

# 自動運転車両の普及過渡期における非優先道路から優先道路への進入待機時間の削減手法

古川 義人<sup>1</sup> 清原 良三<sup>2,a)</sup>

受付日 2018年12月24日, 採録日 2019年7月3日

**概要:** 自動運転車両の普及過渡期では、手動運転車両に対する影響を考慮しなければ、自動運転普及に期待する様々な効果が十分に発揮できない可能性がある。また、自動運転車両ではあっても最終責任者としてドライバーがいて、いつでも手動運転に切り替えられる状況では、人間の感覚と、自動運転車両の感覚とのギャップにより、想定外のブレーキ操作などがおき、交通流が逆に悪化する場合も想定できる。本論文では、交通シミュレータ上に、自動運転車両と手動運転車両の車両モデルを実装し、自動運転らしい行動のおきやすい無信号の交差点を対象とし、普及の度合いに応じた交通流への影響を調べた結果、若干悪化する可能性があることが分かった。そこで路車間通信機能を利用した車間調節機能を含んだ交差点進入のためのプロトコルを提案し、シミュレーションにより評価し、非優先道路から優先道路への進入待機時間の削減効果が得られることを確認した。

**キーワード:** 自動運転, 混在環境, V2X 通信, 調停, 無信号交差点

## A Method for Reducing Waiting Time from non-Prioritized Road to Prioritized Road in the Transient Stage of Autonomous Vehicles

HIROTO FURUKAWA<sup>1</sup> RYOZO KIYOHARA<sup>2,a)</sup>

Received: December 24, 2018, Accepted: July 3, 2019

**Abstract:** It is necessary to consider about the influence of the autonomous vehicles (AVs) on human-operated vehicles (HOVs) in the transient stage of the AV. In this research, we implemented the AVs and the HOVs on the simulator as a mixed environment. We assumed the intersection without traffic light for simulation. As a result, we confirmed that the waiting time decreases as the ratio of AVs increased and we also confirmed that the safety is worsened when the vehicle enter the intersection. Therefore, we targeted the improving both of safety and efficiency, we proposed the communication protocol with road device and the method of adjusting the inter-vehicle distance for safety. As a result of evaluation of this method, we obtained the effect of improving both safety and efficiency of reducing waiting time from non-prioritized road to prioritized road in the transient stage of AVs.

**Keywords:** autonomous vehicle, mixed environment, V2X communication, negotiation, intersection with no traffic signals

### 1. はじめに

より快適で安全な道路交通の実現を目的として、高度交通

システム (ITS: Intelligent Transport System) に関する研究開発がさかんに進められている [1]。また最近では、自動運転車両の投入を想定した ITS を中心に研究開発がさかんである [2]。中でも、安全性や輸送効率性の改善は特に重要であり、具体的には事故の削減や交通渋滞の改善があげられる。

しかしながら、自動運転車両の普及過渡期では、手動運転車両との混在環境が生じる。米国運輸省道路交通安全局 (NHTSA: National Highway Traffic Safety Adminis-

<sup>1</sup> 神奈川工科大学大学院  
Graduate School of Kanagawa Institute of Technology,  
Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

<sup>2</sup> 神奈川工科大学  
Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

a) kiyohara@ic.kanagawa-it.ac.jp

表 1 自動運転のレベル

Table 1 Levels in autonomous vehicles.

レベル	概要	操作主体
レベル 0 手動運転	運転者がすべてのタスクを実施	人間
レベル 1 運転支援	前後・左右いずれかの車両制御のサブタスクをシステムが実施	人間
レベル 2 部分運転自動	前後・左右両方の車両制御のサブタスクをシステムが実施	人間
レベル 3 条件付き自動運転	一部限られた場所でシステムがすべての運転タスクを実施。緊急時は人間が介入	システム 人間
レベル 4 高度自動運転	一部限られた場所でシステムがすべての運転タスクを実施。緊急時の人間介入なし	システム
レベル 5 完全自動運転	システムがすべての運転タスクを実施。人間の操作は一切なし	システム

tration) によって定められた自動運転車両のレベルを表 1 に示す [3]。レベル 3, 4 や緊急時にはドライバーが手動で運転することを考えると、自動運転車両とドライバーの感じ方のギャップからドライバーの操作がどのようになるか不明な点も多い。そのため単に自動運転車両の普及後を想定するだけでなく、混在環境下において自動運転車両が手動運転車両に与える影響を考慮した、自動運転車両の動作を考える必要がある。

本論文では、交通流悪化の原因の 1 つである交差点での進入場面に注目した。交差点への進入場面において、非優先道路の車両が優先道路へ進入する場合、進入地点と交差点へ接近してくる優先車両との間に十分な距離があるタイミングを見計らって進入する必要がある。そのため、進入を待機する車両はいつまで経っても進入できないことがある。加えてこのときの進入可能と判断する距離（以下進入判断距離）はドライバーによって異なり、事故の原因ともなりうる。また、自動運転車両が普及し、安全かつ必要最低限な進入判断距離を計算できたとしても、自動運転車両に乗車するドライバーがその進入判断距離と異なる距離を要求した場合、その進入判断距離が許容されないことが考えられる。よって交差点への進入は自動運転車両であっても難しい課題である。こうした道路において有効な手段として信号機が考えられるが、信号機は優先道路の車両を一時停止させてしまうため優先車両の目的地までの旅行時間に遅延を与えてしまう。そこで本論文では、まず自動運転車両が普及したときに、事故を生じない範囲で必要最低限の進入判断距離を計算できた場合、上記のような進入の課題を解決できるかを事前実験によって確認する。また、人間が危険と感じる必要最低限の進入判断距離を設定した場合、現実的に人間のドライバーが許容できないことを想定して、進入判断距離を短くせずに交差点へ進入する方法を提案する。

