

# 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

高橋 快<sup>†</sup> 古沼 勇人<sup>††</sup> 塩田 茂雄<sup>††</sup> 平井 健士<sup>†††</sup> 村瀬 勉<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 千葉大学工学部, 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>††</sup> 千葉大学 大学院融合理工学府, 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>†††</sup> 名古屋大学 大学院情報学研究科, 〒 464-8601 名古屋市千種区不老町

E-mail: †kai-t@chiba-u.jp, ††shioda@faculty.chiba-u.jp

**あらまし** V2Xの重要な応用先の1つに、位置や速度の情報を格納したフレームを車両が絶えずブロードキャストして、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。衝突警告アプリケーションの実現性を確認するためには、(関係のない)他の車両が送信する信号との干渉により、肝心の車両からのフレームを受信できない確率を知る必要がある。本稿では、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に評価する手法を検討する。特に、車両が2次元平面内にポアソン点過程に従って配置されるとする仮定を用いて、フレーム受信成功確率のシンプルな陽表式を導出する。

**キーワード** V2X, 衝突警告アプリケーション, IEEE 802.11p, ポアソン点過程, 性能評価

## Performance Analysis of a V2X-Based Crash Warning Application Using a Spatial Point Process

Kai TAKAHASHI<sup>†</sup>, Yuto KONUMA<sup>††</sup>, Shigeo SHIODA<sup>††</sup>, Takeshi HIRAI<sup>†††</sup>, and Tutomu MURASE<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba, 263-8522 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba, 263-8522 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Informatics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ward, Nagoya-City, 464-8601 Japan

E-mail: †kai-t@chiba-u.jp, ††shioda@faculty.chiba-u.jp

**Abstract** 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. Estimating the probability that a frame from a crucial vehicle cannot be received due to interference with a signal from other (unrelated) vehicles is very important to confirm the feasibility of the CWA. In this paper, we theoretically evaluate the probability of receiving a frame from a vehicle having a collision threat. In particular, we derive a simple explicit expression of the frame reception success probability based on the assumption that the vehicle is arranged in a two dimensional plane according to the Poisson point process.

**Key words** V2X, Crash Warning Application, IEEE 802.11p, Poisson point process, performance evaluation

### 1. まえがき

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のことであり、車両に搭載したLTE機器などを使った通信であるV2N (Vehicle-to-Network) に加えて、車両同士の通信であるV2V (Vehicle-to-Vehicle)、車両と歩行者との通信であるV2P (Vehicle-to-Pedestrian)、車両と道路脇に設置された機器との

通信であるV2I (Vehicle-to-roadside-Infrastructure) の総称である。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) がある [1-3]。衝突警告アプリケーションとは、車両が自分の位置や速度の情報を絶えずブロードキャストすることにより、自分の存在を近隣の車両や歩行者に認識させ、衝突の危険性の

あるときに、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 [4] では報告されている。

V2X 通信として、V2X 用の無線 LAN 技術 (IEEE 802.11p [5]) を用いた Dedicated Short Range Communications (DSRC) [4, 6] と、LTE や 5G などセルラー通信を用いた Cellular-V2X (C-V2X) [7] の 2 種類の技術が検討されている。本稿では、このうち、DSRC に着目する。DSRC で用いられる 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、このためベースレートは 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 のベースレートが使われる。

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、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、CWmin 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。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 1 秒間に 10 フレーム以上受信しなければならないことが定められており [8, 9]、輻輳発生時にはこの条件が満たされなくなる恐れがある。このため、信号強度の低いフレームの中継を行ってフレーム到達性を向上する手法 [10] などが提案されているが、性能評価のためのシミュレーション実験は多くの車両を配置して行う必要があり、1 回のシミュレーション評価に長い時間を要する問題がある。

本稿では、衝突警告アプリケーションの性能を、シミュレーションを用いずに理論的に簡易に評価する手法を検討する。特に、車両が 2 次元平面内にポアソン点過程に従って配置される場合には、衝突の恐れのある車両からのフレームの受信に成功する確率のシンプルな陽表式が得られることを示す。この陽表式は、車両密度やフレーム送信頻度の関数として与えられているので、車両密度やフレーム送信頻度を変えて衝突警告アプリケーションの性能を簡易に評価することが可能となる。

