# 協調型自動運転の交差点通過における安全・効率のシミュレーション評価

木村 健太[1]　東 峻太朗[1]　佐藤 健哉[1]

**概要**：近年，自動運転の研究開発が活発に行われ，ドライバーの役割を自動車自身が担う仕組みが進歩している．車載センサのみで収集した情報を用いて自動運転を行う場合，見通しが悪く，死角となる部分が大きい交差点を走行する際に，交差する車線に存在する車両の情報を得ることができず，出会い頭衝突事故の危険性が高くなる。また，死角となる部分の情報は交差点の手前に侵入するまで得ることができず，安全確認をする際に一時停止をする必要がある．安全や効率を向上させるために，車両ごとに得た情報を通信を用いて，周囲の車両同士が共有することが重要になる．本研究では見通しが悪い交差点を交通する自動運転車両が通信を使用する場合と使用しない場合を比較することで安全や効率にどれほどの影響を与えるかを検証する．シミュレータを用いて評価を行い，見通しの悪い交差点において，自動運転車が通信を使用した場合，安全と効率に対して一定の効果が現れることを示した．

# Evaluation of Safety and Efficiency simulation of Cooperative Automated Driving through Intersection

KENTA KIMURA[1]　SHUNTARO AZUMA[1]　KENYA SATO[1]

## 1. はじめに

近年自動運転技術の研究開発が盛んに行われている．自律型自動運転車はカメラやレーザレーダ，ミリ波レーダなどを車両に搭載して周辺情報を収集する．そして，その周辺情報を用いて車両の走行を制御する．しかし，このような車載センサは視角範囲外の検知が不可能であるといった欠点をもつ．そのために見通しの悪い交差点での飛び出しや出会い頭衝突の回避は困難である．

V2X(vehicle-to-everything) 通信を用いることで，車両が直接視認することのできない死角情報を取得できる．この情報を用いることで他車両と協調した自動走行を実現するために，協調型自動運転の研究が行われている．自動運転車両がセンサ情報だけを頼りに走行するのではなく，車車間通信を併用し，自車両の情報やセンサ情報を共有することで，300m 周辺の認識率が上がることは示されている [1].

自動運転技術は程度によってレベルが定義されており，現状では部分的に自動運転システムが車両走行を制御するレベル 2 の車両が市場に出回り始めている．これらの車両は事故が起こりそうなタイミングで自動的にブレーキが作動するなどの支援をドライバーに行う．しかし，ドライバー不在の状況で運転を制御するものではなく，運転支援の範囲にすぎないというのが現状である．本研究ではこれから先に普及するであろうドライバーが不在であっても走行することができる自動運転車両を対象として評価する．

本研究は，通信を使用した際に交差点通過安全基準を定める手法を提案し，上述した自動運転車両が通信を用いることで周辺車両情報を得る場合と得ない場合を比較することで，見通しの悪い交差点通過時において通信の使用が交通の効率，安全に及ぼす影響の評価を目的とする．

## 2. 見通しの悪い交差点の問題点

交通の抱える問題の中に見通しの悪い交差点での事故がある．警察庁の交通事故発生場所の統計 [2] によると市街地交差点での事故が事故発生場所として最多である．図 1 の通り，見通しの悪い交差点では死角となる部分が大きい．

