

自動運転車・手動運転車の混在環境における 隊列制御への通信妨害攻撃の影響調査

濱崎 福平¹ 陳 ヒョンテ² 奥田 裕之² 鈴木 達也² 石原 進³

概要：無線通信を使用した自動隊列走行技術 (CACC) の実社会における実現において、自動運転車の普及過渡期では手動運転車が隊列内に混在することが考えられる。また、車車間通信においては通信妨害、なりすまし、パケットの改ざんなどのセキュリティ問題が重要であり、それらを踏まえた CACC の設計が求められる。陳らは手動運転車のモデルを用いることで、手動運転車を隊列内に考慮した混合型 CACC を提案している。しかしながら、通信の信頼性を考慮に入れた評価が行われていない。本研究では混合型 CACC の隊列制御アルゴリズムをネットワークシミュレータ Scenargie に組み込み、妨害攻撃を適用した場合の、隊列制御への影響を、車両挙動を含んだシミュレーションにより調査した。シミュレーションの結果、妨害による車両の追突は発生しなかったものの、目標車間距離 10m に対し、車間距離が 2m の隣接車両が発生するなど、車間距離が目標値から外れることで衝突のリスクが高まることや、一定時間内における隊列先頭から最後尾車両までの距離の変動幅が妨害によって 2 倍以上に膨らみ、隊列の安定性が損なわれることを確認した。また、モデリングの誤差が大きくなると、隣接車間距離に乱れができ、妨害攻撃が加わるとその乱れがさらに大きくなることを確認した。

1. はじめに

近年、自動隊列走行の研究に注目が集まっている。自動隊列走行では、隊列を形成する自動運転車両が互いに位置・速度・加速度等の情報 (以下、制御情報) をやり取りして車間距離を調整しつつ追従走行をする。隊列の各自動運転車両が先頭車両の動きに合わせて加速度を調整することで、車間距離を削減することができる。このため、自動運転によるドライバーの負担軽減のほか、車間距離を短くすることで、道路利用の効率化による交通渋滞緩和、空気抵抗の軽減による燃費向上及び排気ガスの削減が期待できる [1]。

自動隊列走行の中でも、制御情報のやり取りに無線通信を用いるものを CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) という。隊列の制御に当たって、車車間で無線通信を行うが、外部からの通信に対する攻撃の恐れが常に潜在しているため、CACC では通信セキュリティに関わる問題は重要である。通信セキュリティの問題として、通信妨害、なりすまし、メッセージ改ざん、偽装メッセージ、ブラックホール攻撃などが考えられる。本稿では、これらの中でも通信妨害攻撃に焦点を当てる。無線通信の脆弱性を突いた通信妨害によってメッセージがやり取りできなくな

ると、制御情報の更新に遅れが生じ、例えば先行車両が急停止をした場合は車両の追突といった重大な事故につながる可能性がある。そのため、通信妨害攻撃下においても隊列制御が損なわれない CACC が求められる。

また、自動運転車の普及過渡期では隊列の中に手動運転車が割り込むことが想定される。これまでに提案されている CACC [10] では、車車間通信のできない手動運転車が隊列に割り込んだ際、隊列は手動運転車を境に分断される設計となっており、隊列内に手動運転車を考慮することはない。これに対し、手動運転車のモデルを用いたモデル予測制御による CACC (以下、混合型 CACC) が陳らによって提案されている [2]。[2] では、手動運転車の運転行動を反映したモデルを用いることで手動運転車の挙動を予測している。しかしながら、通信干渉や通信妨害攻撃の影響が考慮されていない。そのため、通信妨害下で隊列内の車両が急停止等の衝突事故を引き起こし得る状況に陥った場合においても安全に車間距離を調整可能かを調査する必要がある。そこで本研究では、陳らの混合型 CACC をネットワークシミュレータ Scenargie [3] に組み込み、通信妨害下においても安定した追従走行及び車間距離の調整が可能か、先頭車両の挙動を変えた複数のシナリオを用いてシミュレーションにより調査した。

以下、2 章に関連研究について述べ、3 章で混合型 CACC

¹ 静岡大学工学部
² 名古屋大学大学院工学研究科
³ 静岡大学大学院工学領域

における手動運転車モデルとモデル予測制御について説明する。4章で本シミュレーションの概略について述べ、5章でシミュレーションのシナリオと結果を示し、6章にて本稿をまとめる。