以下、2. では車両が 2 次元平面内にポアソン点過程に従って存在するという仮定のもと、フレーム受信成功確率の解析的な導出法について説明する。次いで、3. では、2. で導出したフレーム受信成功確率の式を用いて、いくつかの数値例を示すとともに、数値例に示された結果について解釈する。最後に、4. において結論を述べる。

## 2. ポアソン点過程によるフレーム受信成功確率の導出

図 1 のように、 $x$  軸上にある車両 (車両 0) が IEEE 802.11p により衝突警告用のフレームをブロードキャストしているとする。本研究では、車両 0 から発せられたフレームを座標原点にいる歩行者 (もしくは車両) が正しく受信できる確率について考察する。歩行者の周囲には車両 0 以外の車両が存在し、やはり衝突警告用の信号をブロードキャストしている。これら (車両 0 以外の) 車両から発せられた信号は、車両 0 からのフレームに対して、いわゆる干渉信号として作用する。車両 0 からのフレームが正しく受信されるか否かを知るためには、車両 0 以外の車両が発する干渉信号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。

本章では、干渉信号源となる車両がポアソン点過程に従って 2 次元平面内にランダムに配置されているという仮定のもと、干渉信号の確率特性やフレーム受信成功確率に関する種々の結果を示す。なお、距離とともに強度がべき則で減衰する信号の

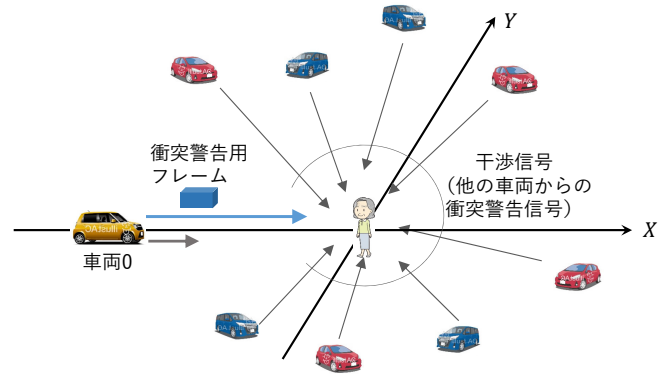


図 1: V2X による衝突警告のイメージ

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いる [11, 12]。本章に示した結果の大半は文献 [12] で示されている結果から直ちに得られる。なお、最近では Power-law Shot Noise の研究はセルラーの性能評価に応用され、様々な研究が行われている [13–15]。

### 2.1 基本モデル

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。

座標原点にある車両が座標原点から距離  $l$  離れた車両 (車両 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。

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

ここで  $S_I$  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  $\mathbf{x} (= (x_1, x_2))$  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)

車両は 2 次元ポアソン過程に従って、2 次元平面内に (無限遠まで) 配置されているものとする。また各車両は IEEE 802.11p のプロトコルに従ってフレームを送信し、フレームの平均送信間隔は全ての車両について  $T$  に等しいものとする。

### 2.2 フェージングを考慮しない場合

#### 2.2.1 干渉信号のラプラス変換

まず、フェージングを考慮しない場合、つまり  $H_i = 1$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) の場合について考察する。簡単のため、自然雑音  $N_w$  は無視できるものとする。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。

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

$\rho \stackrel{\text{def}}{=} E[I_1]$  とおくと

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

ここで、最初の等式は定常ポアソン点過程に関する結果（付録参照）より導かれる。

指数の肩にある積分を評価する。

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} (1 - e^{-scr^{-\alpha}}) r dr \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1 - e^{-scx}}{\alpha x^{\frac{\alpha+2}{\alpha}}} dx \quad (\leftarrow x = r^{-\alpha}) \\ &= \frac{cs}{2} \int_0^{\infty} x^{-\frac{2}{\alpha}} e^{-ctx} dx \\ &= \frac{(cs)^{\frac{2}{\alpha}}}{2} \int_0^{\infty} y^{-\frac{2}{\alpha}} e^{-y} dy \quad (\leftarrow y = ctx) \\ &= \frac{(cs)^{\frac{2}{\alpha}}}{2} \Gamma \left( 1 - \frac{2}{\alpha} \right). \end{aligned}$$

