

# 車車間通信を用いた自律車両制御則の交差点環境下での検証

○岩瀬諒 小林祐一 石原進 益子岳史 (静岡大学)

## Verification of autonomous vehicle control law using inter-vehicle communication under crossing environment

\*R. Iwase, Y. Kobayashi, S. Ishihara and T. Mashiko (Shizuoka University)

**Abstract**— By using inter-vehicle communication, we aim to improve the amount of vehicular traffic at crossing roads with poor visibility. At crossing roads, the sight of a driver is blocked by walls and buildings, and congestion tends to occur due to deceleration of vehicles to avoid collisions with vehicles moving on the crossing roads when the amount of vehicular traffic is high. To relieve such congestion, we propose a vehicular control strategy which shortens the creeping time by using inter-vehicle communication that allows. Comparison of the traffic with communication with that without communication proved that, traffic flow is improved by using inter-vehicle communication that allows a vehicle to detect other vehicles outside its sight. We also verified the effective communication range and communication frequency to increase the amount of vehicular traffic and the proportion of autonomous vehicles under the environment where autonomous vehicles and non-autonomous vehicles coexist.

**Key Words:** Intelligent Transport Systems (ITS), Inter-vehicle communication, Autonomous cooperative vehicle

### 1 緒言

現在、事故原因の多くが人間の認知や判断の過ちによって発生しているため、人の判断を介さない車両の自動運転には交通事故の軽減が期待できる。2017年に行われた調査では、車両同士の死亡事故の中で、出会い頭による衝突が37%で最多である<sup>1)</sup>。見通しが悪い交差点などにおいて、周囲の障害物を検知できるセンサだけでなく、車車間通信や路車間通信を自動運転に活用することが、事故軽減と交通流の改善に気体できる。車車間通信システム<sup>2)</sup>とは個々の車両が生成する情報を無線通信を用いて共有することである。この車車間通信は、5.8GHz帯の電波を用いたDSRCと呼ばれる狭域無線通信(STD-T75)に加え、回り込みの性質が強い700MHz帯の通信(STD-T109)の使用を日本では推進している<sup>3)</sup>。一方、欧米では5.9GHz帯の電波を用いた通信(IEEE 802.11p)の使用を推進している。本研究では車車間通信の各通信条件が交通流へ与える影響を調べる。

#### 1.1 従来研究

自動運転に関する研究は隊列走行<sup>4)</sup>や車線変更<sup>5)</sup>、駐車<sup>6)</sup>などがある。しかし、これらの研究では車車間通信が考慮されていない。以下は車車間通信を用いた自動運転に関する研究である。

Zhaoら<sup>7)</sup>は交差点環境下で車車間通信を利用することで交通流の改善をした。Zhaoらの設定では交通流は非混在環境下で車車間通信を使用することで改善することができた。ここで、混在環境とは通信機器を搭載した自律協調型車両と非自律車両が混在している環境である。しかし、自動車の自律かの移行期間で現れる混在環境下の交通は扱われていなかった。また、通信の送信出力、各車両へのパケットの送信周期などの通信条件の詳細に触れてはなかった。さらに、自律車両同士の衝突が彼らが提案した制御の枠組みでは完全に回避されていなかった。

通信条件については、車車間通信の性能を評価するために今井ら<sup>8)</sup>は車車間通信の品質を分析した。車両の交通量が多くなると、送信端末が増え、パケットロ

ス率が増加することが分かった。これにより、送信出力・送信頻度などの通信条件によっては通信が混雑し受信に失敗するために、Zhaoらのように車車間通信を使用したとしても交通流が改善されない可能性があると考えられる。

よって本研究では、自動車の自律化の移行期間を考慮して、混在環境下で交通流の改善に有効な自律車両の割合を検証するとともに、通信可能距離や送信間隔の要素を車両制御則に反映させ、交通流を改善しつつ通信路の混雑を緩和可能な通信条件を検証する。

