

可視光・電波併用型制御通信を行う隊列走行への 妨害電波攻撃の影響評価

植田 雄介¹ 石原 進¹

概要：自動隊列走行はを行う上で、先頭車両は先頭車両メッセージ（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。しかし、電波を用いた通信はソフトウェア無線等で意図的に電波が妨害される可能性がある。電波が妨害されると、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難しくなる。そこで、Ishihara らによって電波と可視光通信を併用した隊列制御メッセージ送信プロトコルが提案されている。本稿では、電波・可視光通信併用型隊列制御通信プロトコルを用いること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、電波・可視光通信の片方だけを使う方式が隊列の乱れを生じさせるのに対し、電波・可視光併用型通信は、電波通信への妨害攻撃下においても前方車両との車間距離 10m を維持し続けることができ、安全に隊列走行制御を行える効果があることが示された。

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、ドライバーの疲労軽減が期待でき、今日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 が大型トラックでの自動隊列走行プロジェクト Energy ITS Project を 2013 年に実施している [1]。このプロジェクトでは、5.8GHz の電波と赤外光による通信を用いており、4 台の大型トラックには時速 80km、車間距離 4m で自動隊列走行デモを行っている。また、欧州では、一般道路において時速 80km、車間距離 6m でトラックを先頭車両とした、トラック 1 台と乗用車 3 台が追従する隊列走行する SARTRE Project が実施されている [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ことが重要となる。後続車両はこれらの情報をもとに自信の加速度を調整する。先行車両の情報は何らかの車載センサで観測することが可能なので、特に先頭車両の情報が隊列全体の制御に重要である。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することができなくなる。従って、妨害攻撃下で先頭車両からのメッセージを確実に配信できる方法、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できる仕組みが必要である。

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、Ishihara らは可視光通信を用いて先頭車両メッセージを送信する電波・可視光併用型通信プロトコルを提案している [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ため、一方で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への通信はマルチホップとなる。車両における可視光通信は、車両のヘッドランプ、リアランプの LED 照明を利用することで可視光通信の制御を行うことができ、大きな追加コストをかけず実現可能である。電波通信と可視光通信を併用することで、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配信することができる。

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通信妨害の影響を、無線通信と隊列の車両制御を含め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 章に電波通信に対する妨害攻撃について述べる。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、評価について述べ、5 章で本稿をまとめる。

2. 妨害攻撃の脅威

自動隊列走行には、先頭車両からの制御メッセージを隊

¹ 静岡大学大学院 総合科学技術研究科 工学専攻

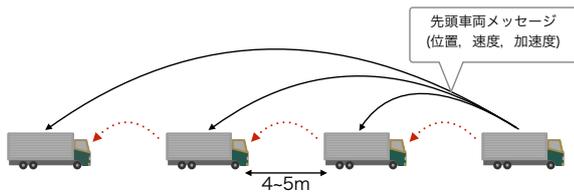


図 1 自動隊列走行

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 間隔で 25km/h の速度で走行する 2 台の車両間の通信が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、100byte のパケットを 10Hz で送信した。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 種類の攻撃方法による攻撃が行われた。これらの攻撃方法のうちから、長さ 64 us 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 Periodic Jammer の攻撃効果が大きく、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。

車両制御に関わる情報が妨害攻撃により受け取れず、事故のリスクが増大する。特に、自動隊列走行は、常に前方車両の情報が必要であるため制御情報の欠落は大きな危険を伴う。

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

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 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、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。



図 2 可視光通信

● 可視光通信 (図 2)

可視光は、マイクロ波帯の電波と比べて指向性が高く、回折もしづらい。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と言える。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 10kbps、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、高価かつ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で路車車間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プロトコル [6]

電波・可視光併用型隊列制御通信プロトコルでは、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。同じメッセージを電波と可視光の両方で送信しているため、後続の隊列メンバー車両は、同じメッセージを複数回受信することがある。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。

可視光と電波を併用することで、どちらの受信エラーに対しても補償が可能であるが、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. シミュレーション評価

提案手法の効果を確認するため、Space Time Engineering 社の離散事象シミュレータ Scenargie [10] を用いて性能評価を行った。本章ではシミュレーション条件とその結果について述べる。