2. 関連研究

自動隊列走行は、隊列を形成した複数台の自動運転車両が互いに制御情報を配信し、制御情報を基に自動で車両制御を行うことで安全に車間距離を調整しつつ追従走行する技術である。車両の追従について、後続車両が隊列の先頭車両を追従目標とするもの [4] や隊列内の車両で協調して仮想的な先頭車両を動的に決定し、それを追従目標とするもの [5] などが考えられている。CACC で用いられる無線通信規格として、IEEE802.11p が挙げられる。IEEE 802.11p は、IEEE 802.11a を基に、ITS の路車間、車車間通信に適合するように機能強化した無線通信規格であり、5.9GHz 帯を使用する。基本的な仕様は IEEE802.11a と同一であるが、標準帯域幅を 20MHz から 10MHz に変更し、シンボル長を 2 倍にするなどフェージングの影響を受けにくくする変更が加えられており、より高速移動体通信に適した無線通信規格になっている。IEEE802.11a と同様、アクセス制御方式には CSMA/CA 方式が、変調方式には通信周波数分割多重方式 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が採用されている。

隊列走行では、安定した追従を行うために制御情報を確実に送信/受信することが重要となる。しかしながら、Punal らは、IEEE802.11p を用いる車車間通信と同じ周波数帯の電波を用いた妨害によって車車間通信が阻害されることを実験によって示している [6]。彼らは、車車間通信する 2 台の車両に対して、電波妨害攻撃用デバイスを用いて 3 種類の電波妨害攻撃を行った。3 種類の電波妨害攻撃の一つである Periodic Jammer は、64 μ s 長の妨害信号に 10 μ s の待ち時間を挟んでいるが、これを用いた場合は、受信端末における妨害攻撃の信号対干渉雑音比 (SINR) が非常に小さいときでも妨害攻撃の効果が大きく、450 m 以上に及ぶ広範囲で車両間の電波通信を阻害することが示されている。

車車間通信への電波妨害攻撃を解決するための手段として、妨害の影響を受けづらい無線通信の利用が考えられる。その一つが可視光通信である。石原らは、通信妨害攻撃に強い隊列走行手法として、隊列走行で重要となる先頭車両および周囲の車両の情報を電波と可視光で補完する電波・可視光併用型通信手法を提案している [7]。電波・可視光併用型通信手法では妨害によって電波による通信が阻害されても、補完手段として電波妨害の攻撃を受けづらい可視光通信を用いて先頭車両のメッセージをマルチホップで中継する。植田らはこれに、先頭車両の挙動を含めたシミュレーションを行い、[7] の手法が、電波通信のみ、あるいは

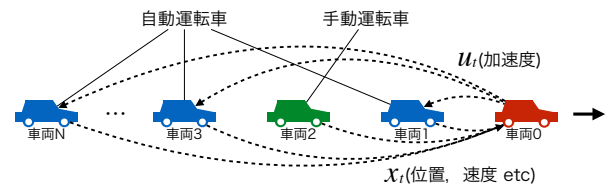


図 1 混合型 CACC のモデル

可視光通信のみでメッセージを中継する場合よりも、妨害攻撃下での隊列内車両の車間距離の変化が少なく、車両が衝突するリスクが低くなることを示している [8]。電波妨害攻撃の対策に限らず、隊列走行に関する総合的なセキュリティに関する研究も行われている。Rens らは、隊列内で不正行為を行う妨害攻撃者モデルを作り、妨害攻撃の影響を定量化するための枠組みを提案している [9]。

自動運転車の普及過渡期には、手動運転車が自動運転車の隊列の中に混在する状況が考えられる。そのため、自動運転車のみを考慮した CACC では、車両の追従走行の性能に影響を及ぼす。したがって、手動運転車が隊列に混在しても安全に車間距離を調整できるような制御設計が求められる。Milanes らは隊列に手動運転車が割り込む場合、その手動運転車を境に分断された隊列内における追従走行の性能評価を行い、追突を起こさずに隊列制御できることをシミュレーションによって確認している [10]。しかしながら、隊列を分断する手法では隊列の中に手動運転車を直接的に考慮することはできない。

奥田らは [11] で人間の運転行動はいくつかの簡単な動作とそれらの切り替えによって再現されるという仮定に基づき、運転行動を複数の線形モデルの組み合わせによってモデル化し、陳らは [2] でそれを自動運転車の隊列に組み込んだ混合型 CACC を提案している。混合型 CACC ではモデル予測制御を用いて制御入力最適化を行うことで、手動運転車を考慮した隊列でも安定した隊列走行を実現している。

3. 混合型 CACC

本章では、陳らの混合型 CACC [2] について述べる。

3.1 混合型 CACC の概要

[2] では、直線道路において図 1 のように先頭車両 (車両 0) に対して手動運転車を含む車両 1 から車両 N までが先頭車両の追従を行う、 $N + 1$ 台の隊列を対象とした CACC を提案している。先頭車両は車車間通信によって後続車両の前方車両との車間距離や相対速度を取得し、後続自動運転車は先頭車両からの加速度指令に従って自身の加速度を更新する。後続自動運転車に指令する加速度はモデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) によって求める。モデル予測制御とは、現在の制御の内部状態から、未来の制御量の動きを制御対象のモデルに基づいて予測しつつ、

