

# マルチエージェントモデルによる多様な自動車・歩行人の混在する交差点における安全性評価

愛知県立大学 \*兵藤 悠也 HYODO Yuya  
愛知県立大学 奥田 隆史 OKUDA Takashi  
\*愛知県立大学 大学院 情報科学研究科 情報システム専攻  
\*〒480-1198 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1522-3  
\*E-mail: im201009@cis.aichi-pu.ac.jp

## 1. はじめに

日本では交通事故を一つの社会問題と捉え、国と自治体が一体となって交通の安全性向上に取り組んでいる [1]. 安全性向上の取り組みにおいて、近年では運転の自動化による安全性向上に注力しており [2], 自動運転技術やコネクテッドカーなどの新たなテクノロジーの活用により実現されつつある [3]. 自動運転技術とは人工知能や機械学習, 深層学習などの技術を用いて運転を支援する技術であり, 自動ブレーキ機能による事故防止や, 速度管理による渋滞を引き起こす運転の抑止などにより運転を支援する [4]. 一方, コネクテッドカーとは外部ネットワーク接続を通して車両同士や交通インフラ設備と通信をおこなう自動車であり, 通信により周囲の車両情報や道路情報などを入手することで運転を支援する [5].

しかしながら安全性向上に関して, 交通事故統計や, 新たなテクノロジーの技術的課題・リスクについて考慮する必要がある. 交通事故統計によると, 交差点は自動車・歩行人の混在による複雑性から, 最も交通事故が発生しやすい場所であることが分析されている [6][7].

また, 新たなテクノロジーの課題・リスクは交差点の複雑性・安全性に影響を与えると考えられる. 自動運転技術に関しては, 自動運転車の挙動が非自動運転車の運転手にとって予測困難であると分析されていることから [8][9], 交差点の複雑性は今後さらに増すことが懸念される. コネクテッドカーに関しては, ネットワークを介して外部から車内システムに侵入されることで, 情報が盗まれたり, 車両の制御が奪われる可能性があることが報告されている [10][11][12][13]. 加えて, 天災などにより突発的に発生する通信障害によって車両・道路情報を入手できない場合における交差点の安全性についても考慮する必要がある [14] (詳細は付録 A にて記載).

そこで本研究では通信障害時を想定し, 自動・非自動運転車と歩行人の混在する交差点における安全性をマルチエージェントモデルにより評価する.

以下, 第 2 節では交通事故の発生状況について述べる. 第 3 節では交差点の安全性評価モデル, 第 4 節では数値例について述べ, 最後に第 5 節でまとめと今後の課題について述べる. 付録 A では運転の自動化における課題についてまとめる.

## 2. 交通事故発生状況

本節では, 現代における交通事故発生状況について述べる. 以下, 第 2.1 節では交通事故の統計, 第 2.2 節

では自動運転車の実証実験で発生した交通事故について述べる.

### 2.1. 交通事故の統計

交通事故は 2020 年 1 月から 9 月までで約 22 万件報告されており, 半数以上が交差点で発生している [6][15].

交差点で交通事故が発生しやすい要因として, 自動車・歩行人の混在による複雑性があげられる [7]. 例えば, 交差点に差し掛かると運転手は以下の事柄:

- ・信号灯の色
- ・前方車両の右左折
- ・対向右折車の有無
- ・横断歩道を通行する人の有無

を確認する必要がある. これら多くの事柄を確認するため注意力が散漫になり, 事故を起こす要因となることがある.

### 2.2. 自動運転実証実験における交通事故

近年では自動運転車の開発に伴い, 公道での実証実験がおこなわれている. しかしながら, 自動運転車の実証実験では交通事故の発生が報告されている [8][16][17]. その要因として, 技術的課題に加え, 自動運転車の異質な挙動に後続の非自動運転車の運転手が対応できなかったことがあげられている.