#### 1.2 研究目的

本研究では自律車両の割合や車車間通信の通信条件が交通流に与える影響を評価し、最適な条件をするために、車車間通信に基づくすべての車両が提案した戦略に従うという理想的な環境における衝突回避を保証する自律車両の速度制御戦略を提案する。さらに、自律車両の割合が混在環境下で交通量に与える影響や、車車間通信の通信可能距離や送信間隔が交通量や通信の混雑に与える影響を検証することを目的とする。

### 2 問題設定

交差点環境下で直交車両との衝突回避が可能な車両制御則を提案する。また、車線上の各車両密度 $\rho$ [台/m]における、最適な交通流となる通信条件(通信可能距離 $R$ 、送信間隔 $T$ )を検証する。そこで、交通流の指標として交通流量 $F$ を次式のように定義する。

$$F = \rho \bar{v} = \frac{N\bar{v}}{L} \quad (1)$$

$L$ は走行区間距離、 $N$ は走行区間内の車両総数、 $\bar{v}$ は全車両の平均速度である。つまり、交通流量は任意の道路の断面を1秒間で通過する車両の台数を表している。

#### 2.1 走行環境の条件

現時点では自動運転技術は確立されていないので、公道走行にあたっての条件・ルールなどの安全確保のための制度的な枠組みとして、画一的な安全基準、安全確保策を義務付けることは必ずしも適切ではないと考えられている<sup>9)</sup>。自動運転技術の進展にともなって、現

行の道路交通法を厳密に守らなくても、安全を確保しながら交通流の改善が可能となる可能性はゼロではない。そこで本研究では、交差点手前での徐行義務の制約を課さない状況下で交通流改善に与える影響を検証する。

走行環境は人や障害物を考慮せず、信号や標識が非設置の見通しの悪い交差点を複数含む、一方通行かつ一車線の道路とする。Fig. 1のように道路は交差点で直角に交わり、一方の道路に車両  $i = 1, 2, \dots, N$  が、他方の道路に車両番号  $j = 1, 2, \dots, N$  が順番に走行しているとする。本論文の交差点上流側では、一方の道路に存在する車両から見た他方の道路に存在し、交差点までの距離が最も短い車両を直交車両と呼ぶ。つまり Fig. 1の車両  $i$  からみた直交車両は車両  $j$  となる。以下に走行環境の条件を示す。

- 最高速度 30 km/h
- 交差点間最小距離 50 m

## 2.2 車両の条件

$P(0 \geq P \geq 1)$  の自律車両、 $(1-P)$  の非自律車両で構成された混在環境を想定する。自律車両は、LIDAR<sup>10)</sup> のように  $360^\circ$  の障害物をレーダーで検出可能なセンサを搭載し、前後の車両の位置を取得できるものとする。また、自律車両  $i$  は、GPS による地図情報を併用することにより最も近い交差点の位置  $(x_{\text{cross}}, y_{\text{cross}})$ 、自己位置  $(x_i, y_{\text{cross}})$  を取得できるものとする。車両に関する条件を以下に示す。

- 自律車両のみ車車間通信可能
- 車両の長さ  $l_{\text{car}}$ 、幅  $w_{\text{car}}$  は全車両で統一
- センサの最大検知範囲は 100 m、観測周期は 50 ms
- 走行の制御周期は 50 ms、最大加速度は  $5.88 \text{ m/s}^2$  (最高速度から急停止するのに約 5.1 s 必要)
- 交差点手前では、センサにより直交車両  $j$  の座標  $(x_{\text{cross}}, x_j)$ 、速度  $v_j$ 、加速度  $a_j$  を取得

## 2.3 通信の条件

自律車両が使用する通信は、車車間通信のみとし、路車間通信は行わないものとする。これは設置費用などの観点から、全交差点に通信機器を設置することが困難であると考えられるためである。また交差点での障害物を考慮し、直交車両間の通信可能距離  $R$  は最大 50 m とする。これは IEEE802.11p で用いる電波の直進性が強く、見通しの良い道路では通信可能距離は数 100 m であり、障害物が存在する交差点での通信可能距離は回折を考慮しても数 10 m であることに基づいている。また、通信の最短パケット送信間隔  $T$  は 0.05 s とする。交通流の検証を行う上で以下の簡略化を行う。