[1] 同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

© 2018 Information Processing Society of Japan

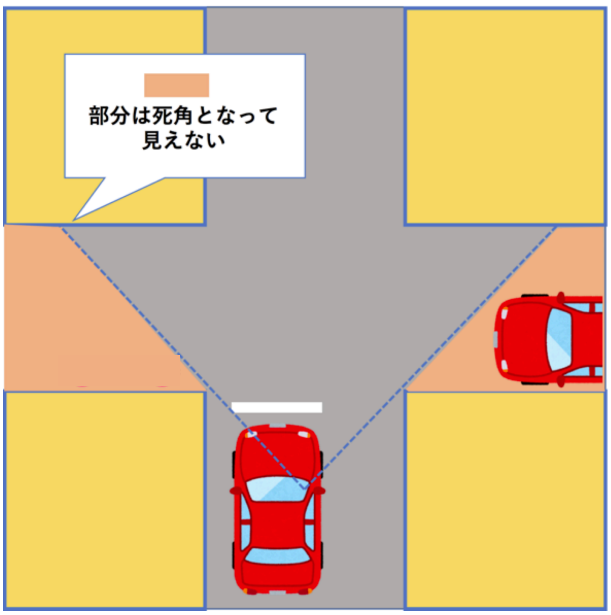



図 1　見通しの悪い交差点の死角

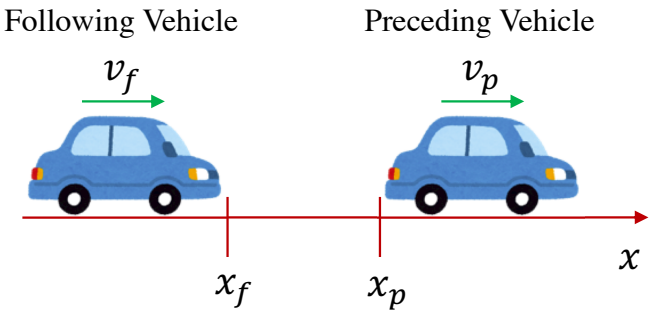



図 2　車両の各値

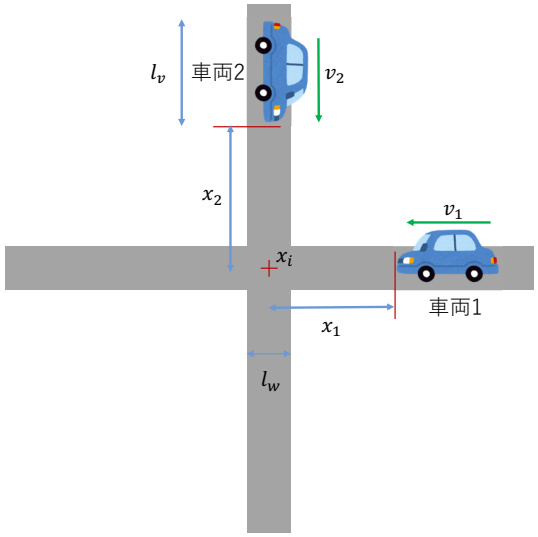



図 3　交差点における車両の各値

このような交差点では出会い頭衝突事故の発生確率が高くなる．そのため，ドライバーは交差点を渡る前に一時停止して，安全を確認した後に交差点を渡らなければならない．この行為は交差する車線の車両の有無に関わらず必要である．交差する車線に車両が存在しなければ，安全確認を行った時間は交差点を通過する上でタイムロスになる．これらのことは自律型自動運転車も同様である．

しかし，交差する車線の情報を車両があらかじめ把握していれば，車両が接近していない場合に一時停止をせずに交差点を渡ることができる．見通しの悪い交差点で死角に存在する車両を認識する事は単体の車両だけでは実現が不可能である．死角情報を補えるように通信による車両間の情報共有を行う方法を用いることで周辺情報が得られ，事故防止という安全性を高めることが可能となる．さらに交差点通過時の停止時間を減少させることが可能となり，交通状態の効率化につながる．

## 3. 提案手法

### 3.1 概要

車両は交差点を通過する際に異なる車線から進行してくる車両と衝突しないかを確認する必要がある．通信を用いない場合，信号機のない見通しの悪い交差点では交差点に進入する前に一時停止し，交差する車線を走行する車両との衝突の危険性を確認してから交差点を通過する必要がある．また，信号機のある交差点では信号機の指示に従って走行をする必要がある．本研究では，見通しの悪い交差点を通過する自動運転車両間が通信を用いることによって正確な位置情報，速度情報などを取得することができる前提を基に，交差点通過を判断する手法について提案する．

### 3.2 前提条件

以下の前提条件を設ける．

- 全自動運転車両は通信が可能
- 通信の損失を考慮しない
- 位置情報の誤差は考慮しない
- 通信は 0.1 秒おきに行う
- 交差する車線は死角とし，見えないものとする

