Vol.2021-MPS-136 No.6
2021/12/13

マルチエージェントモデルによる多様な移動体の混在する交差点における交通ルールのPoC

兵藤 悠也[1,a)]　奥田 隆史[2,b)]

概要：交差点は自動車や通行人など多様な移動体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と分析されている．加えて，自動運転車や小型低速車など，テクノロジーを活用した新たな移動体が普及されようとしており，今後，より複雑性を増す交差点における安全性が懸念される．そこで本研究では交差点における多様な移動体の挙動をマルチエージェントモデルにより分析し，安全性の向上に有効と考えられる新たな交通ルールの PoC（Proof of Concept）をおこなう．

A PoC for New Traffic Rules in Intersections with Mixed Variety of Vehicles and Pedestrians using Multi-Agent Model

1. はじめに

近年，テクノロジーを活用した**自動運転車**や**歩道通行車**，**小型低速車**などの新たな移動体が登場しつつある [1]．歩道通行車とは，電動車椅子相当の大きさで最高速度 $6km/h$ 程度の歩道を通行する移動体であり，小型低速車とは，電動自転車相当の大きさで最高速度 $20km/h$ 程度の車道を通行する移動体である．

我が国では，交通事故を一つの社会問題と捉えており [2]，今後，安全性を向上させるためには交通事故統計に加えて新たな移動体の課題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・通行人の混在による複雑性から，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 [3]．実際に 2021 年 1 月から 9 月までで約 22 万件の交通事故が報告されており，約半数が交差点で発生している [4]．

加えて，新たな移動体の課題は交差点の複雑性・安全性に影響を与えると考えられる．例えば自動運転車に関しては，そ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 [5]，交差点の複雑性は今後さらに増すことが懸念される．実際に公道における自動運転実証実験では，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ず交通事故が発生した [6]．また，小型低速車に関しては，歩道走行中に通行人と衝突した事故が報告されており [7]，今後，歩道の危険性・複雑性が増す恐れがある．

そのため，新たな移動体の混在に対応した交通ルールが検討されている．しかし交通ルールを検討するために実際の移動体を用いて実験・検証することは多大なコストと危険が伴う．そこで，実験の前段階として PoC（Proof of Concept：概念実証）をおこなうことが効果的である [8]．

本研究の目的は交差点の安全性検証および交通ルールの PoC をおこなうことである．そのためにマルチエージェントモデルを用いてさまざまな交差点モデルを構築し，移動体の挙動を可視化しながら交通ルールの PoC をおこなう．

2. 交差点モデル

モデルの構築には，MAS（Multi-Agent Simulation）の artisoc[9] を用いる．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 [10]．

2.1 交差点形態

構築するモデルの交差点形態は 3 種類：**一般式**，**スクラ**

1 愛知県立大学 大学院 情報科学研究科
〒 480-1198 愛知県長久手市茨ケ廻間 1522-3
2 愛知県立大学 情報科学部 情報科学科
〒 480-1198 愛知県長久手市茨ケ廻間 1522-3
a) im201009@cis.aichi-pu.ac.jp
b) okuda@ist.aichi-pu.ac.jp

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

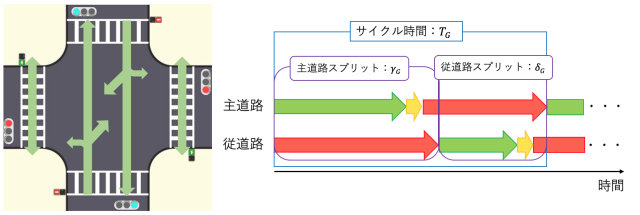


図 1　一般式交差点とその信号灯表示時間の決定
Fig. 1　General Crossing : The Cycle Time and Splits.