- 通信可能距離  $R$  [m]、通信間隔  $T$  [s] は全車両統一
- 車両  $i$  は走行情報 (位置  $x_i$ 、速度  $v_i$ 、加速度  $a_i$ 、前方車両の位置  $x_{i-1}$ 、速度  $v_{i-1}$ 、後方車両の位置  $x_{i+1}$ 、速度  $v_{i+1}$ 、正面の交差点の座標  $(x_{\text{cross}}, y_{\text{cross}})$ 、交差点滞在予想時刻  $t_i^{\text{cross}}$ 、を送信
- パケット 1 つのデータ量は 200 Byte
- 通信可能範囲内で電波の減衰無し
- パケットロス率は 10%
- 車車間通信以外の妨害電波は無し

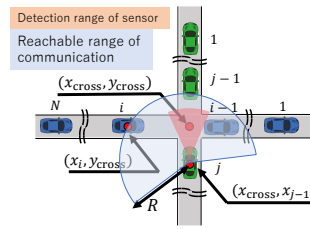


Fig. 1: Arrangement of cars

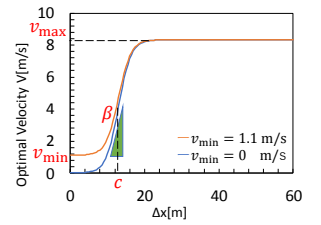


Fig. 2: OV function

- 伝搬・伝送遅延の無視
- 自律車両は走行情報をブロードキャスト

送信するデータ量を概算する。通信する走行情報は前述のように 10 項目あり、すべての double 型がとすると、80Byte となる。さらに、パケットのヘッダ部を考慮して 1 つのパケットのデータ量を 200Byte とする。パケットロス率は本来、このデータ量・車両密度 (送信端末数) の増加や送信出力 (受信出力) の低下などにより増加する。しかし、今回はそれらに関わらず平均 10% で発生するものとする。IEEE802.11p ではパケットの伝送速度は 6 Mbps であり、今回想定するパケット 1 つのデータ量 200 Byte なので、1 パケットあたりの伝送時間  $\tau = 50 \mu\text{s}$  となる。これは最小制御周期やパケット送信周期より大きく下回るので無視できるものとする。

通信方式は CSMA/CA 方式<sup>11)</sup> によるブロードキャスト型とする。1 秒間当たりの受信可能な全ての端末からのパケットが転送に使われている時間の割合をスループット率と言い、以下の式で表される。

$$S = f \tau \rho A \quad (2)$$

ここで、 $f$  [1/s] は送信頻度であり送信間隔  $T$  [s] の逆数、 $\tau$  [s] は 1 パケットあたりの伝送時間、 $\rho$  [台/m<sup>2</sup>] は車両密度、 $A$  [m<sup>2</sup>] は受信可能な端末の範囲である。この方式では再送処理を考慮すると最大スループット率  $S$  は 0.6 以下になると言われている。しかし、本条件では最大でも 0.1 程度であり、CSMA/CA 方式を適用しても問題ないことが分かる。

## 3 自律協調型車両に用いる車両制御則

見通しの悪い交差点では、センサの視界は道路の壁 (障害物) によって遮られ、直交車両との衝突回避のための徐行により交通流量が低下する。そこで本手法では車車間通信を使用し、センサによる直交車両の検知だけでなく、車車間通信から得られる直交車両の走行情報も用い、徐行時間を短縮させる車両制御則を提案する。交差点で直交する車両を車車間通信やセンサなどで検知し、衝突回避動作をする。

### 3.1 最適速度モデル

最適速度モデル (OVmodel) とは、各車両が前方車両間距離によって決定する最適速度に速度を調整して走行する交通流モデルである。本研究では、車両の制御則として用い、以下の式で表される。