### 3.3 提案手法の構成

#### 3.3.1 TTC

車両の交差点通過基準には衝突余裕時間（TTC:Time-To-Collision）[3] を用いる．図 2 に示した通り，追従車両と先行車両の位置，速度をそれぞ $x_f, v_f, x_p, v_p$ とする．また，TTC を $t_c$ とすると式 (1) で定義される．

$$t_c = -\frac{x_f - x_p}{v_f - x_p} \tag{1}$$

#### 3.3.2 本論文での TTC の定義

しかし，TTC は同一車線上の車両間に対する指標であることから，式を他の車線上を走る車両同士の計算に適応させる必要がある．交差点での各値を図 3 に示す．ここで，異なる車線を走る車両を非優先道路側を走る車両を車両 1，

© 2018 Information Processing Society of Japan

優先道路側を走る車両を車両 2 とする．交差点の中心までの距離をそれぞれ $x_1, x_2$ とし，速度を $v_1, v_2$，車両の長さを $l_v$，交差点内の長さを $l_w$ と定義する．

はじめに車両 1 が交差点の入口に到達するまでの時間を計算する．この時間を $t_1$ とすると式 (2) で求めることができる．

$$t_1 = \frac{x_1 - \frac{l_w}{2}}{v_1} \tag{2}$$

交差点の入り口までの距離は交差点の中心距離から交差点の幅の半分を引くことで求めることができる．次に車両 1 が交差点を完全に通過するまでにかかる時間を計算する．この時間を $t_2$ とすると式 (3) で求めることができる．先ほど求めた $t_1$ の値に交差点の幅と車両の長さを足した距離を走行するためにかかる時間を合わせたものである．

$$t_2 = t_1 + \frac{l_w - l_v}{v_1} \tag{3}$$

次に，先ほど求めた時間 $t_1, t_2$ 後の車両 2 がどの位置に存在するかを計算する．ここで，それぞれの時間が経過した時点での位置を $x_{2,1}, x_{2,2}$ とすると式 (4)，(5) で求めることができる．

$$x_{2,1} = x_2 + v_2 t_1 \tag{4}$$

$$x_{2,2} = x_2 + v_2 t_2 \tag{5}$$

交差点を渡る際に許容する TTC を $t_{ttc}$ とする．この $t_{ttc}$ を考慮して車両 1 の交差点通過時の車両 2 の位置が危険であるかを判断する．ここで $x_i$ は交差点の中心位置である．式 (6)，(7) のいずれかを満たすとき，車両 1 が交差点を通過することを危険であるとみなし，交差点通過を許可しない．

$$x_i - \frac{l_w}{2} - v_2 t_{ttc} \leq x_{2,1} \leq x_i + \frac{l_w}{2} + v_2 t_{ttc} + l_v \tag{6}$$

$$x_i - \frac{l_w}{2} - v_2 t_{ttc} \leq x_{2,2} \leq x_i + \frac{l_w}{2} + v_2 t_{ttc} + l_v \tag{7}$$

交差点通過を許可されなかった車両は交差点の手前で停止できるように減速する．

## 4. 評価

### 4.1 シミュレータ

評価は PTV 社の交通流シミュレータである Vissim[4] を用いる．Vissim とはドイツ PTV 社が開発したミクロ車両シミュレータである．車両間の相互影響を考慮することで，渋滞や新たな道路建設時の影響などの課題を抽出することができる．設定したシミュレーションを 3D グラフィックで視覚的に確認することができる．

また，COM インターフェース (Component Object Model Interface) に Vissim は対応している．COM インターフェースを用いることで，外部アプリケーションやスクリプトから Vissim を呼び出すことができる．この機能を用いて，Vissim に対して入力データを設定することや Vissim からの出力データを取得することができる．本研究では Python2 を用いて Vissim から各車両情報を収集し，TTC を計算している．

### 4.2 直進車のみ走行する場合

本節では，車両が右左折をせず，直進のみを選択して交差点を走行する場合の評価を行う．

#### 4.2.1 評価方法

国土交通省の定めた技術指針 [5] によると，自動ブレーキシステムにおいてブレーキを作動させる基準は乗用車の場合，TTC が 1.4 秒以下としている．そこで今回の交差点通過基準の TTC の値を 1.4 秒として評価する．また，交差点通過判定の計算処理は交差点周囲 100m 以内に車両が侵入したタイミングから行う．

表 1 に設定の詳細を示す．交差点の車線は片側 1 車線とする．交差点の片方の車線を優先道路とし，非優先道路を走行する車両が TTC を考慮して交差点通過を判断する．また，車両の制限速度を 50km/h とする．

