の研究が活発に行われており [1], エネルギーや医療など様々な分野における課題を解決することを目標として掲げている。特に交通分野においては ITS の研究が注目されており、自動運転やコネクテッドカーに関する研究は活発に進められている。

交通分野における ITS の核となる技術として、V2X (Vehicle-to-Everything) と呼ばれる「車両と歩行者・車両間・車両と道路設備など車両を主体とした通信を実現する技術」がある。V2X は、自動料金収受、交通量調査、渋滞検知、信号機の切り替わりの認識による停止・発進の自動化など様々な応用が検討されているが、最も注目されている応用の一つに衝突警告アプリケーション (Crash Warning Application: CWA) [2, 3, 4] がある。衝突警告アプリケーションとは、車両が自身の位置や速度の情報 (以下、フレーム) を絶えずブロードキャストすることで自身の存在を近隣の車両や歩行者に認識させつつ、他の車両と歩行者からの位置情報に基づいて衝突の危険性を予見し、近隣の車両の運転手や歩行者に警告を行うアプリケーションである。衝突警告アプリケーションにより、全米においては 82% もの交通事故を回避できる可能性があったと文献 [5] では報告されている。

### 1.2 研究目的

衝突警告アプリケーションの実現のためには、ある車両が衝突の恐れのある車両からのフレームを確実に受信できるかどうかの信頼性を評価及び向上させる必要がある。本論文では、ある車両が衝突の恐れのある他車両からのフレームを正しく受信できる確率 (以下、フレーム受信成功確率) を、理論的と現実的双方のシチュエーションにおいて様々な観点から評価する。また、本アプリケーションの信頼性向上の方法として、一部の車両のフレーム送信を制限する手法を提案し、現状のアプリケーションよりもフレーム受信成功確率が大幅に向上することを明らかにする。

## 1.3 本論文の構成

以下に，本論文の構成内容を述べる．

### 第 1 章 序章

内容：本研究の背景・目的・論文構成について．

### 第 2 章 問題設定

内容：衝突警告アプリケーションの詳細と本研究における問題設定，及び通信品質評価のための数式モデルについて．

### 第 3 章 関連研究

内容：本研究の関連性のある研究の紹介と本研究との違いについて．

### 第 4 章 衝突警告アプリケーションの信頼性評価

内容：衝突警告アプリケーションの信頼性に関する評価方法と数値評価例．

### 第 5 章 衝突警告アプリケーションの信頼性向上

内容：衝突警告アプリケーションの信頼性向上に関する方式の提案と数値評価例．

### 第 6 章 結論と今後の課題

内容：本研究の総括と今後の課題点について．

## 第 2 章

# 問題設定

本章では、本研究の対象である V2X 通信を用いた衝突警告アプリケーションの詳細と本研究における問題設定、及び通信品質評価のための数式モデルについて述べる。

### 2.1 V2X 通信を用いた衝突警告アプリケーション

#### 2.1.1 本アプリケーションの概要

V2X (Vehicle-to-Everything) とは、車両と歩行者・車両間・車両と道路設備など車両を主体とした通信を実現する技術であり、以下の項目の総称である。

- V2N (Vehicle-to-Network) : 車両に搭載した LTE 機器などを使った通信
- V2V (Vehicle-to-Vehicle) : 車両同士の通信
- V2P (Vehicle-to-Pedestrian) : 車両と歩行者との通信
- V2I (Vehicle-to-roadside-Infrastructure) : 車両と道路脇に設置された機器との通信

V2X は、自動料金収受、交通量調査、渋滞検知、信号機の切り替わりの認識による停止・発進の自動化など様々な応用が検討されているが、最も注目されている応用の一つに衝突警告アプリケーション (Crash Warning Application: CWA) がある (図 2.1)。衝突警告アプリケーションとは、車両が自身の位置や速度の情報 (以下、フレーム) を絶えずブロードキャストすることで自身の存在を近隣の車両や歩行者に認識させつつ、他の車両と歩行者からの位置情報に基づいて衝突の危険性を予見し、近隣の車両の運転手や歩行者に警告を行うアプリケーションである。

#### 2.1.2 本アプリケーションにおける通信技術

V2X 通信として、V2X 用の無線 LAN 技術 (IEEE 802.11p[6]) を用いた Dedicated Short Range Communications (DSRC)[5, 7] と、LTE や 5G などセルラー通信を用いた Cellular-V2X (C-V2X) [8]



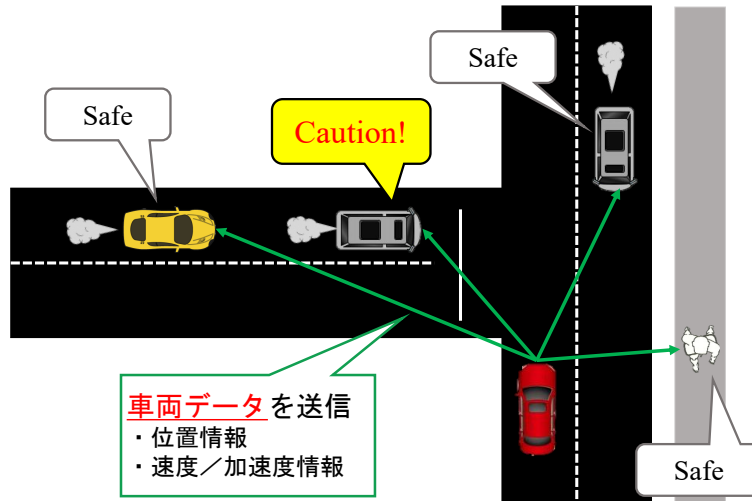


図 2.1 V2X 通信を用いた衝突警告アプリケーションのイメージ。

の 2 種類の技術が検討されている。DSRC はインフラレス方式であり、基地局を介さず通信機器自身が自律分散的に通信制御を行う。ただし自律分散的に通信制御を行うため、何らかのランダムアクセスのメカニズムが必要となる。一方 C-V2X はインフラベース方式であり、基地局経由で通信を行う。基地局は各通信ノードを登録・把握でき、送信タイミングなどを決めることができるため、中央集中型の通信制御が可能となり、前者よりも効率的な通信が行える。V2X 通信の既存インフラが無い現状で考えると、車両に通信機器を具備すればよいだけのインフラレスが普及の敷居は低いが、インフラが充実することが前提であれば、インフラベースが有利である。ただし基地局がカバーできない中山間地域などではインフラレスが必須になるため、インフラベースとインフラレスを組み合わせることが現実的である。本研究では、インフラレス方式における代表的な通信技術である DSRC に着目する。

DSRC で用いられる車両間通信規格 IEEE 802.11p は IEEE 802.11a をベースとして V2X 用に開発された技術であり、5.9GHz 帯において帯域幅が 10MHz の 7 つのチャンネルが確保されている。帯域幅 10MHz は IEEE 802.11a の半分であり、このためベーシックレートは 3Mbps となる。衝突警告に用いられるブロードキャストモードでは、この 3Mbps のベーシックレートが使われる。IEEE 802.11p はランダムアクセス方式として CSMA/CA を用いているが (図 2.2)、ブロードキャストモードでは再送がなく、ACK による送達確認も行われず、CW<sub>min</sub>(コンテンツンウィンドウの最小値) は 15 に固定されている。このプロトコルの単純さがゆえに輻輳が生じやすい。

### 2.1.3 本アプリケーションの問題提起

衝突警告アプリケーションでは、衝突の危険のある車両からのフレームを (衝突 2.5~3.5 秒前の) 1 秒間に 10 フレーム以上受信しなくてはならないことが定められているが [9, 10], 以下の 4 つの要因の影響で本要求条件が達成されなくなる恐れがある (図 2.3)。

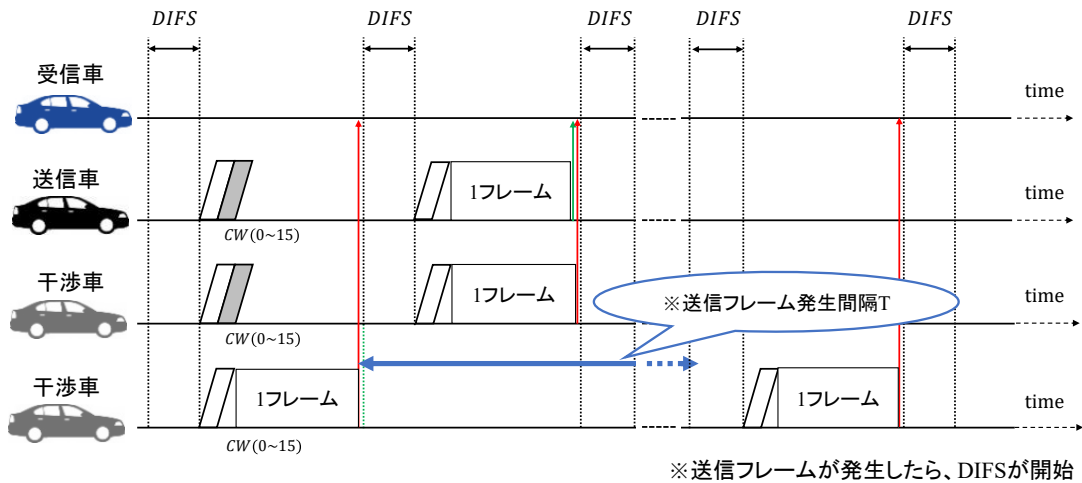


図 2.2 IEEE802.11p における CSMA/CA 方式.

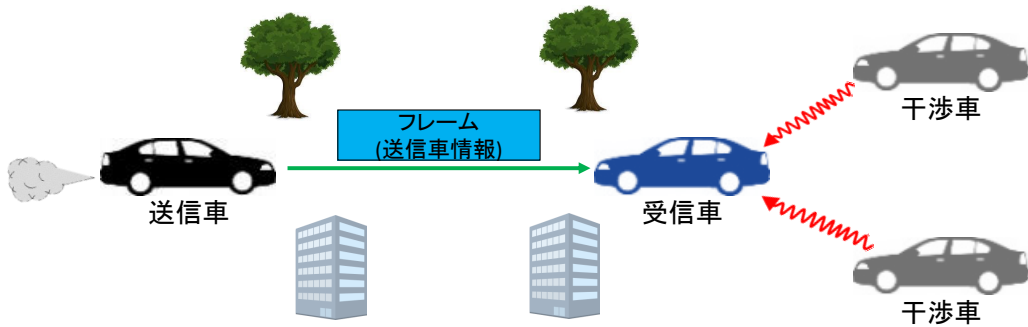


図 2.3 フレーム受信要求条件を妨げる要因.

1. 送信電力の距離による減衰
2. 建物などの周辺環境による電波の変動（フェージング）
3. 周辺の通信ノード（車両，歩行者）からの干渉電力
4. 各通信ノードのフレーム送信頻度

本研究では，混雑時に任意の車両が衝突の恐れのある車両からのフレームを正しく受信できるフレーム受信成功確率について考察する．2.2 節において，（フレーム受信が成功したか否かの基準となる）通信品質を表す数式モデル，そしてフレーム送信確率を表す数式モデルを紹介する．

## 2.2 数式モデル

### 2.2.1 通信品質を表す数式モデル

距離  $l$  離れた場所にある車両から送信されたフレームの信号強度  $S(l)$  はフェージングなどの影響を除き以下で与えられるものとする.

$$S(l) = cl^{-\alpha}.$$

ここで  $c$  は伝搬損失係数,  $\alpha$  は電波強度の距離減衰係数 ( $\alpha > 2$ ) を表す.

受信車が距離  $l$  離れた送信車 0 からのフレームを受信した際の  $SINR(l)$  を以下で定義する.

$$SINR(l) = \frac{S(l)H_0}{S_I}, \quad S_I \stackrel{\text{def}}{=} N_w + \sum_{i=1}^{\infty} I_i S(|\mathbf{x}_i|) H_i.$$

ここで,  $SINR$  は受信信号電力対干渉および雑音電力比 (Signal-to-interference-plus-noise ratio) を,  $S_I$  は干渉信号の強度を表す. また

- $\mathbf{x}_i$ : (干渉源となる) 車両  $i$  の座標 (確率変数)
- $|\mathbf{x}_i| \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ : 座標原点と  $\mathbf{x}_i (= (x_1, x_2))$  間のユークリッド距離
- $N_w$ : 自然雑音 (干渉源の車両以外の雑音) の強度 (確率変数)
- $I_i$ : 車両  $i$  がフレームを送信中のときに 1, それ以外のときに 0 を取る変数 (確率変数)
- $H_i$ : 車両  $i$  から発信された信号が受けるフェージングなどの影響を表す変数 (確率変数)

フレームの受信は  $SINR$  がしきい値 ( $\theta$ ) を超える場合に必ず成功し,  $SINR$  がしきい値を下回る場合は必ず失敗するものとする. 本研究では, 各車両は IEEE802.11p プロトコルの CSMA/CA 方式によるアクセス制御方法に従ってフレームを送信し, 衝突警告アプリケーション用のフレームが発生する間隔はすべての車両について  $T$  に等しいものとする. また, レイリー・フェージングにより個々の干渉波が指数分布に従って変動するので,  $H_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) は平均 1 の指数分布に従う確率変数となる. 簡単のため, 自然雑音  $N_w$  は無視できるものとする.