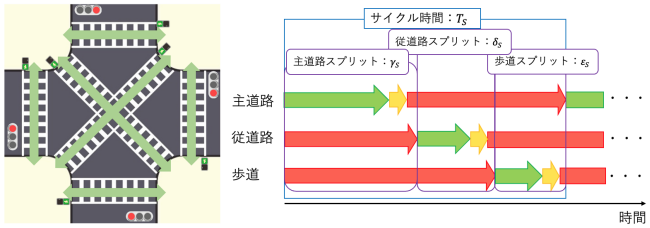


図 2　スクランブル式交差点とその信号灯表示時間の決定
Fig. 2　Scramble Crossing : The Cycle Time and Splits.

ンブル式，歩車分離式である．各交差点の面積は $x \times y$（x：横幅，y：縦幅）で表される．また，各交差点は決められた時間で信号灯を表示する定周期信号を持つものとする．定周期信号の信号灯表示時間は，「青→黄→赤」と全体の一巡する時間である**サイクル時間**と，各方向に割り当てられる**スプリット**によって決定される [11].

2.1.1　一般式交差点

本モデル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．本モデルでは一般式交差点のサイクル時間を T_G，主道路のスプリットを γ_G，従道路のスプリットを δ_G で表す（図 1）.

2.1.2　スクランブル式交差点

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通行人を同時に横断させる方式の交差点である．本モデルではスクランブル式交差点のサイクル時間を T_S，主道路のスプリットを γ_S，従道路のスプリットを δ_S，歩道のスプリットを ϵ_S で表す（図 2）.

2.1.3　歩車分離式交差点

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，通行人の斜め横断を含まない交差点である．本モデルでは歩車分離式交差点のサイクル時間を T_P，主道路のスプリットを γ_P，従道路のスプリットを δ_P，歩道のスプリットを ϵ_P で表す（図 3）.

2.2　エージェントのルール

本モデルでは自動車 3 種類と通行人 3 種類，合わせて 6 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，通行人は

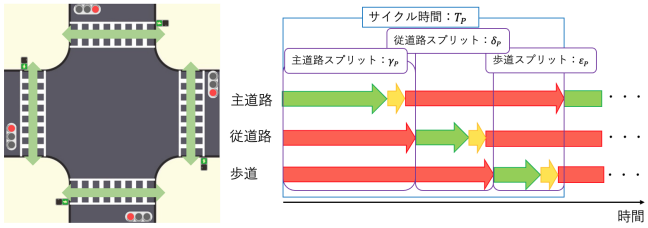


図 3　歩車分離式交差点とその信号灯表示時間の決定
Fig. 3　Pedestrian Crossing : The Cycle Time and Splits.

歩行者，**歩道通行車**，**小型低速車**の 3 種類である．

各エージェントは生成ルールと挙動ルールを持つ．生成ルールとは，エージェントを生成するための条件や生成率のことであり，挙動ルールとは自身の保持パラメータや周囲エージェントの振る舞いに応じた挙動のことである．

2.2.1　生成ルール

各エージェントは生成率に従って生成される．ただし，生成条件を持つ場合は条件を満たしているときに限る．生成される際，パラメータとして速度，視野，右左折決定パラメータ p を持つ．通行人の場合は，加えて回避方向決定パラメータ q を持つ．各パラメータには，生成されるエージェントごとにランダムな値が与えられる．

自動運転車

自動運転車の生成条件は「自方向の信号が青もしくは黄色である」かつ「交差点進入口付近で他自動車が停止していない」ことであり，生成率 $r\lambda_C$（r：自動運転車普及率，λ_C：自動四輪車到着率）で生成される．自動運転車の速度，視野はそれぞれ v_A，D_A で表される．

非自動運転車

非自動運転車の生成条件は自動運転車と同じであり，生成率 $(1-r)\lambda_C$ で生成される．非自動運転車の速度，視野はそれぞれ v_N，D_N で表される．

自動二輪車

自動二輪車の生成条件は「自方向の信号が青もしくは黄色である」ことであり，生成率 λ_B（λ_B：自動二輪車到着率）で生成される．自動二輪車の速度，視野はそれぞれ v_B，D_B で表される．