通信を用いて交差点を通過する効果を測定するために他に 2 種類のモデルをシミュレーションした．1 つ目が通信を行わず，非優先道路側の車両は交差点を渡る前に 0.5 秒安全の確認をするために一時停止し，安全であるなら交差点を通過するモデルである．安全であるかの基準は付近（交差点から 100m 以内）に優先道路側からの車両が接近しているかどうかで判断する．

2 つ目が通信を行わず，交差点に設定した信号機の指示に従って車両が進行するモデルである．信号の周期を図 4 に示す．信号機の設定はサイクルタイムが 120 秒，信号が互いに赤の時間が 1 秒で 2 回，青の時間が互いに 57 秒，黄色の時間が互いに 3 秒とする．

これらの条件の中で交差点を含む 1000m の非優先道路を走行する車両の旅行時間を計測する．旅行時間とは決められた区間を走行した際に費やした時間を指す．

#### 4.2.2 評価結果

評価は 3 種類の方法で行った．前述した交差点の 3 つの設定の旅行時間を測定する．

1 つ目の評価として各車線の車両発生台数を 500 台/h とした場合，非優先道路側を走行する車両が 1000m を走行

**表 1** 直進車のみ走行する場合の設定

| | |
|---|---|
| シミュレータ | Vissim9.00-09 |
| 1 車線の車両台数 | 100〜700 台/h |
| 測定時間 | 10 分 |
| 測定区間 | 1000m |
| 道路の幅 | 7m |
| 交差点の位置 | 500m 地点 |
| 制限速度 | 50km/h |

© 2018 Information Processing Society of Japan




図 4　信号の設定

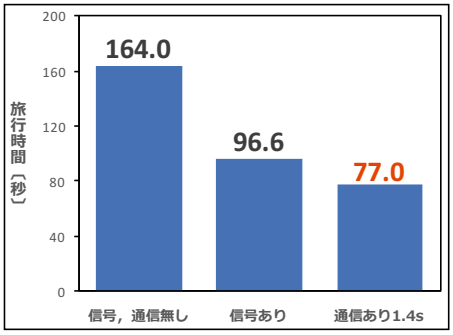



図 5　モデル別の車両旅行時間

するのに要する旅行時間を計測した．通信を用いて交差点通過を計算する際に用いられる安全基準 TTC は上述したとおり，1.4 秒とする．結果をグラフにまとめたものが図 5 である．旅行時間は通信を用いて交差点通過を判断したモデル，次点で信号機を使用して交差点の交通を制御したモデル，最後に信号機，通信共に用いることなく一時停止による安全確認を行ったモデルの順に旅行時間が短いという結果を得た．

2 つ目の評価として各車線の 1 時間あたりの車両台数を 100 台刻みで計測した．その結果が図 6 である．信号で制御した場合の旅行時間は計測した範囲の車両台数では旅行時間に大きな影響を与えなかった．しかし，通信，信号共に用いないモデルでは車両台数の増加と共に旅行時間も増加している．また，通信を用いた場合は車両台数が 100 台/h から 600 台/h までは旅行時間に大きな変化が見られなかったが，700 台/h に増加させると旅行時間が大幅に上昇した．

3 つ目の評価として通信を用いて交差点通過を判断する際に使用する TTC の秒数を 1.4 秒から 2.0 秒まで 0.2 秒刻みで旅行時間を計測した．乗用車と大型自動車ではブレーキを踏んでから実際に止まるまでの距離が異なり，自動ブレーキシステムは大型自動車の場合，TTC が 1.6 秒以下のときに作動する事が望ましいとされる [6]．そこで，この評価では TTC の値を変更させ，車間距離を変更させた場合の旅行時間を計測した．結果は図 7 である．TTC の値が大きくなればなるほど旅行時間の値も上昇した．