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	50kbps
Size of VLC packet	200bytes
RF 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

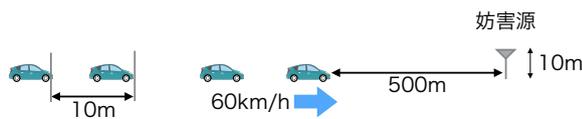


図 3 シミュレーションシナリオ

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 のように車頭間距離を 10m とした車両 10 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、DSRC と VLC の送受信機を有しているものとする。VLC 送信機は車両後方中央、VLC 受信機は車両前方中央に取り付けられる。妨害源は先頭車両の初期位置から 500m 先に設置され、2 章で述べた Periodic Jammer の妨害手法を用いて妨害をする。妨害源の電波の出力は 20dBm でアンテナは無指向性である。

先頭車両は、60km/h で妨害源に向かって走行し、妨害源手前 0m、20m、40m、60m の地点で加速度 -4.0m/s^2 で急停止する。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、先頭車両メッセージから車頭間距離が 10m を維持されるように走行する。本シミュレーションで用いたパラメータを表 2 で示す。なお、VLC による通信のモデルは単純化にできており、通信によるビットエラーは発生しないものとしている。

4.2 中継通信メディアの変化による比較

本評価では、提案手法に加え先頭車両メッセージの中継に用いる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。

(1) 電波・可視光併用 (提案手法)(図 3)

先頭車両、隊列メンバー車両は、DSRC と VLC 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 4)

先頭車両、隊列メンバー車両は、DSRC 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 5)

先頭車両は、DSRC と VLC の両方を用いて先頭車両

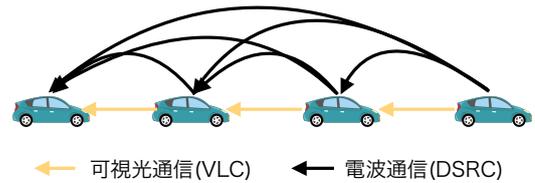


図 4 提案手法 (電波可視光併用型)

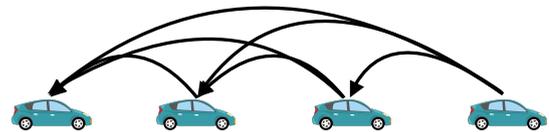


図 5 電波 (DSRC) のみで中継

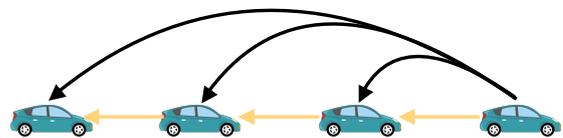


図 6 可視光通信 (VLC) のみで中継

メッセージを送信するが、隊列メンバー車両は VLC のみを用いて先頭車両メッセージを送信する。

4.3 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。先行車両の情報には車載センサで直接観れるものとした。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、加速度を参照し、目標車間距離から遠ざかっているのであれば、速度を上げ、近づきすぎているのであれば速度を落とすように制御する。妨害攻撃によって先頭車両メッセージが届かない場合には、各車両は直前に受信した先行車両情報を利用して隊列メンバー車両は、速度と加速度を調整する。

4.4 シミュレーション結果

図 6, 7 に先頭車両の減速開始以後の先頭車両と各車両の車頭間距離の推移を示す。両図はそれぞれ、制御メッセージ送信頻度が 10Hz、50Hz の場合の結果を示している。シード値を変えて行った。10 回のシミュレーション結果の平均値をグラフにプロットしている。