未来のある時刻における内部状態をできるだけ目標値に従った状態に近づけるような制御入力を最適化によって求める制御手法である。以下、制御対象を隊列全体とした場合の制御変数を定式化する。

まず、時刻 t における隊列の全車両の制御状態を以下のように与える。

$$x_t = [x_{1,t}^T, x_{2,t}^T, \dots, x_{N,t}^T]^T \quad (1)$$

$$x_{i,t} = \begin{cases} [D_{i,t}, V_{i,t}]^T, & (i \in I_m), \\ [D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}]^T, & (i \notin I_m). \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $x_{i,t}$ は時刻 t における車両 i の制御状態を表し、 $D_{i,t}$ [m] は車両 i と前方車両との車間距離、 $V_{i,t}$ [m/s] は車両 i と前方車両との相対速度を表す。手動運転車の集合を I_m をすると、 i が I_m に属する場合、車両の制御状態に車両 i の加速度 $y_{i,t}$ [m/s²] が含まれる。 $y_{i,t}$ は前ステップにおけるモデル出力値である。

MPC での予測区間内における各ステップの制御値には、以下の関係が成り立つ。

$$D_{i,t+1} = D_{i,t} + V_{i,t}h, \quad (3)$$

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (A_{i-1,t} - A_{i,t})h. \quad (4)$$

ここで、 h [s] は予測区間内の刻みであり、時刻 t における車両 i の加速度 $A_{i,t}$ は、

$$A_{i,t} = \begin{cases} A_t^{\text{lead}} & (i = 0), \\ u_{i,t} & (i \notin I_m), \\ y_{i,t} & (i \in I_m). \end{cases} \quad (5)$$

である。 K ステップでの予測区間内における後続車両の加速度入力値の最適解を $\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}$ とすると、各ステップにおける入力値は、

$$u_t = [u_{1,t}, u_{2,t}, \dots, u_{N,t}]^T \quad (6)$$

となる。ただし、 $u_{i,t}$ は手動運転車に対しては 0 となる。実際の加速度入力には $\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}$ の現在時刻に対する \hat{u}_0 を用いる。加速度入力値の最適解 $\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}$ は、モデル予測制御 (MPC) によって求める。

3.2 手動運転車の走行モデル

混合型 CACC[2] では、人間の複雑な運転行動を反映した手動運転車の走行モデルを表現する必要がある。最も基本的なシステム同定モデルとして、ARX モデルがある。ARX モデルではパラメータの同定を最小二乗法に基づいて容易に行うことができる。しかしながら、人間の自動車運転行動における複雑な挙動のモデリングには適さない。混合型 CACC では、複数の ARX モデルを確率的重み付けした非線形モデルの PrARX モデル [11] を用いることで、人間の複雑な運転行動を反映している。ARX モデル及び PrARX モデルでは、入力として前方車との車間距離、相対速度、前ステップでのモデル出力を用い、次ステップの

加速度を出力する。

ARX モデルは次のように表される。

$$y_{i,t+1} = f_i^{\text{ARX}}(D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}), \quad (7)$$

$$f_i^{\text{ARX}}(D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}) = \theta_i^T \phi_{i,t}. \quad (8)$$

$\theta_{i,j}$ は車両 i の ARX モデルのパラメータベクトルであり、陳らの研究グループが保有する運転シミュレータを用いた実験を通して得られる運転データから、最急降下法によって推定する [11]。 $\phi_{i,t}$ は回帰ベクトル

$$\phi_{i,t} = [D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}, 1]^T \quad (9)$$

を表す。

PrARX モデルは次のように表される。

$$y_{i,t+1} = f_i^{\text{PrARX}}(D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}), \quad (10)$$

$$f_i^{\text{PrARX}}(D_{i,t}, V_{i,t}, y_{i,t}) = \sum_{j=1}^S P_j(\phi_{i,t}) \theta_{i,j}^T \phi_{i,t}. \quad (11)$$

S は組み合わせる ARX モデルの数、 $\theta_{i,j}$ は車両 i の S 個の ARX モデルに対する j 番目の ARX モデルのパラメータベクトルである。 $P_j(\phi_{i,t})$ は j 番目の ARX モデルが選択される確率を表し、ARX モデル間の回帰空間における分割面を表すパラメータ $\eta_{i,j}$ ($j = 1, 2, \dots, S-1$) を用いた以下のソフトマックス関数によって与えられる。

$$P_j(\phi_{i,t}) = \frac{\exp(\eta_{i,j}^T \phi_{i,t})}{\sum_{j'=1}^S \exp(\eta_{i,j'}^T \phi_{i,t})} \quad (12)$$