上記のことから, 自動運転車の普及によりさらに複雑性を増す交差点の安全性が懸念される.

## 3. MAS による交差点安全性評価モデル

交差点の安全性評価には, MAS (Multi-Agent Simulation) の *artisoc* を用いる [18]. MAS とは, 個々のエージェントが独自のルールを持って行動し, 相互作用した結果を分析する手法である. ここで, エージェントとは自律的に動く主体を指す [19].

本モデルでは自動車 3 種類と歩行人 2 種類, 合わせて 5 種類のエージェントを想定する. 具体的には, 自動車は自動運転車, 非自動運転車, 自動二輪車の 3 種類, 歩行人は自転車, 歩行者の 2 種類である.

以下, 第 3.1 節では, 検証する交差点形態について述べ, 第 3.2 節で各エージェントの生成ルール, 第 3.3 節で各エージェントの交差点内における挙動について述べたのち, 第 3.4 節では本モデルにおける交通事故の定義について述べる.

### 3.1. 交差点形態

検証する交差点形態は 3 種類: 一般式, スクランブル式, 歩車分離式である. 各交差点形態について述べる前に, 本稿で用いる表記について整理する.

交差点において信号灯が「青→黄→赤」と一巡する時間のことを信号周期といい [20],  $T$  で表す。また, ある方向の信号灯が一度青になったのち, 各方向の信号周期を経て再び青に切り替わるまでの時間を本稿では交差点周期と呼び, 交差点形態に応じて  $T$  の整数倍で表す。

**一般式交差点 (図 1)**

本稿で一般式交差点とは, 同方向の車両用信号と歩行者用信号が同時に, 同色に切り替わる方式の交差点を指す。一般式交差点の交差点周期は  $2T$  である。

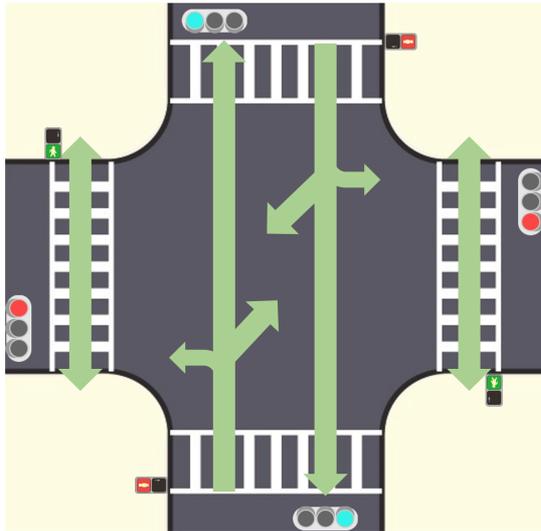


図 1: 一般式交差点

**スクランブル式交差点 (図 2)**

スクランブル式交差点とは, 全方向の車両を同時に停止させるあいだに, 斜め方向を含む全方向の歩行人を同時に横断させる方式の交差点である。スクランブル式交差点の交差点周期は  $3T$  である。

