

# 電波・可視光併用型の無線通信を用いる自動走行隊列への 電波妨害攻撃の影響評価

植田 雄介<sup>1</sup> 石原 進<sup>2</sup>

概要：自動隊列走行を行う上で先頭車両か自身の車両メッセージ（位置や速度，加速度など）を確実に隊列メンバー車両に配信することが重要となる．先頭車両メッセージは，電波などの無線通信を利用して隊列内の各車両に配信される．しかしながら，電波を用いた通信は，意図的に妨害される可能性がある．通信が妨害されると，先頭車両メッセージを隊列メンバー車両が受け取れず，隊列走行を安全に維持することが困難になる．電波通信の妨害に対する対策として，筆者らは，電波通信と可視光通信を併用して自動隊列走行用制御通信手法を提案している．本稿では，電波妨害攻撃下の電波・可視光通信併用型隊列制御通信を用いた時の電波妨害攻撃の隊列走行制御への影響をシミュレーションによって評価する．シミュレーションの結果，可視光通信を使うことで電波通信のみで中継する場合よりも車間距離の変化は大幅に小さくなるが，電波・可視光通信併用型手法を用いた場合には，さらに車間距離の変化が少なくなり，事故のリスクが大きく軽減されることがわかった．

## 1. はじめに

自動隊列走行は，走行時の空気抵抗の軽減による燃費向上，車間距離の短縮に伴う渋滞緩和，自動運転によるドライバーの疲労軽減が期待でき，今日世界中で活発に研究開発が進められている．自動隊列走行の実現を目指し，日本，米国，欧州で自動隊列走行プロジェクトの実証実験が進められている [1][2][3]．日本では，NEDO が自動隊列走行プロジェクト Energy ITS Project で実証実験を行っている [1]．この Energy ITS Project では，5.8GHz の電波と赤外光による通信を先頭車両や先行車両の情報を取得するのに用いており，時速 80km の 4 台の大型トラックを車間距離 4m で自動隊列走行するデモを行っている．また，欧州では，5.9GHz の電波を用いた DSRC を使用し，一般道路において時速 80km、車間距離 6m でトラック 1 台に乗用車 3 台が追従して隊列走行する実証実験が SARTRE Project で実施されている [2]．

自動隊列走行では，先頭車両ならびに先行車両からのメッセージ（位置，速度，加速度など）を図 1 のように隊列メンバー車両に対して確実に配信する．後続車両はこれらの情報をもとにして自身の加速度を調整する．先行車両の情報は赤外線やレーザー等の車載センサで観測することが可能であるため，特に先頭車両の情報が隊列全体の制御

に重要である．そのため，先頭車両からの通信が妨害攻撃により阻害されると隊列メンバー車両は隊列を安全に維持できなくなる．従って，妨害攻撃下で先頭車両からのメッセージを配信できる方法，あるいは妨害攻撃されていることを検出して安全な車間距離を調整可能な仕組みが求められる．

電波通信への妨害攻撃下でも安全に隊列走行を可能とするために，筆者らは電波通信だけでなく可視光通信も用いて先頭車両メッセージを送信する電波・可視光併用型通信手法を提案している [6]．可視光は，指向性が高く，通信範囲が限定されるため，妨害の影響を受けづらい．一方で，可視光通信は，車両をまたがる通信が困難であるので，隊列走行メンバー車両への通信はマルチホップとなる．電波通信と可視光通信を併用することで，たとえ電波による通信が阻害されても，バックアップ手段として可視光通信を用いて先頭車両メッセージを送信することで先頭車両メッセージを低遅延で，かつ確実に配信することが期待出来る．

本稿では，電波・可視光併用型通信プロトコルを用いた場合の自動隊列走行に対する電波と可視光通信妨害攻撃の影響を，無線通信と隊列の車両制御を含めたシミュレーションにより評価する．本稿の構成は以下の通りである．2 章に関連研究について述べる．3 章で電波・可視光併用型通信の隊列走行制御用通信プロトコルについて述べる．4 章で本シミュレーションのシナリオ，5 章でその結果，6 章で本稿をまとめる．