### 2.2.2 フレーム送信確率を表す数式モデル

任意の車両がフレームを送信中である確率  $\rho = E[I_1]$  は, 次の考察から求まる [11]. 本モデルの場合, フレームを送信する可能性のある車両は無限に多く存在する. 従って, フレーム送信が終了し (CW のカウントダウンのための) 1 スロット時間経過後に, 必ずいずれかの車両がまたフレームの送信を試みる. つまり, フレーム送信時間を  $T_f$ , スロット時間を  $T_s$  とすると,  $\tau \stackrel{\text{def}}{=} T_f + T_s$  の間隔でフレームを送信できるタイミング (フレーム送信タイミング) が訪れ, 必ずそのタイミングでフレームの送信が行われる (図 2.4). 各車両は一定の間隔  $T$  でフレームの送信を試みるならば (かつ  $T > \tau$  ならば), 各車両は  $n = T/\tau$  個のフレーム送信タイミングおきにフレームを送信する. つまり, フレーム送信タイミングで任意の車両がフレームを送信している確率は  $1/n = \tau/T$  である. 以上の考察より

$$\rho = \frac{\tau}{T} = \frac{T_f + T_s}{T}.$$

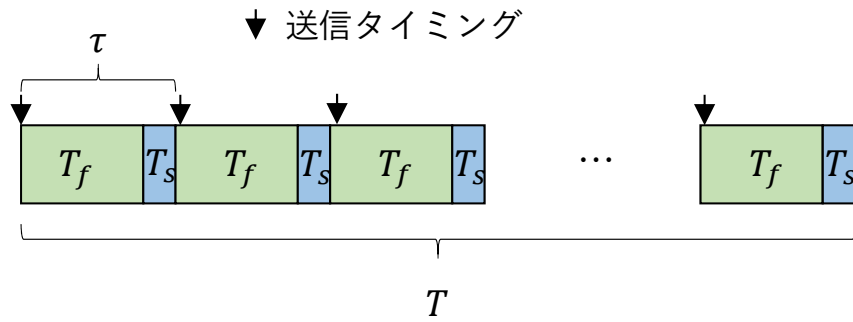


図 2.4 フレーム送信タイミング.

なお IEEE 802.11p では，フレーム再送や再送時の指数バックオフによる CW の増加は行わない．端末はフレームを送信すると，0 以上 15 以下の任意の値に CW を設定し，CW が 0 までカウントダウンされると次のスロットの先頭でフレームを送信する． $T$  が十分小さく，CW のカウントダウンに要する時間がフレーム送信間隔を決定する要因となる場合は，車両は平均してフレーム送信タイミング 17/2 回に対して 1 回フレームを送信するので， $\rho = 2/17$  である．従って，最終的には

$$\rho = \min \left\{ \frac{2}{17}, \frac{T_f + T_s}{T} \right\}. \quad (2.1)$$

## 第 3 章

# 関連研究

本章では、本研究の関連性のある研究をいくつか紹介し、本研究との違いについて述べる。

### 3.1 衝突警告アプリケーションの収容数増加

ノード数が増加すると、輻輳や干渉の影響で、収容台数 (衝突警告アプリケーションのフレーム受信要求条件を満たす最大のノード数) は低下させざるを得ない [12]。しかし本アプリケーションの普及を考えると、収容台数を増加させる必要がある。CSMA/CA の特性として、ノード数が過剰になると無線通信帯域に輻輳が生じるため、負荷に対して受信できるフレーム数が低下してしまう。これにより、CWA の受信頻度要求を満たすことができなくなり、収容台数、すなわち、本アプリケーションの高精度な衝突警告が可能なノード数は低下させざるえないということになる。将来的に本アプリケーションが普及し、多数の自動車や歩行者が通信機能を備えると、ノード数が増加することは必然であり、収容台数の増加を研究すべきである。

### 3.2 DCC(Decentralized Congestion Control) 手法

輻輳や干渉を緩和するために、送信パラメータ (送信頻度や送信電力など) を制御し、周波数利用効率を向上させる手法として DCC(Decentralized Congestion Control) 手法という、自律分散的に各通信ノードの送信を抑制することで輻輳・干渉を低減する手法が提案されている。既存 DCC 手法では、衝突ノードの受信頻度要求を満たすことができていない。なぜならば、衝突可能性の高いノードであっても送信パラメータを抑制するように制御している、もしくは、衝突可能性の低いノードの送信パラメータを抑制せずに輻輳が十分に低減されていないためである。

表 3.1 DCC の送信制御パラメータ.

制御方法	特徴	欠点
送信頻度制御 (TRC:Transmit Rate Control)	送信頻度の低減 ⇒トラフィック量低下による輻輳緩和	送信頻度低下 ⇒受信頻度低下
送信電力制御 (TPC:Transmit Power Control)	送信電力の低減 ⇒干渉電力低下	受信電力低下 ⇒ SINR 低下
キャリアセンス閾値制御 (DSC:DCC Sensitivity Control)	キャリアセンス閾値高める ⇒送信数低下による輻輳緩和	送信頻度低下 ⇒受信頻度低下
データレート制御 (TDC:Transmit Datarate Control)	高いデータレートの変調方式も使用 ⇒帯域増加による輻輳緩和	SINR の基準上昇 (耐性低下)
送信公平性制御 (TAC:Transmit Access Control)	高優先度のメッセージの大量送信を抑制 ⇒輻輳緩和	送信頻度低下 ⇒受信頻度低下

※ キャリアセンス：同じ周波数で同時に複数キャリア（搬送波）を出さないように制御する技術

### 3.2.1 DCC の送信制御パラメータ

DCC 手法は、周波数利用効率の向上のため、送信パラメータを変動することによって送信抑制を行い、輻輳や干渉を低減する手法 [13] である。ETSI(European Telecommunications Standards Institute) により、5 つのパラメータ制御 (表 3.1) を行うと定めている。また、この 5 つの制御方法の中でも、送信頻度制御 (TRC) とデータレート制御 (TDC) における輻輳緩和が最もベーシックであると文献 [14] にて述べられている。

### 3.2.2 DCC 手法における代表的アルゴリズム

以下の表 3.2 に DCC 手法における代表的なアルゴリズムを示す。本稿では、3.2.1 節で言及した最もベーシックな制御方法である送信頻度制御 (TRC) の代表的アルゴリズムである LIMELIC[15, 16], データレート制御 (TDC) の代表的アルゴリズムである DR-DCC[17] と PDR-DCC[14] について簡単に紹介する。

#### 1. LIMELIC

- 送信頻度制御 (TRC) の代表的アルゴリズム
- 一定時間間隔ごとに送信車両が“チャンネル使用率の上限閾値を上回らないように”自身の送信頻度を調整することで輻輳緩和

#### 2. DR-DCC

- データレート制御 (TDC) の代表的アルゴリズム
- チャンネル使用率に上限と下限を設け、閾値以下に維持することで輻輳緩和
- チャンネル使用率の測定はデータレートの不要な変動を避けるためにヒステリシス（動作履

表 3.2 DCC 手法における代表的アルゴリズム。

アルゴリズム名	制御方法
LIMELIC	送信頻度制御 (TRC)
AIMD	送信頻度制御 (TRC)
D-FPAV	送信電力制御 (TPC)
TP-DCC	送信電力制御 (TPC)
DR-DCC	データレート制御 (TDC)
PDR-DCC	データレート制御 (TDC)
PHY-DCC	データレート制御 (TDC)

歴) を利用

- チャンネル使用率の測定の影響で、データレートの公平な割り当てに十分な情報を提供できない⇒同様のチャンネル負荷状態にある車両間で不公平なデータレートが割り当てられる可能性あり (ex. CBR0.6 の 2 つの近隣車両が、6Mbps と 24Mbps のデータレートを選択する可能性)

### 3. PDR-DCC

- データレート制御 (TDC) の代表的アルゴリズム
- 車両が検知したパケット数とチャンネル使用率を用いてデータレートを調整することで、DR-DCC で実現できなかった公平性を担保
- 一定時間間隔ごとに車両が検知したパケット数を、送れるパケット数の上限値 (=総ビジー時間の最大値/設定されたデータレート時のパケット送信時間) に合わせることで、データレートを調整

LIMERIC は全通信ノードの送信頻度を均一に制御するため公平性は担保されるが、衝突ノードであっても送信パラメータを抑制、もしくは、衝突ノードでないノードの送信パラメータを抑制しない可能性があるため輻輳を十分に低減することができない。一方、DR-DCC は LIMERIC と比べて高い通信トラフィック密度でも効率良い通信を実現できるが、車両間で不公平が生じるため、信頼性への低下に影響してしまう。PDR-DCC はパケット数とチャンネル使用率を考慮に入れてデータレートを調整することで、DR-DCC よりも高い公平性を担保することが可能となった。

また、文献 [18] では送信頻度制御の LIMERIC とデータレート制御の PDR-DCC を組み合わせることで、より高い信頼性を獲得できることを明らかにしている。

### 3.3 本研究との違い

3.2.2 節で紹介したアルゴリズムと本研究の違いは 2 点ある。

1 点目は、チャンネル使用率に対する考え方である。3.2.2 節で紹介したアルゴリズムでは、チャンネル使用率に上限や下限を設定し、それに合わせて制御することで通信品質を保つという制御方式であった。一方で、本研究におけるシミュレーションでは、通信ノードが密集した混雑時を想定していることから、チャンネル使用率が限りなく 100% に近いと考え、制御の対象とはなりえないと判断している。

2 点目は、衝突警告を目的にしているかどうかである。3.2.2 節で紹介したアルゴリズムは、単一の送信相手を指定してフレームを送信するユニキャストモードを想定している。一方で、本研究では、周囲の不特定多数の通信ノードに同時にフレームを送信するブロードキャストモードを想定している。この違いが生じるのは、目的の違いが起因している。本研究では、衝突警告を目的にしているため、衝突の危険性のある周囲の通信ノード全てにフレームを送信したいと考えるのでブロードキャストモードを利用する。一方で、3.2.2 節のアルゴリズムにおいては、衝突警告に限らない V2X を用いたアプリケーションの輻輳緩和を目的としているため、ユニキャストモードを利用する。また、ブロードキャストモードではベーシックレート 3Mbps で固定のため、データレートは制御対象とはなりえない。



## 第4章

# 衝突警告アプリケーションの信頼性評価

本章では、理論的と現実的双方の車両配置でのシチュエーションにおけるフレーム受信成功確率を様々な観点から評価することで衝突警告アプリケーションの信頼性を明らかにする。

### 4.1 定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置の場合における信頼性評価

本節では、衝突警告アプリケーションの基本性能を明らかにするため、定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置でのシチュエーションにおけるフレーム受信成功確率を評価する。

#### 4.1.1 定常ポアソン点過程

基地局や車両、スマートフォンを持った歩行者などの通信ノードは、規則正しく配置されているわけではなく、ランダムに配置されているように見える。無線ネットワークの性能が通信ノードの相対位置に依存する理由は2つある。まず、周辺のノード（車両、歩行者）からの干渉電力の影響である。無線電波を受信する通信ノードは通信相手のノードからの電波だけでなく、その他の同じ周波数を用いている通信ノードからの電波も受信し、これが通信相手からの電波と干渉してしまうのである。次に、送信電力の距離による減衰である。これらの電波は送信ノードからの距離に応じて徐々に弱くなる。以上の理由から、無線ノードの配置の不規則さが受信電波の強弱に与える影響、つまりネットワークの性能に与える影響を考慮するために空間点過程が利用される。

空間点過程モデルの点配置には、定常ポアソン点過程とジニブル点過程といった2種類の点配置が存在する。本研究では、解析的な取り扱いが比較的容易な定常ポアソン点過程に従う点配置を考える。図4.1に定常ポアソン点過程に従う点配置の一例に示す。円で囲まれた領域内の青の点は通信ノードである。すべての通信ノードが互いに独立に配置しているため点が疎になっているところと密なところが現れる。

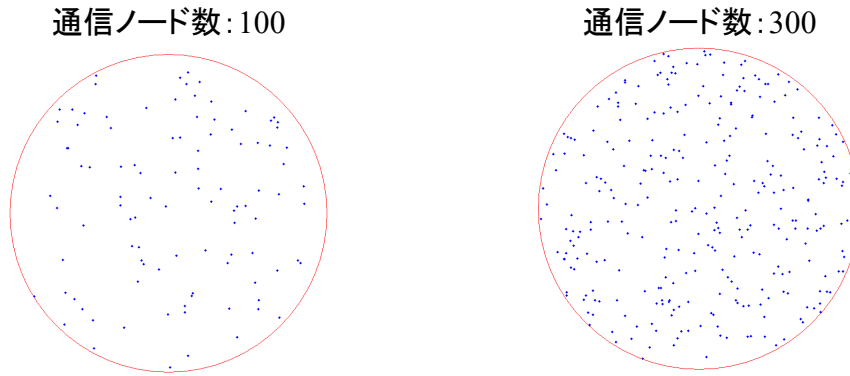


図 4.1 定常ポアソン点過程に従う点配置.