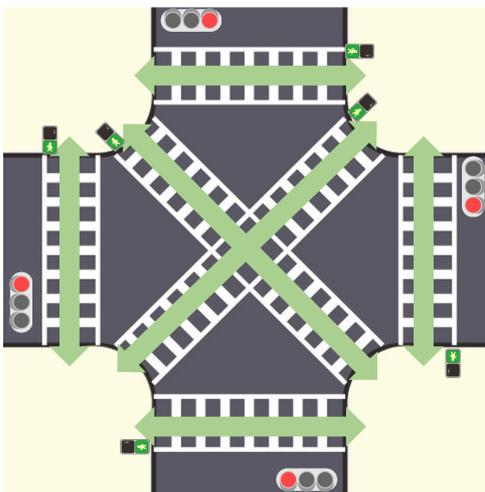


図 2: スクランブル式交差点

**歩車分離式交差点 (図 3)**

歩車分離式交差点とは, スクランブル式交差点と同方式で, 歩行人の斜め横断を含まない交差点である。歩車分離式交差点の交差点周期は  $3T$  である。

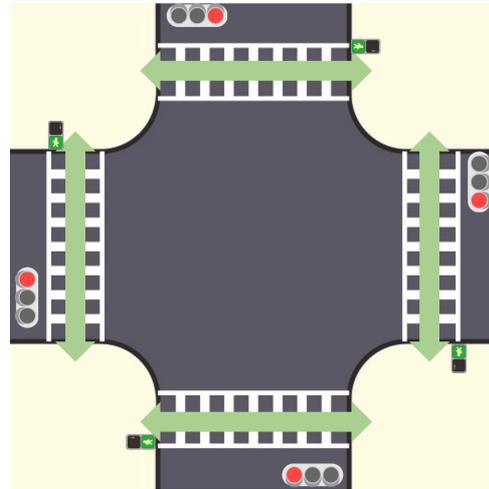


図 3: 歩車分離式交差点

**3.2. エージェント生成ルール**

本節では各エージェントの生成ルールについて述べる。

**自動運転車**

自方向の信号が青もしくは黄色であるときに, 交差点出入口付近で他自動車が停止していない場合にのみ, 確率  $r\lambda_C$  ( $r$ : 自動運転車普及率,  $\lambda_C$ : 自動四輪車到着率) で生成される。その際, パラメータとして 右折率  $p_R$ , 左折率  $p_L$ , 速度  $v_A$ , 視野  $D_A$  を持つ。

**非自動運転車**

自動運転車と同条件で確率  $(1-r)\lambda_C$  で生成され, パラメータとして 右折率  $p_R$ , 左折率  $p_L$ , 速度  $v_N$ , 視野  $D_N$  を持つ。

**自動二輪車**

自方向の信号が青もしくは黄色であるときに, 確率  $\lambda_M$  ( $\lambda_M$ : 自動二輪車到着率) で生成され, パラメータとして 右折率  $p_R$ , 左折率  $p_L$ , 速度  $v_M$ , 視野  $D_M$  を持つ。

**自転車**

自方向の信号が青もしくは黄色であるときに, 確率  $q\lambda_B$  ( $q$ : 車道走行率,  $\lambda_B$ : 自転車到着率) で車道に生成され, パラメータとして 右折率  $p_R$ , 左折率  $p_L$ , 速度  $v_B$ , 視野  $D_B$  を持つ。

また, 信号の状態に関係なく確率  $(1-q)\lambda_B$  で歩道に生成され, その際はパラメータとして 速度  $v_B$ , 視野  $D_B$  を持つ。

**歩行者**

確率  $\lambda_W$  ( $\lambda_W$ : 歩行者到着率) で歩道に生成され, パラメータとして 速度  $v_W$ , 視野  $D_W$  を持つ。

### 3.3. 交差点における挙動

本節では各エージェントの挙動ルールについて述べる。第 3.3.1 節では自動車 3 種類，第 3.3.2 節では自転車，第 3.3.3 節では歩行者の挙動ルールについて述べる。

#### 3.3.1. 自動車

自動車は 4 つの挙動：右左折・直進，加速，減速，停止のルールを持つ。

##### 右左折・直進

右折率  $p_R$ ，左折率  $p_L$  に従って右折，左折，直進（右折も左折もしない）をおこなう（図 4）。本モデルでは自動車の U ターンを考慮しないものとする。