ここで  $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数である。以上より

$$\mathcal{L}_{S_I}(s) = e^{-As^\delta}, \quad A \stackrel{\text{def}}{=} \pi\lambda\rho c^\delta \Gamma(1-\delta), \quad \delta \stackrel{\text{def}}{=} 2/\alpha.$$

なお、

$$E[S_I] = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d\mathcal{L}_{S_I}(s)}{ds} = \lim_{s \rightarrow 0} A\delta s^{\delta-1} = \infty.$$

すなわち、干渉信号の強度の期待値は有限に収まらず発散する<sup>(注1)</sup>。また

$$f_n(x) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{(-1)^n}{n!} \left( \frac{n+1}{x} \right)^{n+1} \frac{d^n \mathcal{L}_{S_I} \left( \frac{n+1}{x} \right)}{ds^n},$$

により  $f_n(x)$  を定めると、 $n \rightarrow \infty$  の極限で  $f_n(x)$  は  $S_I$  の確率密度関数  $f(x)$  に収束するが<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} f_n(x) &= g(n)x^{-(1+\delta)} + o(x^{-(1+\delta)}), \\ g(n) &\stackrel{\text{def}}{=} A\delta \frac{n+1}{n} (1+n)^\delta (1-\delta) \left( 1 - \frac{\delta}{2} \right) \dots \left( 1 - \frac{\delta}{n-1} \right) \\ &= A\delta \frac{n+1}{n} e^{\delta(\log(1+n) - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k})} \prod_{k=1}^{n-1} \left( 1 - \frac{\delta}{k} \right) e^{\frac{\delta}{k}}, \end{aligned}$$

であり、さらに

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(n) = \frac{A\delta}{\Gamma(1-\delta)} = \pi\lambda\rho\delta c^\delta$$

であることから

$$f(x) = \pi\lambda\rho\delta c^\delta x^{-(1+\delta)} + o(x^{-(1+\delta)}).$$

(注1)：これは、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ことに起因している。

したがって

$$P(S_I > x) = \pi\lambda\rho\delta c^\delta x^{-\delta} + o(x^{-\delta}).$$

である。すなわち  $S_I$  は裾の長い分布を持ち、裾の方ではべき則に従って減衰する。

### 2.2.2 フレーム受信成功確率

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。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

$$\begin{aligned} p_{suc}(l) &= P(\text{SINR}(l) \geq \theta) = P\left(\frac{S(l)}{S_I} \geq \theta\right) \\ &= P\left(S_I \leq \frac{S(l)}{\theta}\right). \end{aligned}$$

上式において  $\frac{S(l)}{\theta}$  は定数である。したがって、干渉信号の強度の分布関数  $P(S_I \leq x)$  がわかれば、 $p_{suc}$  を求めることができる。 $S_I$  の分布関数は  $\mathcal{L}_{S_I}(s)$  をラプラス逆変換することで求まる。ラプラス逆変換には、例えば文献 [17] で紹介されている Gaver-Stehfest アルゴリズムが利用できる。

$$P(S_I \leq x) \approx \sum_{k=1}^{2M} \frac{\zeta_k}{k} \mathcal{L}_{S_I} \left( \frac{k \ln 2}{x} \right).$$

ここで

$$\zeta_k = (-1)^{M+k} \sum_{j=\lfloor (k+1)/2 \rfloor}^{k \wedge M} \frac{j^{M+1}}{M!} \binom{M}{j} \binom{2j}{j} \binom{j}{k-j}.$$

$M$  はパラメータであり、本ケースの場合、経験的に  $M = 8$  程度で精度の良い結果が得られる。

### 2.3 フェージングを考慮する場合

#### 2.3.1 干渉信号のラプラス変換

次に、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。この場合、 $H_i$  ( $i = 0, 1, \dots$ ) は平均 1 の指数分布に従う確率変数である。やはり、自然雑音  $N_W$  は無視できるものとする