歩行者

歩行者は生成条件を持たず，生成率 λ_W（λ_W：歩行者到着率）で歩道に生成される．歩行者の速度，視野はそれぞれ v_W，D_W で表される．

歩道通行車

歩道通行車は生成条件を持たず，生成率 λ_S（λ_S：歩道通行車到着率）で歩道に生成される．歩道通行車の速度，視野はそれぞれ v_S，D_S で表される．

小型低速車

車道走行の場合，生成条件は「自方向の信号が青もしくは黄色である」ことであり，生成率 $c\lambda_L$（c：車道走行率，λ_L：自転車到着率）で車道に生成される．歩道走行の場

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

合は生成条件を持たず，生成率 $(1-c)\lambda_L$ で歩道に生成される．小型低速車の速度，視野はそれぞれ v_L，D_L で表される．

2.2.2 挙動ルール

各エージェントは 4 つの挙動ルールを持ち，自身の持つパラメータ値や周囲エージェントの振る舞いに応じた挙動をおこなう．

自動車

自動車 3 種類のエージェントは共通して右左折・直進，加速，減速，停止のルールを持つ．

(1) 右左折・直進

右左折決定パラメータ p が，右折率 p_R 以下の値を取る場合に右折，$1-p$ が左折率 p_L 以下の値を取る場合に左折，それ以外の場合は直進をおこなう．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．

(2) 加速

加速度 $a = \alpha G[m/s^2]$（α：加速係数，G：重力加速度）に従って右左折後・直進時，前方視野内に自動車や通行人を認識していない場合に加速する．

(3) 減速

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

(4) 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通行人を認識しているときに減速し，停止する．

歩行者・歩道通行車

歩行者と歩道通行車は右左折・直進，前進，回避，停止のルールを持つ．

(1) 右左折・直進

右左折決定パラメータ p が右折率 p_R を下回る場合に右折，$1-p$ が左折率 p_L を下回る場合に左折，それ以外の場合は直進をおこなう．

(2) 前進

以下の場合：

・目前の信号が青

・前方視野内に進行中の自動車・通行人がいない

に自身の速度に従って前進する．

(3) 回避

前方視野内に前進中の通行人が存在する場合に，対象との衝突を回避する．

回避する際には，まず正面を確認する．正面に通行人がいなければそのまま真っ直ぐ前進する．

正面に通行人がいる場合は，左右を確認する．左側に通行人がいて右側にいない場合は右側に回避，右側に通行人がいて左側にいない場合は左側に回避する．左右両方とも通行人がいなければ，自身の回避方向決定パラメータ q に従って回避方向を決定する（図 4）．具体的には，q が右側回避率 q_R 以下の値を取る場合に右側に回避，$1-q$ が左側回避率 q_L 以下の値を取る場合に左側に回避する．

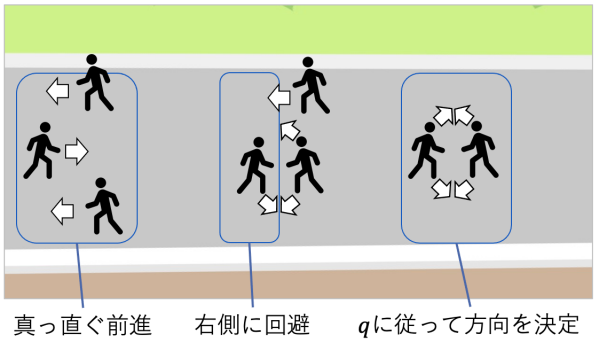


図 4 通行人の回避挙動
Fig. 4 The Avoidance of Pedestrians.

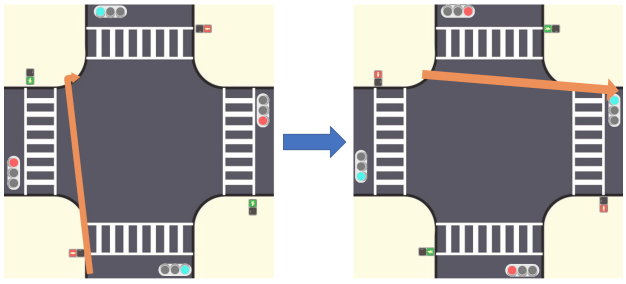


図 5 小型低速車の二段階右折
Fig. 5 Two-stage right turn of Pedestrians in the Roadway.