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = A(V(\Delta x_i) - v_i(t)) \quad (3)$$

ここで、 $v_i(t)$  は時刻  $t$  [s] における車両  $i$  の速度 [m/s] で、 $A$  は感応度と呼ばれ、人間の反射速度や車両の反

応速度に相当する速度調整の時間スケールを表すパラメータ [1/s] である。  $V(\Delta x_i)$  は最適速度関数で、以下の式で表される。

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{\max}}{1 + \tanh(\beta c)} (\tanh(\beta(\Delta x_i - c)) + \tanh(\beta c)) \quad (4)$$

ここで  $\Delta x_i$  は車両  $i$  と前方車両との車間距離 [m] で、  $v_{\max}$  は車両の最高速度 [m/s]、  $\beta$ 、  $c$  はそれぞれ  $V(\Delta x_i)$  の変曲点付近の傾き [1/m]、 変曲点の位置 [m] である。 変曲点の位置  $c$  [m] が低いほど短い車間距離で最高速度に達しやすい。

### 3.2 交差点に対応した最適速度モデルによる車両制御則

OV model では、直交車両との衝突回避を考慮していないため、直交車両との衝突回避動作を考慮した以下の車両制御則 (Fig. 3) を提案する。 Condition1, 2, 3 に応じ、 Mode1, 2, 3 の行動を選択し車両に加速度を指令する。

**Condition1** 直交車両を3種類の方法で検知する。

- (1) 直交車両から車車間通信によって走行情報を直接受信する。
- (2) Fig. 4 に示す例のように車両  $j$  の直交車両  $i$  が非自律車両や通信可能範囲外でも、その前方車両  $i-1$  がセンサで車両  $i$  の走行情報を取得しており、車両  $i-1$  から車両  $i$  の走行情報を受信する。
- (3) 自己車両のセンサ (人の視覚) の検知範囲内に直交車両が存在する。

(1), (2) で検知した場合 Condition2 へ、(3) で検知した場合 Condition3 移行する。 検知されなかった場合 Mode3 へ移行する。

**Condition2** 検知した直交車両と衝突する可能性があるか判定する。 自車両の軌道を予測し、交差点滞在予想時刻を計算し、受信した直交車両の滞在時刻と比較する。 滞在時間が重複した場合は衝突の可能性が存在するため Condition3 へ、重複してなかった場合は Mode1 へ移行する。 軌道と交差点滞在時刻の予測方法については本章で後述べる。

**Condition3** 交差点を先に通過する車両を決定する。 直交車両より交差点までの距離が短い場合は Mode1 へ、遅い場合は Mode2 へ移行する。

**Mode1** 衝突する可能性が無いため、直交車両に関わらず、前方車両に追従する。

**Mode2** 直交車両が先に交差点を通過するまで交差点手前で停止する。

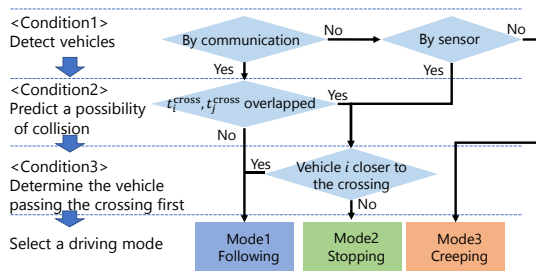


Fig. 3: Fslowchart

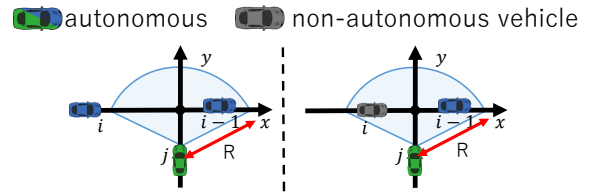


Fig. 4: Mixed traffic

**Mode3** 直交車両がないことが確定せず、衝突する可能性があるため徐行する。

Condition2 における交差点に滞在する時刻  $t_i^{\text{cross}}$  の計算手法を以下に示す。 車両の軌道の予測は OVmodel で制御している限り、前方車両の位置や速度により指令値が決まるので、一意に予測できない。 そこで本手法では、交差点滞在時刻  $t_i^{\text{cross}}$  は、最速時に交差点に進入する時刻  $t_i^{\text{fast-in}}$  から、最遅時に交差点から退出する時刻  $t_i^{\text{slow-out}}$  の間とする。