<sup>1</sup> 静岡大学大学院 総合科学技術研究科 工学専攻

<sup>2</sup> 静岡大学大学院 工学領域数理システム 工学系列

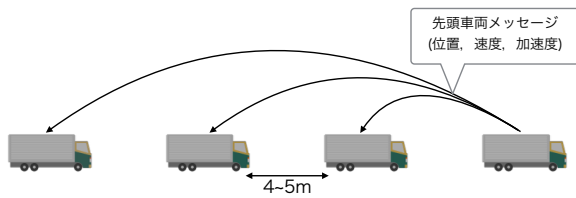


図 1 自動隊列走行

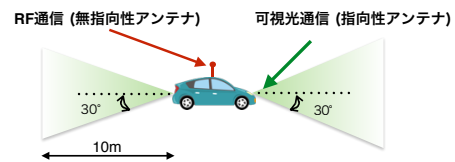


図 2 通信モデル

## 2. 関連研究

自動隊列走行は、先頭車両からの制御メッセージを隊列メンバー車両へ確実に配信することが重要となる。しかしながら、Punalらは[4]で電波を用いた車車間通信が妨害攻撃によって大きく阻害されることを実験により示している。彼らは、5mの車間距離で25km/hの速度で走行する2台の車両間の通信を、道路沿いに設置した電波妨害源から攻撃する実験を行った。この実験において、送信車両は受信車両に5.89GHz帯域のIEEE802.11pでの電波通信を用いて、送信頻度10Hz、送信出力17.48dBmで100byteのパケットを送信した。攻撃用デバイスにはFPGAベースのソフトウェア無線ツールキットWARP2が用いられ、Constant Jammer, Periodic Jammer, Reactive Jammerの3種類の妨害方法による攻撃が行われた。Constant Jammerは、長さ2.71ms長の妨害信号を常に送信し続ける。Periodic Jammerは、長さ64us長の妨害信号を10usの待ち時間を挟んで繰り返し送信する。Reactive Jammerは、閾値(-75dBm)を超えると妨害信号を送信する。これらの攻撃方法のうちから、Periodic Jammerの妨害攻撃の効果が大きく、妨害信号出力17.28dBmの場合で、妨害源の周囲465mの広範囲で車両間の電波通信を阻害することが示された。この攻撃は、車載無線機の自動利得制御の遅れを突いたものである。また、妨害攻撃でなくとも多くの車両による定期的送信メッセージによる通信路の混雑によって制御情報の欠落が起こりうる。

## 3. 電波・可視光併用型通信

この章では、電波通信と可視光通信の通信特性を示し、電波・可視光併用型隊列制御通信プロトコルについて述べる。

### 3.1 電波・可視光通信

#### ● 電波通信 (Radio Frequency)

車車間通信用の電波通信の方式として、欧米では5.9GHz帯を用いるDSRC(Dedicated Short Range Communications)の標準化が行われている。日本では、700MHz帯を用いるARIB-T109が標準化されている。マイクロ波帯の電波は、光と比べると回折効果が大きく障害物を回り込んで通信を行うことができる。

特に、日本で用いられる700MHz帯の電波は5.9GHz帯に比べて見通し外での広い範囲で通信できる。また、オムニアンテナにより1ホップで前後左右の広範囲(200-300m程度)に車両メッセージを配信することができる。しかし、2章でも述べたよう電波通信は妨害攻撃に脆弱である。

#### ● 可視光通信

可視光は、マイクロ波帯の電波と比べて指向性が高く、回折も起きにくい。そのため、可視光通信を妨害するには、この限定された通信範囲内に妨害源が存在しているか、通信相手との間に障害物がなければならない。従って、可視光通信は妨害攻撃の影響を受けづらい。フォトダイオード単体による受信機と市販スクータを用いた実験ではビットレート10kbps、通信範囲10m程度の屋外での可視光車車間通信の事例が報告されている[7]。一方、山里らは、高精度のイメージセンサを使うことで屋外で高いビットレート(10Mbps)で路車・車車間可視光通信を実現している[5]。可視光通信を隊列制御で用いる場合、先頭車両から見て2番目以降の車両に対しては1番目の車両が障害物となるので直接通信ができない。従って、自動隊列走行で可視光通信を利用して情報を送信するにはマルチホップとならざるを得ないので、ホップ数分だけ遅延時間が増大する。