3.3 MPC による加速度計算

混合型 CACC では、得られた制御情報から、MPC によって最適な加速度入力値を求める。最適な制御入力値は、コスト関数 $J(\{\hat{u}_k\}_{0:K-1})$ を最小化するような入力系列 $\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}$ を決定する最適制御問題を解くことで求めることができる。コスト関数は以下のように表される。

$$J(\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}) = \sum_{k=0}^{K-1} L(\hat{x}_k, \hat{u}_k) + \Phi(\hat{x}_K), \quad (13)$$

$$\begin{cases} L(\hat{x}_k, \hat{u}_k) = (\hat{x}_k - x^d)^T Q (\hat{x}_k - x^d) + \hat{u}_k^T R \hat{u}_k, \\ \Phi(\hat{x}_K) = (\hat{x}_K - x^d)^T S_f (\hat{x}_K - x^d), \end{cases}$$

$$\text{subject to } \hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k, \hat{u}_k) \forall k \in [0 : K-1].$$

ここで x^d は目標状態を表す。 \hat{x}_k, \hat{u}_k はそれぞれ、予測区間の長さ K ステップのうち、 k ステップ目における制御状態と制御入力である。 S_f, Q, R は各誤差に対する重み行列であり、それぞれは車両 i に対する各々の重み行列 $S_{f,i}, Q_i, R_i$ を要素とする。

$$\begin{cases} S_f = \text{diag}(S_{f,1}, S_{f,2}, \dots, S_{f,N}) \\ Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, \dots, Q_N) \\ R = \text{diag}(R_1, R_2, \dots, R_N) \end{cases} \quad (14)$$

$\{\hat{u}_k\}_{0:K-1}$ は最適制御問題の解であるが、実際の加速度入力には現在の時刻に相当する \hat{u}_0 を用いる。

最適解は、高速解法の C/GMRES 法 [12] によって近似値を求めることで計算する。C/GMRES 法では状態の変化

に対する制約条件を満たす解を継続的に追従することで、より簡単な連立方程式に帰着させ、最適解の近似値を求める。ここでは、共状態 λ_k を用いてハミルトニアンを以下のように定義する。

$$H(\hat{x}_k, \hat{u}_k, \lambda_k) = L(\hat{x}_k, \hat{u}_k) + \lambda_k^T f(\hat{x}_k, \hat{u}_k) \quad (15)$$

このハミルトニアンを用いると式 (13) の制約条件は式 (16) のように変形される。

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = x_t, \quad \lambda_K = \Phi(\hat{x}_K)^T, \\ \hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + f(\hat{x}_k, \hat{u}_k)h, \\ \lambda_k = \lambda_{k+1} + H_x(\hat{x}_k, \hat{u}_k, \lambda_{k+1})^T h, \quad \forall k \in [0 : K-1] \\ H_u(\hat{x}_k, \hat{u}_k, \lambda_{k+1}) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

x_t と適当な初期ベクトル U が決まれば、 \hat{x}_k, λ_k が決まり、式 (16) は $U : F(U, x_t) = 0$ の方程式とみなすことができる。ここで、時刻 $t-1$ における最適解ベクトル U_{t-1} が得られたと仮定すると、この解を用いて時刻 t における近似解 U_t を求めることができる。状態ベクトルの変化量を $\delta x = x_t - x_{t-1}$ とし、入力ベクトルの変化量を δU とすると、上記の F の変化量は、

$$\delta F = F_U \delta U + F_x \delta x. \quad (17)$$

と決まり、ここで F が 0 に収束するようにするため、 $\delta F = -\alpha F, 0 < \alpha < 1$ と置き、 δU は式 (18) より求まる。

$$F_U \delta U = -(\alpha F + F_x \delta x). \quad (18)$$

最後に、 $U_t = U_{t-1} + \delta U$ より、非線形モデルの最適制御問題の近似解が導出される。

4. シミュレーションモデル

本稿では、混合型 CACC の制御アルゴリズムと妨害攻撃モデルをネットワークシミュレータ Scenargie[3] に組み込み、通信妨害が隊列制御へ与える影響を車両挙動を含んだシミュレーションにより調査した。本章ではシミュレーションの概略について述べる。

4.1 モデルパラメータ

4.1.1 ドライバーモデル

本稿では、2つの PrARX モデルを用いたため、式 (11) における手動運転車のモデルパラメータは θ_1, θ_2, η となる。運転シミュレータを用いた実験を通して得られたデータから推定したドライバーモデルのパラメータを表 1 に示す。 θ_1, θ_2 はドライバーの動作に基づくパラメータであり、 η はモデルの選択に基づくパラメータである。パラメータの推定には、最急降下法を用いている [11]。

4.1.2 MPC のパラメータ

式 (13) の MPC のパラメータとして、 $K=20, h=0.1, S_{t,i}=\text{diag}(10000,1000,100), Q_i=\text{diag}(100,10,1), R_i=100, x_i^d=[d;0;0]$ を用いた。ここで、 d はシミュレーションのシナリオごとに設定する目標車間距離である。