以降、本論文では、2 章において、関連する研究を紹介し、本論文の位置づけを明確化する。3 章では、前記シミュレーションの詳細を説明し、その結果を基礎実験結果として示す。交通流の評価には、交差点に接続される道路の種

類ごとに異なるものを想定する。交差点への進入が困難な非優先道路を走行する車両に対しては交差点への進入を待機する待機時間、次に進入を許容する立場にある優先道路を走行する車両には目的地までの旅行時間を使用する。安全性に関しては、前方車両との車間距離を自車の現在速度で進行した場合、前方車両へ衝突するまでの時間を示した安全評価指標の 1 つである TTC (Time To Collision) [4] を使用する。実験では、交差点への進入時において、進入する車両と進入される車両との TTC を計測する。

4 章では、3 章の評価に基づき、改良するための手法の提案として、路車間のプロトコルを提案する。5 章では、提案手法の結果を示したうえで評価、考察を行い有効性を示し、6 章でまとめる。

## 2. 関連研究

交通流の改善手法として、V2V (Vehicle-to-Vehicle) や V2I (Vehicle-to-Infrastructure) による、車両間、車両と道路間での情報共有方法が着目されている。車両間の通信によって人間のドライバーは自車や周辺車両の運転情報を取得可能になるため、従来より安全で確実な通行が実現できると期待されている。

Kurt らは、自動運転車両が普及した際の最適な交通流を実現するために、交差点に対して通行予約を行う手法を提案している [5]。通行予約は対象の交差点内を  $n \times n$  のブロックに仕切り、通行する軌跡と時間からブロックを占有することを予約する方法である。また、手動運転車両との混在環境では、信号機が通行を許可する方向に向かう車両が存在しないことを確認できた場合のみ、自動運転車両が、赤信号の点灯時でも交差点への進入予約ができる規則を提案し、シミュレーションを行っている。実験の結果、提案手法はすべての車両が自動運転車両である場合は、交差点での遅延時間を削減できることを報告している。また、手動運転車両が 1% 以上混在した場合には大きな改善はないが、現在の交通流よりは遅延時間が少ないことを報告している。

Lee らは、交差点で衝突することなく通行するために、各車両の進行予測軌跡を計算し、衝突のない通行軌跡を案内する手法を提案している [6]。この実験では、提案手法によって、交差点での待機時間、総旅行時間およびスループットの削減に成功している。ただし、すべての車両が通信可能な車両であり、想定するすべての通信はパケットロスや通信の遅延がないものとしている。また、速度の案内は車両の減速によって制御するものであり、減速車両の後続車に対する影響を考慮していない。

上記の研究では交差点への進入時に交差点をブロックや進入軌跡として進入タイミングを時間的に予約する手法であった。予約による手法は、失敗したときの修復方法が複雑化する。そこで提案手法は予約方式をとらず、進入が失敗したときは通常どおりの走行に戻るよう設計した。こ

れにより成功したときのみ有意差が得られるが、失敗したときに通常の走行時よりも悪化しない方法とした。

Lin らは交差点手前を速度調節のバッファとし、交差点の通過のための速度案内による交通流改善手法を提案している [7]。提案手法は通信可能な車両にのみ適応され交差点に進入できる車両はつねに案内速度に従うものとしているため、ドライバは車両の挙動に対してつねに信頼していることが前提である。この研究では提案された案内速度をドライバが必ず許容することで成立している。こうした手法は自動運転車両のレベルが高く乗車するドライバに運転の責任がともなわない場合には有効である。しかし、初期段階の自動運転車両は運転の責任はドライバにあるため、すべてのドライバが、提案速度および交差点への進入予約を許容するのは難しい。本提案手法は交差点への進入時にドライバが求める進入判断距離に依存しないため、自動運転車両のレベルに依存しない手法である。

米国では、交差点で信号機が案内する青信号の進行方向に車両が存在しない場合は、右折に限っては赤信号点灯時であっても交差点を通過してよいという規則がある。Sharon らは、右折に限らずに、これに通信機能を利用して、安全性を確保できる経路を確保できた場合はたとえ進入が不可能な左折方向の道路であっても交差点へ進入できるように規則を拡張する手法を提案している [8]。この手法では、通信できない車両が道路に存在していた場合は、通常どおりの規則に基づいた交通流になるため、通信が可能な車両が存在した場合にのみ提案手法が適応できる。しかしこの提案手法は信号機が設置されていた場合の規則の拡張方法であるため、もともと信号機が設置されていない道路の場合には適用することができない。

### 3. 事前実験

筆者らはこれまで、交差点へ安全性を考慮しつつ進入を促すための手法を提案してきた [9], [10], [11], [12]。しかし、ネットワークの通信時間を考慮せず、通信が 100% 成功するモデル [9] であったり、追従モデルが現実的でないモデル [10], [11] であったり、交差点への進入判断が現実的でないモデル [12] であったりした。そこで、本論文では、これらの現実的でなかった部分をすべて現実的なモデルで実験検証を行う。