#### 4.1.2 定常ポアソン点過程に従う点配置における点の密度と数

空間点過程の数値計算において、通信ノードの密度（強度）は重要なパラメータである。ある領域  $A$  内の点過程  $\Phi$  が定常ポアソン点過程に従うときとすると、密度  $\lambda$  は以下の式で定義される [19].

$$\lambda = \frac{E_{\Phi}[\Phi(A)]}{|A|}$$

ただし、上式は以下の条件が定められている。

- 密度は特定の領域の選択に依存しない
- 定常性は密度が一定であることを意味する
- 命題の逆は一般的に真ではない（定密度は定常性を意味しない）

以下、証明を記述する。点過程  $\Phi$  が定常ポアソン点過程に従い、 $A \subset \mathbb{R}^d$ （2次元平面）のとき、

$$\begin{aligned} \frac{E_{\Phi}[\Phi(A)]}{|A|} &= \frac{1}{|A|} \sum_{k=0}^{+\infty} k P(\Phi(A) = k) \\ &= \frac{1}{|A|} \sum_{k=0}^{+\infty} k \frac{(\lambda|A|)^k}{k!} \exp(-\lambda|A|) \\ &= \frac{\exp(-\lambda|A|)}{|A|} \sum_{k=0}^{+\infty} k \frac{(\lambda|A|)^k}{k!} = \frac{\exp(-\lambda|A|)}{|A|} \sum_{k=1}^{+\infty} k \frac{(\lambda|A|)^k}{k!} \\ &= \frac{\exp(-\lambda|A|)}{|A|} (\lambda|A|) \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(\lambda|A|)^{k-1}}{(k-1)!} \\ &= \frac{\exp(-\lambda|A|)}{|A|} (\lambda|A|) \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} \end{aligned}$$

規格化条件  $\exp(-\lambda|A|) \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} = 1$  ,  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(\lambda|A|)^n}{n!} = \exp(\lambda|A|)$  より、

$$\begin{aligned} \frac{E_{\Phi}[\Phi(A)]}{|A|} &= \frac{\exp(-\lambda|A|)}{|A|} (\lambda|A|) \exp(\lambda|A|) \\ &= \lambda \end{aligned}$$

点の配置が定常ポアソン点過程に従っているとき、領域  $A$  に含まれる点の数が従う分布はポアソン分布に従う。したがって、領域  $A$  に対して点過程  $\Phi$  が強度  $\lambda$  の定常ポアソン点過程の場合、以下の式が成り立つ。

$$P(\Phi(A) = n) = \frac{e^{-\lambda|A|}(\lambda|A|)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, \dots$$

ここで、 $\Phi(A)$  は領域  $A$  内の点過程  $\Phi$  の点の数を表す確率変数、 $|A|$  は領域  $A$  のルベーク測度である。また、点の数の期待値は

$$E_{\Phi}[\Phi(A)] = \sum_{n=0}^{\infty} nP(\Phi(A) = n) = \lambda|A|$$

と表され、点の数が存在しない確率は

$$P(\Phi(A) = 0) = e^{-\lambda|A|}$$

となる。したがって、少なくとも 1 つは点が存在する確率は

$$P(\Phi(A) \geq 1) = 1 - e^{-\lambda|A|}$$

と表される。

### 4.1.3 フレーム受信成功確率を表す数式モデルの導出

定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置におけるフレーム受信成功確率を理論的に算出するために数式モデルの導出を行う。ただし、2.2 節にて前述した通り、レイリー・フェージングにより個々の干渉波が指数分布に従って変動する場合を考えるので、 $H_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) は平均 1 の指数分布に従う確率変数とする。また、自然雑音  $N_w$  は無視できるものとする。

フレーム受信成功確率を表す数式モデルを導出するためには、まず干渉信号となる車両がどのような強度分布を有しているのかを知る必要がある。(なお、距離とともに強度がべき則で減衰する信号の発信源がランダムに存在する  $n$  次元空間において、全ての発信源からの重畳信号 (Power-law Shot Noise) の強度分布については古くから研究が行われており、様々な性質が報告されており [20, 21]、本論文では文献 [21] で示されている結果を参照する。)

2.2 節にて定義した干渉信号強度  $S_I$  の分布関数を直接算出することは困難であるので、以下では  $S_I$  のラプラス変換形を導出する。

$$\mathcal{L}_{S_I}(s) = E[e^{-sS_I}] = E\left[e^{-s \sum_{i=1}^{\infty} I_i S((\mathbf{x}_i)H_i)}\right]$$

$\rho \stackrel{\text{def}}{=} E[I_1]$  (任意の車両がフレームを送信中である確率) とおくと

$$\begin{aligned} & E\left[e^{-s \sum_{i=1}^{\infty} I_i S((\mathbf{x}_i)H_i)}\right] \\ &= E\left[\prod_{i=1}^{\infty} e^{-sI_i S((\mathbf{x}_i)H_i)}\right] \\ &= \exp\left\{-\lambda\rho E\left[\int (1 - e^{-sS((\mathbf{x})H)}) d\mathbf{x}\right]\right\} \\ &= \exp\left\{-2\pi\lambda\rho E\left[\int_0^{\infty} (1 - e^{-scr^{-\alpha}H}) r dr\right]\right\}. \end{aligned}$$

最後の式の指数の肩の定積分は、以下のように計算できる.

$$\begin{aligned}
& \int_0^\infty (1 - e^{-scr^{-\alpha}H}) r dr \\
&= \frac{1}{2} \int_0^\infty (1 - e^{-scx^{-1}H}) \delta x^{\delta-1} dx \quad (\leftarrow x = r^{-\alpha}, \delta \stackrel{\text{def}}{=} 2/\alpha) \\
&= \frac{1}{2} (scH)^\delta \delta \int_0^\infty (1 - e^{-y}) y^{-(1+\delta)} dy \quad (\leftarrow y = scH/x) \\
&= \frac{1}{2} (scH)^\delta \int_0^\infty e^{-y} y^{-\delta} dy \\
&= \frac{1}{2} (scH)^\delta \Gamma(1 - \delta).
\end{aligned}$$

ここで  $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数である. 以上より

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{S_I}(s) &= e^{-Bs^\delta}, \\
B &\stackrel{\text{def}}{=} \pi\lambda\rho c^\delta E[H^\delta] \Gamma(1 - \delta) = \pi\lambda\rho c^\delta \Gamma(1 - \delta) \Gamma(1 + \delta) \\
&= \pi\lambda\rho c^\delta \frac{\pi\delta}{\sin \pi\delta}.
\end{aligned}$$

ここで

$$E[H^\delta] = \int_0^\infty x^\delta e^{-x} dx = \Gamma(1 + \delta).$$

であること, および  $\Gamma(1 - \delta)\Gamma(1 + \delta) = \frac{\pi\delta}{\sin \pi\delta}$  であることを用いた. なお, ごく近くに干渉信号の発信者がいる可能性が除外できない影響から干渉信号の強度の期待値  $E[S_I]$  は有限に収まらず発散する. また,  $S_I$  は裾の長い分布を持ち, 袖の方ではべき則に従って減衰する [11].

よって, 距離  $l$  離れた車両からのフレームの受信に成功する確率  $p_{suc}(l)$  は, 干渉信号強度  $S_I$  のラプラス変換系から直接求まり, 以下のシンプルな陽表現を持つ式が求まる.

$$\begin{aligned}
p_{suc}(l) &= P(SINR(l) > \theta) = P\left(\frac{S(l)H}{S_I} > \theta\right) \\
&= P\left(H > \frac{\theta S_I}{S(l)}\right) = P\left(H > \frac{\theta l^\alpha}{c} S_I\right) \\
&= \mathcal{L}_{S_I}\left(\frac{\theta l^\alpha}{c}\right) \\
&= E\left[e^{-\frac{\theta l^\alpha}{c} S_I}\right] = \exp\left(-l^2 \pi \lambda \rho \theta^\delta \frac{\pi \delta}{\sin \pi \delta}\right). \tag{4.1}
\end{aligned}$$

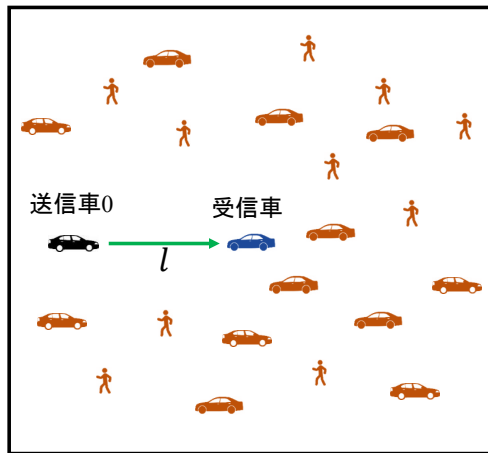


図 4.2 定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置.

表 4.1 数値実験における条件設定.

フレームサイズ [byte]	ヘッダ	32
	ペイロード	250
通信速度 [Mbps]	$3.0 \times 10^{-6}$	
DIFS[s]	$3.4 \times 10^{-5}$	
SLOT 時間 [s]	$9.0 \times 10^{-6}$	
伝搬損失係数 $\alpha$	3.5	
閾値 $\theta$ [dB]	$4(10^{0.4} \approx 2.5)$	
ノイズ信号電力 $N_w$ [dB]	0	

※ 建物の多い都市部では  $\alpha$  は 3 から 4 の値を取る.

#### 4.1.4 数値実験における条件設定

1 平方 km に平均して 1000 台~3000 台の密度  $\lambda$  で車両・歩行者（通信ノード）が配置される場合（図 4.2）において、受信車（青い車両）が距離  $l$  離れた送信車 0（黒い車両）からのフレームを正しく受信できるフレーム受信成功確率を、車両間の距離の関数として評価した。また、用いるパラメータの値を表 4.1 に示す。

#### 4.1.5 数値実験 1：車両密度ごとのフレーム受信成功確率の評価

まず、定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置における車両密度ごとのフレーム受信成功確率を求める。図 4.3 は車両密度  $\lambda$  が 1000 [台/km<sup>2</sup>] と車両密度が 2000 [台/km<sup>2</sup>] の場合の結果である。車両は 1 秒間に 15 フレーム送信するものとした。衝突警告のためには 1 秒間に 10 フレーム以上受

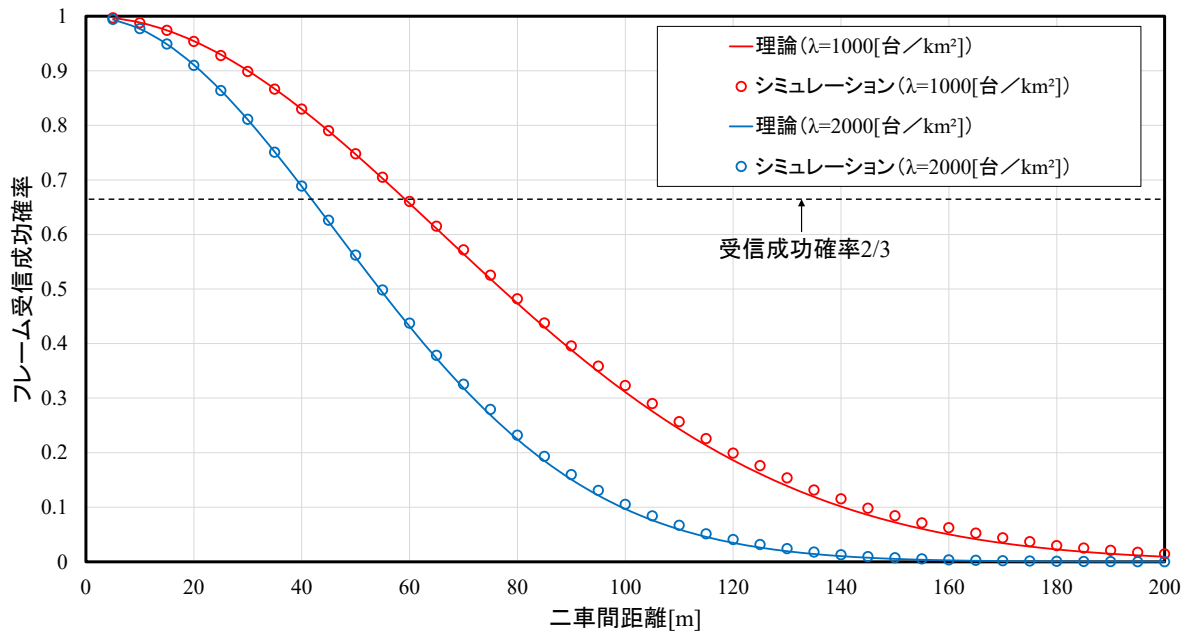


図 4.3 定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置におけるフレーム受信成功確率 ( $\lambda = 1000, 2000$ [台/ $km^2$ ]).

信する必要があるため、車両が 1 秒間に 15 フレーム送信する場合、フレーム受信成功確率は  $2/3$  以上でなければならない。

この条件は受信車-送信車 0 の距離（以下、二車間距離）がそれぞれ 60m 以内、40m 以内の場合にのみ満たされる。また、理論では車両が 2 次元平面内の無限遠まで配置されているとして結果を導いているが、シミュレーションでは車両を無限遠まで配置することはできないので、十分な計算精度を確保できる 1km 以内を配置範囲とする [11]。

#### 4.1.6 数値実験 2：車両速度に応じた 1 秒間の平均フレーム受信数

衝突警告アプリケーションでは、衝突の危険のある車両からのフレームを（衝突 2.5～3.5 秒前の）1 秒間に 10 フレーム以上受信しなくてはならないことが定められている。例えば 60km/h の車両は 3 秒間で 50m 走行できるため、60km/h の車両との衝突を回避するためには、少なくとも 50m 離れた場所にいる車両から 1 秒間に 10 フレーム以上受信できる必要があると考えられる。そこでフレームの送信頻度を増やせば受信フレーム数は増加するように思われるが、各車両がフレームの送信頻度を増やしすぎると無線空間が混雑してしまい、かえって受信できるフレームの数を減らす恐れがある。車両が衝突の 3 秒前の位置にいるものとして、その位置からフレームを送信した場合のフレームの送信頻度と 1 秒間に受信できるフレーム数の期待値の関係を理論的に評価した。

図 4.4 は車両速度が 40, 50, 60km/h での結果である。車両速度が 40km/h の場合では、送信フレーム頻度が 1 秒間に 15 回以上であれば、 $\lambda = 3000$  [台/ $km^2$ ] であっても「1 秒間に 10 フレーム以上」という基準は満たされる。車両速度が 50km/h の場合では、 $\lambda = 2000$  [台/ $km^2$ ] であれば送信フ

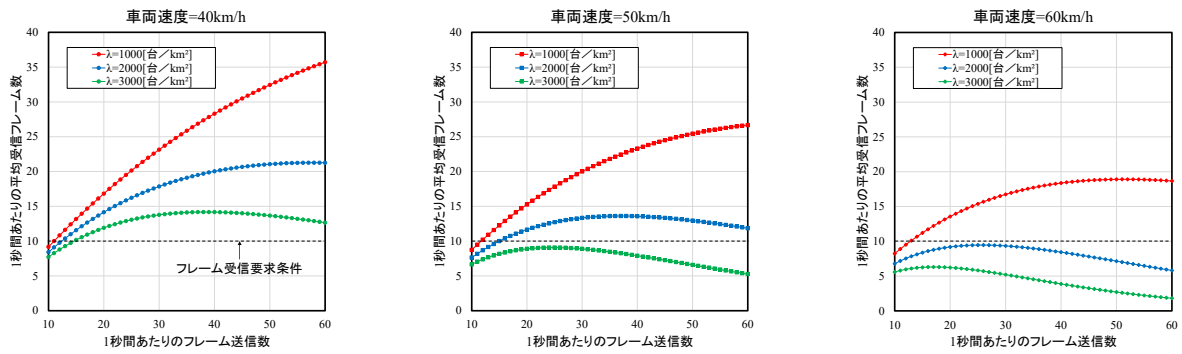


図 4.4 1 秒間の平均受信フレーム数 (車両速度=40, 50, 60[km/h]).