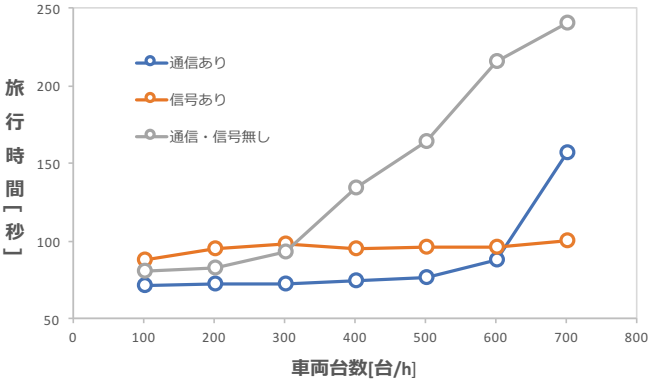



図 6　車両台数別の車両旅行時間

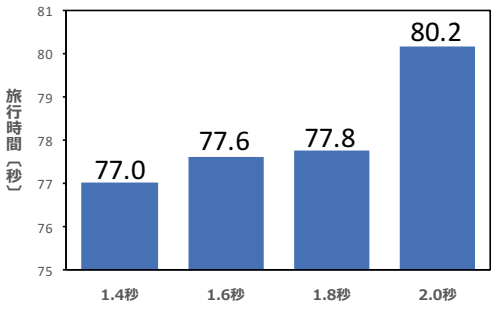



図 7　TTC 別の車両旅行時間

### 4.3　丁字路の場合

本節では，非優先道路側の車両が右左折を選択し，丁字路を走行する場合の評価を行う．ただし前提条件として，優先道路側を走行する車両は直進のみを選択し走行することとする．

#### 4.3.1　評価方法

丁字路での協調型自動運転車の旅行時間を計測するために丁字路を設定した．形状は図 8 の通りである．左折時は図の通り 1 車線の安全を確認することで左折可能であるか判定することができる．しかし，右折時は 2 車線の安全を確認する必要があり，左折時と比べ交差点の通過の条件は厳しくなる．

評価は通信ありで TTC を基に交差点通過を判定するモデル，交差点前で一時停止し，安全を確認したのち交差点を通過するモデル，信号機の指示に従って交差点を通過するモデルの比較を行う．一時停止の設定，信号の周期の設定は前節で使用したものと同様の設定で評価する．シミュレーションの設定は表 2 の通りである．車両発生地点から 500m の地点に交差点を設置し，右左折を行う非優先道路側の車両が 1000m 走行する際の旅行時間を計測する．ここで，非優先道路を走行する車両は右折左折ともに 5 割の

© 2018 Information Processing Society of Japan

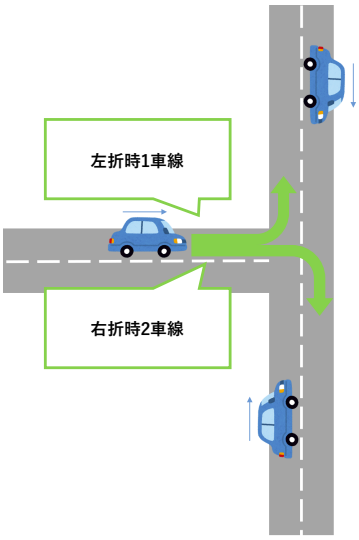



図 8　丁字路の形状

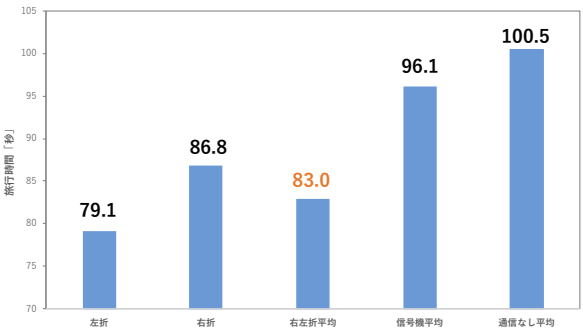



図 9　丁字路の旅行時間の比較

確率で選択するとし，進行方向別に旅行時間を計測する．

#### 4.3.2　評価結果

評価の結果は図 9 の通りである．左折時の 1km を走行する旅行時間は 79.1 秒，右折時の旅行時間は 86.8 秒である．この結果から左折時と比べ，右折時は安全確認の基準が厳しく旅行時間も長くなっている事が分かる．

### 4.4　十字路の場合

本節では，非優先道路側の車両が右左折または直進を選択し，十字路を走行する場合の評価を行う．ただし前提条件として，優先道路側を走行する車両は直進のみを選択し走行することとする．