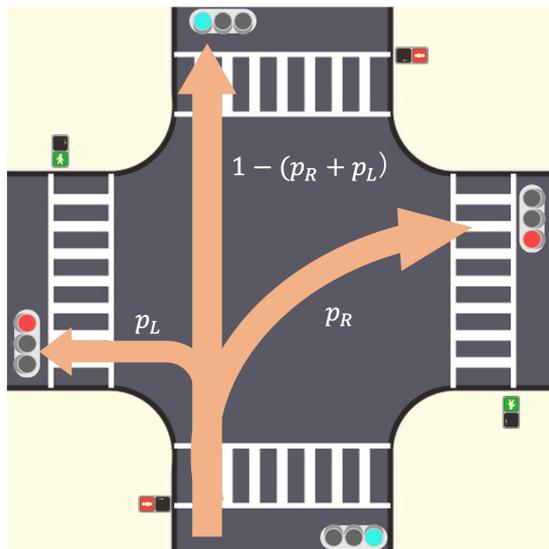


図 4: 自動車の右左折・直進

##### 加速

加速度  $a = \alpha G [m/s^2]$  ( $\alpha$ : 加速係数,  $G$ : 重力加速度) に従って以下の場合：

- ・前方視野内に自動車や歩行者を認識していない
- ・右左折後

に加速する。

##### 減速

減速度  $b = \beta G [m/s^2]$  ( $\alpha$ : 減速係数) に従って右左折時に減速する。

##### 停止

停止時減速度  $b' = \beta' G [m/s^2]$  に従って，前方視野内に自動車や歩行者を認識しているときに減速し，停止する。

#### 3.3.2. 自転車

自動車は 3 つの挙動：右左折・直進，加速，停止のルールを持つ。

##### 右左折・直進

車道で生成された自転車は，右折率  $p_R$ ，左折率  $p_L$  に従って右折，左折，直進（右折も左折もしない）をおこない，歩道で生成された自転車は直進のみをおこなう。右折の際は自動車と異なる方法で右折し，目の信号が青になってから発進する（図 5）。

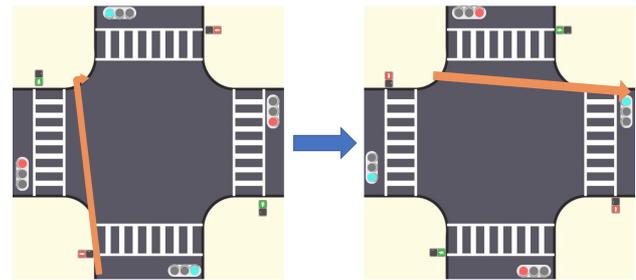


図 5: 車道走行する自転車の右折

##### 加速

加速度  $a_B = \alpha_B G [m/s^2]$  ( $\alpha_B$ : 自転車加速係数) に従って以下の場合：

- ・前方視野内に進行している自動車を認識していない
- ・発進時

に加速する。

##### 停止

減速度  $b_B = \beta_B G [m/s^2]$  ( $\beta_B$ : 自転車減速係数) に従って，以下の場合：

- ・目の信号が赤
- ・前方視野内に停止していない自動車を認識

に停止する。

#### 3.3.3. 歩行者

歩行者は 2 つの挙動：歩行，停止のルールを持つ。

##### 歩行

以下の場合：

- ・目の信号が青
- ・横断中，前方視野内に進行している自動車を認識していない
- ・横断後

に歩行する。

##### 停止

以下の場合：

- ・目の信号が黄色または赤
- ・横断中，前方視野内に停止していない自動車を認識

に停止する。

### 3.4. 交通事故の定義

交通事故は 2 種類：車両衝突事故と人身事故がある。

#### 車両衝突事故

自動車同士が衝突して発生する事故を指す。本モデルでは、「2 台の自動運転車または非自動運転車の座標が一致」もしくは「1 台の自動運転車または非自動運転車と 1 台の自動二輪車の座標が一致」した場合に発生する。

#### 人身事故

自動車と歩行者が衝突して発生する事故を指す。本モデルでは、「1 台の自動運転車または非自動運転車と，1 台の自転車または 1 人の歩行者の座標が一致」した場合に発生する。