### 3.2 電波・可視光併用型隊列制御通信手法 [6]

筆者らが提案したこの手法では、先頭車両は、電波と可視光通信の両方を用いて先頭車両メッセージ(位置、速度、加速度)に先頭車両が送信した時のタイムスタンプを付与して隊列メンバー車両に送信する。各車両は、より新しいタイムスタンプを持つメッセージを受け取った時のみ隊列メンバー車両にそのメッセージを電波と可視光通信で転送する。受け取ったメッセージのタイムスタンプが最新のものと同一、あるいは古い場合には、メッセージを転送せず破棄する。

可視光通信と電波を併用することで、一方の通信路での障害を他方での通信で補うことができる。通信路で発生した電波通信での受信エラー率が高く、可視光通信を利用する頻度が上がると遅延は増大する。電波通信は広範囲にブロードキャストでメッセージを送信可能であるため、先頭車両から1回で各車両に低遅延で送信可能である。しかし

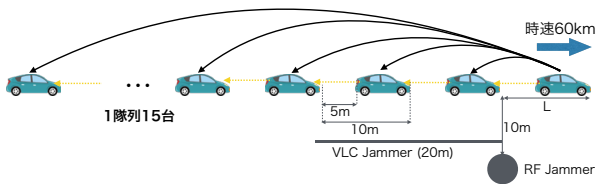


図 3 急停止シナリオ

ながら、電波通信のエラーが生じた場合、可視光通信によるマルチホップ通信の割合が増えるため遅延が増大する。

#### 4. シミュレーションシナリオ

電波妨害下での電波・可視光併用型通信を用いた隊列走行への電波妨害攻撃への耐性を確認するため、Space Time Engineering 社の離散事象シミュレータ Scenargie[10]を用いて、電波・可視光併用型の通信モデル、隊列走行制御モデルを実装し、シミュレーションにより性能評価を行った。本章ではそのシミュレーション条件について述べる。

##### 4.1 シミュレーションシナリオ

本シミュレーションでは、図 3 のように車間距離を 5m とした車両 15 台の隊列走行を想定する。車両の大きさは、全長 5m、幅 2.5m とし、各車両は、電波通信と可視光通信の送受信機を有しているものとする。可視光通信送信機は車両後方中央、可視光通信受信機は車両前方中央に取り付けられる。妨害源には、電波妨害と可視光通信妨害の 2 種類の妨害攻撃方法を用意した。電波妨害攻撃は、2 章で述べた Periodic Jammer を無指向性アンテナを利用して送信出力 20dBm の妨害信号を送信するものとした。可視光通信妨害攻撃は、可視光通信の受信機に妨害光を与えるものとする。妨害源の位置から隊列走行の逆方向に向かって 20m の区間で可視光通信での受信が全て失敗するものとした。それぞれの妨害源は先頭車両の初期位置から 500m 先に設置した。本シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。

シミュレーションシナリオは、以下の 2 種類を用いた。

##### (1) 急停止シナリオ

先頭車両は 60km/h で妨害源に向かって走行し、妨害源通過後 0m、15m の地点で加速度-7.2m/s<sup>2</sup> で急停止する。

##### (2) 加減速シナリオ

先頭車両は、妨害源に向かって走行し、最高速度 100km/h、最低速度 20km/h とした 16s 周期の正弦波に従うように加減速を繰り返す。

隊列メンバー車両は、次節に示す隊列制御アルゴリズムに則り車両制御を行い、車間距離が 5m を維持するように走行する。本シミュレーションで用いたパラメータを表 2 に示す。

表 1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Value
MAC Algorithm VLC interface	ALOHA(no retransmission)
Bit rate of VLC link	10kbps
Size of VLC Packets	200bytes
Tx Power	20dBm
RF Modulation	QPSK R=1/2(6Mbit/s)
RF Propagation Model	Free Space
RF Fading Model	Nakagami(m = 2)
RF PHY/MAC Model	IEEE 802.11p/1609.4 single channel
RF Frequency	5.89GHz
RF Antenna	Omni-directional antenna(0dbi)
RF MSDU Size	200bytes
RF Access Category	AC_VI
最高減速度	- 7.2m/s <sup>2</sup>
最高加速度	2.5m/s <sup>2</sup>