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

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。

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

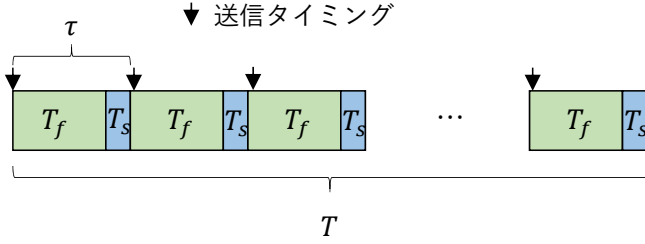


図 2: フレーム送信タイミング

$$= \frac{1}{2}(scH)^\delta \Gamma(1 - \delta).$$

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、 $\mathcal{L}_{S_I}(s)$  の関数形はフェージングがない場合と同じであり、したがって同様に  $E[S_I]$  は発散し、 $S_I$  は裾の長い分布に従う。

### 2.3.2 フレーム受信成功確率

フレームを運ぶ信号自身がフェージングの影響を受ける場合、距離  $l$  離れた車からのフレームの受信に成功する確率  $p_{suc}(l)$  は以下で定まる。

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

すなわち、フレーム受信成功確率は干渉信号のラプラス変換形から（ラプラス逆変換の必要なく）直接求まり、しかも非常にシンプルな陽表現を持つ。

### 2.4 フレーム送信確率

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。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）。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

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

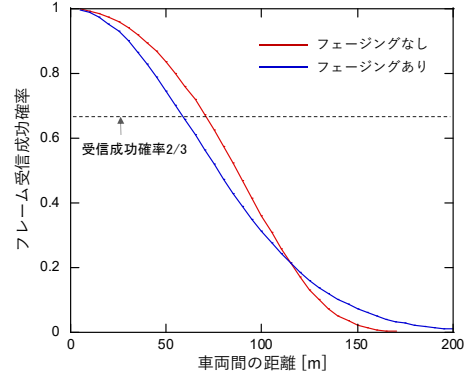


図 3: フレーム送信成功確率:  $\lambda = 1000$  (台/km<sup>2</sup>)

なお IEEE 802.11p [6, 18] では、フレーム再送や再送時の指数バックオフによるコンテンツンションウィンドウ（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

$$\rho = \min \left\{ \frac{2}{17}, \frac{T_f + T_s}{T} \right\}. \quad (3)$$

## 3. 数値例

1 平方 km に平均して 1000 台～3000 台の密度で車両（通信ノード）が配置される場合において、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。フレーム長は 282 バイト（ヘッダ 32 バイト、ペイロード 250 バイト）、 $\alpha$  は 3.5（建物の多い都市部では  $\alpha$  は 3 から 4 の値を取る）、閾値は 4db ( $\theta = 10^{0.4} \approx 2.5$ ) とした。  $N_w$  は無視できるものとした。

### 3.1 フレーム送信成功確率

図 3 は車両密度が 1000 (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。フェージングの有無はさほど結果には影響しないことがわかる。衝突警告のためには 1 秒間に 10 フレーム以上受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。この条件は車両間の距離が 70m 以内（フェージングなし）もしくは 60m 以内（フェージングあり）の場合にのみ満たされる。

図 4 は車両密度が 2000 (台/km<sup>2</sup>) の場合の結果である。フレーム受信成功確率が 2/3 以上であるのは、車両間の距離が 50m 以内（フェージングなし）もしくは 40m 以内（フェージングあり）の場合にのみ満たされる。

### 3.2 シミュレーションの際の車両配置領域

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。計算時間の観点からは、シミュレーションはなるべく狭い領域に車両を配置して行いたい。十分な精度を確保するために、シミュレーションの際に車両を配置すべき領域の最低限の広さを知ることは重要である。そのため、車両を配置する領域を変えてシミュレーションを行い理論と比較した。なお、シミュレーションでは、(3) で定まる割合の車両のみが信号を送信した際の干渉信号の強度を調べる簡易な実験を行った（IEEE 802.11p の動作を模擬する詳細なシミュレーションは実施していない）。