## 4. 数値例

本節では数値例について述べる。以下、第4.1節でシミュレーション条件、第4.2節で本モデルにおける評価指標、第4.3節でシミュレーション結果について述べる。

### 4.1. シミュレーション条件

エージェントの各パラメータの数値を表1にまとめる。加速係数、減速係数、視野の数値は、参考文献[21][22][23]を参照している。

表1: エージェントのパラメータ値

パラメータ	表記	数値
信号周期	$T$	100[s]
自動運転車普及率	$r$	{0, 0.5, 0.9, 1}
自動四輪車到着率	$\lambda_C$	0.15
自動二輪車到着率	$\lambda_M$	0.05
車道走行率	$q$	0.5
自転車到着率	$\lambda_B$	0.01
歩行者到着率	$\lambda_W$	0.20
右折率	$p_R$	0.2
左折率	$p_L$	0.2
加速係数	$\alpha$	0.2
自転車加速係数	$\alpha_B$	0.09
減速係数	$\beta$	0.4
停止時減速係数	$\beta'$	0.7
自転車減速係数	$\beta_B$	0.35
自動運転車速度	$v_A$	0~40[km/h]
非自動運転車速度	$v_N$	0~50[km/h]
自動二輪車速度	$v_M$	0~50[km/h]
自転車速度	$v_B$	0~15[km/h]
歩行者速度	$v_W$	0~1.5[m/s]
自動運転車視野	$D_A$	15[m]
非自動運転車視野	$D_N$	1~15[m]
自動二輪車視野	$D_M$	1~15[m]
自転車視野	$D_B$	1~10[m]
歩行者視野	$D_W$	0~5[m]

また、交差点進入時の自動車速度は信号・自動車の状態に依存しており、表2のようにになっている。

表2: 交差点進入時の  $v_A, v_N, v_B$

信号・自動車の状態	$v_A$	$v_N$	$v_B$	
青になって5[s]以内	10	5~15	5~15	
5[s]以降	左折車	20	15~25	15~25
	右折車	30	25~35	25~35
	直進車	40	35~45	35~45

### 4.2. 評価指標

$r = \{0, 0.5, 0.9, 1\}$  の4パターンで各交差点形態を1時間観測する。これを10回繰り返し、平均交通量と車両衝突事故率、人身事故率を比較・評価する。

