

モデル予測型 CACC における 手動運転車モデルの予測精度と通信障害の影響調査

阪井 耀[†] 加藤 新良太[‡] 陳 ヒョンテ[§] 奥田 裕之[§] 鈴木 達也[§] 石原 進^{*}

[†] 静岡大学工学部 [‡] 静岡大学大学院総合科学技術研究科

[§] 名古屋大学工学研究科 ^{*} 静岡大学学術院工学領域

1 はじめに

インターネットの普及に伴う通信販売の発展によって、物流サービスの需要が急増し、物流業界の人手不足が深刻化している。その解決策の1つに、自動隊列走行の実現がある。特に、無線通信を用いて隊列内の車両間で速度、加速度、車間距離等の情報(以下、制御情報)を共有し、適切な車間距離を維持するシステムを Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) という。CACCの実現により、人手不足解消だけでなく、省人化に伴う物流コスト削減や、空気抵抗や無駄な加減速の抑制による燃費改善等が期待されている。

自動運転車の普及過渡期には、自動運転車と手動運転車の混在が予想される。この場合、自動隊列走行中の車両群へ手動運転車が割り込むことが考えられるため、手動運転車を考慮した CACC の設計が必要である。

手動運転車が混在している状況で、安全に車間距離を維持する手法の1つに、陳らによるモデル予測型 CACC[1]がある。[1]の手法では、隊列中の手動運転車の挙動を PrARX モデル [2] で予測し、Model Predictive Control (MPC) により、後続自動運転車の加速度を計算し、隊列を制御することで安全な車間距離を維持する。

陳らの性能評価では、通信の信頼が完全に保証された場合を想定しているが、通信障害が発生し制御情報が正しく共有されないと、モデルに基づく正確な予測が困難となる。通信障害は車両混雑によっても起こりうるが、意図的な妨害電波の照射によっても起こりうる。また、



図1 モデル予測型 CACC

隊列内の車両が虚偽の情報を先頭車両に送ることで、先頭車両が持つ隊列の制御情報の正確性を損なう攻撃が起こりうる。また、正確な制御情報が与えられたとしても、手動運転車の予測モデルの予測精度が十分でないと隊列の安定性が失われると考えられる。

本稿では、モデル予測型 CACC における通信障害および、虚偽情報送信の影響について検討し、その影響検証のためのシミュレーションモデルの設計を示す。

2 モデル予測型 CACC

図1に、モデル予測型 CACC の概略図を示す。手動ドライバーの運転行動モデルとして、PrARX モデル [2] を用いて手動運転車の運転行動を予測する。次に、その予測を MPC に反映させることで、手動運転車の挙動を考慮しつつ隊列内の自動運転車の加速度を計算している。MPC では、隊列内の全車両のある時刻における前方車両との車間距離と速度から、次のある時刻における車間距離が目標車間距離に最も近づくような加速度を最適化計算で求める。

3 通信障害・虚偽情報の送信が モデル予測型 CACC に及ぼす影響

車両密度が高い場合における無線通信路へのアクセス競合、並びに第三者からの通信妨害攻撃によって通信障害が発生しうる。図2に、通信障害・虚偽情報の送信により、不適切な加速度指令が伝達される様子を示す。通信障害によりパケットロスや過度なパケット送信遅延が

Evaluation of the effect of radio interference and the prediction accuracy of a human driving car in model predictive CACC

Aki SAKAI[†], Arata KATO[‡], Chin HYUNTAI[§], Hiroyuki OKUDA[§], Tatsuya SUZUKI[§], susumu ISHIHARA^{*}