自動運転車両と手動運転車両の車両モデルをネットワークシミュレーションと交通シミュレーションを同時に実行できる Scenargie [13] 上に実装し、混在環境で自動運転車両が手動運転車両に与える影響について調べる。特に、事前実験では、自動運転車両が交差点進入時に手動運転車両に与える影響を確認する。

#### 3.1 道路モデル

実験で使用する道路モデルを図 1 に示す。実験では信

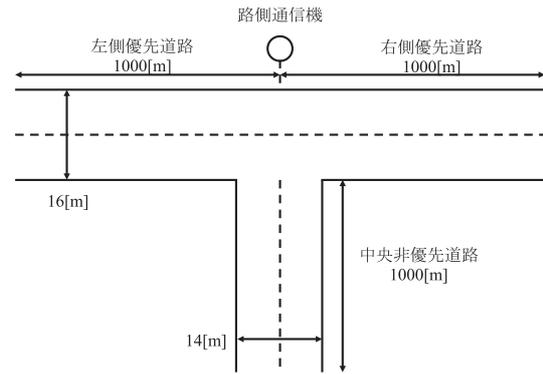


図 1 道路モデル

Fig. 1 Roadmodel.

表 2 事前実験のシミュレーション設定

Table 2 Setting of pre-simulation.

プロパティ名	値
シミュレーション時間	3,600 [秒]
車両総台数	300 [台]
制限速度	40 [km/h]
出発地・目的地	自動運転車両のみ非優先道路から出発可能. 目的地はランダム
備考	歩行者は考慮しない

号機の設置されていない丁字路の交差点を想定する。信号機が設置されている交差点では、規則上自動車のドライバは交差点への進入判断を信号機に任せるが、信号機のない道路では、交差点へ進入する車両と、侵入先の道路を走行する車両のドライバ同士での判断が必要となり、多くの事故や交通流の悪化は、進入判断のミスやそれともなうブレーキの影響によると考えられる。つまり信号機が設置されていない交差点は、自動運転車両が普及した場合においても特に通行の難しい道路であり、混在環境下においても課題となる可能性が高い。そのため、実験では信号機を設置していない道路を対象とする。このモデルでは横方向に優先道路があり、縦方向に非優先道路を設置している。道路の長さは、実験の考察のため十分に渋滞できる距離として 1,000 [m] とした。また道路の幅は、提案手法が片側 2 車線以上の広い交差点でも適用できることを確認するために、大きい交差点を想定した幅を設定した。車車間・路車間通信を想定して、交差点中央に路側器を設置している。自動運転車両のみが非優先道路を出発地点として交差点を右左折にランダムに進入する。優先道路は、自動運転車両、手動運転車両の両方が走行できる。シミュレーション実験における設定を表 2 に示す。

#### 3.2 進入判断モデル

ドライバは交差点や特定の場所から道路へ進入する場面において、現在の位置と進入に関係のある車両との位置に対して距離、速度、時間などの差を認識し、その差を許容

表 3 車両モデル

Table 3 Model of vehicles.

	交差点進入時 車間距離	追従走行時 車間距離	通信
自動運転車両	式 (1) または式 (2)	式 (3)	可
手動運転車両	式 (1)	式 (3)	不可

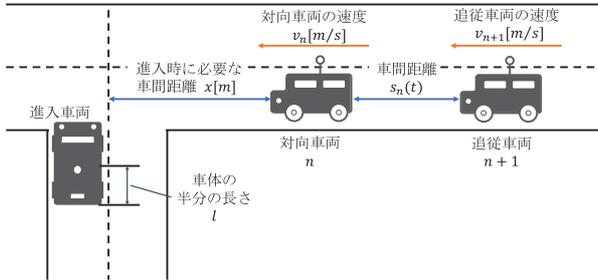


図 2 交差点に必要な車間距離

Fig. 2 Required distance between vehicles at intersection.

表 4 車間距離設定割合

Table 4 Setting timeheadway.

操作主体	車間時間 [秒]	割合 [%]
人間	1.0	12.8
	1.5	28.1
	2.0	24.7
	2.5	14.4
	3.0	13.1
	3.5	6.9
システム	0.64	50.0
	0.78	50.0

するか否かで進入を決定することが知られている。これはギャップアクセプタンス理論 [14] と呼ばれ、人間のドライバーの進入判断モデルへ適用できることが知られている [15]。本論文で使用するドライバーの進入決定方法はこのモデルを使用する。ただし、進入可能と判断する距離はドライバーによって様々である。そこで本論文では、車両が衝突することがないことを前提として、進入に必要とする距離を計算する式を仮定した。

実験で想定する車両のモデルを表 3 に示す。本実験では交差点進入時に焦点を当てるため、それぞれのドライバーは交差点の進入に必要とされる固有の車間距離を保持していると仮定する。車間距離は図 2 に示すように、交差点に進入する車両と、その進入に関わる車両の位置によって定義されるものであり、これはギャップアクセプタンス理論 [14] における距離ギャップである。交差点進入時に必要とされる車間距離 (図 2 の  $x$ ) は式 (1) で示される。

$$x = v_n \times (t + T_{rand}) \quad (1)$$

$v$  は対向車両が交差点に向かって走行する速度、 $t$  は進入車両が交差点を通過する際に要する時間、 $T_{rand}$  は進入車両のドライバーに設定される車間時間であり [16], [17], 表 4 に示した確率で設定する。すなわち、進入車両が交差点に