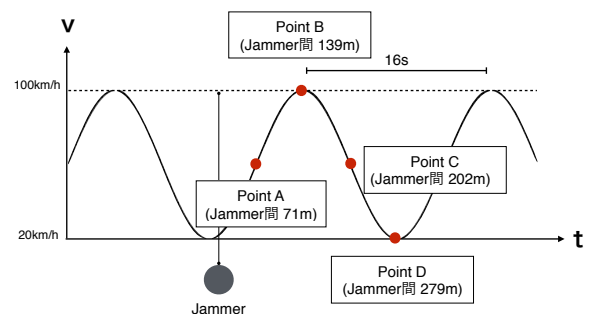


図 4 加減速シナリオ

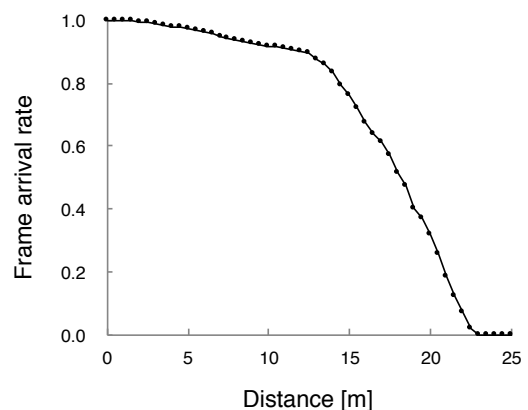


図 5 可視光通信モデルにおけるフレーム到達率

##### 4.2 可視光通信モデル

ここでは、車両のヘッドランプやテールランプは、光を遠くに届けるために反射板が取り付けられているため、Lambertian モデルよりも車車間で用いられる可視光通信モデルは光軸から 20-30° の狭い範囲が妥当な通信範囲となる。本シミュレーションは、この可視光通信モデルに則り行った。図 5 にフレーム到達率を示す。この可視光通信モデルは、13m を超えるとフレームエラーが頻発し、24m でフレーム到達率が 0% になる

##### 4.3 中継通信メディアの変化による比較

本評価では、提案手法に加えて先頭車両メッセージの中

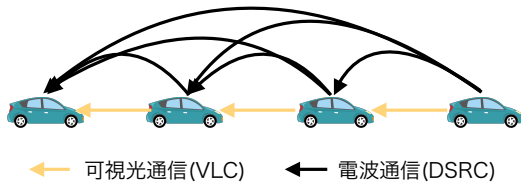


図 6 提案手法 (電波可視光併用型)

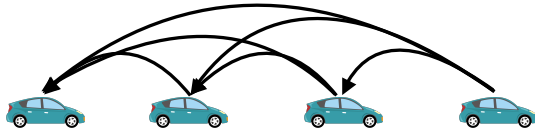


図 7 電波 (DSRC) のみで中継

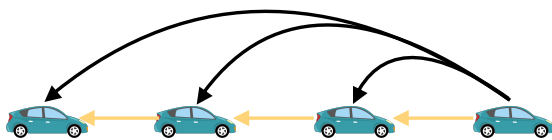


図 8 可視光通信 (VLC) のみで中継

次にメンバー車両は通信メディアが異なる2つの手法の動作をシミュレーションした。先頭車両は、常に電波と可視光通信を利用して先頭車両メッセージを送信する。

(1) 電波・可視光併用 (提案手法)(図 6)

先頭車両、隊列メンバー車両は、電波通信と可視光通信の両方を用いて先頭車両メッセージを送信する。

(2) 電波のみで中継 (図 7)

先頭車両、隊列メンバー車両は、電波通信だけを用いて先頭車両メッセージを送信する。

(3) 可視光のみで中継 (図 8)

先頭車両は、電波通信と可視光通信の両方を用いて先頭車両メッセージを送信するが、隊列メンバー車両は可視光通信のみを用いて先頭車両メッセージを送信する。

#### 4.4 隊列走行制御アルゴリズム

隊列走行制御アルゴリズムには、車車間通信ネットワークシミュレータ Veins[8] に隊列走行制御を組み込んだ拡張 Plexe[9] で用いられているものと同等のものを利用した。このアルゴリズムでは、先行車両ならびに自身の位置、速度、加速度、自車両の位置を利用して目標加速度を決定する。先頭車両は、自身の位置、速度、加速度を含めた先頭車両メッセージを決まった送信頻度で送信する。先頭車両メッセージを受け取った隊列メンバー車両は、受信したメッセージから先頭車両までの距離と速度、加速度を参照する。下の式により、次のステップでの加速度を決定する。