#### 4.4.1　評価方法

十字路での協調型自動運転車の旅行時間を計測するため

表 2　丁字路，十字路の設定

| | |
|---|---|
| 1 車線の車両台数 | 300 台/h |
| 測定時間 | 10 分 |
| 測定区間 | 1000m |
| 道路の幅 | 7m |
| 交差点の位置 | 500m 地点 |
| 制限速度 | 50km/h |

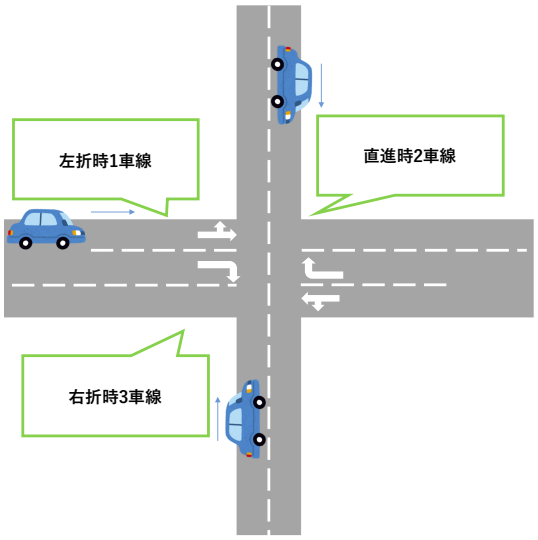



図 10　十字路の形状

に，十字路を設定した．形状は図 10 の通りである．左折時は 1 車線，直進時は 2 車線，右折時は 3 車線の安全を確認する必要がある．このように進行方向によって安全基準は異なり，左折，直進，右折の順で基準は厳しくなる．また，右折する場合，対向車の進行方向を確認する必要がある．しかし，右折車両同士が対面した場合，交差点内での衝突が発生しない．従って，車両の速度情報と位置情報に加えて進行方向の情報を通信によって共有する必要がある．そこで他の評価とは異なり，進行方向の情報も共有することとする．

評価は丁字路の評価と同様に，通信ありで TTC を基に交差点通過を判定するモデル，交差点前で一時停止し，安全を確認したのち交差点を通過するモデル，信号機の指示に従って交差点を通過するモデルの比較を行う．一時停止の設定，信号の周期の設定は前節で使用したものと同様の設定で評価する．シミュレーションの設定は前節と同様に表 2 とする．車両発生地点から 500m の地点に交差点を設置し，1000m の旅行時間を計測する．ここで，非優先道路側を走行する車両は直進 7 割，左折 2 割，右折 1 割の確率で選択するとし，進行方向別に旅行時間を計測する．

#### 4.4.2　評価結果

評価の結果は図 11 の通りである．十字路においても安全確認をする車線の数が増えるほど旅行時間が増加することがわかる．

## 5.　考察

### 5.1　直進車のみ走行する交差点に関する考察

1 車線の車両発生台数を 1 時間あたり 500 台とすると，図 5 の旅行時間となる．直進車のみ走行する交差点において通信を用いることは旅行時間の削減に繋がることが分かる．交通における効率は目的地にたどり着くまでの時間が短いほど良い．通信を用いると旅行時間の削減ができたこ

© 2018 Information Processing Society of Japan

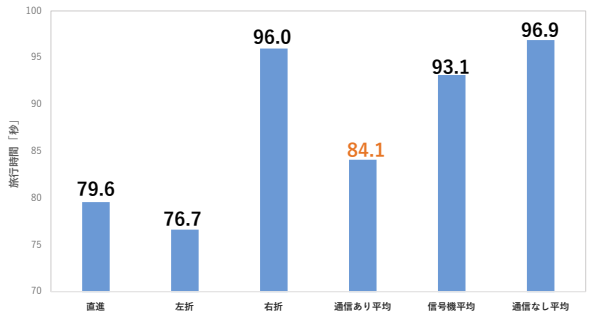



図 11　十字路の旅行時間の比較

とから効率は向上した．また，TTC を用いた計算を行うことで，交差点通過時に交差する車線の車両との衝突猶予時間を担保することができ，安全という観点においても通信なしの場合と比べ向上した．