表 1 ドライバーモデルのパラメータ

	θ_{j1}	θ_{j2}	θ_{j3}	θ_{j4}
$j = 1$	0.0484	0.0213	0.9688	-0.0291
$j = 2$	-0.0062	0.0278	0.9757	-0.0023
	η_1	η_2	η_3	η_4
	20.7913	-18.2781	1.7072	-12.4316

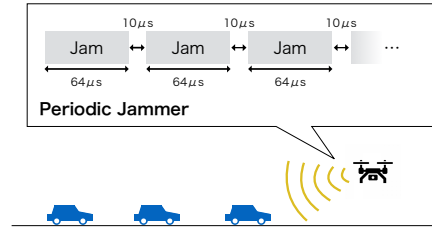


図 2 電波通信妨害モデル

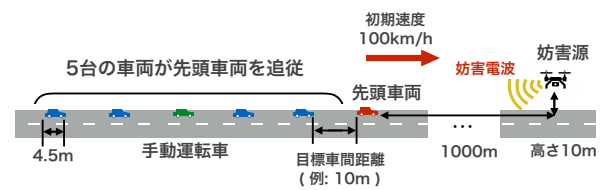


図 3 隊列走行モデル

4.2 電波通信妨害モデル

通信妨害攻撃のモデルには、無指向性アンテナを利用して送信出力 20 dBm の妨害信号を $64 \mu\text{s}$ 出したのち $10 \mu\text{s}$ の待ち時間を設ける Periodic Jammer[6] を用いた。隊列走行では、主に高速道路のような直線道路を想定しているため、妨害源は、図 2 のように妨害源の付近を通過する通信車両をターゲットにして通信を妨害するものとした。

4.3 隊列走行モデル

本シミュレーションでは図 3 のように 1 つの隊列が 1 車線の直線道路上を、先頭車両の初期位置から 1000m 先、10m 上空に配置した妨害源に向かって、初期速度 100 km/h で走行するものとした。車両は 6 台とし、先頭から 4 台目が手動運転車、それ以外が自動運転車、各車両は全長 4.5m、幅 2m とした。隊列内の車両は IEEE802.11p に基づく 5.89 GHz 帯の電波を用いて車車間通信を行う。各後続車両は、自身の制御情報 (位置、速度) を含めたメッセージを 50 Hz の頻度でブロードキャストし、先頭車両は加速度指令メッセージを 10 Hz の頻度でブロードキャストする。その他の本シミュレーションで用いたパラメータを表 2 に示す。

4.4 例外処理

4.4.1 メッセージを受け取れない場合の処理

実環境における無線通信では、通信干渉や妨害攻撃によって、車車間でメッセージが正しく送信/受信できず、隊列内の車両が新しい制御情報を受信できない状態が続く可

表 2 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
送信出力	20 dBm
アンテナ	Omni-directional
変調方式	QPSK R=1/2 (6 Mbit/s)
伝搬モデル	Free Space
フェージングモデル	Nakagami (m = 2)
PHY/MAC プロトコル	IEEE 802.11p/ IEEE 1609.4
周波数	5.89 GHz
パケットサイズ	200 bytes
アクセスカテゴリ	AC_VI
速度下限値	0 m/s
速度上限値	36.0 m/s
加速度下限値	-7.2 m/s ²
加速度上限値	3.2 m/s ²

能性がある。そのような場合においては、車両が自身の保持する制御情報から補間して現在の制御情報を随時予測する場合と、そのまま古い制御情報を使い続ける場合が考えられる。ここでは、新しいメッセージを受け取るまで、現在持っている一番新しいメッセージの制御情報を用いるものとした。

4.4.2 追突が起こった場合の処理

[2] の混合型 CACC では、車両同士が追突を起こした場合の車両の物理挙動が未定義である。ここでは、シミュレーション実行中において、任意の車両とその前方車両の車間距離が 0 を下回ったとき、それを追突とみなし、その後のシミュレーションを停止するものとした。

5. シミュレーション結果

5.1 シミュレーションシナリオ

隊列走行の後続車両は先頭車両の動きに追従するため、先頭車両の挙動を変えた 2 つのシナリオを設定した。

(1) 急停止シナリオ

先頭車両は、初期速度 100 km/h のまま 1000 m 先の妨害源に向かって進行し、妨害源通過直後に加速度 -3.6 m/s^2 で急停止する。目標車間距離 d は 10 m とした。

(2) 加減速シナリオ

先頭車両は、初期速度 100 km/h で妨害源に向かって進行し、最高速度 120 km/h、最低速度 80 km/h とした 16 s 周期の正弦波に従うように加速と減速を繰り返す。目標車間距離 d は、車頭時間 0.5 s における距離に 5 m を加算した距離 $(v[i] * 0.5 + 5) \text{ m}$ とした。