### 4.3. 結果・考察

各交差点形態における平均交通量を図6に示す(エラーバーは95%信頼区間を表す)。また、平均交通量に対する車両衝突事故率と人身事故率を図7, 図8に示す。

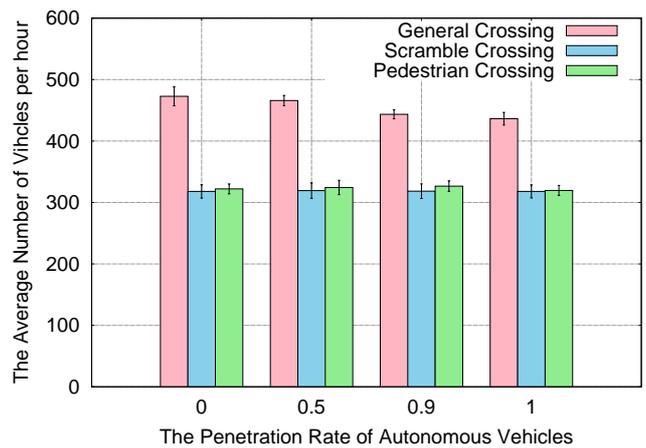


図6: 平均交通量

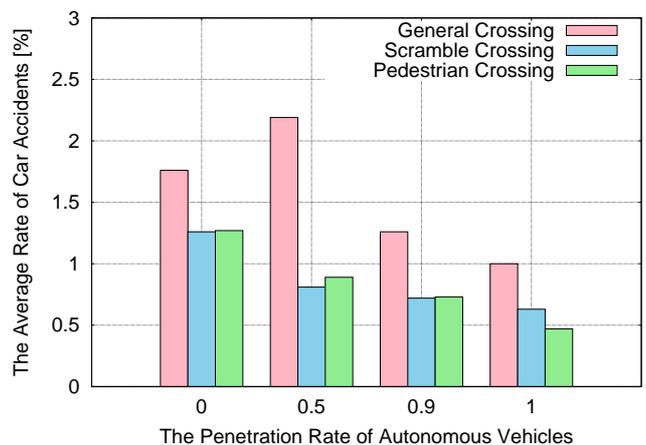


図7: 車両衝突事故率

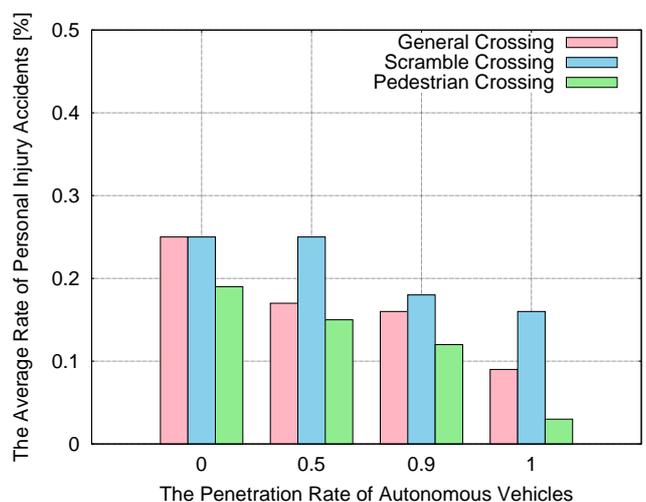


図8: 人身事故率

これらの結果から、一般式交差点交通特性、歩車分離式交差点交通特性、スクランブル式交差点交通特性を以下にまとめる。

### 一般式交差点交通特性

一般式交差点の特徴として、交通量が多いことや、 $r = 0.5$  の時に車両衝突事故率が高くなることなどがあげられる。

交通量が多いことについては、他交差点形態と異なり一般式交差点の交差点周期が  $2T$  であるためだと考えられる。

一方で車両衝突事故率が  $r = 0.5$  の時に高くなることについて、2つの理由が考えられる。1つ目に、左折する自動運転車が歩行者を認識した際に、早い位置で停止してしまい、後続の非自動運転車が対応できずに衝突するリスクが高いためである。2つ目に、右折車が歩行者を認識して停止した際に対向車が衝突するリスクが高いためである。どちらの理由も、歩行者の存在が大きく関係している。

以上のことから一般式交差点は、自動車交通量の面では優れている反面、自動・非自動運転車と歩行者の混在による事故率が高く、安全性においては他交差点形態と比較して低いことが明らかとなった。

### スクランブル式交差点交通特性

スクランブル式交差点の特徴として、車両衝突・人身事故率ともに  $r$  の増加に反比例して減少している一方で、人身事故率が他交差点形態と比較して全体的に高いことがあげられる。

車両衝突・人身事故ともに減少していることについては、スクランブル式では右左折時に歩行者の存在による停止をおこなう可能性が極めて低く、衝突のリスクが低いためであると考えられる。

一方で人身事故率が全体的に高いことについては、スクランブル式では歩行者の斜め横断が可能であるために、斜め方向での横断時間が長く、人身事故のリスクが高まると考えられる。特に速度の遅い歩行者は、歩行者用信号灯が赤になり車両用信号灯が青になったにもかかわらず、横断を完了できずに交差点内を通行しているケースが見られた。

以上のことからスクランブル式交差点は、斜め横断を可能にすることで歩行者にとって利便性が高い反面、横断に時間を必要とするため、人身事故率が高いことが明らかとなった。