$$t_i^{\text{cross}} \in [t_i^{\text{fast-in}}, t_i^{\text{slow-out}}], t_j^{\text{cross}} \in [t_j^{\text{fast-in}}, t_j^{\text{slow-out}}] \quad (5)$$

$t_i^{\text{fast-in}}$ 、  $t_i^{\text{slow-out}}$  は最大加速度  $a_{\max}$  と最小加速度  $a_{\min} = -a_{\max}$ 、 OVmodel に基づいて予測した最速・最遅時の車両の軌道より求める。 ここで、時刻  $t$  [s] 時に車車間通信で取得できた車両  $i$  の加速度  $a_i(t)$ 、速度  $v_i(t)$ 、座標  $x_i(t)$ 、前方車両  $i-1$  までの距離  $\Delta x_i(t)$ 、相対速度  $\Delta v_i(t)$  を取得した場合、車両の軌道の予測は以下の手順で行う。

- (a) 離散時間  $dt$  [s] 後の車両  $i$  の加速度  $a_i(t+dt)$  を車車間通信で取得した  $\Delta x_i(t)$ 、  $v_i(t)$  を式 (3)、式 (4) に代入することで求める。
- (b) 車間距離  $\Delta x_i(t+dt)$  には車両  $i$  の  $dt$  [s] 後の位置  $x_i(t+dt)$  と車両  $i-1$  の  $dt$  [s] 後の位置  $x_{i-1}(t+dt)$  を考慮する必要がある。 式 (3) をテイラー展開し、  $x_i(t+dt)$  を求める。

$$x_i(t+dt) = x_i(t) + v_i(t)dt + \frac{1}{2}a_i(t)dt^2 \quad (6)$$

- (c) 車両  $i-1$  は最大の加速度  $a_{\max}$  で等加速度運動すると仮定し、  $dt$  [s] 後の前方車両の位置  $x_{i-1}(t+dt)$  を予測する。

$$x_{i-1}(t+dt) = (x_i(t) + \Delta x_i(t)) + (v_i(t) + \Delta v_i(t))dt + \frac{1}{2}a_{\max}(t)dt^2 \quad (7)$$

- (d) 時刻  $t+dt$  [s] 時の車間距離  $\Delta x_i(t+dt)$  を式 (6)、式 (7) より予測する。

$$\Delta x_i(t+dt) = x_{i-1}(t+dt) - x_i(t+dt) \quad (8)$$

- (e) 式 (8) と式 (6) を式 (3) に代入することで、  $2dt$  [s] 後の車両  $i$  の加速度  $a_i(t+2dt)$  を予測する。
- (f) (b) から (e) の計算手順を繰り返すことで最速時の車両  $i$  の軌道を予測する。
- (g) 手順 (c) で車両  $i-1$  は最小の加速度  $a_{\min} = -a_{\max}$  で等加速度運動すると仮定し、同様に (b) から (e) の計算手順を繰り返すことで Fig. 5 のように、最速時と最遅時の車両の軌道を予測する。