図 6, 7 から、電波通信のみで中継、可視光通信のみで中

継する手法は妨害源に近い位置で先頭車両の減速を開始するほど各車両の車頭間距離の変化が大きくなることわかる。中でも、電波通信のみで中継する手法は各車両の車頭間距離の変化が最も大きく、減速開始位置が妨害源 20m 未満では車頭間距離が 5m まで短くなり、衝突事故のリスクが増大されているのが確認できる。この原因は、妨害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取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、可視光通信を用いる提案手法と可視光のみで中継手法は、各車両の車頭間距離が 5m 未満になることはなく、衝突事故のリスクが小さいとわかる。この 2 つの手法を減速開始位置 0m での結果を比較すると、可視光のみで中継する手法は減速開始 1 秒間は各車両の車頭間距離が 10m よりも小さい。また、送信頻度が異なる場合を比較すると、可視光のみで中継手法は 50Hz よりも 10Hz の方が変化が大きい。しかし、提案手法は減速開始位置 0m においても、車頭間距離 10m を維持していることがわかる。これらのことから提案手法は妨害攻撃下でも隊列走行制御が確実に行われ、衝突事故のリスクが極めて低いものと言える。可視光通信による制御ではマルチホップ通信による先頭車両メッセージの遅延が生ずるがこの遅延による隊列の乱れはメッセージ送信頻度 10Hz で中継に可視光を用いたことで観測される。中継に可視光と電波を併用した場合遅延が減少し隊列の乱れがほとんど目立っていない。

5. まとめ

本稿では、電波・可視光併用型通信プロトコルを用いることで妨害攻撃下における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、各車両の車頭間距離が大幅に変化し、事故のリスクが増大することが確かめられた。一方、電波・可視光通信併用型プロトコルを用いた場合には、車頭間距離の変化が少なく、事故のリスクが大きく軽減されることがわかった。

今回のシミュレーションでは可視光通信の障害を考慮していない。今後、可視光通信の障害も考慮した評価を行う必要がある。また、隊列走行制御以外の電波・可視光併用型通信の効果を検討する予定である。

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> (2016.04.18 確認)
- [2] The SARTRE Project, <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx> (2016.04.18 確認)
- [3] The European Truck Platooning Challenge, <https://www.eutruckplatooning.com/default.aspx> (2016.04.18 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)