### 歩車分離式交差点交通特性

歩車分離式交差点の特徴として、車両衝突・人身事故率ともに  $r$  の増加に反比例して減少していることに加え、人身事故率が最も低いことがあげられる。

車両衝突・人身事故率ともに減少していることについてはスクランブル式交差点と同様の理由であり、加えて斜め横断が不可能であるため、歩行者が交差点内に存在する時間が短く、人身事故率が低いと考えられる。

以上のことから歩車分離式交差点は、斜め横断が不可能であるため、歩行者にとってスクランブル式交差点ほどの利便性はないものの、最も安全性が高いことが明らかとなった。

## 5. おわりに

本研究では、自動運転車の普及による複雑性の増加、ならびに通信障害時を想定し、3形態の交差点の安全性をMASを用いて評価した。結果から各交差点形態の交通特性が明らかとなり、自動運転車の普及により事故率が高まる場合もあることや、最も安全性の高い交差点形態は歩車分離式であることなどがわかった。

今後の課題として、より現実的なモデルに近づけることや、通信機能が有効である場合のシミュレーションなどがあげられる。

## 参考文献

- [1] 国土交通省, 『交通事故のない社会を目指した今後の車両の安全対策のあり方について』, <https://www.mlit.go.jp/common/001130302.pdf>, 2020年11月18日閲覧。
- [2] 総務省, 『情報通信白書 令和2年版』, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd263220.html>, 2020年10月31日閲覧。
- [3] 国土交通省, 『自動走行ビジネス検討会報告書『自動走行の実現に向けた取組方針』Verison4.0』, <https://www.mlit.go.jp/common/001343740.pdf>, 2020年10月31日閲覧。
- [4] pwc, 『Five trends transforming the Automotive Industry』, <https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/assets/pwc-five-trends-transforming-the-automotive-industry.pdf>, 2018。
- [5] 総務省, 『ITS 安全運転支援無線システムの在り方』, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000019515.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000019515.pdf), 2020年10月31日閲覧。
- [6] 内閣府, 『令和2年版交通安全白書』, [https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou\\_haku/pdf/zenbun/1-1-1.pdf](https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou_haku/pdf/zenbun/1-1-1.pdf), 2020年11月12日閲覧。
- [7] 株式会社建設技術研究所, 『事故多発交差点マップ過去データ分析』, [https://www.sonpo.or.jp/report/publish/bousai/ctuevu000000iu81-att/kousaten-map\\_2.pdf](https://www.sonpo.or.jp/report/publish/bousai/ctuevu000000iu81-att/kousaten-map_2.pdf), 2020年11月12日閲覧。
- [8] 日本経済新聞, 『米グーグルの自動運転車、過失で事故 バスと衝突』, [https://www.nikkei.com/article/DGXLAS0040002\\_R00C16A3000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLAS0040002_R00C16A3000000/), 2016年3月1日。
- [9] 木通秀樹, “自動運転車の五つの社会実装課題に対する技術的なアプローチの提案”, JRI レビュー, No.41, Vol2, pp124-136, 2017。
- [10] 倉地亮, “自動車を取り巻くIoTセキュリティーとその課題”, 情報管理, Vol.60, No.10, pp.690-700, 2018。