フレーム頻度が 1 秒間に 15 回以上であれば「1 秒間に 10 フレーム以上」という基準は満たされるが、 $\lambda = 3000$  [台/km<sup>2</sup>] だとフレーム送信頻度に関わらず基準は満たされない。車両速度が 60km/h の場合では、 $\lambda = 2000, 3000$  [台/km<sup>2</sup>] だとフレーム送信頻度に関わらず「1 秒間に 10 フレーム以上」という基準を満たすことはできなくなるが、 $\lambda = 1000$  [台/km<sup>2</sup>] であれば基準は十分に満たされる。

以上の結果から、車両密度が一定値を超えてしまうとフレーム送信頻度に関わらずフレーム受信要求条件を満たせない、つまり車両密度や車両速度に大きく依存することが明らかになった。また、この条件下ではフレーム送信頻度は 1 秒間に 15 回程度以上に設定するのが良いことも分かった。

#### 4.1.7 数値実験 3：異なる車両配置でのフレーム受信成功確率の分散評価

4.1.6 節にて、フレーム受信要求条件の達成には車両密度や車両速度が大きく関わることを示した。本節では、信号干渉源となる車両配置の影響度を明らかにするために、定常ポアソン点過程に従う 1000 の車両配置パターンにおけるフレーム受信成功確率の分散を評価する。車両は 15 [フレーム/s] 送信するものとし、衝突警告のためには 10 [フレーム/s] 以上受信する必要があるので、フレーム受信成功確率は 2/3 以上でなければならない。

図 4.5 は車両密度  $\lambda = 1000$  [台/km<sup>2</sup>]、図 4.6 は  $\lambda = 2000$  [台/km<sup>2</sup>] での結果であり、それぞれ 1000 回のシミュレーションのフレーム受信成功確率の平均値・上位 1%・下位 1% を示している。どちらの車両密度の場合においてもフレーム受信成功確率の分布範囲が狭く、分散は小さいといえる。 $\lambda = 1000$  [台/km<sup>2</sup>] の場合では二車間距離  $l = 65m$  のときに上位 1%・下位 1% の差が最大値を取るが 0.15 (0.69-0.54)、 $\lambda = 2000$  [台/km<sup>2</sup>] の場合でも  $l = 45m$  のときに最大値 0.15 (0.70-0.55) と比較的小さい。

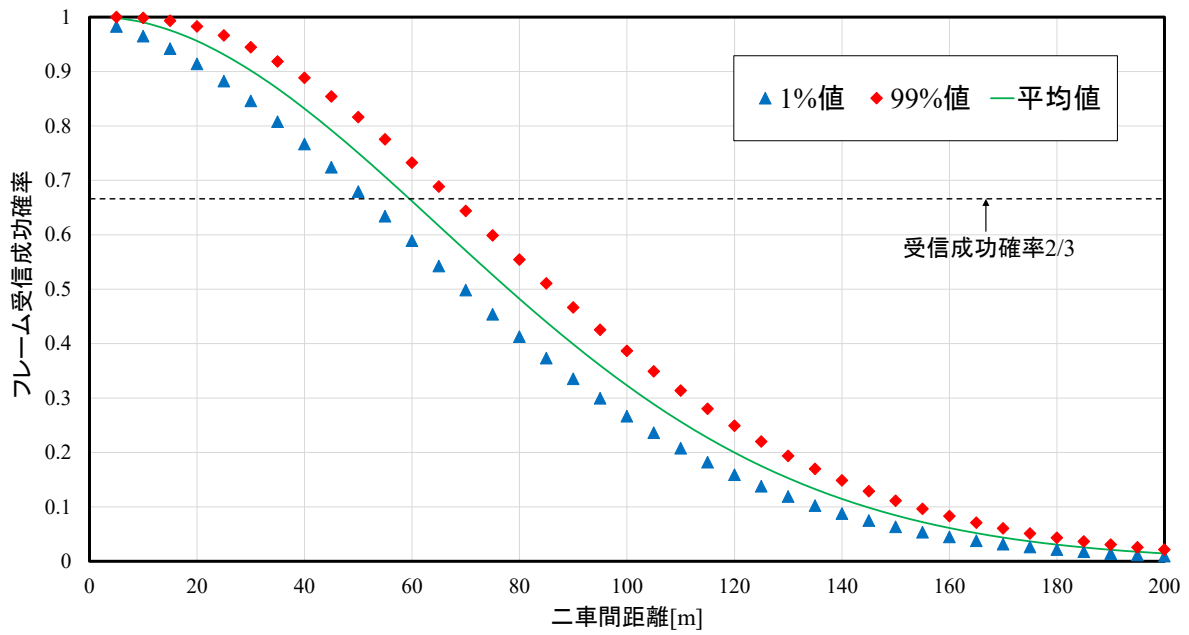


図 4.5 定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置におけるフレーム受信成功確率の分散 ( $\lambda = 1000$ [台 /  $km^2$ ]).

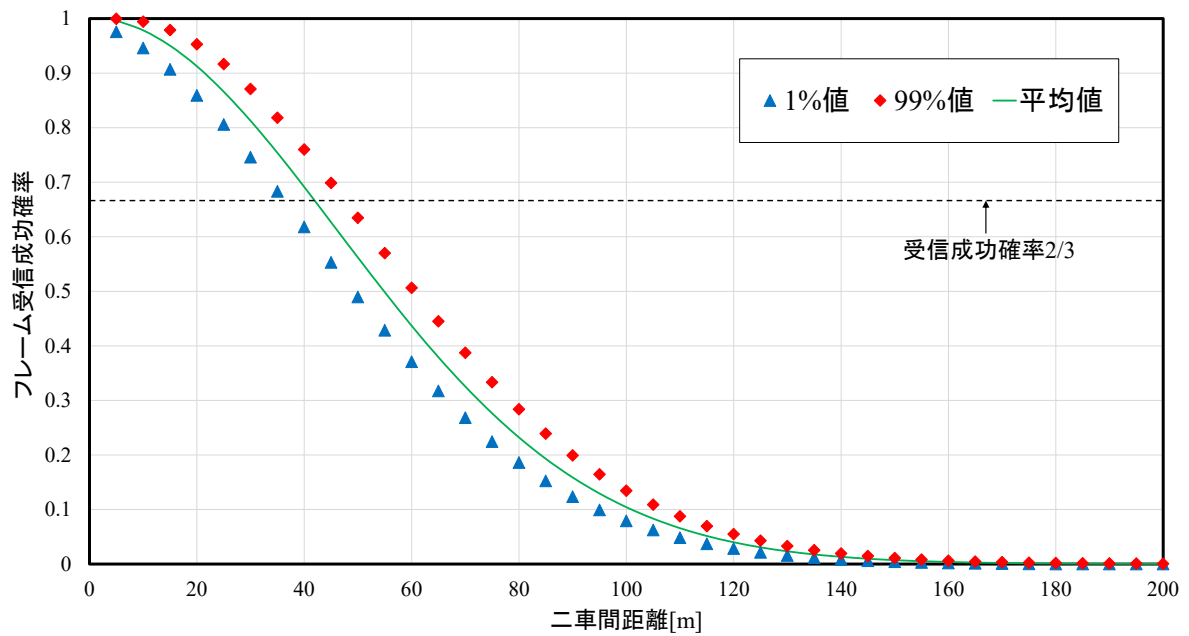


図 4.6 定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置におけるフレーム受信成功確率の分散 ( $\lambda = 2000$ [台 /  $km^2$ ]).



## 4.2 現実データに基づく車両配置の場合における信頼性評価

4.1 節では定常ポアソン点過程に従うランダム車両配置でのシミュレーションにおけるフレーム受信成功確率を評価し、衝突警告アプリケーションの基本性能を明らかにした。本節では、より現実的な場面における本シミュレータの信頼性を評価するために、現実データに基づく車両配置でのシミュレーションにおけるフレーム受信成功確率を評価する。

### 4.2.1 交通流シミュレータ SUMO

本研究では、現実的配置を取得するために、交通流シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) [22] を利用した。SUMO は、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が開発しているオープンソースの交通流シミュレータであり、高度交通システム (ITS) の研究でもよく利用されている。自動車をエージェントと見立て、また、信号や道路ネットワークを環境と見立て、エージェント間の相互作用およびエージェントと環境の相互作用を考慮し、一定の法規に従った交通流を再現できる。

### 4.2.2 使用する現実データ

SUMO では、イタリア・ボローニャ市内のある区域のシナリオデータが取得可能である。このデータには、2008 年 11 月 11 日 AM8 時~9 時半の時間帯（時間帯としては混み具合がピーク時よりやや落ちる程度）における車両・歩行者の情報（位置・速度・進行方向など）や交通環境の情報等が格納されている。図 4.7 は、SUMO のシミュレーションにおけるイタリア・ボローニャ市内のある区域の一場面をスナップショットとして切り取ったイメージ図である。

本研究では、ボローニャデータにおける車両・歩行者が最も多いタイミング（8 時 36 分 32 秒）での配置（図 4.8）を使用する。4.2.4 節の数値実験では、以下の表 4.2 に車両密度・配置の違う 4 つの交差点におけるフレーム受信成功確率をそれぞれ求め比較することで、現実的なシミュレーションにおける衝突警告アプリケーションの信頼性、また、現実データに基づく車両配置・密度がもたらす本アプリケーションのフレーム受信成功確率への影響度を評価する。

表 4.2 該当交差点の詳細。

交差点 番号	座標		車両・歩行者密度 [ノード / $m^2$ ]		
	x	y	半径 50m の円範囲	半径 100m の円範囲	半径 150m の円範囲
交差点 1	456	542	$8.03 \times 10^{-3}$	$3.60 \times 10^{-3}$	$2.66 \times 10^{-3}$
交差点 2	582	854	$7.03 \times 10^{-3}$	$3.12 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-3}$
交差点 3	1448	1072	$5.73 \times 10^{-3}$	$2.42 \times 10^{-3}$	$1.73 \times 10^{-3}$
交差点 4	967	643	$3.31 \times 10^{-3}$	$2.33 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-3}$

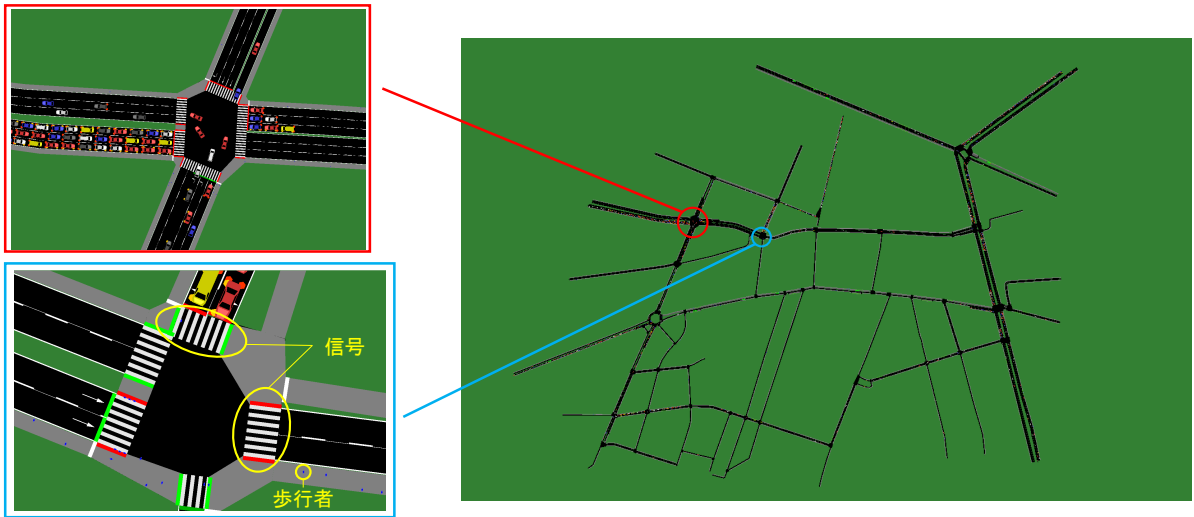


図 4.7 交通流シミュレータ SUMO におけるポローニャ市内のある区域.