左右両方ともに通行人がいる場合は，通行人の少ない方向へ回避する．全方向で同じ人数の通行人がいる場合は，回避方向決定パラメータ q に従って回避方向を決定する．

(4) 停止

以下の場合：

・目前の信号が黄色または赤

・前方視野内に停止中の通行人を認識

・前方視野内に進行中の自動車を認識

に停止する．

小型低速車

小型低速車は右左折・直進，加速，回避，停止のルールを持つ．

(1) 右左折・直進

右左折決定パラメータ p が，右折率 p_R を下回る場合に右折，$1-p$ が左折率 p_L を下回る場合に左折，それ以外の場合は直進をおこなう．車道で生成された場合は，右折の際に二段階右折をおこなう（図 5）．歩道で生成された場合は，歩行者や歩道通行車と同様におこなう．

(2) 加速

加速度 $a_L = \alpha_L G[m/s^2]$（α_L：小型低速車加速係数）に従って以下の場合：

・前方視野内に進行中の自動車・通行人がいない

・発進時

に加速する．

(3) 回避

歩行者・歩道通行車と同様に，前方視野内に前進中の通行人が存在する場合に対象との衝突を回避する．

(4) 停止

減速度 $b_L = \beta_L G[m/s^2]$（β_L：小型低速車減速係数）に従って，以下の場合：

・目前の信号が赤
・前方視野内に停止中の通行人を認識
・前方視野内に進行中の自動車を認識

に停止する．

2.3 交通事故の定義

交通事故は 3 種類：車両事故，人身事故，通行人衝突事故がある．それぞれ，自動車同士の衝突，自動車と通行人の衝突，通行人同士の衝突により発生する．本モデルにおける衝突とは，モデル内の xy 座標が一致することを指す．

3. 交通ルールの PoC

3.1 検討する交通ルール

本研究ではルールなしを基準としたうえで，3 種類の交通ルール：**速度規制**，**通行規制**，**右側回避**を交差点モデルに反映させてその有効性を検証する．

ルールなし

本研究において，ルールなしとは以下の要素を含む．

(1) 通行：小型低速車が車道・歩道の両方を走行可能
(2) 速度：小型低速車の歩道走行時に速度規制なし
(3) 回避：通行人の回避方向がランダム

ルール 1：通行規制

通行規制ルールでは，小型低速車の歩道走行を禁止する．本来，小型低速車は車道のみの通行を原則としている．そこで，全ての小型低速車が本来のルールを遵守した場合にどれほどの効果があるのかを検証する．

ルール 2：速度規制

速度規制ルールでは，小型低速車の歩道走行を許す代わりに，歩道走行時の速度を規制する．警察庁ら有識者による交通ルール検討会 [1] では，歩道走行時に最大速度を $10km/h$ まで落とすことを条件に，小型低速車の歩道走行を許すルールが検討された．これは，歩行者もランニング時などに $10km/h$ で歩道を通行する場合があるからである．そこで，速度を規制した場合にどれほどの効果があるのかを検証する．

ルール 3：右側回避

右側回避ルールでは，通行人の回避行動において，回避方向の選択時にランダムではなく右側のみに限定する（**図 6**）．通行人衝突事故は，回避挙動をおこなう際に互いに衝突し合う方向へと移動してしまうことで発生する可能性が考えられる．そこで，回避する方向を右側に限定した場合にどれほどの効果があるのかを検証する．

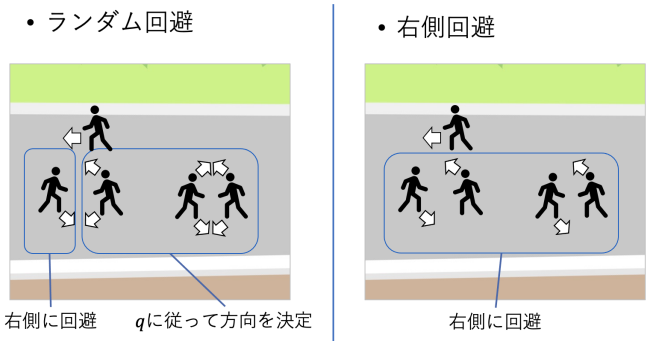


図 6 ランダム回避と右側回避
Fig. 6 The Random Avoidance and the Right-side Avoidance.