- [11] pwc, 『コネクテッドカー・サイバーセキュリティ』, <https://www.pwc.com/jp/ja/industries/auto/connected-car.html>, 2020年10月31日閲覧.
- [12] 経済産業省, 『自動走行システムにおけるサイバーセキュリティ対策』, [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seizou/jido\\_soukou/pdf/sankou\\_002.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seizou/jido_soukou/pdf/sankou_002.pdf), 2018, 2020年10月31日閲覧.
- [13] 境野哲, “IoTへの期待と課題”, 情報の科学と技術, Vol.67, No.11, pp560-565, 2017.
- [14] 日本経済新聞, 『東電やKDDIなど 台風の停電・通信障害がほぼ復旧』, [nikkei.com/article/DGXMZ051055440W9A011C1EA1000/](http://nikkei.com/article/DGXMZ051055440W9A011C1EA1000/), 2019年10月16日.
- [15] 警察庁, 『統計表』, <http://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html>, 2020年10月31日閲覧.
- [16] 日経 XTECH, 『Uber自動運転車の人身事故で3つの技術的欠陥が判明、歩行者を認識できず』, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/nc/18/020600011/112000044/>, 2020年10月31日閲覧.
- [17] 朝日新聞デジタル, 『実証実験中の自動運転バスが接触事故、けが人なし 大津』, <https://www.asahi.com/articles/ASN997DKHN99PTJB00W.html>, 2020年9月9日.
- [18] 構造計画研究所, 『artisoc マルチエージェント・シミュレーションプラットフォーム』, <https://www.kke.co.jp/solution/theme/artisoc.html>, 2020年10月31日閲覧.
- [19] 株式会社NTTデータ数理システム, 『エージェントシミュレーション』, <https://www.msi.co.jp/s4/introduction/agent.html>, 2020年10月31日閲覧.
- [20] 横浜法律特許事務所, 『交通事故での信号サイクルの活用』, <https://yokoyalp.jp/2018/12/07/column2018120701/>, 2020年10月31日閲覧.
- [21] 畠中秀人他, “プローブデータを使用した安全走行支援サービスに関する検討”, 第6回ITSシンポジウム, pp321-326, 2007.
- [22] 高橋直希他, “交差点での様々な状況における、一般車と自動運転自動車が共存した場合の安全性の評価”, 第16回MASコンペティション, 2016.
- [23] BIGLOBE, 『交通事故における車速と停止距離を考える』, <http://www5d.biglobe.ne.jp/Jusl/Keisanki/JTSL/TeisiSyasoku.html>, 2020年11月1日閲覧.

## 付録 A. 運転の自動化における現状課題

自動運転技術やコネクテッドカーは、運転の自動化による利便性・安全性の向上を実現させる一方でさまざまな課題が存在する。

### 自動運転技術の課題

技術不足や自動運転システムの異質な挙動などが課題としてあげられる [9].

例えば、2018年3月、米アリゾナ州で自動運転車の実証実験中に女性歩行者との人身事故が発生した [16]. 自動運転車は衝突前に減速した形跡が見られず、歩行者を認識していなかったと報告されている。また2020年8月、日本で実証実験中の自動運転バスが歩道脇の柵の支柱に接触する事故が発生した [17]. これらの事故から、自動運転の技術的課題が見られる。

一方で、自動運転車が衝突される事故も発生している。米カリフォルニア州では、路肩の砂袋を検知した自動運転車が一時停止して砂袋を避けるように左方向に車両を動かしたとき、後ろから走行してきたバスの側面に接触した事故が発生した。この時、自動運転車は時速3キロ以下、バスは時速24キロであり、自動運転システムの過失であったと報告されている。

自動運転技術により安全性の向上が実現されつつある一方で、その異質な挙動による複雑性の増加が要因で発生する交通事故も考えられる。

### コネクテッドカーの課題

外部アクセスによる悪用や通信障害などが課題としてあげられる [12][13].

外部アクセスに関する事例として、研究者によると、第三者が車内システムに外部から侵入し、ハンドル操作や盗難防止アラームの無効化など自由に遠隔操作できたことが報告されている。 [11]

また、ネットワーク接続するうえで通信障害のリスクはつきものである。例えば2019年10月では、日本を襲った台風19号により関東地方を中心に1都11県で通信障害が発生した [14]. このような天災による通信障害を防ぐことは非常に困難である。また、通信障害が発生した場合、車両同士や交通インフラ設備との通信が一時的に機能なくなり、事故につながる可能性がある。

上記の課題から、今後サイバーセキュリティの強化を進めるとともに、通信障害発生時の交通安全対策についても考慮する必要がある。