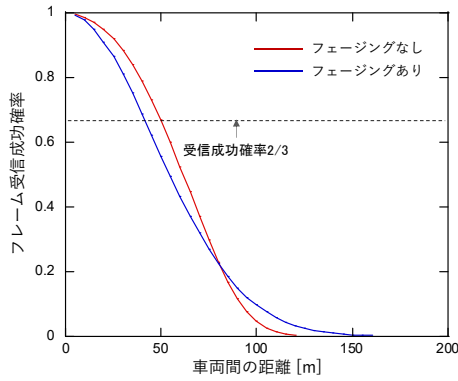


図 4: フレーム送信成功確率:  $\lambda = 2000$  (台/km<sup>2</sup>)

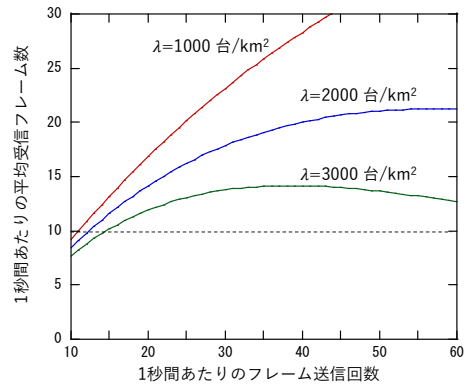


図 7: 1 秒間の平均受信フレーム数 (車両速度=40km/h)

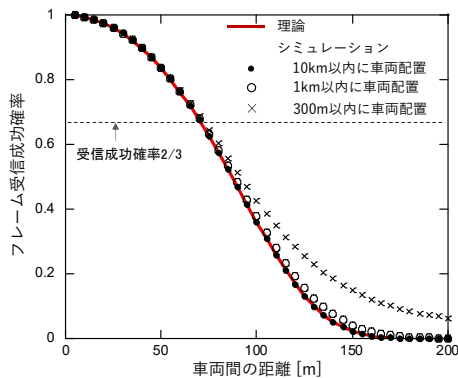


図 5: フレーム送信成功確率: シミュレーションとの比較 (フェージングなし)

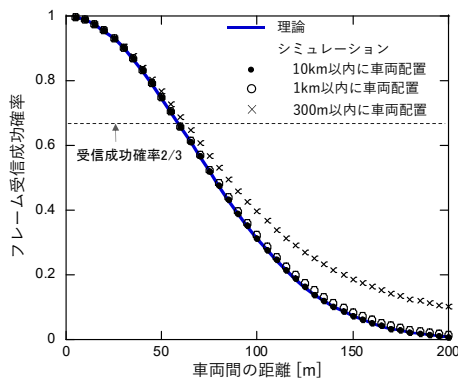


図 6: フレーム送信成功確率: シミュレーションとの比較 (フェージングあり)

図 5 はフェージングなしの場合の結果である。車両密度は  $1000$  (台/km<sup>2</sup>) とした。車両を原点から  $300\text{m}$  以内に配置した場合のシミュレーション結果は理論とやや異なるが、 $1\text{km}$  以内に車両を配置するとシミュレーション結果は理論とほぼ一致する。すなわち、シミュレーションの際には、 $1\text{km}$  以内に車両を配置すれば、ほぼ充分であると言える<sup>(注2)</sup>。図 6 はフェージングがある場合の結果である。同様の傾向が見られる。

### 3.3 1 秒間の平均受信フレーム数

衝突警告アプリケーションのための無線通信に求められる品質要件として、(1) 衝突が予想される  $9.5$  秒前から  $2.5$  秒から前の間に、衝突の危険のあるノード (車両) に関する情報が配信されること [19]、および (2)  $1$  秒間に  $10$  フレーム以上受信で