それぞれのシナリオにおいて、シミュレーションは乱数のシード値を変えて 100 回試行した。

5.2 急停止シナリオでの挙動

全ての車両が停止した時点での隣接車両間の車間距離の分布を図 4 に示す。100 回の試行全てで車両の追突は発生しなかった。

妨害がない場合は、車間距離の分布が 9 m から 10 m に

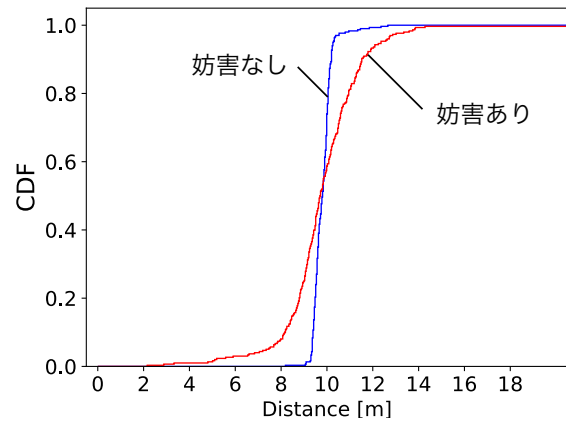


図 4 急停止シナリオにおける全車両停止後の車間距離の累積分布

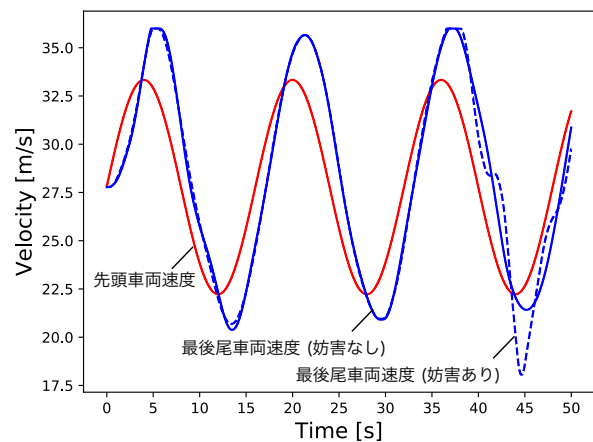


図 5 加減速シナリオでの先頭車両と最後尾車両の車両速度の時系列変化

集中しているが、妨害がある場合はそれが 2 m から 14 m まで広がっている。車間距離が極端に短い隣接車両が存在し、妨害によって追突のリスクが高まっていることが確認できる。妨害電波によって先頭車両がパケットを正常に送れず、後続車両に加速度が反映されるまでの時間が長くなったためだと考えられる。

5.3 加減速シナリオの挙動

先頭車両と最後尾車両の速度の時系列グラフを図 5 に示す。このグラフは、シミュレーションで得られたデータのうち、典型的な 1 回の 0.1 s ごとの車両の速度サンプルを元に得られたものである。100 回の試行全てで車両の追突は発生しなかった。妨害がある場合は、妨害がない場合と比べて妨害源を過ぎた時刻 45 s 付近での速度変動が大きくなっていることが確認できる。

同シナリオにおける、シミュレーション開始後 16 s から 60 s まで、4 s ごとの隣接車両間の車間距離の分布を図 6 に示す。隊列が妨害源に最も接近する時刻 32 s 付近から、妨害がある場合の車間距離の分布が広がり、車間距離にばらつきが生じていることが確認できる。ばらつきが生じるこ