進入するために必要な距離は、進入中に対向車両が接近する分の距離と、進入後に対向車両が進入車両に追従した際に、速度を落とすことなく車間時間分の距離を確保するための距離を表している。ただし、 $v$  は道路の制限速度とし、 $t$  は事前実験から事故が生じない安全な進入時間として、4.0 [s] を設定した。

ここで、式 (1) に関して、自動運転車両のドライバーは手動運転車両のドライバーよりも  $T_{rand}$  が短いため、進入に必要とする車間距離が短くなる。そのため交差点へ進入した際に対向車両が手動運転車両であった場合、対向車両は短い車間距離に不安を感じ、減速をする可能性がある。そこで、自動運転車両の車間距離の計算を式 (2) に改良した場合も想定した。

$$x = v_n \times (t + T_{rand}) + d \quad (2)$$

$d$  は手動運転車両を考慮した安全な車間距離である。この距離は停止距離を意味しており、空走距離および制動距離から計算される [18]。

### 3.3 追従走行モデル

交差点進入後、進入を受け入れた車両は、進入した車両に対して、追従走行を開始する。このときの影響を確認するために、各車両の追従走行モデルについて説明する。追従走行モデルは様々な議論がされている [19], [20]。実験では追従モデルに加え、自由走行モデルも同時に考慮することができる IDM (Intelligent Driver Model) を使用した [21]。IDM は以下の式によって速度を決定する。

$$v = a \left[ 1 - \left( \frac{v_n}{v_0} \right)^4 - \left( \frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left( T_{rand} v + \frac{v \Delta v}{2\sqrt{ab}}, 0 \right) \quad (4)$$

$$s_n(t) = x_{n+1} - x_n - 2l \quad (5)$$

$$\Delta v_n(t) = v_n(t) - v_{n+1}(t) \quad (6)$$

$s^*$  は適切な車間距離で、 $v_0$  はドライバーの希望走行速度である。これは式 (4) で計算する。このときの  $T_{rand}$  は表 4 で設定されたものを使用する。 $l$  は車両の車体の半分の長さである。その他の変数は図 2 に示している。

### 3.4 シミュレーション結果

混在環境下での自動運転車両が与える影響に関して、効率性のために、非優先道路から交差点への進入の際の待機時間を計測した。また、安全性に関して、交差点の進入時に対向車両であった車両の TTC (Time To Collision) を計測した。実験では、自動運転車両と手動運転車両の割合を変化させて、5つのパターンを計測した。それぞれの車両の混在率を表 5 に示す。また、シミュレーション実験は、すべてのエージェントが交差点に到着してから直進す

表 5 車両の混在率

Table 5 Occupancy of vehicle types.

	自動運転車両 [%]	手動運転車両 [%]
A	0	100
B	25	75
C	50	50
D	75	25
E	100	0

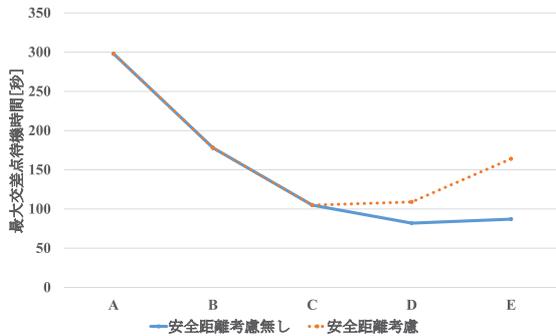


図 3 最大交差点待機時間

Fig. 3 Maximum time of waiting at intersection.

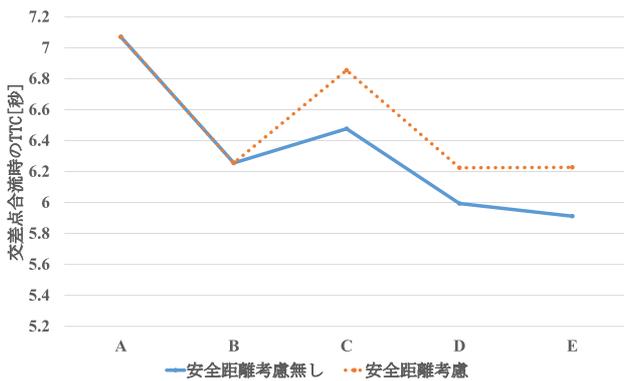


図 4 交差点合流時の対向車両の TTC

Fig. 4 TTC of oncoming vehicles at enter vehicle merging.

るか、右左折するかを乱数によって設定した。乱数を生成するシード値は毎回変更し、1パターンあたり10回の実験を行った。

非優先車両の交差点での待機時間に関して、最大の待ち時間による評価を図3に示す。交差点への進入時に求められる車間距離が短くなることで、手動運転車両では進入できなかったタイミングで進入する機会が増える。そのため自動運転車両の混在率が増加するごとに交差点での待機時間は短くなることを確認できた。しかし、安全距離を考慮した場合、自動運転車両の割合が手動運転車両を上回ったタイミングであるパターンDにおいて、待機時間がパターンCよりも長くなった。パターンEも同様である。

図4は交差点の進入に関与した対向車両が、進入車両と合流したタイミングにおける平均のTTCを示している。自動運転車両の増加にともない、短い車間距離を許容する進入車両が増加するため、TTCが減少し、安全性が悪化

することが確認できた。しかし、自動運転車両と手動運転車両が半分の割合になるパターンCでわずかにTTCが増加した。また、パターンC以降では安全性を考慮した車間距離を設定した方が、TTCが増加し、安全性が改善されていることが確認できた。