きること [8,9] が定められている。例えば時速  $60\text{km}$  の車両は  $3$  秒間で  $50\text{m}$  走行できるため、時速  $60\text{km}$  の車両との衝突を回避するためには、少なくとも  $50\text{m}$  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。フレームの送信頻度を増やせば、受信する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、かえって受信できるフレーム数を減らす恐れがある。適切なフレームの送信頻度を知るために、車両が衝突の  $3$  秒前の位置 (時速  $60\text{km}$  で走行する場合は  $50\text{m}$ ) 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 7 は車両速度が  $40\text{km/h}$  の場合の結果である。車両密度  $\lambda$  に結果は大きく依存する。しかし、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<sup>2</sup>) 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。図 8 は車両速度が  $50\text{km/h}$  の場合の結果である。 $\lambda = 2000$  (台/km<sup>2</sup>) のときは、送信フレーム頻度が  $1$  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>) のときはもはや基準は満たされない。図 9 は車両速度が  $60\text{km/h}$  の場合の結果である。 $\lambda = 2000$  (台/km<sup>2</sup>) のときに、もはや「 $1$  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。しかし、 $\lambda = 1000$  (台/km<sup>2</sup>) のときは、基準は十分に満たされる。

以上のように、結果は車両密度や車両の速度に大きく依存するが、送信フレーム頻度を適切に設定すれば、衝突警告アプリケーションは十分に成立すると考えられる。また本数値例からは、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という結論となる。

**注 1.** フレーム受信成功確率は (2) で与えられるが、車両の位置の時間変動がない場合、フレーム送信に成功するか否かは送信するたびに独立に決まるわけではない。しかし、フェージングの影響により信号強度は大きく時間変動すること、また CSMA/CA によりフレーム送信中の車両は毎回変わることから、独立性はおよそ成り立つと考えられる。したがって、 $1$  秒間に受信できるフレーム数の分散はさほど大きくないと思われる。

## 4. むすび

本稿では、車両が  $2$  次元平面内にポアソン点過程に従って配置されているとして、衝突の恐れのある車両からのフレームの受信成功確率の陽表式を導出した。また陽表式に基づいて幾つかの数値例を示し、例えばシミュレーションの際に確保すべき車両配置領域や、衝突警告アプリケーションが成立しうる車両密度などについて考察した。今後の課題として、車両が例えば

(注2): この結論は  $\alpha$  の値に大きく依存する。例えば  $\alpha = 2.5$  の場合は、車両を  $10\text{km}$  以内に配置しないと理論とシミュレーションは一致しない。



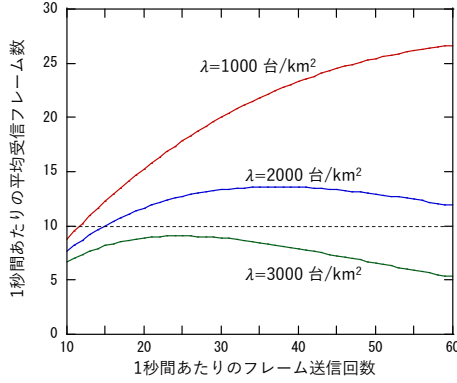


図 8: 1 秒間の平均受信フレーム数 (車両速度=50km/h)

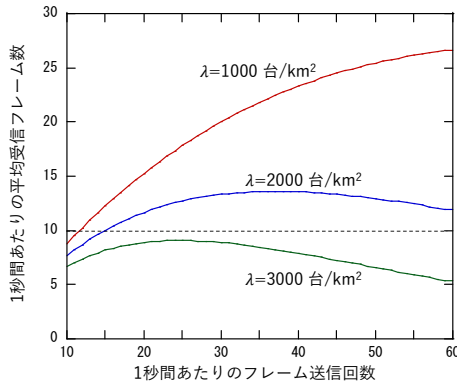


図 9: 1 秒間の平均受信フレーム数 (車両速度=60km/h)

格子状の道路網に定常点過程に従って配置される場合などの評価がある。また、本稿で得られた結果は、C-V2X, 特にノード間で直接データ通信を行う PC5-based C-V2X [20] にも適用可能であると考えられる。今後は、PC5-based C-V2X への応用も検討したい。

## 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J.B. Kenney, “Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States,” Proceedings of the IEEE, vol.99, no.7, pp.1162–1182, 2011.
- [5] 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.
- [6] D. Jiang, V. Taliwal, A. Meier, W. Holfelder, and R. Hertrich, “Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication,” IEEE Wireless Communications, vol.13, no.5, pp.36–43, 2006.
- [7] R. Kawasaki, H. Onishi, and T. Murase, “Performance evaluation on V2X communication with PC5-based and Uu-based LTE in crash warning application,” 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.1–2, IEEE, 2017.
- [8] “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-s-department-transportation-announces-decision-move-forward-vehicle-vehicle-communication-technology-light-vehicles/>, 2014. The News on NHTSA.