表 2 隊列走行制御アルゴリズムパラメータ

Parameter	Value
加速度の更新間隔	1[msec]
時定数 $\beta$	0.5
重み係数 $C_1$	0.5
ダンピング率 $\zeta$	1
制御バンド幅 $\omega_n$	0.1[Hz]
理想車間距離 $gap_{des}$	5[m]

まず、式 (2) で、先行車両の加速度 ( $\ddot{x}_{i-1}$ )、先頭車両の加速度 ( $\ddot{x}_0$ )、先行車両との速度差 ( $\dot{\epsilon}_i$ )、先頭車両との速度差 ( $\dot{x}_i - \dot{x}_0$ )、目標車間距離のズレ ( $\epsilon_i$ ) を利用して、各車両の目標加速度を求める。実際の車両は、目標とする加速度を得る際に動作遅延が伴う。このため、式 (2) の反応遅延式に基づいて、車両の加速度を更新する。ここで、 $\ddot{x}_{des}[n]$ 、 $\ddot{x}[n-1]$  は、それぞれ現在の加速度更新時の加速度、前回の更新からの加速度を表す。この本シミュレーションでは、表 2 で示す隊列走行アルゴリズムパラメータを用いた。

$$\ddot{x}[n] = \beta \ddot{x}_{des}[n] + (1 - \beta) \ddot{x}[n-1] \quad (1)$$

$$\ddot{x}_{ides} = \alpha_1 \ddot{x}_{i-1} + \alpha_2 \ddot{x}_0 + \alpha_3 \dot{\epsilon}_i + \alpha_4 (\dot{x}_i - \dot{x}_0) + \alpha_5 \epsilon_i \quad (2)$$

$$\epsilon_i = x_i - x_{i-1} + l_{i-1} + gap_{des} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i-1} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = 1 - C_1 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = C_1 \quad (6)$$

$$\alpha_3 = -(-2\zeta - C_1(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}))\omega_n \quad (7)$$

$$\alpha_4 = -C_1(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad (8)$$

$$\alpha_5 = -\omega_n^2 \quad (9)$$

#### 4.5 シミュレーション結果

図 9 に急停止シナリオで各車両の減速開始以後の車間距離の推移、図 11 に加減速シナリオの各車両の車間距離の推移を示す。

##### 4.5.1 急停止シナリオ

電波妨害シミュレーション結果を図 9 左側、電波と可視光通信妨害を利用したシミュレーション結果を図 9 右側に示す。これは、1 回のシミュレーション結果に基づく結果を示している。グラフの縦軸は、前方車両との車間距離、横軸は、急停止開始経過時間を表している。

電波妨害がされている場合 (図 9 左側)、電波通信のみで中継する手法を用いたとき、急停止開始位置が 0m、15m の両方において、前方車両との車間距離が 0m、もしくは、0m 付近まで縮まる。このことから、電波通信のみを用いて先頭車両メッセージを送信すると、電波妨害攻撃によって衝突事故となる危険性が大きくなる。この原因は、妨害