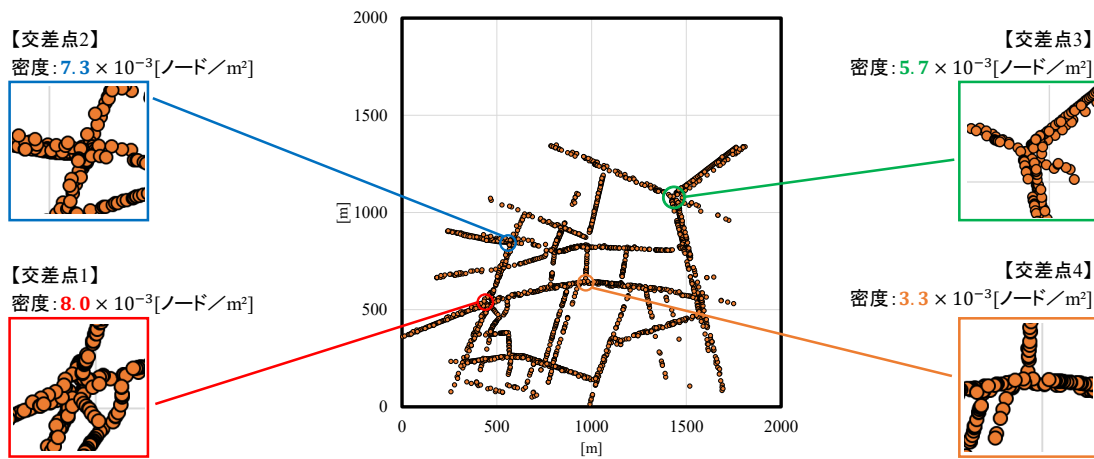


図 4.8 ポローニャ市内のある区域における車両配置と該当交差点の詳細.

### 4.2.3 数値実験における条件設定

4.1 節と同様、用いるパラメータの値を表 4.1 に示す。また、車両は 15 [フレーム / s] 送信するものとし、衝突警告のためには 10 [フレーム / s] 以上受信する必要があるので、フレーム受信成功確率は 2/3 以上でなければならない。

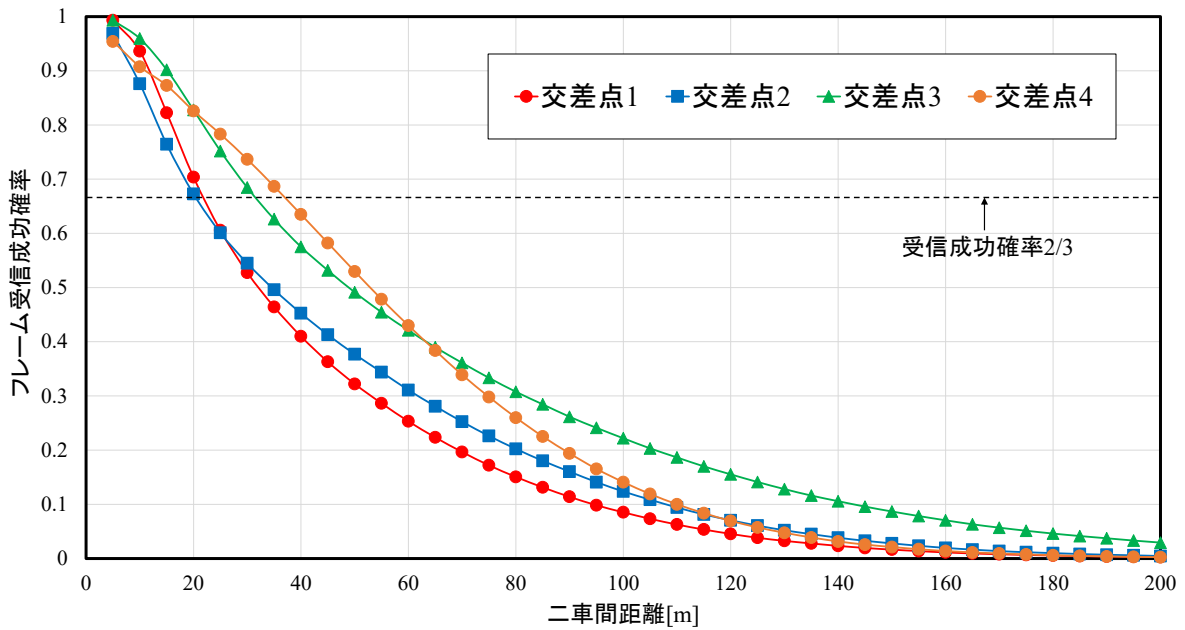


図 4.9 ポローニャ市内の車両配置における該当交差点ごとのフレーム受信成功確率.

#### 4.2.4 数値実験 4 : ポローニャ市内の車両配置における該当交差点ごとのフレーム受信成功確率

図 4.9 に、表 4.2 に示した車両密度・配置の違う 4 つの交差点で得られた値をそれぞれ平均した結果を示す。交差点ごとに比較すると、フレーム受信成功確率にバラつきがあることから分散は大きいといえる。次に、60km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である  $l = 50m$  を基準に評価すると、交差点 1~4 においてフレーム受信成功確率が  $2/3$  以上となるにはそれぞれ  $l \approx 22, 20, 32, 36m$ 、つまりどの交差点においても  $l = 50m$  では 1 秒間に 10 フレーム未満しか受信できない。また、40km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である  $l = 33.3m$  を基準に評価しても、交差点 4 のみフレーム受信成功確率が  $2/3$  以上となり、交差点 1~3 では達成されない。

## 第 5 章

# 衝突警告アプリケーションの信頼性向上

第 4 章において、定常ポアソン点過程に従う車両配置と現実データに基づく車両配置どちらにおいても、二車間距離  $l = 50m$  以上離れた場合については、1 秒間に 10 フレームという受信要求条件（フレーム受信成功確率  $2/3$  以上）を満たせないことが明らかになった。本章では、衝突警告アプリケーションの信頼性を向上させるために、一部の車両のフレーム送信を制限する方式について考察する。

### 5.1 重要度に応じたフレーム送信制御

第 4 章における衝突警告アプリケーションの既存方式では、車両・歩行者を含む全ての通信ノードが平等に送信機会を与えられている。つまり、衝突可能性の低いノードのフレーム送信を抑制せず、衝突可能性の高いノード（以下、衝突ノード）のフレーム送信が抑制される可能性がある。文献 [23, 24, 25] などでは、衝突ノードのフレームが確実に送受信される確率を向上を目的とした、「各ノードの衝突危険性の高さを“重要度”として規定し、重要度の高い衝突ノードの情報フレームを優先的に送信する」手法が検討されている。

### 5.2 条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式

衝突警告アプリケーションにおいて、全車両・歩行者の中で重要度が高い、つまり衝突危険性が高いのは、高速で移動する車両であると考えられる。本節では、高速で移動する車両の情報フレームを周囲の車両群が確実に受信する為に、設定した条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を提案する。

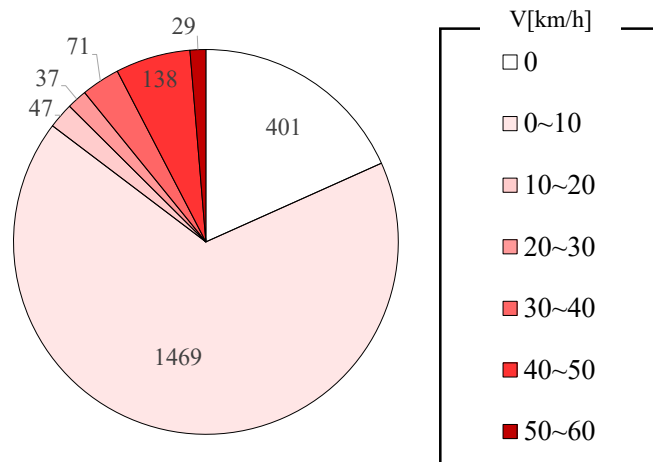


図 5.1 ボローニャデータにおけるノードの速度分布（最もノードが多いタイミング）。

### 5.2.1 ボローニャデータにおける車両・歩行者の速度分布

本章では、4.2 節と同様、ボローニャデータにおける車両・歩行者が最も多いタイミング（8 時 36 分 32 秒）での配置を使用する。図 5.1 は、最も車両・歩行者が最も密集しているタイミングのボローニャ市内のデータにおける車両・歩行者（ノード）の速度分布を示している。速度を有しているノードは約 82% 存在し、0~10km/h の速度帯のノードが最も多く、全体の 67% を占める。

### 5.2.2 数値実験における条件設定

4.1 節と同様、用いるパラメータの値を表 4.1 に示す。また、車両は 15 [フレーム / s] 送信するものとし、衝突警告のためには 10 [フレーム / s] 以上受信する必要があるので、フレーム受信成功確率は 2/3 以上でなければならない。

表 5.1 条件速度ごとのフレーム受信要求条件達成時における二車間距離  $l[m]$ .

交差点 番号	既存 方式	条件速度 [km/h]						
		0	5	10	20	30	40	
交差点 1		22	27	73	145	167	200	200over
交差点 2		20	38	79	103	113	152	200over
交差点 3		32	38	65	80	100	120	187
交差点 4		36	38	106	183	195	200over	200over

表 5.2 既存手法とのフレーム受信成功確率の差異 ( $l = 50m$ ).

条件速度 [km/h]	交差点番号			
	交差点 1	交差点 2	交差点 3	交差点 4
0	0.08	0.22	0.06	0.02
5	0.43	0.40	0.26	0.37
10	0.55	0.42	0.29	0.45
20	0.58	0.43	0.32	0.46
30	0.62	0.47	0.35	0.46
40	0.66	0.59	0.41	0.46

### 5.2.3 数値実験 5：条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた該当交差点ごとのフレーム受信成功確率

4.2 節と同様、4つの該当交差点において、条件速度を 0~30km/h の範囲で設定し、設定した条件速度以下の車両のフレーム送信を制限することでフレーム受信成功確率の向上を図った。

図 5.2~5.5 に、該当交差点ごとに得られたフレーム受信成功確率の結果を示す。まず、該当交差点ごとの「条件速度に応じたフレーム受信要求条件（フレーム受信成功確率 2/3 以上）達成時における二車間距離  $l[m]$ 」（表 5.1）を元に評価する。条件速度を 0km/h（走行車両フレーム送信制限なし）と設定すると、交差点 1 においては 30km/h、交差点 2~4 においては 40km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である二車間距離  $l$  より長くても、フレーム受信要求条件を達成することができると分かった。さらに、どの交差点においても、条件速度 5km/h 以上と設定すれば、80km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である二車間距離  $l = 67m$  より長くても、フレーム受信要求条件を達成することができると分かった。

次に、60km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である  $l = 50m$  を基準に評価していく。表 5.2 は、「二車間距離  $l = 50m$  の場合における、該当交差点ごとの既存手法とのフレーム受信成功確率の差異」を示す。条件速度を 0km/h（走行車両フレーム送信制限なし）と設定すると、交差点 2 においては 0.2 を超えるフレーム受信成功確率の向上が見られた一方で、他交差点では 0.1 未

表 5.3 フレーム受信要求条件との差異 ( $l = 50m$ ).

条件速度 [km/h]	交差点番号			
	交差点 1	交差点 2	交差点 3	交差点 4
0	0.26	0.07	0.11	0.12
5	-0.09	-0.11	-0.08	-0.23
10	-0.21	-0.14	-0.12	-0.32
20	-0.23	-0.14	-0.14	-0.32
30	-0.27	-0.18	-0.17	-0.32
40	-0.31	-0.30	-0.23	-0.32

満の向上に留まった。条件速度を 5, 10, 20, 30, 40km/h 以上と設定すると、交差点 1 では大きな効果が見られ、それぞれ 0.4, 0.5, 0.5, 0.6, 0.6 を超えるフレーム受信成功確率の向上が見られた。他交差点でも、0.39~0.59 (交差点 2), 0.25~0.41 (交差点 3), 0.37~0.45 (交差点 4) の向上が見られた。また、交差点 4 においては、10km/h と設定する場合とそれ以上の速度で設定する場合では、ほとんど効果の向上は見られないことも分かった。

次に、表 5.3 は、「二車間距離  $l = 50m$  の場合における、該当交差点ごとのフレーム受信要求条件 (フレーム受信成功確率 2/3 以上) との差異」 (差異がプラスであればフレーム受信要求条件を満たしており、マイナスであれば満たしていない) を示す。すべての交差点において、条件速度を 0km/h (走行車両フレーム送信制限なし) と設定しても、 $l = 50m$  ではフレーム受信要求条件を満たすことはできない。一方で、条件速度 5km/h 以上と設定すれば、フレーム受信要求条件を達成することができると分かる。

## 5.2.4 本方式の課題点

5.2.3 節にて、本方式はフレーム受信成功確率を大きく向上させることを示したが、条件速度以下の車両が自身の情報フレームを送信しないことは危険性が伴う。例えば、高速移動車両が自身の情報フレームを周囲の他車両群に受信してもらえたとしても、周囲の他車両群からの情報フレームを受信できないと (高速移動車両が) 衝突予測ができない。よって、条件速度以下の車両も何らかの形で自身の情報フレームを送信する必要がある。

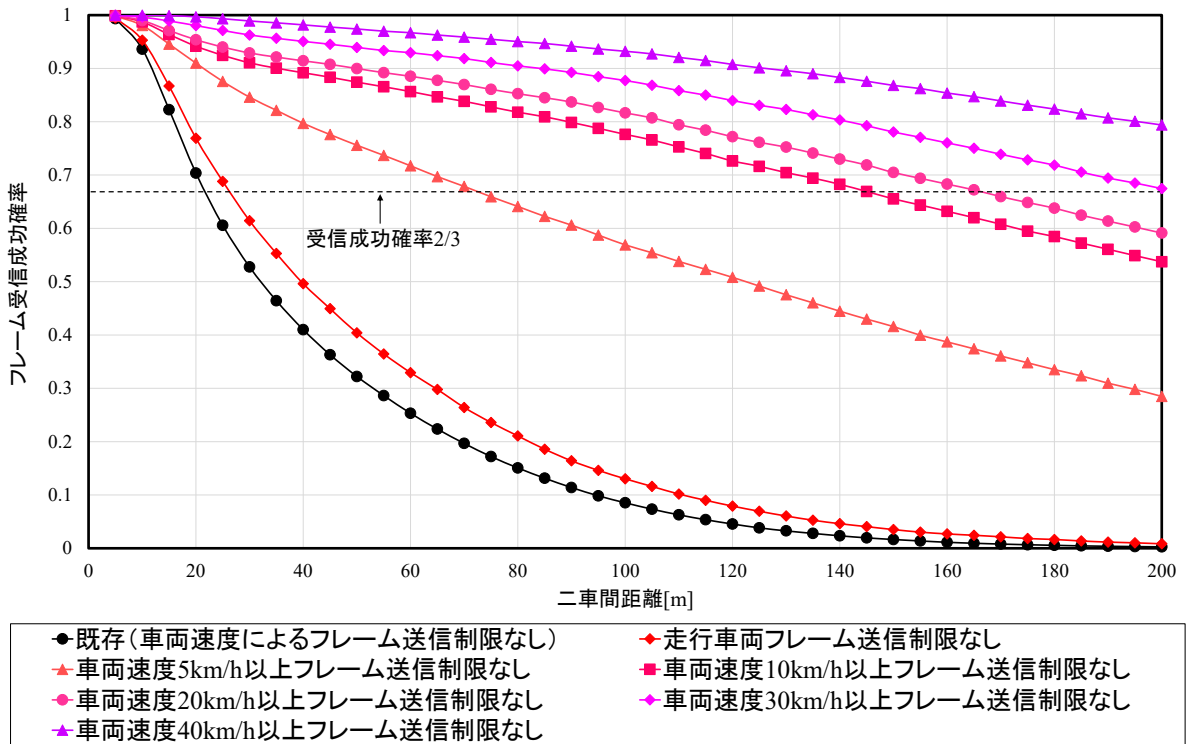


図 5.2 条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 1).