事前実験の結果から自動運転車両が進入可能と判断する距離として式(1)を設定した場合と式(2)を設定した場合とでは、どちらも事故は生じないが、待機時間の削減効果は判断距離の短い式(1)の方が大きい。しかし、進入された優先道路を走行する車両が測定したTTCの値も大きくなる。

自動運転車両の普及過渡期において、自動運転車両が人間のドライバに危険を感じさせることは避けるべきである。一方で実験結果から安全な距離を進入判断距離とした場合には交差点での待機時間を削減することは難しい。これを解消するために、一般的な道路では信号機を設置することで優先車両と非優先車両に機械的に交差点進入機会を設けている。しかし、信号機を設置することで優先車両は、信号機手前で停止かつ再発進することで目的地までの旅行時間を遅延させてしまう。

そこで、次章では信号を設置せずに、安全な進入判断距離を保ちつつ、交差点での待機時間を削減する方法を提案する。

#### 4. 提案手法

提案手法では、事前の実験結果から、以下の課題を解決することを目標とする。

- 交差点待機時間を削減すること
- 交差点進入時の優先道路が観測するTTCが悪化しないこと
- 優先道路の進入によって優先道路の旅行時間が10秒以上増加しないこと

以上を満たすため、提案手法では非優先道路からの進入意思を優先道路に通知する。また、通知を受け取った車両は自車が安全とする速度で対象の進入車両を自車の手前に進入させることができるかを判定し、自車の速度を制御する。ただし、このとき調節可能な車両は、前方車両も自動運転車両のときのみである。提案手法における通信は車車間、路車間通信の標準であるARIBT109の規格とする。また提案手法は交差点付近に建物が存在した場合の通信障害を考慮して、優先道路と非優先道路の通信を路側通信機が中継することを想定する。路側通信機の通信範囲は半径300mの円状を想定している。

##### 4.1 通信プロトコル

非優先道路の進入意思を優先道路に通知するための通信プロトコルを図5に示す。提案手法は非優先道路の車両が交差点で待機を始めたタイミングで開始する。

交差点で進入を待機し始めた車両は、交差点を通過する

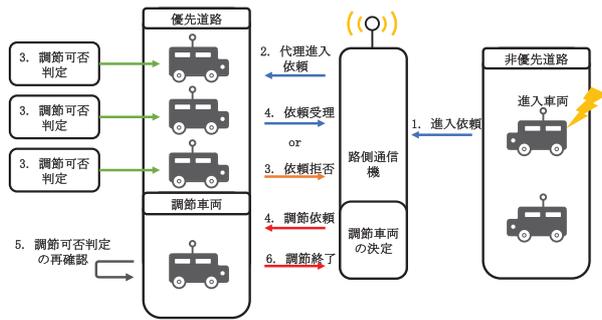


図 5 通信プロトコル

Fig. 5 Communication protocol.

表 6 使用するペイロードセット

Table 6 Payload set.

(a)	(b)
メッセージタイプ	メッセージタイプ
進入車両 ID	調節車両の車両 ID
X 座標	調節車両の車両 ID
Y 座標	現在時刻
進入車両の進行方向	
車間時間	
現在時刻	

ために必要な時間を待機し、その時間周期で路側通信機に対して進入依頼を送信する。ここで、交差点を通過するために必要な時間は道路形状からあらかじめシミュレーションした時間を使用しており、本実験ではこれを 4 秒と設定した。そのため、進入依頼は 4 秒周期で路側通信機に対して送信される。このときの進入依頼時に送信されるペイロードの中身を表 6 の (a) に示す。車間時間は進入車両のものであり、後述する車間距離の調節時判定のために使用される。

路側通信機を介して進入依頼を受信した優先道路を走行する対向車両は、受信した場所から速度調節を行い、実際に進入車両を進入させるための車間距離を作ることができるかの調節可否判定を行う。調節可否判定の結果、車間距離の調節が可能な対向車両は、路側通信機に対して依頼受理メッセージを送信する。また、不可能であった車両は依頼を破棄し、通常の走行に戻る。

依頼受理メッセージを受信した路側通信機は、調節可能な車両のなかから、最も交差点に近い車両を選択し、それを調節可能車両とし、その車両 ID を含む調節依頼メッセージを優先道路の車両に対して送信する。また、このときのペイロードを表 5 の (b) に示す。調節依頼メッセージは進入車両の進入方向が右折であった場合、進入に関与する車両として右左折方向から接近する 2 台の車両が選択される。このとき、調節依頼のペイロードに含まれる車両 ID と一致しない車両は通常の走行に戻る。

調節依頼車両として選択された調節車両は、再度調節可否判定を行った後、可能であれば車間距離を調節し、交差点通過後に提案手法を終了する。

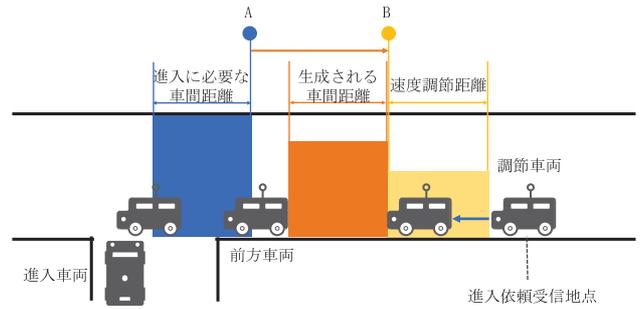


図 6 調節可否判定

Fig. 6 Decision of adjustability.