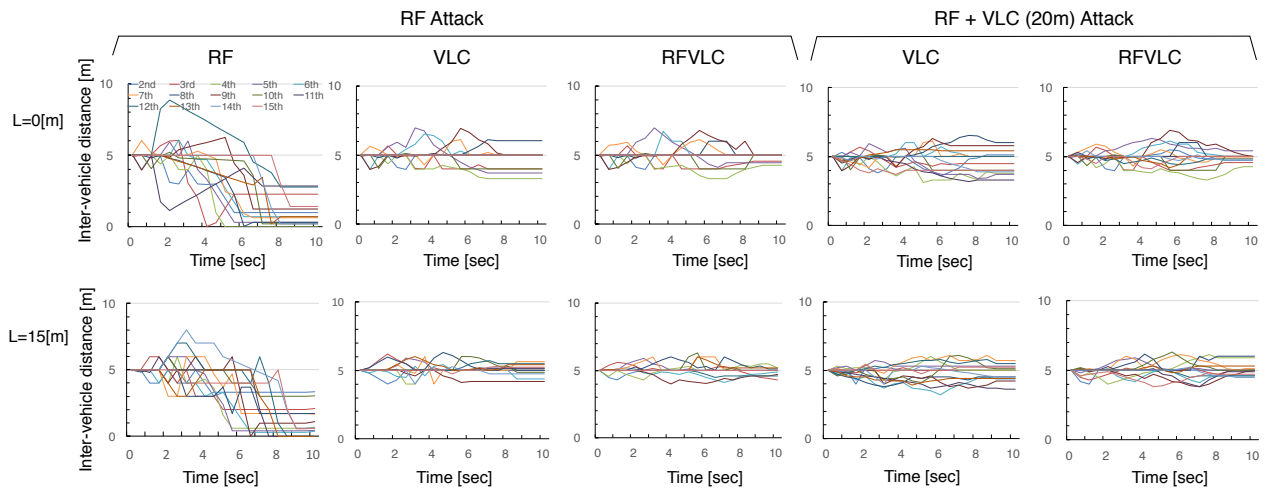


図 9 急停止シナリオ結果

源接近時に先頭車両からの減速を示す制御メッセージが後続車両に届かないことにある。今回用いたシナリオでは、先行車両は一度減速を開始すると停止するまでその加速度を維持する。従って、一度先頭車両からの制御メッセージを受けることができれば直ちに減速を始めることができる。しかし、減速開始時の先頭車両と妨害源の距離が短い場合、制御メッセージの大半が後続車両に届かなかったために、大きな隊列の乱れが生じている。

一方で、可視光通信を用いている提案手法と可視光のみで中継手法を用いた場合、電波のみを利用して中継する手法よりも各車両の車間距離の変化が小さくなる。車間距離の変化は、VLC を利用するどちらの手法においても理想の車間距離 5m に対して、 $-1.8\text{m} \sim +2.0\text{m}$  の間で推移している。また、可視光通信だけで中継する手法よりも、電波と可視光の両方を利用する提案手法は、急減速開始後の時間経過とともに車間距離の変化が理想車間距離 5m に近づいていく。

電波と可視光通信の両方を用いて妨害がされている場合(図 9 右側)、車間距離の変化は、電波妨害のみが行われている場合と比較して、提案手法と可視光通信のみで中継する手法とも大きくは変わらない。

図 10 に急停止開始後 3-6s までの車間距離の CDF を示す。これは、500 回の試行の結果です。電波妨害がされている場合、電波のみで中継する手法は、急減速開始後の時間経過とともに車間距離が短くなる車両が多くなる。また、提案手法は、急停止 5s 以降から可視光通信のみで中継する手法よりも車間距離を 5m に保つ車両が多い。

#### 4.5.2 加減速シナリオ

加減速シナリオにおける、ある試行での車間距離の変化を図 11 に示す。

電波通信だけを用いる手法では、急停止シナリオと同様に車間距離が大きく変化し、 $3.5\text{m} \sim 7.6\text{m}$  で推移する。

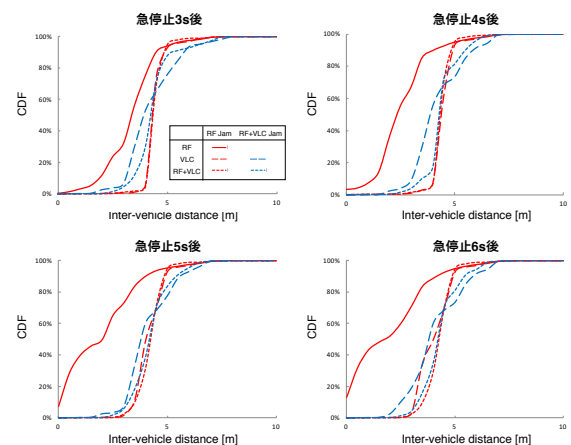


図 10 急停止シナリオ時の車間距離 CDF

図 12 に妨害源通過後 Point A-D までの車間距離に CDF を示す。試行回数は、500 回である。隊列車両が加速している Point A, C, 減速している Point B, D においても、提案手法と可視光のみで中継する手法は車間距離を 5m 付近に保っている。特に提案手法は、可視光のみで中継する手法よりも加速、減速のどちらとも 5m 付近にいる車両が多い。