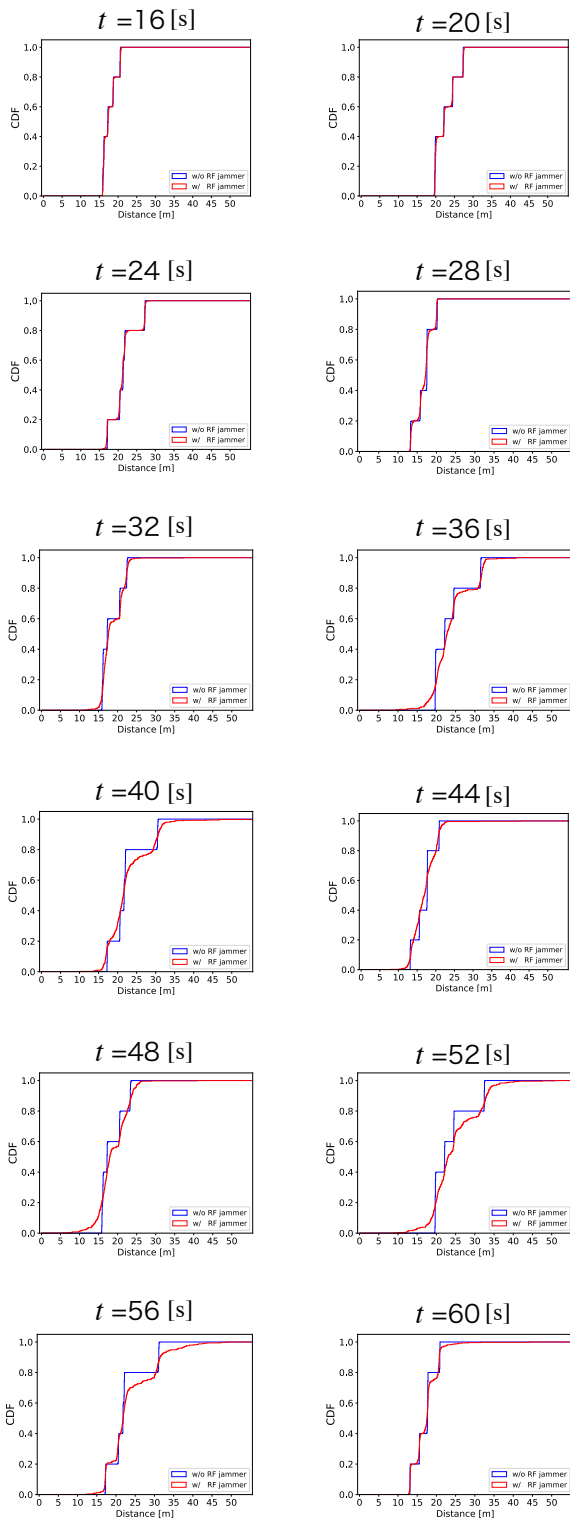


図 6 加減速シナリオでの各時刻における車両間の車間距離の累積分布

とで、特に時刻 36 s, 48 s では車間距離が 10 m を下回る隣接車両が存在し、追突のリスクが高まっていることが確認できる。

同シナリオにおける、各後続車両と先頭車両の距離の時系列変化を図 7 に示す。妨害源に近づく時刻 30 s 付近から距離の変動が大きくなることが確認できる。また、時刻

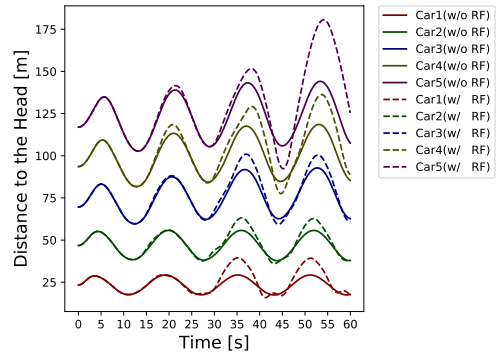


図 7 加減速シナリオでの各後続車両と先頭車両の距離の時系列変化

45 s から 55 s の区間において、隊列の先頭から最後尾車両までの距離を見ると、妨害がない場合は距離の差が 35 m 程度になっているが、妨害がある場合では 90 m 近くになっており、妨害によって隊列の乱れが増大し、安定性が損なわれることがわかる。

加減速シナリオにおける車両速度や車間距離の変動が増大した理由は、先頭車両が妨害源に接近すると隊列内の車両に加速度指令が行き渡らず、直後の数秒間にわたり後続車両が古い制御情報を用いて走行を行っていたためだと考えられる。この対策として、後続車両が新しいメッセージを受信できない場合は、自律的に古い制御情報から現在の制御値の近似値を線形補間によって推定することが挙げられる。

5.4 推定モデルに誤差がある場合

ここまで、MPC に組み込んだ予測モデルと実際の手動運転車の走行が一致することを前提にシミュレーションを行った。しかしながら、実際のシステム利用時では、パラメータによって推定されたモデルは手動運転車の実際の運動行動と必ずしも一致するわけではない。ここでは、モデリング誤差として、表 1 の 12 箇所のパラメータ全てを 5% 及び 10% 大きくし、与えた誤差が隊列制御に与える変化を比較する。ただし、ここでは予測モデルの推定に用いるパラメータに誤差を与えるものとし、手動運転車の挙動は誤差を与える前のパラメータに則る。目標車間距離 d は 20 m とし、その他の条件は加減速シナリオと同じである。

誤差と妨害の有無で 6 通りのシミュレーションを行った、それぞれの場合の各隣接車両の距離を表した時系列グラフを図 8 に示す。まず、妨害がない場合は誤差が 5% だと誤差がない場合と比べて車間距離に僅かな乱れはあるものの、大幅な変動は見られない。しかし、誤差が 10% になると 3 台目より後ろの車両の車間距離に周期的な変動が見られる。妨害がある場合は、隊列が妨害源に接近する時刻 30 s 以降において、車間距離に細かな乱れが発生している。特に、誤差が 10% の場合は乱れの幅が大きく、隊列の安定