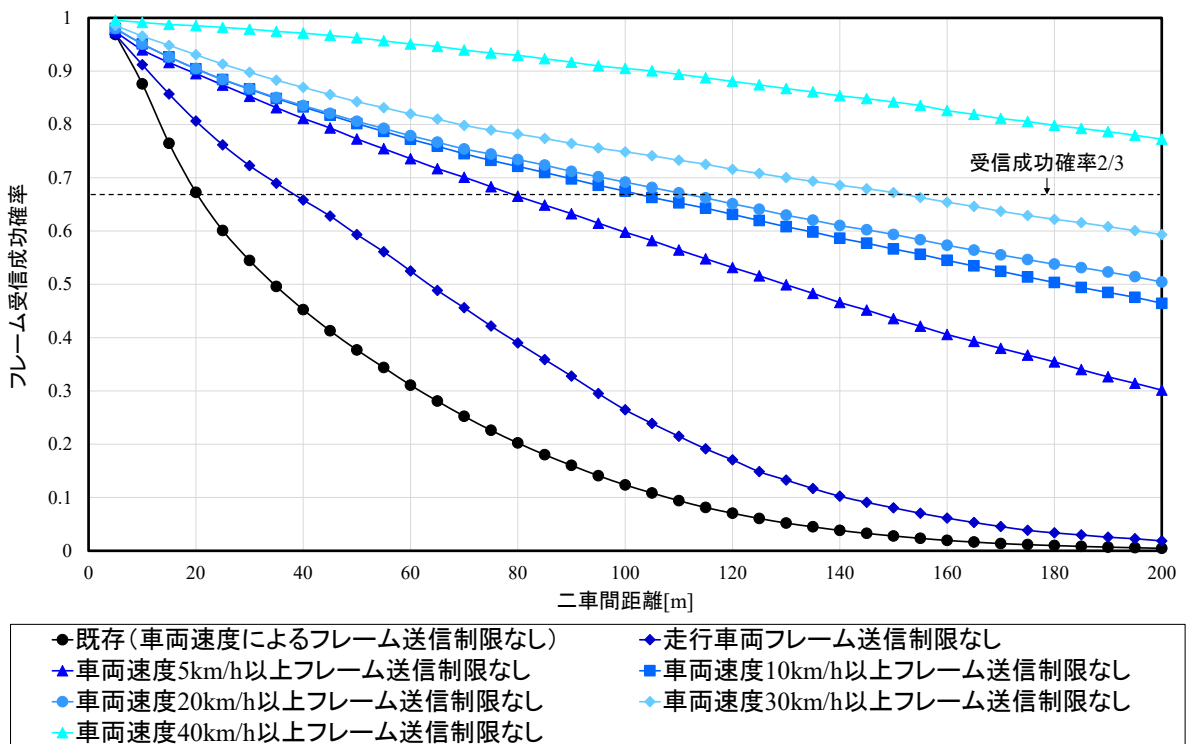


図 5.3 条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 2).



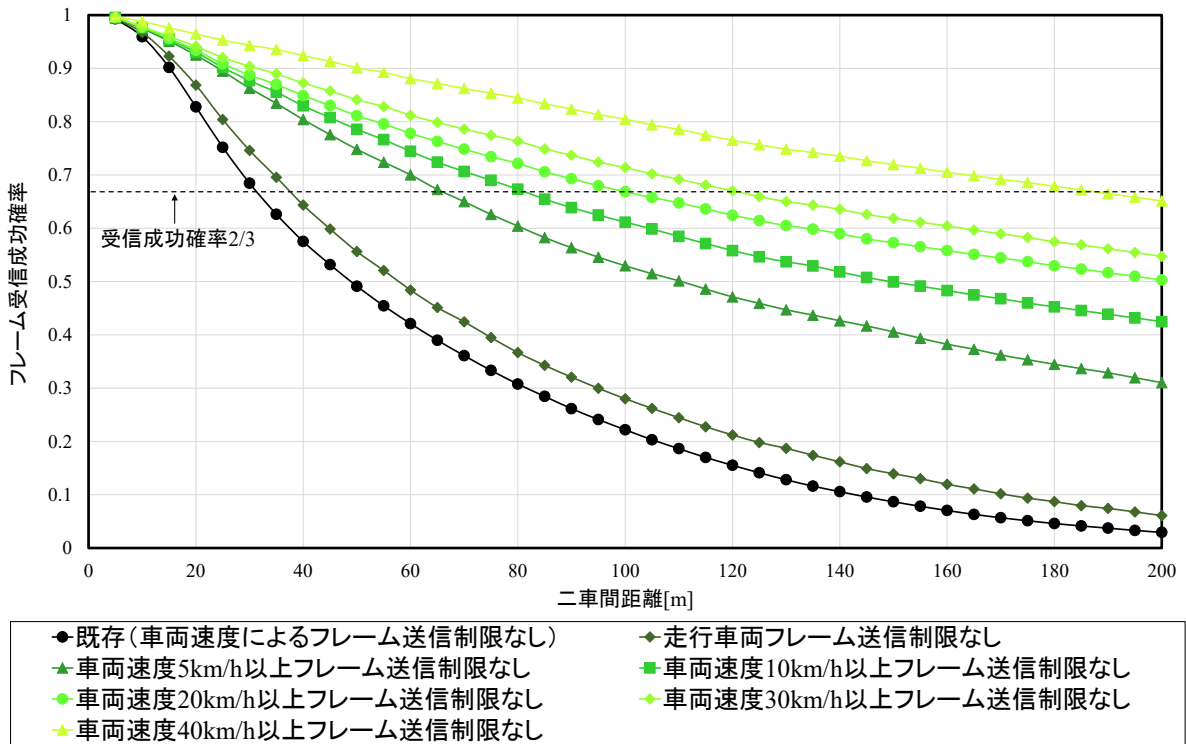


図 5.4 条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 3).

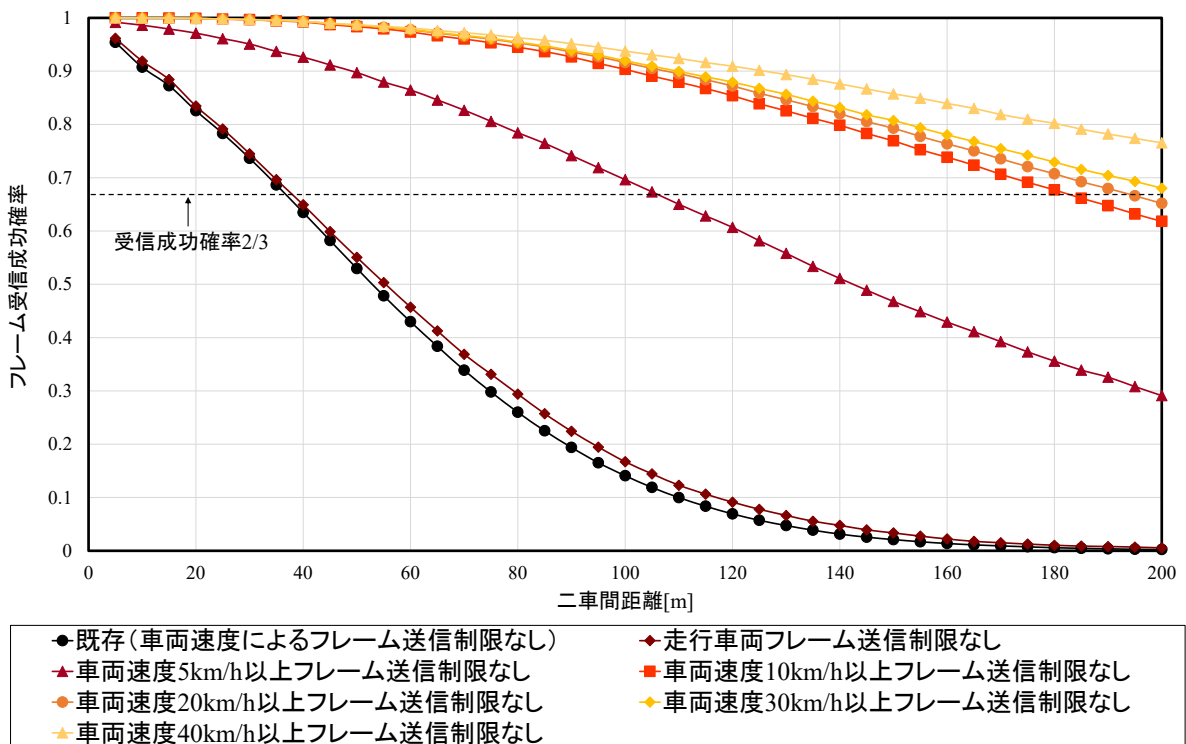


図 5.5 条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 4).

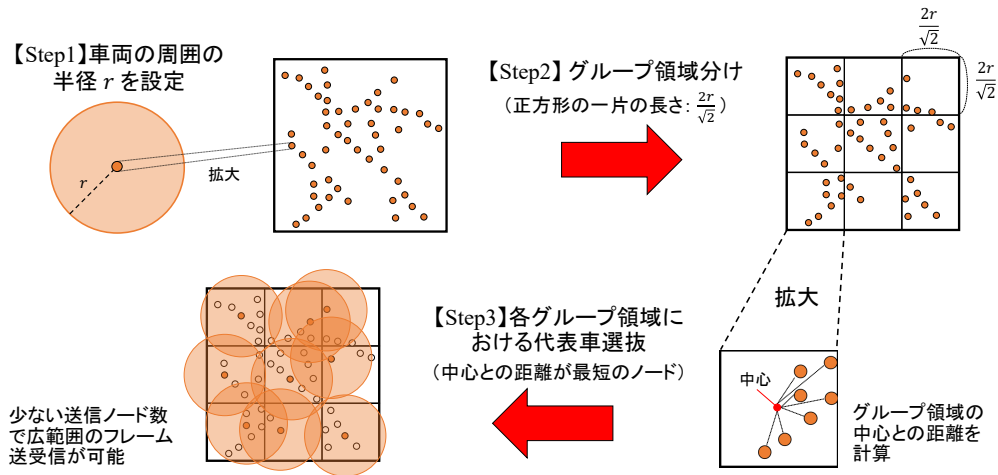


図 5.6 疑似的な代表送信車選抜手法.

## 5.3 代表送信車を選抜する方式

5.2 節では、条件速度以上で移動する車両の情報フレームのみを周囲に知らせる方式を考察した。本節では、全車両の情報フレーム全体に知らせる方式について検討する。ただし、全ての車両がフレームを送信すると、膨大な数のフレームが常に送信される影響でフレーム受信要求条件が満たされないため、代表送信車のみが周囲の車両の情報フレームをまとめて送信することとする。

### 5.3.1 代表送信車選抜方式のアルゴリズム構築の難しさ

現実的なシチュエーションを想定した代表送信車選抜方式のアルゴリズム構築を考えると、速度を有している車両の位置情報は絶えず変化するので、選抜される代表送信車は自律分散的に判断・更新されなくてはならない。本論文では、代表送信車を設けた場合のフレーム受信成功確率を簡易的に評価するために、ポローニャ市内のデータにおける車両・歩行者が最も多いタイミングのみで考える。

### 5.3.2 疑似的な代表送信車選抜方式

図 5.6 に疑似的な代表送信車選抜方式のイメージを示す。まず車両の周囲の半径  $r$  を設定し、車両配置全体をいくつかの領域グループに分ける。ここで 1 グループあたりの領域は 1 辺の長さが  $2r/\sqrt{2}$  の正方形と定義する。次にそれぞれのグループにおいて最も中心点に近いノードを代表送信車として選抜する。これにより、送信車の台数を抑えつつほぼ漏れなく車両配置全体をカバーすることが可能となる。ただし、一定速度以上（今回は  $5\text{km/h}$  以上）の車両はこの方式から除き、自身の情報フレームを自ら送信する。

表 5.4 グループ半径  $r$  ごとのフレーム受信要求条件達成時における二車間距離  $l[m]$ .