## 5. まとめ

本稿では、電波・可視光併用型通信手法を用いる場合の妨害攻撃下の隊列制御への影響を調査した。シミュレーションの結果、妨害攻撃下で電波通信だけを用いて先頭車両メッセージを送信した場合には、隊列メンバー車両の車間距離が大幅に変化し、事故のリスクが高くなることが確かめられた。一方、可視光通信を使うことで車間距離の変化は大幅に小さくなるが、電波・可視光通信併用型手法を用いた場合には、さらに車間距離の変化が少なくなり、事故のリスクが大きく軽減されることがわかった。今後、複数の隊列が複数のレーンに隊列している場合についても調

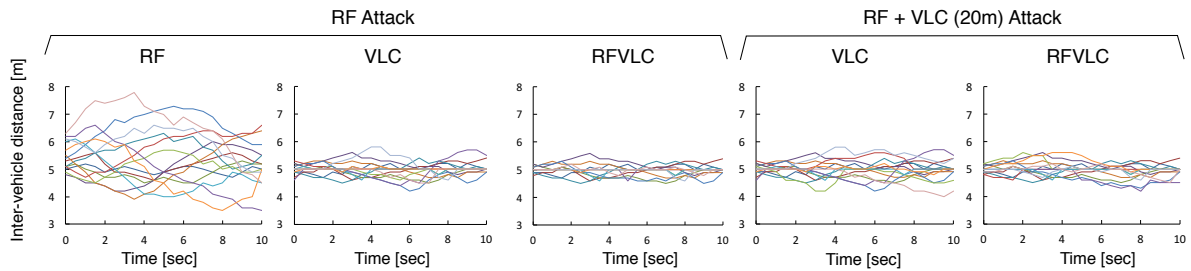


図 11 加減速シナリオ結果

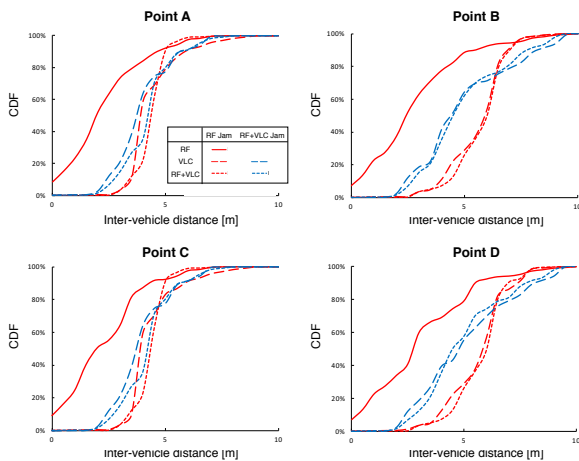


図 12 加減速シナリオ時の車間距離 CDF

査を行う予定である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 B 「複数メディア併用とセンサデータ転送によるロバストな衝突防止車車間通信システム (課題番号 15H02689)」の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

#### 参考文献

- [1] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO: エネルギー ITS 推進事業, <http://www.nedo.go.jp/activities/FK00023.html> (2016.11.14 確認)
- [2] The SARTRE Project, <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx> (2016.11.14 確認)
- [3] The European Truck Platooning Challenge, <https://www.eutruckplatooning.com/default.aspx> (2016.11.14 確認)
- [4] O. Punal, C. Pereira, A. Aguiar, and J. Gross, "Experimental Characterization and Modeling of RF Jamming Attacks on VANETs," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 64, no. 2, pp. 524-540, Feb. 2015.
- [5] T. Yamazaki, et al., "Image-sensor-based visible light communication for automotive applications", IEEE Comm., vol.52 no.7, pp.88-97, 2014.
- [6] S. Ishihara, R. Rabsatt, M. Gerla, "Improving Reliability of Platooning Control Messages Using Radio and Visible Light Hybrid Communication", Vehicular Networking Conference (VNC), 2015.
- [7] W. Viriyasitavat, S.-H. Yu, and H.-M. Tsai, Channel Model for Visible Light Communications using Off-the-

shelf Scooter Taillight, Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2013.

- [8] C. Sommer, R. German, and F. Dressler, Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis, IEEE Trans. Mobile Computing, vol.10, no.1, pp. 3-15, January 2011.
- [9] M. Segata, S. Joerer, B. Blessl, C. Sommer, F. Dressler, R.L. Cingo, PLEXE: A Platooning Extension for Veins, Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Dec. 2014.
- [10] Space Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/jp/> (2016.04.18 確認)