- [9] 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.
- [10] 平井健士, 村瀬勉, “V2X を利用した衝突警告アプリケーションにおける SINR 改善手法の実データを用いた通信性能評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2017-140, pp.303–308, 2018.
- [11] S.B. Lowen and M.C. Teich, “Power-law shot noise,” IEEE Trans. Information Theory, vol.36, no.6, pp.408–421, 1990.
- [12] M. Haenggi and R.K. Ganti, “Inference in large wireless networks,” Foundations and Trends in Networking, vol.3, no.2, pp.127–248, 2008.
- [13] J.G. Andrews, F. Baccelli, and R.K. Ganti, “A tractable approach to coverage and rate in cellular networks,” IEEE Trans. Commun., vol.59, no.11, pp.3122–3134, 2011.
- [14] F. Baccelli and B. Blaszczyszyn, “Stochastic Geometry and Wireless Networks, Volume I – theory,” Foundations and Trends in Networking, vol.3, no.3–4, pp.249–449, 2009.
- [15] F. Baccelli and B. Blaszczyszyn, “Stochastic Geometry and Wireless Networks, Volume II – applications,” Foundations and Trends in Networking, vol.4, no.1–2, pp.1–312, 2009.
- [16] J. Abate and W. Whitt, “The Fourier-series method for inverting transforms of probability distributions,” Queueing Systems, vol.10, pp.5–88, 1992.
- [17] J. Abate and W. Whitt, “A unified framework for numerically inverting laplace transforms,” INFORMS Journal on Computing, vol.18, no.4, pp.408–421, 2006.
- [18] T.V. Nguyen, F. Baccelli, K. Zhu, S. Subramanian, and X. Wu, “A performance analysis of CSMA based broadcast protocol in VANETs,” Proceedings of INFOCOM, pp.2805–2813, IEEE, 2013.
- [19] D. Bezzina, “Light vehicle platform update,” 2008. IVBSS 2008 Public Meeting.
- [20] 川崎綾也, 平井健士, 村瀬勉, “衝突警告アプリケーションにおける端末間干渉を考慮した PC5-based C-V2X の性能評価,” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2017-139, pp.297–302, 2018.

## 付 録

### 1. 2 次元ポアソン過程に関する公式

車の存在領域を  $\Omega$ , 領域内で  $I_i$  が 1 に等しい車の台数を  $K$ , 領域内の車両数を  $N$  とすると,

$$\begin{aligned}
 E \left[ e^{-s \sum_{i=1}^N I_i S(|\mathbf{x}_i|)} \right] &= E \left[ (E[e^{-sS(|\mathbf{x}|)}])^K \right] \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} p(K=k) (E[e^{-sS(|\mathbf{x}|)}])^k \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda \rho |\Omega|)^k}{k!} e^{-\lambda \rho |\Omega|} (E[e^{-sS(|\mathbf{x}|)}])^k \\
 &= e^{-\lambda \rho |\Omega|} \exp \{ \lambda \rho |\Omega| E[e^{-sS(|\mathbf{x}|)}] \} \\
 &= \exp \left\{ -\lambda \rho |\Omega| (1 - E[e^{-sS(|\mathbf{x}|)}]) \right\} \\
 &= \exp \left\{ -\lambda \rho \int_{\Omega} (1 - e^{-sS(|\mathbf{x}|)}) d\mathbf{x} \right\}
 \end{aligned}$$

$\Omega$  を二次元平面全体に広げれば, (1) の最初の等式が導かれる。