交差点 番号	既存 方式	グループ半径 $r[m]$					条件速度 制限のみ	
		10	20	30	40	50		
交差点 1		22	24	48	55	59	63	73
交差点 2		20	39	54	60	65	65	79
交差点 3		32	45	48	55	57	60	65
交差点 4		36	57	75	80	88	91	106

### 5.3.3 数値実験における条件設定

4.1 節と同様、用いるパラメータの値を表 4.1 に示す。また、車両は 15 [フレーム / s] 送信するものとし、衝突警告のためには 10 [フレーム / s] 以上受信する必要があるため、フレーム受信成功確率は 2/3 以上でなければならない。

### 5.3.4 数値実験 6：疑似的代表的送信車選抜方式を用いた該当交差点のフレーム受信成功確率

4.2, 5.2.3 節と同様、4 つの該当交差点において、グループ半径  $r = 10, 20, 30, 40, 50m$  と範囲で設定し、代表的送信車と車両速度 5km/h 以上の車両以外のフレーム送信を制限することでフレーム受信成功確率の向上を図った。

図 5.7~5.10 に、該当交差点ごとに得られたフレーム受信成功確率の結果を示す。まず、該当交差点ごとの「グループ半径  $r$  に応じたフレーム受信要求条件（フレーム受信成功確率 2/3 以上）達成時における二車間距離  $l[m]$ 」（表 5.4）を元に評価する。交差点 1 においては、既存方法では  $l = 22m$ 、代表的送信車選抜を行った場合でもグループ半径  $r = 10m$  と設定した場合は、 $l = 24m$  に留まってしまう。しかし、 $r = 20, 30, 40, 50m$  と設定すると、それぞれ 50, 60, 70, 70km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である二車間距離  $l$  より長くても、フレーム受信要求条件を達成することができると分かった。交差点 2 においては、 $r = 10, 20, 30, 40, 50m$  と設定すると、それぞれ車両速度 40, 60, 70, 70, 70km/h であってもフレーム受信要求条件を達成できる。交差点 3 においては、 $r = 10, 20, 30, 40, 50m$  と設定すると、それぞれ車両速度 50, 50, 60, 60, 70km/h であってもフレーム受信要求条件を達成できる。交差点 4 においては、 $r = 10m$  と設定すると、車両速度 60km/h であってもフレーム受信要求条件を達成できる。さらに、 $r = 20m$  以上に設定すると、車両速度 80km/h であってもフレーム受信要求条件を達成できる。

表 5.5 既存手法とのフレーム受信成功確率の差異 ( $l = 50m$ ).

グループ半径 $r[m]$	交差点番号			
	交差点 1	交差点 2	交差点 3	交差点 4
10	0.21	0.23	0.14	0.19
20	0.33	0.31	0.17	0.28
30	0.38	0.34	0.20	0.28
40	0.39	0.36	0.22	0.33
50	0.40	0.37	0.24	0.33

表 5.6 フレーム受信要求条件との差異 ( $l = 50m$ ).

グループ半径 $r[m]$	交差点番号			
	交差点 1	交差点 2	交差点 3	交差点 4
10	0.13	0.06	0.04	-0.05
20	0.01	-0.02	0.01	-0.14
30	-0.03	-0.05	-0.03	-0.14
40	-0.05	-0.07	-0.05	-0.19
50	-0.06	-0.08	-0.07	-0.19

次に、60km/h で走行する送信車と受信車の衝突の 3 秒前の位置である  $l = 50m$  を基準に評価していく。表 5.5 は、「二車間距離  $l = 50m$  の場合における、該当交差点ごとの既存手法とのフレーム受信成功確率の差異」を示す。グループ半径  $r = 10, 20, 30, 40, 50m$  と設定して代表送信車選抜を行うと、それぞれの交差点において、0.21~0.41（交差点 1）、0.23~0.37（交差点 2）、0.14~0.24（交差点 3）、0.18~0.33（交差点 4）の向上が見られた。また、今回はグループ半径  $r$  を 10m ずつ変化させた中で、各交差点ごとで大きく向上するタイミングが違う (ex. 交差点 1 であれば  $r = 10 \Rightarrow 20m$  だが、交差点 3 では  $r = 20 \Rightarrow 30m$ )。よって、代表送信車選抜において、車両配置・密度や車両速度によって適切な  $r$  を判断するアルゴリズムが重要とあることは明らかである。

次に、表 5.6 は、「二車間距離  $l = 50m$  の場合における、該当交差点ごとのフレーム受信要求条件（フレーム受信成功確率 2/3 以上）との差異」（差異がプラスであればフレーム受信要求条件を満たしており、マイナスであれば満たしていない）を示す。交差点 1~4 においてそれぞれ  $r = 30, 20, 10, 30m$  以上と設定すれば、 $l = 50m$  より長い距離でもフレーム受信要求条件を達成することができると分かる。また、各交差点ごとフレーム受信要求条件を達成する  $r$  は異なることから、代表送信車選抜において、車両配置・密度や車両速度によって適切な  $r$  を判断するアルゴリズムが重要とあるのはこれもまた明らかである。

表 5.7 グループ半径  $r$  に応じた 1 グループ所属台数.

	グループ半径 $r$ [m]				
	10	20	30	40	50
1 グループ所属台数	2.61	3.57	5.02	6.57	8.57

最後に、選抜された代表送信車がどれだけの台数の代表となるのか（何台分の車両のフレームをまとめて送るのか）について考察する。表 5.7 は、「グループ半径  $r$  に応じた 1 グループ所属台数（何台分の車両のフレームをまとめて送るのか）」を示す。全ての交差点にて  $l = 50m$  より長い距離でもフレーム受信要求条件を達成することができるグループ半径である  $r = 30m$  の場合では、平均で 4.02 台（代表送信車自身を除くので  $5.02 - 1$ ）の車両のフレームをまとめて代表送信車が送信することが分かった。

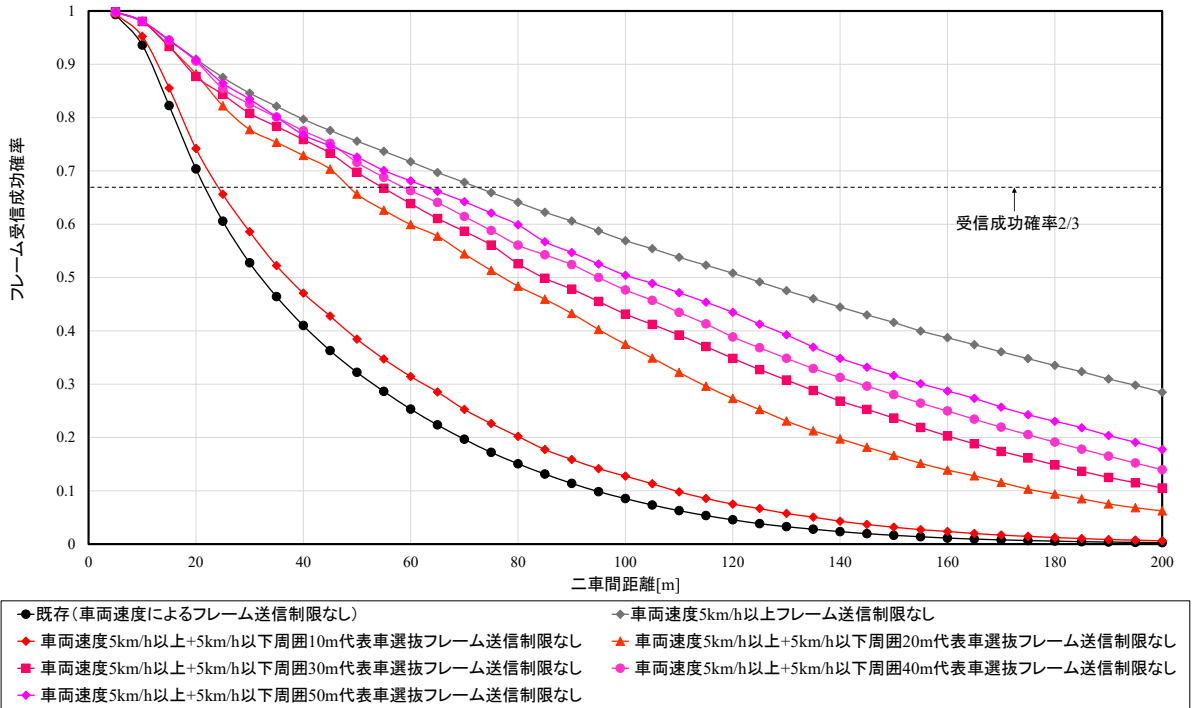


図 5.7 疑似的代表送信車選抜方式を用いた場合のフレーム受信成功確率（交差点 1）。

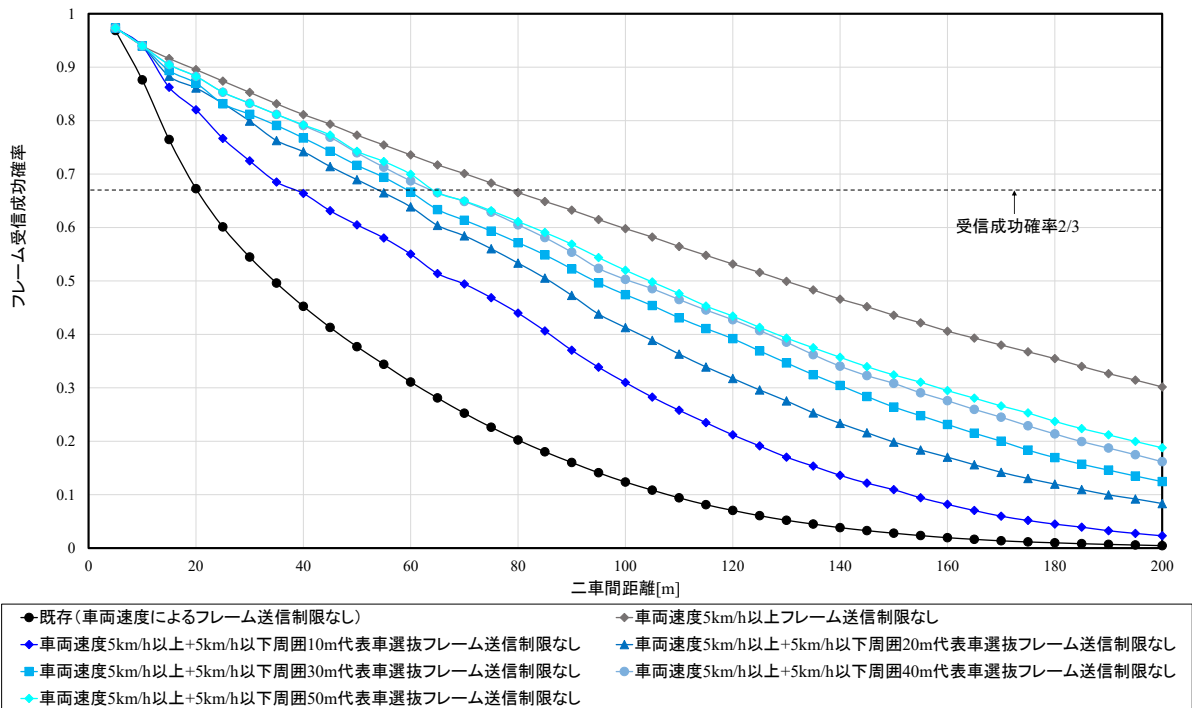


図 5.8 疑似的代表送信車選抜方式を用いた場合のフレーム受信成功確率（交差点 2）。

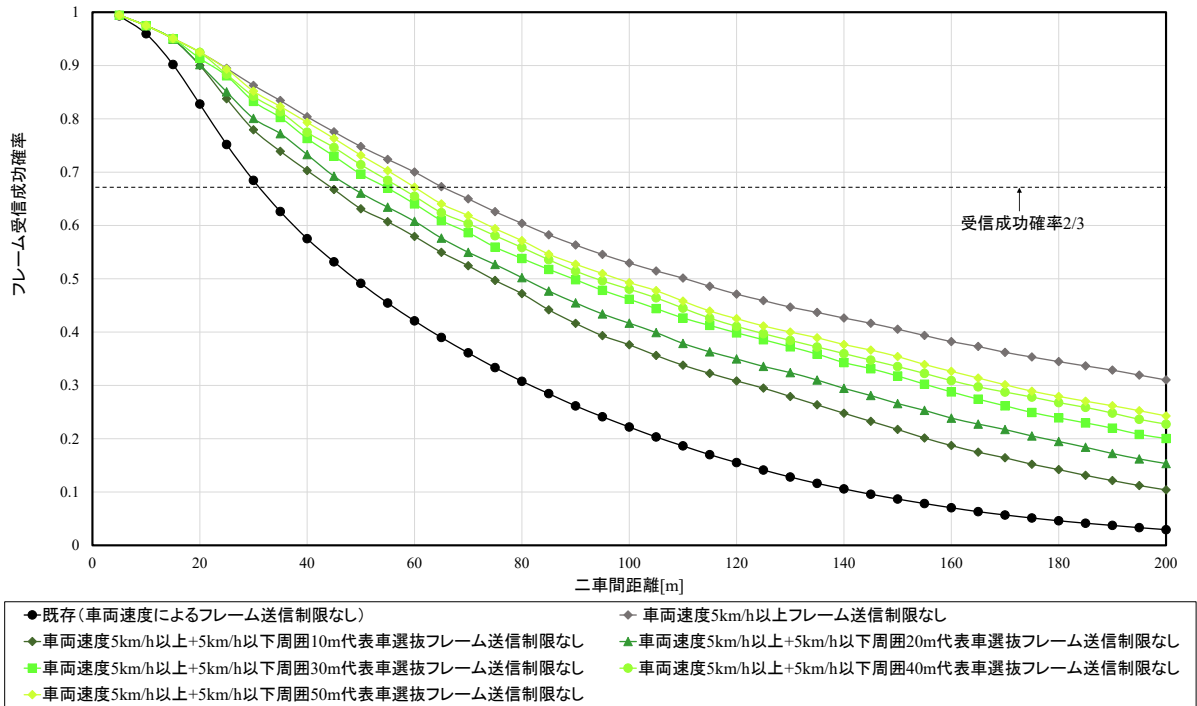


図 5.9 疑似的代表送信車選抜方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 3).