表 1 交差点パラメータ値
Table 1 Parameters for Intersections.

パラメータ名		表記	数値
横幅		x	50[m]
縦幅		y	50[m]
一般式	サイクル時間	T_G	150[s]
	主道路スプリット	γ_G	0.6
	従道路スプリット	δ_G	0.4
スクランブル式	サイクル時間	T_S	150[s]
	主道路スプリット	γ_S	0.4
	従道路スプリット	δ_S	0.3
	歩道スプリット	ϵ_S	0.3
歩車分離式	サイクル時間	T_P	150[s]
	主道路スプリット	γ_P	0.4
	従道路スプリット	δ_P	0.3
	歩道スプリット	ϵ_P	0.3

3.2 検証条件

3.2.1 交差点パラメータ値

交差点のパラメータ値を**表 1** にまとめる．

3.2.2 エージェントパラメータ値

ルールなし

ルールなし時のエージェントパラメータ値を**表 2** にまとめる．視野，加速係数，減速係数の数値は，参考文献 [12][13][14][15] を参照している．

ルール 1：通行規制

通行規制ルールは，小型低速車の歩道走行を禁止するルールである．よって，**表 3** のようにパラメータを変更する．

ルール 2：速度規制

速度規制ルールは，歩道走行時における小型低速車の最高速度を $10km/h$ に制限するルールである．最高速度 $10km/h$ とは，ランニング時の歩行者とほぼ同じ速さである．よって本モデルでは速度規制ルール下において歩道走行する小型低速車を歩行者と同様の扱いであるものとし，歩行者到着率を増加，小型低速車到着率を減少させ，小型低速車は車道走行している扱いとした．変更するパラメータを**表 4** に示す．

表 2　エージェントのパラメータ値
Table 2　Parameters for Agents.

パラメータ	表記	数値
自動運転車普及率	r	$\{0, 0.5, 0.9, 1\}$
自動四輪車到着率	λ_C	0.12
自動二輪車到着率	λ_B	0.03
歩行者到着率	λ_W	0.10
歩道通行車到着率	λ_S	0.02
車道走行率	c	0.5
小型低速車到着率	λ_L	0.03
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_B	$0-50[km/h]$
歩行者速度	v_W	$0-10[km/h]$
歩道通行車速度	v_S	$0-6[km/h]$
小型低速車速度	v_L	$0-20[km/h]$
自動運転車視野	D_A	$15[m]$
非自動運転車視野	D_N	$5-15[m]$
自動二輪車視野	D_B	$3-15[m]$
歩行者視野	D_W	$0-5[m]$
歩道通行車視野	D_S	$0-5[m]$
小型低速車視野	D_L	$0-5[m]$
右左折決定パラメータ	p	$0-1$
右折率	p_R	0.2
左折率	p_L	0.2
回避方向決定パラメータ	q	$0-1$
右側回避率	q_R	0.5
左側回避率	q_L	0.5
加速係数	α	0.2
小型低速車加速係数	α_L	0.09
減速係数	β	0.3
停止時減速係数	β'	0.5
小型低速車減速係数	β_L	0.35

表 3　ルール 1 におけるパラメータ値の変更
Table 3　Changing Parameters for Rule1.

パラメータ	表記	ルールなし		ルール 1 適用
車道走行率	c	0.5	→	1

表 4　ルール 2 におけるパラメータ値の変更
Table 4　Changing Parameters for Rule2.