#### 4.2 調節可否判定

図 5 の 3 および 6 で示した調節可否判定について説明する。調節可否判定では、進入車両を交差点に進入させるための車間距離を確保すること。また、進入距離の確保のための速度調節をし、実際に調節した場合に確実に進入車両を優先道路に合流させることが可能であるかを判定する。図 6 に調節可否判定が可能である場合の例を示す。

図 6 は調節車両が進入依頼を受信した地点から、速度調節距離を経て、前方車両との間に、進入に必要な車間距離と同じ距離を生成している様子を示している。つまり、生成される車間距離と進入に必要な車間距離は同じ距離であり、式 (2) によって計算される。進入車両の車間時間は表 6 の (a) によって共有されているものとする。

車間距離を生成するために、調節車両は速度を制御する。最も基本的な制御方法として、信号機のように交差点手前で停止する方法が考えられる。提案手法では調節車両が後続する車両に対して調節による影響を少なくするために、完全に停止させない。実験では最低速度を 25 [km/h] とし最大減速度を 2.0 [m/s<sup>2</sup>] に設定した。最低速度は、小さいほど調節可能と判断する車両の台数は多くなり、進入依頼が許容される確率も高くなる。本実験では道路の制限速度の半分以上であれば道路に与える影響は大きくないと考え、25 [km/h] とした。最低速度に関する最適解は今後の課題とする。

進入車両は交差点の中心から外方向に進入距離分の範囲を進入に必要な車間距離としている。そのため図 6 の A は進入に必要な車間距離として区切るための境界地点である。調節可否判定では、調節車両は A 地点よりも手前の位置で、前方車両との間に車間距離の生成を完了している必要がある。ここで、調節車両が速度調節を終了した時点の位置を地点 B とする。つまり、車間距離の生成が完了した時点で B 地点が A 地点を超えていた場合、調節車両は進入車両を交差点に進入させることができない。こうした調節による進入の失敗を防ぐために、調節車両は調節可否判定をする必要がある。

B 地点を予測するために、調節車両は車間距離を生成するために必要な速度調節距離を予測する必要がある。調節

車両は進入依頼を受信した時点で減速走行による速度調節距離をシミュレーションし、その結果、進入依頼を受信した場所に速度調節距離を加算することで B 地点を予測する。速度調節距離は以下の式によって計算される。

$V < V_{min}$  の場合

$$\text{速度調節距離} = Vt + \frac{1}{2}a_{min}t^2 \quad (7)$$

$V \geq V_{min}$  の場合

$$\text{速度調節距離} = Vt \quad (8)$$

$V_{min}$  は最低速度の 25 [km/h],  $a_{min}$  は最大減速度 2.0 [m/s<sup>2</sup>],  $t$  は 1.0 [s] である。調節車両は現在速度が目標速度以下である場合、式 (7) によって速度調節距離が計算される。調節車両の速度が目標速度に達した場合は、それ以上の減速はしないものとし、目標速度のまま走行するため、速度調節距離は式 (8) によって計算される。

調節可否判定を行う車両は前方車両も自動運転車両であるため、前方車両は道路の制限速度で走行していると仮定する。また、シミュレーションは 1 秒間隔で計算される。そのため、1 秒ごとに速度調節距離と前方車両の進行距離から車間距離を計算することができる。シミュレーション中の前方との車間距離が図 6 で示した進入に必要な車間距離以上になったときにシミュレーションは終了し、車間距離が生成された時点での速度調節距離が得られる。

### 4.3 通信障害への対策通信プロトコル

まず、進入依頼が優先道路に到達しなかった場合は、その後の提案手法は適用されず、提案手法なしの通常状態の走行を行う。また提案手法では、優先道路側で車間距離の調節が完了した際に、非優先道路に進入を促すようなことはせず、最終的に合流するかは非優先道路で待機するドライバーによって決定される。そのため、通信障害によってドライバーに対して危険な運転が課されることはない。しかし、優先道路に対して意味のない進入依頼が送信された場合、その依頼が交差点で待機する車両から来たものかを判別する処理は本論文では考慮していない。そのため、優先道路を走行する車両が意味のない車間距離調節を強いられる可能性がある。こうしたセキュリティに関する対処は今後の課題とする。

## 5. 実験結果と評価

提案手法の評価実験を行った。評価は、予備実験で行った項目に加え、優先道路側の旅行時間について確認する。実験に使用する道路モデルや、車両モデルは同じものを使用した。進入距離に安全距離を考慮した場合の実験結果と比較する。

### 5.1 最大交差点待機時間

交差点での最大待機時間の比較を図 7 に示す。自動運転

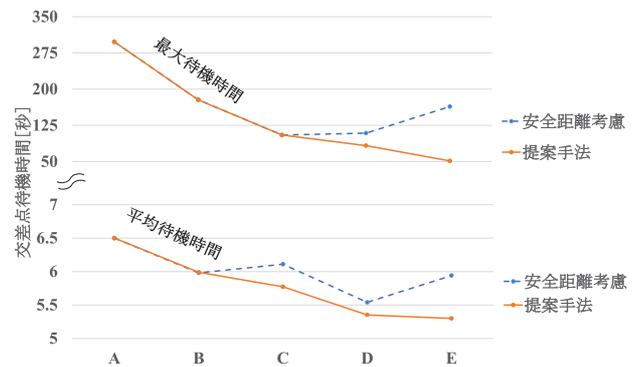


図 7 交差点での待機時間の比較

Fig. 7 Comparison of waiting time at intersection.