また，図 6 は 1 時間あたりの車両発生台数別の旅行時間である．この図から 1 時間あたりの車両発生台数 100 台から 600 台のとき，通信を使用するモデルの旅行時間が最も短いが，700 台に増加させると旅行時間は 600 台と比べ約 60 秒増加し，信号ありのモデルと比べ旅行時間が長い．優先道路を走行する車両が途切れることなく走行することで非優先道路を走行する車両が交差点を横断できないことに起因する．この結果から一定の交通量を上回る場合，交差点の走行調停を行う必要があると分かる．例えば，交差点手前で一定時間停止状態に陥った車両に交差点通過を譲る方法がある．

3 つ目の評価が図 7 の設定した許容する TTC の値別の旅行時間である．図 7 の結果の通り TTC の値を増加させると旅行時間も増加する．このことから安全とみなす車間距離を広げることで衝突の危険は小さくなるが，旅行時間という効率の観点では悪くなることが分かる．従って安全と効率はトレードオフの関係である．最低限担保したい安全を確保しつつ効率を最大限高める値を設定する必要がある．

### 5.2　丁字路に関する考察

非優先道路を走行する車両の右左折を考慮した場合，丁字路における旅行時間は図 9 となる．安全確認を必要とする車線が 2 車線の右折時は安全確認を必要とする車線が 1 車線の左折時と比べ，旅行時間が約 7 秒長い．右左折の旅行時間の平均値は 83.0 秒である．この数値は 1km 区間の車両平均時速が約 43.4km/h であることを示し，制限速度が 50km/h であることを考慮すると高い水準である．また，信号機を用いたモデルの旅行時間 96.1 秒，一時停止し安全確認を行うモデルの旅行時間 100.5 秒であることから通信を用いて安全確認を行うことは丁字路の交通の効率において有効である．

### 5.3　十字路に関する考察

非優先道路を走行する車両の右左折を考慮した場合，十字路における旅行時間は図 11 となる．安全確認を必要とする車線が多くなるに連れて旅行時間は増加している．直進，右左折の旅行時間の平均値は 84.1 秒である．この数値は 1km 区間の車両平均時速が約 42.8km/h であることを示し，制限速度が 50km/h であることを考慮すると高い水準である．また，信号機を用いたモデルの旅行時間 93.1 秒，一時停止し安全確認を行うモデルの旅行時間 96.9 秒であることから通信を用いて安全確認を行うことは十字路の交通の効率において有効である．

## 6.　おわりに

近年，自動運転の研究が活発に行われている．自動運転車両が単体で得ることができる情報には限界があり，車両から見て死角となる部分の情報を収集することが不可能である．このことから通信を用いて様々な対象と情報共有することで不足した情報を補う必要がある．

本研究では見通しが悪く死角となる部分が大きい交差点における自動運転車両が通信を用いた際の安全と効率を検証した．通信を用いることで，交差点周辺に存在する車両の速度情報や位置情報を取得し，交差点を安全に通過できるか判定する．

評価の結果，通信を用いて交差点通過の安全を確認した場合，通信を用いずに交差点通過の安全を確認した場合と比較し，効率と安全が向上することを示した．

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16H02814 の助成を受けたものである．

### 参考文献

[1] Hendrik-Jorn Gunther, Raphael Riebl, Lars Wolf, Christian Facchi, ”Collective Perception and Decentralized Congestion Control in Vehicular Ad-hoc Networks”, Vehicular Networking Conference(VNC)，2016.

[2] 警察庁，”平成 28 年における交通事故事故の発生状況”，https://www.npa.go.jp/toukei/koutuu48/toukei.htm，(参照 2017-4)

[3] 平岡敏洋，高田翔太，”衝突回避減速度による衝突リスクの評価”，計測自動制御学会論文集，Vol.47，No.11，pp.534-540，2011.

[4] PTV Vissim，http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/，(参照 2018-4)

[5] 国土交通省，”参考資料 - 国土交通省”，www.mlit.go.jp/common/000162826.pdf，(参照 2017-4)

[6] 澤田東一，廣瀬敏也，春日伸予，銭谷真拓，”衝突被害軽減ブレーキシステムの評価に関する研究”，国際交通安全学会誌，Vol.33，No.4，pp.311-338，2008.

© 2018 Information Processing Society of Japan