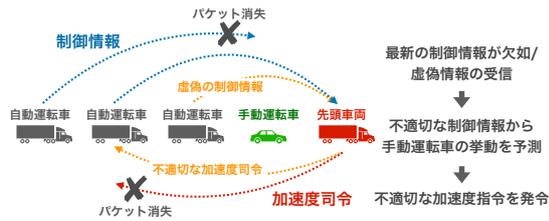


図2 通信障害・虚偽情報の送信による不適切な加速度指令

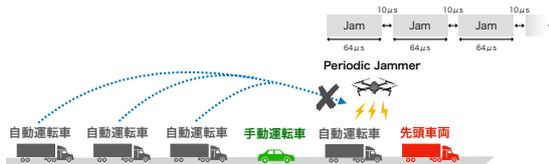


図3 通信妨害シナリオ



図4 虚偽情報送信シナリオ

発生すると、先頭車両は後続車両の最新の状態（位置、速度、加速度）を把握できなくなる。従って、先頭車両は古い制御情報で手動運転車の挙動を予測するしかない。隊列内車両の最新状態は、手動運転車の運転行動予測モデルの入力であるので、これが不正確であると、手動運転車の挙動の予測精度が低下する。また、手動運転車の実際の運転行動と先頭車両が使用する手動運転車のモデルの一致度が低いと、予測精度は更に悪化すると考えられ、衝突事故のリスクが増大する。また、先頭車両からの加速度指令が届かない場合、後続車両は不適切な加速度で走行し続け、隊列が乱れることも予想される。

隊列内の自動運転車が悪意のあるものであった場合、その車両が虚偽の位置情報を先頭車両に報告することで、実際には車両が隊列内のある場所に車両が存在しているように先頭車両に見せることも可能となる。この結果、誤った値を基に加速度が算出され、不適切な加速度指令が後続車両へ伝達される。この結果、隊列が乱れ、衝突事故リスクが増大する。

4 評価モデル

通信妨害攻撃による通信妨害シナリオと、虚偽情報送信シナリオの2つを提案する。直線道路で車両 n 台

からなる隊列を想定する。隊列内の目標車間距離は dm とし、先頭から k 台目に1台の手動運転車がいるとする。後続車両は、自身の制御情報を f_{state} Hz の頻度でブロードキャストする。先頭車両は、後続車両から制御情報を受信・集約し、PrARX モデル [2] で手動運転車の挙動を予測する。その後、MPC で後続自動運転車の最適加速度を計算し、加速度指令を $f_{command}$ Hz の頻度でブロードキャストする。車々間通信方式は、IEEE 802.11p とし、周波数は 5.89 GHz とする。 $n, k, f_{state}, f_{command}$ の値として、それぞれ 6, 3, 50, 10 を想定する。

4.1 通信妨害シナリオ

図3に通信妨害シナリオ概略図を示す。Unmanned Aerial Vehicle (UAV) に搭載された通信妨害源が特定の位置に留まる場合（例えば道路上 10m 上空）、及び隊列上空に居続けるように隊列と共に移動する場合を考える。通信妨害攻撃は、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 $64 \mu\text{sec}$ 出したのち、 $10 \mu\text{sec}$ 待ち時間を設ける Periodic Jammer[3] を使用する。Periodic Jammer は [3] の実験により、高い攻撃効果があることが示されている。

4.2 虚偽情報送信シナリオ

図4に虚偽情報送信による攻撃を想定したシナリオ概略図を示す。隊列外の車両から、あたかも車両が隊列内に存在するとした虚偽の車両状態情報が送信される。この虚偽情報の送信が通信妨害攻撃と並行して行われる場合についても評価する。

5 まとめ

モデル予測型 CACC における通信障害および虚偽の車両状態情報の送信の影響について検討し、その評価のためのシミュレーションモデルを設計した。今後、このモデルをネットワークシミュレータ Scenargie[4] に組み込み、シミュレーション評価を行う予定である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 15H02689 の助成により行われたものである。

参考文献

[1] H. Chin et al., "Model Predictive Cooperative Cruise Control in Mixed Traffic", Industrial Electronics Society, In Proc. of IECON 2015, pp. 3199–3205, 2015.
 [2] H. Okuda et al., "Modeling and Analysis of Driving Behavior Based on a Probability-Weighted ARX Model", IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, pp. 98–112, Vol. 14, No. 1, 2013.
 [3] O. Punalet et al., "Experimental Characterization and Modeling of RF Jamming Attacks on VANETs", IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol. 64, No. 2, pp. 524–540, 2015.
 [4] Space Time Engineering, Scenargie, <https://www.spacetime-eng.com/jp> (2019/1/9 確認) .