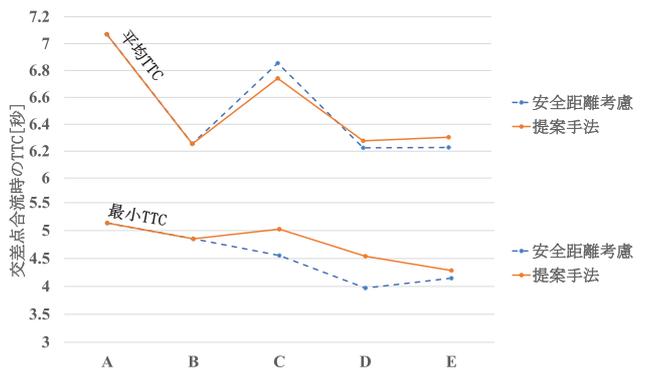


図 8 TTC の比較

Fig. 8 Comparison of TTC.

車両が 50% を超えると、安全性のみを考慮したケースは待機時間が長くなっていることが分かる。しかし、提案手法は最大交差点待機時間はパターン D で 25.9 秒、パターン E で 112.5 秒短くなっていることが確認できた。

また、平均待機時間の比較では、安全性を考慮した場合はパターン C や E で自動運転車両の混在率が増加しているにもかかわらず、待機時間が長くなっているパターンが確認できた。一方で提案手法では、パターン C で 0.34 秒、パターン D で 0.19 秒、パターン E で 0.64 秒と、増減率が一定ではないものの、自動運転車両の増加にともなって待機時間は改善されていることが確認できた。

提案手法は自動運転車両が 50% 以上普及したパターン以降で待機時間を削減することが確認できた。提案手法における車間距離調節機能は、自車および前方車両がともに自動運転車両である場合に適用されるため、自動運転車両が少ない場合には効果が得られないためである。すべてのパターンで待機時間を削減する目標には至らなかった。

### 5.2 対向車両の TTC

対向車両の TTC の比較を図 8 に示す。平均の TTC に関しては、パターン B と C を除いて提案手法のほうが改善されていることが分かる。パターン D と E ではわずか 0.1 秒の改善が確認できた。

最小の TTC に関しては、パターン C で 0.5 秒、パター

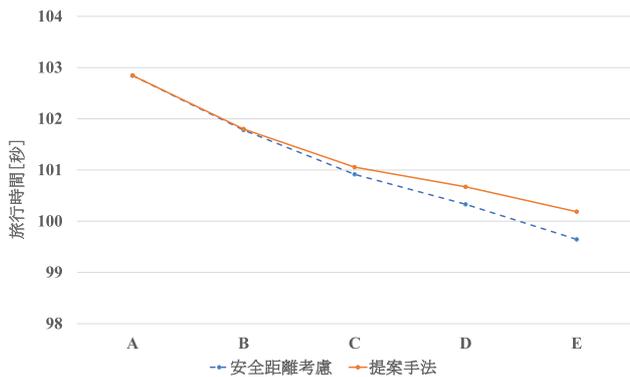


図9 優先道路の旅行時間の比較

Fig. 9 Comparison of travel time on priority road.

ンDで0.6秒、パターンEで0.1秒の改善が確認できた。提案手法で進入のために生成される車間距離は、安全性を考慮したときと同じ式(2)によって計算される車間距離と同じである。そのため、TTCの改善は進入時の対向車両が減速していることが要因であると考えられる。

提案手法のTTCに関する目標はTTCが悪化しないことであった。しかし一部のパターンで提案手法を適用する前よりも悪化することを確認した。ただし、最小のTTCにおいて悪化することはなかった。目標は達成できなかったが、進入判断距離を大きくすることで改善できると考えられる。

### 5.3 優先道路の旅行時間

優先道路を走行する車両すべてを対象にした旅行時間の比較を図9に示す。まず、旅行時間は自動運転車両の混在率の増加にともない減少傾向にあることが確認できる。これは、自動運転車両が速度の調節に対して短い反応時間を設定でき、追従走行に遅れないことが理由と考えられる。

提案手法との比較の結果、パターンC以降で提案手法が優先道路に対して減速による旅行時間の遅延を与えていることが確認できた。それぞれパターンCで0.2秒、パターンDで0.3秒、パターンEで0.5秒の増加が確認できた。しかし、それぞれ1秒未満の差であった。これは、調節車両が、減速中に停止することがなく、進入車両が合流した後も、追従走行に戻ることができるため、旅行時間への影響が少なかったことが考えられる。

以上の比較から、提案手法は、優先道路に与える影響は旅行時間にしてわずか1秒未満でありながら、交差点進入時のTTCおよび非優先道路の交差点待機時間を改善することを確認した。

## 6. おわりに

本論文ではまず、予備実験として自動運転車両の普及過渡期に着目し、自動運転車両が手動運転車両に与える影響について分析した。その結果、交差点への進入時に自動運

転車両は交差点進入に必要な車間距離について安全性を考慮する必要があることが判明した。しかし、安全性を考慮した場合、交差点での進入に必要な車間距離を確保することが難しくなり、自動運転車両の普及率が増加しているにもかかわらず、交差点の進入待機時間が増加することを確認した。