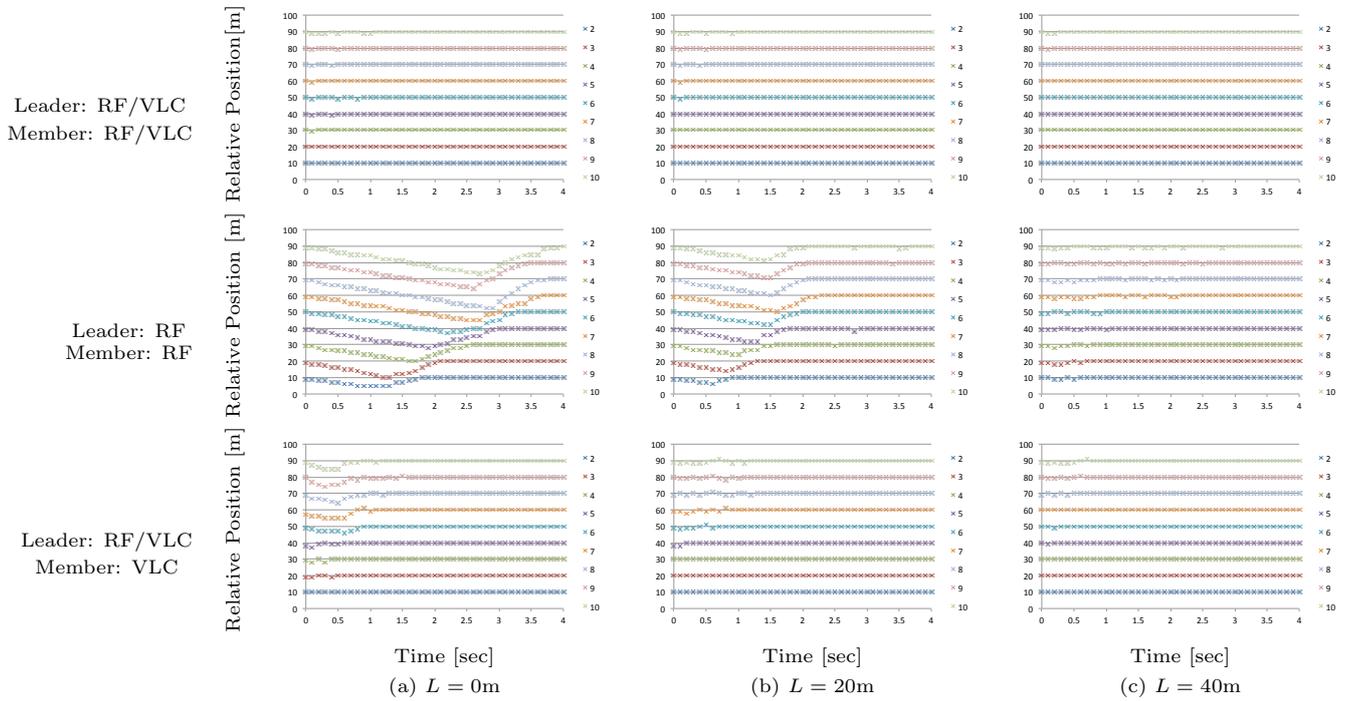


図 7 送信頻度 10Hz

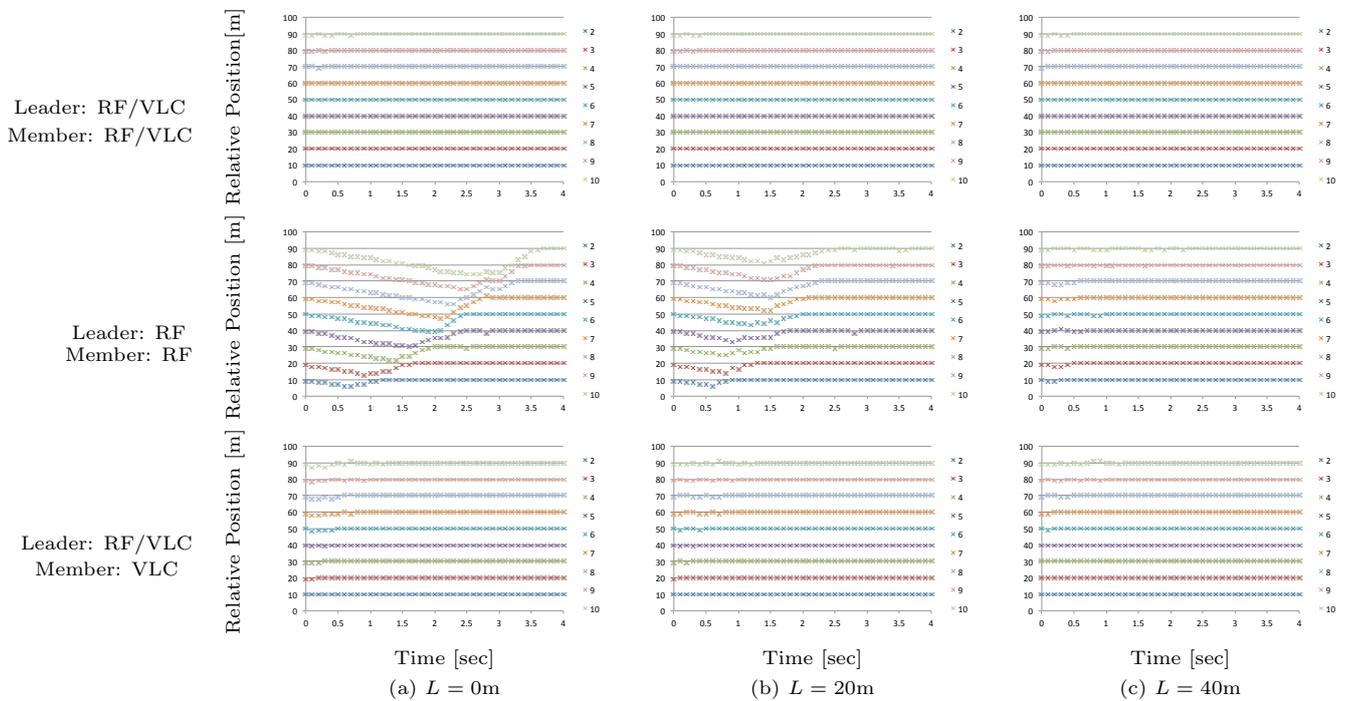


図 8 送信頻度 50Hz