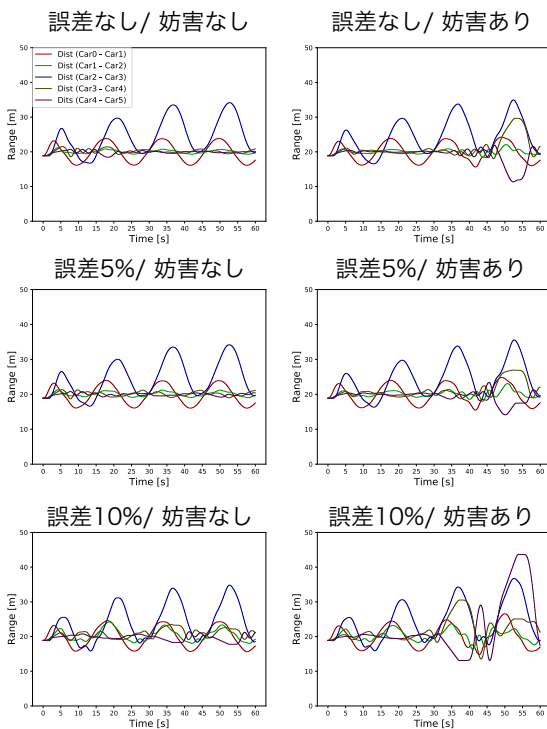


図 8 誤差・妨害の有無における車間距離の時系列変化

性が損なわれていることが確認できる。

6. まとめ

本稿では、車車間通信と同じ周波数帯の電波妨害攻撃が、モデルによって挙動予測される自動運転車を含んだ隊列に与える影響について、先頭車両の挙動を含んだシミュレーションによって調査した。

シミュレーションの結果、妨害による車両の追突は発生しなかったものの、先頭車両が急停止するシナリオでは、目標車間距離 10 m に対し、車間距離が 2 m の隣接車両が発生するなど、車間距離が目標値から外れることで衝突のリスクが高まることを確認し、先頭車両が加減速を繰り返すシナリオでは、一定時間内における隊列先頭から最後尾車両までの距離の変動幅が妨害によって 2 倍以上に膨らみ、隊列の安定性が損なわれることを確認した。

また、モデリングの誤差が大きくなると、隣接車間距離に乱れができ、通信妨害攻撃が加わるとその乱れがさらに大きくなることを確認した。

通信妨害に対する対策として、メッセージが受信できない場合の車両の制御値の線形補間、メッセージ送信頻度の動的制御、電波・可視光併用型通信 [7] の適用等が挙げられる。

今後、より現実的な状況を想定するため、モデリング誤差がある状況で、自動運転車の数を増やしたり、複数の隊列が複数のレーンで走行している場合や、通信妨害攻撃以外の妨害がある場合についても調査する必要がある。また、妨害に強い CACC の実現に向けて、妨害の影響評価

にとどまらず、適切な安全マージンについても検討する必要がある。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金 (17K20027) ならびに公益財団法人立石科学技術振興財団の助成の下で行われたものである。

参考文献

- [1] Van, Arem B., Van, Driel C. and Visser, R.: The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. , no. 4, pp. 429-436, Dec. 2006.
- [2] Chin, H., Okuda, H., Tazaki, Y. and Suzuki, T.: Model Predictive Cooperative Cruise Control in Mixed Traffic, *Industrial Electronics Society, IECON 2015*, pp. 3199-3205, 2015.
- [3] Space Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/jp/> (2018年2月13日確認) .
- [4] Fritz, H., Bonnet, C., Schiemenz, H. and Seeberger, D.: Electronic Tow-Bar Based Platoon Control of Heavy Duty Trucks Using Vehicle-Vehicle Communications: Practical Results of CHAUFFEUR2 Project, *Proc. ITS World Congress*, 2004.
- [5] Shida, M. and Nemoto, Y.: Development of a Small-Distance Vehicle Platooning System, *Proc. ITS World Congress*, 2009.
- [6] Punal, O., Pereira, C., Aguiar, A. and Gross, J.: Experimental Characterization and Modeling of RF Jamming Attacks on VANETs, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 524-540, 2015.
- [7] Ishihara, S., Rabsatt, R., Gerla, M.: Improving Reliability of Platooning Control Messages Using Radio and Visible Light Hybrid Communication, *IEEE Vehicular Networking Conference*, pp. 96-103, 2015.
- [8] 植田雄介, 石原進, 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情報処理学会研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol. 2016-ITS-67, No.17, pp.1-6, 2016.
- [9] Heijden, R., Lukaseder, T., Kargl, F.: Analyzing Attacks on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), *IEEE Vehicular Networking Conference*, pp. 45-52, 2017.
- [10] Milanes, V. and Shladover, S.: Handling Cut-in Vehicles in Strings of Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 20, pp.178-191, 2015.
- [11] Okuda, H., Ikami, N., Suzuki, T., Tazaki, Y. and Takeda, K.: Modeling and Analysis of Driving Behavior based on a Probability Weighted ARX Model, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, pp.98-112, 2012.
- [12] Ohtsuka, T.: A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control, *Automatica*, Vol. 40, pp. 563-574, 2004.