そこで、交差点進入に必要な車間距離を安全性を考慮したものにしながら、交差点での待機時間を削減するために路側通信機器を介した車間距離調節方法を提案した。また、シミュレータ上に実装し、評価実験を行った。評価実験の結果、提案手法は非優先道路の交差点での待機時間を削減し、交差点進入時の優先道路の対向車両のTTCをわずかであるが改善することを確認した。また、交差点の進入を促すために優先道路の調節車両は減速を行うが、これによる優先道路の旅行時間は1秒未満の影響しか受けないことを確認した。

提案手法では目標速度を25[km/h]、最大減速度を $2.0[m/s^2]$ としていた。しかし、実際の速度調節をする場合、調節車両は自車の減速が後続車両に与える影響を考慮する必要がある。そのため、今後の研究では調節車両が後続車両に与える影響を考慮し、目標速度および減速度を動的に変える必要があると考えている。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費16K00143の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：官民ITS構想・ロードマップ2018, 首相官邸(オンライン), 入手先(<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180615/siryou9.pdf>) (参照2018-12-24).
- [2] 辻野照久, 坪谷 剛：自動運転自動車の研究開発動向と実現の課題, 科学技術動向, Vol.133, No.1-2, pp.9-16 (2013).
- [3] National Highway Traffic Safety Administration: Automated Vehicles for Safety, available from (<https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>) (accessed 2018-12-24).
- [4] 北島 創, 丸茂喜高, 平岡敏洋, 伊藤 誠：リスク認知に関する評価指標の比較検討, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.2, pp.597-602 (2009).
- [5] Kurt, D. and Peter, S.: A multiagent approach to autonomous intersection management, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.31, pp.591-656 (2008).
- [6] Lee, J. and Park, B.: Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles Environment, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.81-90 (2012).
- [7] Lin, P., Liu, J., Jin, P.J. and Ran, B.: Autonomous Vehicle-Intersection Coordination Method in a Connected Vehicle Environment, *IEEE Intelligent Transportation System Magazine*, pp.37-47 (2017).
- [8] Sharon, G. and Stone, P.: A Protocol for Mixed Autonomous and Human-Operated Vehicle at Intersection, *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 2017*, pp.151-167 (2017).

- [9] Miyazaki, C., Matsuyama, S., Saito, M., Tokunaga, Y. and Kiyohara, R.: A Study of Driver's Behavior with Autonomous and Non-Autonomous Vehicle, *International Workshop on Informatics* (2016).
- [10] 古川義人, 徳永雄一, 斎藤正史, 清原良三: 自動運転車両普及期における渋滞軽減のための車両制御方式, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム, pp.58–64 (2017).
- [11] Furukawa, H., Saito, M., Tokunaga, Y. and Kiyohara, R.: A Method for Vehicle Control at T-Junctions for the Diffusion Period of Autonomous Vehicles, *20th International Conference on Network Based Information Systems*, pp.295–305 (2017).
- [12] Furukawa, H., Kiyohara, R., Tokunaga, Y. and Saito, M.: Vehicle Control Method at T-Junctions for Mixed Environments Containing Autonomous and Non-Autonomous Vehicles, *IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (2018).
- [13] Takai, M., Martin, J., Kaneda, S. and Maeno, T.: Scenargie as a Network Simulator and Beyond, *Journal of Information Processing*, Vol.27, pp.2–9 (2019).
- [14] 三浦利章: ギャップ・アクセプタンス行動およびその近似的要因についての予備的研究, 大阪大学人間科学部紀, Vol.6, pp.33–77 (1980).
- [15] 鈴木雅洋, 金子寛彦: 自動車運転熟練者及び未熟者の交差点右折判断メカニズム—二段階モデルを用いた間隔受け入れ判断の分析, 日本感性工学会論文誌, Vol.11, No.3, pp.453–457 (2012).
- [16] 太田博雄: ASV 開発への交通心理学からの提言, *IATSS Review*, Vol.36, No.143, pp.50–56 (2011).
- [17] 津川定之: 自動運転の課題, 電子情報通信学会基礎・協会ソサエティ Fundamentals Review, Vol.10, No.2, pp.93–99 (2016).
- [18] 合志和晃, 松永勝也, 黒木大一期, 志堂寺和則, 松木祐二: 自動車運転事故防止のための ITS—安全運転管理教育システム ASSIST, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.7, pp.1754–1761 (2001).
- [19] 大口 敬: 高速道路単路部渋滞発生解析, 土木学会論文集, Vol.2000, No.660, pp.39–51 (2000).
- [20] 西村友佑, 藤田 敦, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 諏訪 晃, 浦山博史, 竹嶋 進, 高井峰生: 従来車と調和する自動運転車の運転挙動モデル, *CSEC*, Vol.80, No.24, pp.1–8 (2010).
- [21] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, Vol.62, No.2, pp.1805–1824 (2000).



清原 良三 (正会員)

1985年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻前期課程修了。同年三菱電機(株)入社。1988年より(財)新世代コンピュータ技術開発機構に出向, 1993年三菱電機(株)に復職。2012年より神奈川工科大学情報学部情報工学科教授。組込み機器のソフトウェア更新, JavaVM実装方式, 組込み機器の信頼性, ITSに関する研究に従事。2008年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(情報科学)。電子情報通信学会, ACM各会員, IEEE Senior Member, 本会フェロー。



古川 義人

2017年神奈川工科大学情報学部情報工学科中退, 同年同大学大学院工学研究科情報工学専攻前期課程飛び級入学, 2019年同前期課程修了。同年NTTアドバンステクノロジー株式会社入社。