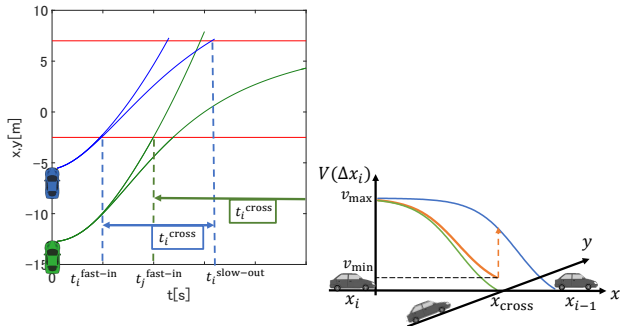


Fig. 5: Predicting trajectories Fig. 6: Avoiding action

Mode1~3における衝突回避動作は、最適速度式(4)の車間距離  $\Delta x_i$  や最低速度  $v_{\min}$  を調整することで、前方追従や停止、徐行を可能にする。Fig. 6は、縦軸が車両  $i$  の最適速度  $V(\Delta x_i)$  であり、それぞれ青の曲線は前方追従時、緑の曲線は交差点手前で停止時、橙の曲線は徐行時のものである。以下にそれぞれの Mode 時の車間距離  $\Delta x_i$  や最低速度  $v_{\min}$  を示す。

$$\Delta x_i = \begin{cases} x_{i-1} - x_i & \text{Mode1} \\ x_{\text{cross}} - x_i - l_{\text{car}}/2 & \text{Mode2,3} \end{cases} \quad (9)$$

$$v_{\min} = \begin{cases} 0 & \text{km/h Mode1,2} \\ 4 & \text{km/h Mode3} \end{cases} \quad (10)$$

Mode2における停止動作は交差点入口に前方車両が停止していると仮定して、OVmodelにより加速度を調整し減速する。また、Mode3において車間距離が0mのときの速度  $v_{\min}$  は、車両の交差点進入時の速度と等価となる。 $v_{\min}$  に徐行速度4 km/hを代入することで、車両  $i$  は交差点を徐行速度で通過可能になる。

## 4 実験

本研究では以下の実験を行った。

- 1 交通流の改善に有効な自律車両の割合  $P$  の検証
- 2 交通流を改善しつつ通信の混雑を緩和可能な通信条件 (通信可能距離  $R$ , 送信間隔  $T$ ) の検証

シミュレータ内で交通流量を計測した。考慮した通信可能距離  $R$  は0~50mで刻み幅1m, 送信間隔  $T$  は0.05~0.5sで刻み幅0.05s, 自律車両の割合  $P$  は0~100%で刻み幅20%とした。

### 4.1 実験条件

実験条件を以下に示す。

- Figure. 7のように、交差する4本の道路に3つの交差点を設置
- 道路はオープン境界で幅は6m
- 車両が流入する確率はポアソン分布  $P(\lambda)$  に従い、1秒間に平均  $\lambda = 1$  [台/s] 流入
- 前方の車両が干渉するために流入出来ない場合は、流入時刻を順延
- 長さ  $l_{\text{car}} = 4.5\text{m}$ , 幅  $w_{\text{car}} = 2.0\text{m}$  の車両が各道路で200台走行
- センサ, 通信機器は車両の中心に設置

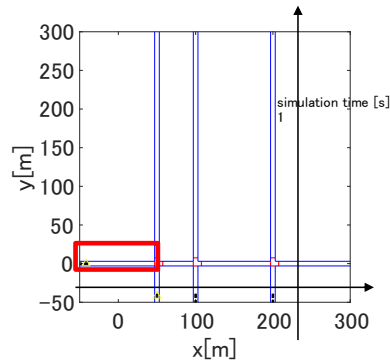


Fig. 7: Arrangement of crossings

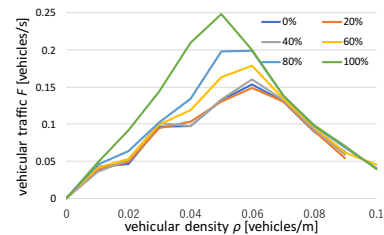


Fig. 8: Traffic flow at proportion of autonomous vehicles

- 最高速度は  $v_{\max} = 30\text{km/h}$ , 徐行速度は  $v_{\min} = 4\text{km/h}$ , 最大加速度は  $a_{\max} = 5.88\text{m/s}^2$
- 観測・制御周期およびシミュレーション更新周期はともに0.05s
- 最適速度関数のパラメータ  $A = 0.7\text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 0.1\text{m}^{-1}$ ,  $c = 13\text{m}$