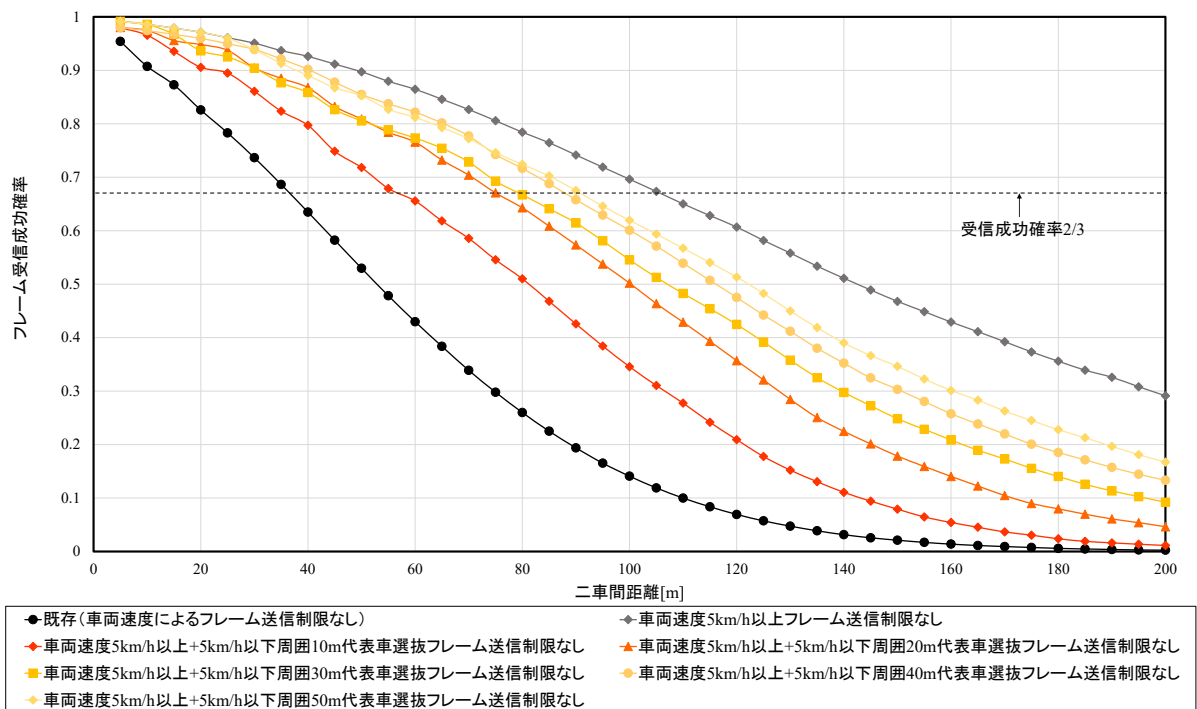


図 5.10 疑似的代表送信車選抜方式を用いた場合のフレーム受信成功確率 (交差点 4).

## 第6章

# まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

本論文では、V2Xを用いた自動車衝突警告アプリケーションの信頼性評価と向上について考察した。1つ目に衝突警告アプリケーションの信頼性評価を行った。まずポアソン点過程に従う車両配置におけるフレーム受信成功確率を求め、車両速度や車両密度、車両配置が与える影響度を評価した。まず、ポアソン点過程に従う車両配置であれば、適切に設定された送信パラメータの下、本アプリケーションは十分に成立する性能であると分かった。一方で、車両密度・速度がある一定値を超えてしまうと、送信パラメータの値に関わらずフレーム受信要求条件を達成することができなくなることで、つまり、車両密度・速度の影響度の大きさを明らかにした。また、異なる車両配置におけるフレーム受信成功確率の成功確率の分散は小さいことも明らかにした。次にイタリア・ボローニャ市内のデータに基づく車両配置における4つの交差点のフレーム受信成功確率をそれぞれ求め、車両配置の影響度を評価すると共に、現実的な車両配置における（既存方式の場合での）本アプリケーションの成立の難しさを示した。

2つ目に衝突警告アプリケーションの信頼性向上について考察した。まず重要度の観点から高速移動車両の情報フレームを優先する、条件速度以下の車両のフレーム送信を制限する方式を提案した。そして現状のアプリケーションの結果と比較することでフレーム受信成功確率を大幅に向上させる効果があることを明らかにした。次に自身の情報フレームと共に周囲の他車両群の情報フレームもまとめて送信する代表車を選抜する方式について考察した。切り取られたある一場面でのみで判断する疑似的な代表送信車選抜方式を用いることで簡易的に評価した結果、適切に車両の周囲の半径を設定することが出来れば、本稿の条件設定であれば電波干渉を防ぎつつフレーム受信要求条件を達成することができると分かった。



## 6.2 今後の課題

今後の主な課題として2つ挙げる。1つ目は、具体的な代表送信車選抜のアルゴリズムの構築である。本論文では、代表送信車を設けた場合のフレーム受信成功確率を簡易的に評価するために、ある一場面のみを切り取って数値実験を行った。しかし、現実的なシチュエーションを想定した代表送信車選抜方式のアルゴリズム構築を考えると、速度を有している車両の位置情報は絶えず変化するので、選抜される代表送信車は自律分散的に判断・更新されなくてはならない。代表送信車選抜を成立させるには、ある一定時間毎に各車両が周囲のフレーム送信状況などから代表送信車を自律分散的に判断・更新するアルゴリズムの構築が不可欠であるといえるだろう。

2つ目は、本研究で用いたインフラレス（通信ノード同士の直接通信）方式の DSRC と、インフラベース（基地局経由で通信）方式の Cellular-V2X (C-V2X) が混在している場合における衝突警告アプリケーションの構築と性能評価である。DSRC と C-V2X それぞれの特徴を活かし併用することで、本研究のように DSRC のみを利用する場合よりも精度の高い衝突警告が可能になると考えられる。

# 参考文献

- [1] Z. Xiong, H. Sheng, W. Rong, and D. E. Cooper, “Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review,” *Science. China Information Science*, vol. 55, no. 12, pp. 2908 – 2914, 2012.
- [2] 村瀬勉, “安全安心のための V2X 通信における QoS と輻輳制御,” 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, CQ2018-21, pp.19–24, 2018.
- [3] T. ElBatt et al., T. ElBatt, S.K. Goel, G. Holland, H. Krishnan, and J. Parikh, “Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications,” *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular Ad Hoc networks (VANET)*, pp.1–9, ACM, 2006.
- [4] B.M. Mughal, A.A. Wagan, and H. Hasbullah, “Efficient congestion control in VANET for safety messaging,” *International Symposium in Information Technology (ITSim)*, vol.2, pp.654–659, IEEE, 2010.
- [5] J. B. Kenney, “Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States,” *IEEE*, vol.99, no.7, 2011.
- [6] D. Jiang and L. Delgrossi, “IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments,” *VTC Spring 2008*, pp.2805–2813, IEEE, 2008.
- [7] D. Jiang, V. Taliwal, A. Meier, W. Holfelder, and R. Herrtwich, “Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication,” *IEEE Wireless Communications*, vol.13, no.5, pp.36–43, 2006.
- [8] R.Kawasaki, H.Onishi, andT.Murase, “Performanceevaluation on V2X communication with PC5-based and Uubased LTE in crash warning application,” *6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.1–2, IEEE, 2017.
- [9] “U.S. department of transportation announces decision to move forward with vehicle-to-vehicle communication technology for light vehicles,” <https://www.auto-talks.com/u-sdepartment-transportation-announces-decision-move-forwardvehicle-vehicle-communication-technology-light-vehicles/>,2014 The News on NHTSA.
- [10] B. Masini, A. Bazzi, and A. Zanella, “A survey on the roadmap to mandate on board connectivity and enable V2V-based vehicular sensor networks,” *Sensors*, vol.18, no.7, p.2207, 2018.
- [11] 高橋快, 古沼勇人, 塩田茂雄, 平井健士, 村瀬勉, “V2X を用いた衝突警告アプリケーションの空間点過程モデルによる性能評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2018-121, pp.223–228, 2019.
- [12] T. Hirai et al., “Node-Clustering in Vehicle-to-Pedestrian Communications for Crash Warning

- Applications,” ITS World Congress 2016, 2016.
- [13] A. Autolitano, C. Campolo, A. Molinaro, R. M. Scopigno, and A. Vesco, “An insight into Decentralized Congestion Control techniques for VANETs from ETSI TS 102 687 V1.1.1,” IFIP Wireless Days, 2013.
- [14] C. B. Math, S. Heemstra de Groot, H. Li, and I. Niemegeers, “Fair decentralized data-rate congestion control for V2V communications,” in Proc. 24th Int. Conf. Telecommun. (ICT), Limassol, Cyprus, May 2017.
- [15] J. B. Kenney, G. Bansal, and C. E. Rohrs, “LIMERIC: A linear message rate control algorithm for vehicular DSRC systems,” in Proc. 8th ACM Int. Workshop Veh. Inter-Netw. (VANET), 2011, pp. 21–30.
- [16] G. Bansal, J. B. Kenney, and C. E. Rohrs, “LIMERIC: A linear adaptive message rate algorithm for dsrc congestion control,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62(9):4182–4197, 2013.
- [17] C. Belagal Math, A. Ozgur, S. Heemstra de Groot, H. Li, “Data Rate based Congestion Control in V2V communication for traffic safety applications”, Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT) 2015 IEEE Symposium on, Nov 2015.
- [18] C.B. Math, H. Li, S. Heemstra de Groot, I.G. Niemegeers, “V2X Application-Reliability Analysis of Data-Rate and Message-Rate Congestion Control Algorithms,” IEEE Commun. Letter, Vol. 21, No. 6, 2017.
- [19] Marco Di Renzo, “Intro to Stochastic Geometry & Point Process”, 2016.
- [20] S.B. Lowen and M.C. Teich, “Power-law shot noise,” IEEE Trans. Information Theory, vol.36, no.6, pp.408–421, 1990.
- [21] M.Haenggi and R.K.Ganti, “Inference in large wireless networks,” Foundations and Trends in Networking, vol.3, no.2, pp.127–248, 2008.
- [22] “SUMO Documentation,” <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>.
- [23] 平井健士, 村瀬勉, “V2X 通信を利用した衝突警告アプリケーションにおけるアプリ特性を考慮した自律分散的輻輳制御手法,” 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2018, pp503-508, 2018.
- [24] S. Tang, K. Saito, S. Obana, “Transmission Control for Reliable Pedestrian-to-Vehicle Communication by Using Context of Pedestrians”, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2015), pp. 41-47, Nov. 2015.
- [25] 伊藤舜, 小花貞夫, 湯素華, “歩車間通信における無線チャネル使用率に基づく動的送信制御,” 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2018, pp487-494, 2018.

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である塩田茂雄先生に多大にご協力いただいたことをここに記し、深く感謝申し上げます。また、名古屋大学の村瀬勉先生と平井健士さんには、共同研究という形でたくさんの助言を頂き、何度も千葉大学に足を運んでいただき大変お世話になったことをここに記し、深く感謝申し上げます。最後に、塩田先生をはじめとする塩田研究室一同の皆様（特に同期である松尾君・野田君・中島君、後輩で共同研究者である高橋君）に関しましても常日頃お世話になり、そのうえで本論文が完成したことをここに記し、感謝の意を伝えさせていただきたいです。本当にありがとうございました。

# 研究成果

## 2018 年度

- 古沼勇人, 榊原巧也, 村瀬勉, 塩田茂雄, ”無線 LAN と携帯電話回線を併用したクラウドへの並列データ伝送の最適化,” 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, CQ2018-29, 2018 年 5 月 (千葉) .
- 高橋快, 古沼勇人, 塩田茂雄, 平井健士, 村瀬勉, ”V2X を用いた衝突警告システムの空間点過程による性能評価,” 電子情報通信学会 総合大会, 2019 年 3 月 (東京) .
- 高橋快, 古沼勇人, 塩田茂雄, 平井健士, 村瀬勉, ”V2X を用いた衝突警告アプリケーションの空間点過程モデルによる性能評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, 2019 年 3 月 (沖縄) .

## 2019 年度

- 古沼勇人, 高橋快, 塩田茂雄, ”V2X を用いた衝突警告アプリケーションの空間確率モデルによる信頼性評価,” 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, CQ2019-39, 2019 年 7 月 18 日 (新潟) .
- 古沼勇人, 高橋快, 塩田茂雄, 平井健士, 村瀬勉, ”V2X による衝突警告システムのフレーム受信成功確率の分布範囲,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-11-8, 2019 年 9 月 10 日 (大阪) .
- 古沼勇人, 高橋快, 塩田茂雄, 平井健士, 村瀬勉, ”V2X による衝突警告システムのフレーム受信成功確率の分布範囲,” (名大, 早大, 電通大, 広島市立大, NII, 千葉大合同) 第 2 回 学生技術交流会, 2019 年 10 月 15 日 (NII, 東京) .