パラメータ	表記	ルールなし		ルール 2 適用
歩行者到着率	λ_W	0.10	→	0.115
車道走行率	c	0.5	→	1
小型低速車到着率	λ_L	0.03	→	0.015

ルール 3：右側回避

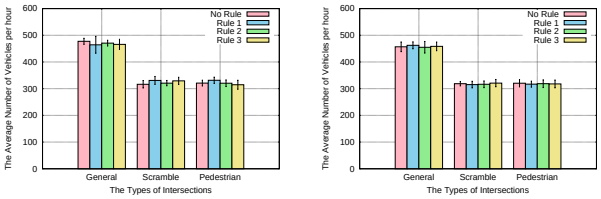
右側回避ルールは，通行人の回避方向選択を右側のみに限定するルールである．よって，**表 5** のようにパラメータを変更する．

3.3　評価指標

まず各交差点形態で，$r = \{0, 0.5, 0.9, 1\}$ の 4 通りでルールなし時の検証をおこなう．その後，各ルールを適用させて PoC をおこなう．全てのパターンで 1 時間の観測を 10 回おこない，そのときの自動車および通行人の平均交通量と車両事故率，人身事故率，通行人衝突事故率を比較・評価する．

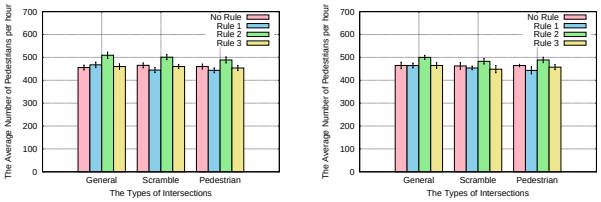
表 5　ルール 3 におけるパラメータ値の変更
Table 5　Changing Parameters for Rule3.

パラメータ	表記	ルールなし		ルール 3 適用
右側回避率	q_R	0.5	→	1
左側回避率	q_L	0.5	→	0



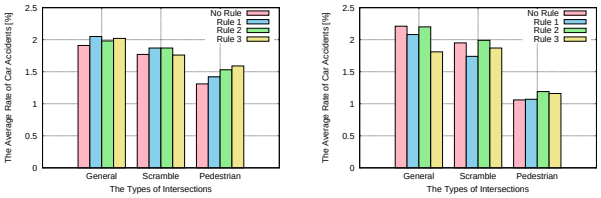
(a) $r = 0$　(b) $r = 0.5$

図 7　自動車平均交通量
Fig. 7　The Average Number of Vehicles.



(a) $r = 0$　(b) $r = 0.5$

図 8　通行人平均交通量
Fig. 8　The Average Number of Pedestrians.



(a) $r = 0$　(b) $r = 0.5$

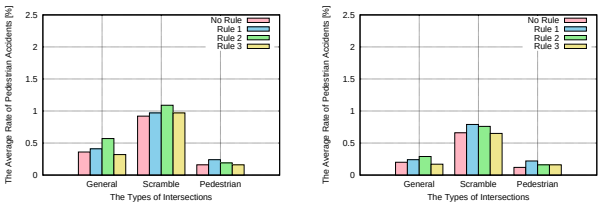
図 9　車両事故率
Fig. 9　The Average Rate of Car Accidents.

3.4　検証結果

本論文では，各交通ルール下における平均交通量，事故率の比較結果の一部を示す．$r = 0$ および $r = 0.5$ のときの自動車・通行人の平均交通量を**図 7**，**図 8** 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事故率，人身事故率，歩道事故率を**図 9**，**図 10**，**図 11** に示す．

4.　考察

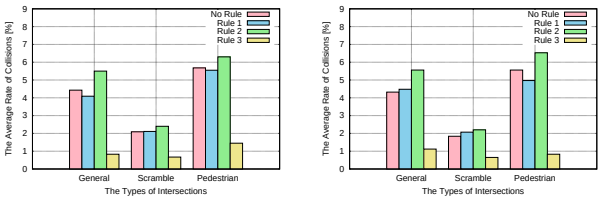
検証結果から得られた交通ルール特性についてまとめる



(a) $r = 0$　(b) $r = 0.5$

図 10　人身事故率

Fig. 10　The Average Rate of Pedestrian Accidents.



(a) $r = 0$　(b) $r = 0.5$

図 11　通行人衝突事故率

Fig. 11　The Average Rate of Cpllisions.