本実験で交通流量を測定するのはFig. 7における複数の交差点を有する車線である横方向の車両のみとする。さらに、図中の赤枠のように1番最初に交差点を通過するまでの車両のみを測定対象とする。提案した制御則は交差点手前での徐行時間を短縮するためであるため、交差点を超えた範囲では車車間通信による交通流の改善が乏しいと考えられるためである。また、1つ目の交差点手前にしか注目しないのは、交差点付近の交通容量が直線区間のと比べ低くボトルネックになっているため、その後の交通容量も絞られたままで他の交差点手前で渋滞が起きにくくなっており、車車間通信による交通流の改善が乏しいと考えられるためである。

### 4.2 実験結果

本実験の結果と考察を以下に示す。また、今回の条件ではシミュレータ内で車両の衝突は無く、提案する車両制御則が見通しの悪い交差点での衝突回避を実現していることが確認された。

**実験1の結果・考察** Fig. 8は横軸が車両密度  $\rho$  [台/m], 縦軸が交通流量  $F$  [台/s] である。通信可能距離  $R = 50\text{m}$ , 送信間隔  $T = 0.05\text{s}$ , パケットロス率10%で自律車両のそれぞれ割合  $P$  における車両密度と交通流量の関係を表している。非通信時と等価である自律車両の割合0%と100%のときを比較すると、交通流量は最大2倍向上しており、車車間通信の使用は交通流の改善に有効であることが分かった。また、車両密度  $\rho = 0.05 \sim 0.06$  [台/m] で交通流量が最大値をとり、それ以降の車両密度では交通流量は低下した。前半の区間は自由相、

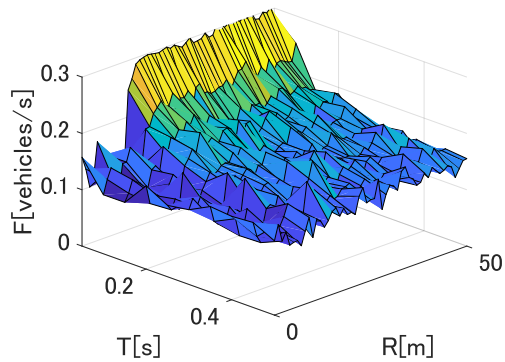


Fig. 9: Traffic flow at each communication condition

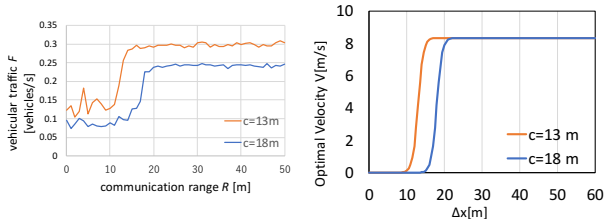


Fig. 10: Traffic flow at each communication range

Fig. 11: OV function

後半の区間は渋滞相であると考えられ、典型的な交通流量の結果が得られた。ここで、自律車両の割合が高く、車車間通信を頻繁に使用したとしても、渋滞相のときは自由相のときに比べ交通流の改善が得られにくいことが分かった。さらに、自律車両の割合が約40%以下は非通信時との交通流量の差が隠微であり、車両の自動化における過渡期では交通流の改善は乏しいと考えられる。

これらの結果より、車車間通信を用いることは交通流の改善に有効であるが、自律車両の割合が約40%以下では効果が薄く、通信の無駄な混雑を招くことが考えられる。

**実験2の結果・考察** 実験2の結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す。Fig. 9の横軸は車車間通信の送信の隔間  $T$  [s]、奥行軸は通信可能距離  $R$  [m]、縦軸は交通流量  $F$  [台/s] であり、車両密度  $\rho = 0.05$  [台/s]、自律車両の割合100%時の各通信条件に対する交通流量を表している。通信間隔が狭いほど交通流量は上昇することが分かった。本実験では通信間隔の上限をセンサーの制御周期に合わせて0.05sとしていたが、通信間隔が0sに近いほど交通流はさらに改善されると考えられる。また通信可能距離も同様に広いほど交通流量が上昇すると予想したが、範囲が約17m以上の交通流量の増加率は低かった。