（詳細は発表にて述べる）.

ルール 1：通行規制

通行規制ルールの特徴として，ルールなしと比較して車両事故率が高まりやすい傾向にあることがあげられる．

車両事故率が高まりやすいことについては，小型低速車が車道のみを走行することで，自動運転車は小型低速車との事故を避けようとするあまり，異質な挙動をしてしまうためであると考えられる．特に，自動運転車の右折時では直進してくる小型低速車との事故を避けるために対向車線上で急減速・停止してしまい，かえって対向車と車両事故を引き起こすケースが見られた．

人身・通行人衝突事故率についてもルールなし時と比較して低減されるようなパターンは特に見られず，安全性の向上に有効でないことが検証結果から明らかとなった．

ルール 2：速度規制

速度規制ルールの特徴として，通行人衝突事故率が高まる傾向にあることがあげられる（図 11）.

通行人衝突率が高まりやすいのは，小型低速車が歩道を通行する際に速度が規制されていることから，歩道を通行する通行人の密度が高まりやすくなるためであると考えられる．車両・人身事故率についてもルールなし時と比較して低減されるようなパターンは特に見られず，安全性の向上に有効でないことが検証結果から明らかとなった．

ルール 3：右側回避

右側回避ルールの特徴として，大幅に通行人衝突事故率が低くなることがあげられる（図 11）.

通行人衝突事故が低くなるのは，右側回避では回避する方向が決まっており，互いに離れるように移動することができるためであると考えられる．

以上のことから，右側回避ルールは歩道の安全性を高めることが明らかとなった．

5. おわりに

本研究では新たな移動体の登場による交差点の安全性を懸念し，MAS を用いて交差点の安全性評価ならびに安全性の向上に有効な交通ルールの PoC をおこなった．

検証結果から，右側回避ルールによって歩道の安全性を大幅に高められることがわかった．一方で，通行規制や速度規制については事故率が高まる傾向も見られることがわかった．

今後の課題として，歩道の片側通行や自転車レーンの有無などさまざまな交通ルールを検証することや，車車間・路車間の通信が可能である場合の検証などがあげられる．

謝辞　本研究は日東学術振興財団の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 警察庁：多様な交通主体の交通ルール等の在り方に関する有識者検討会，中間報告書 (2021).
[2] 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 (2016).
[3] 石田敏郎：交通事故学，新潮社 (2013).
[4] 警察庁：交通事故統計，入手先 ⟨https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html⟩，（参照 2021-11-11）.
[5] 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，pp.124-136(2017).
[6] BBC NEWS：グーグルの自動運転車　バスと接触 (2016)，入手先 ⟨https://www.bbc.com/japanese/35693847⟩，（参照 2021-11-11）.
[7] 朝日新聞デジタル：電動キックボードでひき逃げ容疑、男逮捕　女性 1 人重症 (2021)，入手先 ⟨https://www.asahi.com/articles/ASP644J3VP63PTIL08Y.html⟩，（参照 2021-11-11）.
[8] Tony Stark： Navigating the Proof of Concept, Pre-SalesLife(2015).
[9] 構造計画研究所：MAS　COMMUNITY，入手先 ⟨https://mas.kke.co.jp/⟩，（参照 2021-11-11）.
[10] 山影進：人口社会構築指南，書籍工房早山 (2007).
[11] 交通工学研究会：平面交差の計画と設計　基礎編，丸善出版 (2018)
[12] 高橋直希，小久保達也：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).
[13] 高木　相，谷口正成，藤木澄義，神村伸一，鈴木伸夫：交差点における車両の挙動のモデル的解析と青信号スループット，情報処理学会論文誌，Vol.42，No.7，pp.1885-1891(2001).
[14] 畠中秀人，平沢隆之，真部泰幸，渡部　寧，井上　洋，竹中憲郎，川崎弘太：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，pp.321-326，(2007).
[15] 山中英生：高齢者・若年者による電動アシスト自転車の走行挙動特性の比較分析，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.5，pp.831-836(2011).