Fig. 10の横軸は車車間通信の通信可能距離  $R$  [m] であり、縦軸は交通流量である。車両密度  $\rho = 0.05$  [台/s]、自律車両の割合100%、送信間隔  $T = 0.05$  s であり、Fig. 9を奥の断面で切った図である。さらに本実験の最適速度関数の変曲点のパラメータ  $c$  を2種類にした場合の交通流量を計測した。 $c = 13$  m は本実験で行ってきたパラメータであり、 $c = 18$  m は今回新しく測定したものである。また、Fig. 11は、その2つの変曲点の場合の最適速度関数である。これら2つの図を比較すると似た傾向を有していることが分かる。 $c = 13$  m のように変曲点が小さく、交差点までの距離が約17mよ

り近づかないと減速しない運転をしている場合、過剰な通信可能範囲(約17m以上)の車車間通信に早めに直交車両を検知しても不必要な情報であり、制御には活かせず、交通流量が一定となったと考えられる。これは  $c = 18$  m のときを見ても同じ結果であることから一般論だと考えられる。

他の車両が通信可能距離を拡大するほどCSMA/CA方式では、他の端末からのパケットを受信してしまい、通信が混雑し、パケットロス率が高まる。したがって今回の設定では、交差点で停止するために減速を始めるときの交差点までの距離は、交通流の改善をしつつ通信の混雑の緩和が可能な観点から有効な通信可能距離と等価だと考えられる。

## 5 結言

本研究では車車間通信を用いた自律車両の制御則を提案し、見通しの悪い交差点環境下で車車間通信の有効性を検証した。シミュレーションで提案手法を検証した結果、提案した制御則の有効性を確認でき、車車間通信を用いることで交通流量が向上したため、交通流改善の観点から車車間通信の必要性を確認できた。また交通流改善に有効な自律車両の割合や通信の混雑の緩和に有効な通信条件についても議論した。

本研究では、全ての車両が同じ制御則で走行すると仮定していた。しかし、実際には人の運転には個人差がある。また、自律車両の制御則を人に合わせる必要はないと考えられる。よって、今後の課題としては、より現実に近い状況で車車間通信の有効性を検証する必要がある。

**謝辞** 本研究はJSPS 科研費15H02689の助成を受けた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) <https://www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/toukei.htm>
- 2) 松本, 伊藤, 石原; “車車間通信による近接車間協調動作とセルラネットワークを用いた低サーバ負荷車載カメラ画像提供手法,” 情報処理学会論文誌, 56 (2017), pp. 2106-2116
- 3) <http://www.jsae.or.jp/01info/its/>
- 4) A. Alam, B. Besselink, V. Turri, J. Martensson and K. H. Johansson; “Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency,” IEEE Control Systems, 35 (2015), pp. 34-56
- 5) Y. Naito, T. Nagatani; “Safety collision transition induced by lane changing in traffic flow,” Physics Letters A, 375 (2011), pp. 1319-1322
- 6) J. M. Kim and K. I. Lim and J. H. Kim; “Auto parking path planning system using modified reeds-shepp curve algorithm,” 2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), (2014), pp. 311-315
- 7) J. Zhao, P. Li; “An extended car-following model with consideration of vehicle to vehicle communication of two conflicting streams,” Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 478 (2017), pp. 178-187
- 8) 今井, et al.; “車車間通信サービスにおけるCSMA/CA通信品質の解析,” 情報学会論文誌, 51 (2010), pp. 914-929
- 9) <https://www.kantei.go.jp/>
- 10) <https://www.argocorp.com/cam/special/Velodyne/HDL-64e.html>
- 11) <https://www.infraexpert.com/study/wireless6.html>