

視野を考慮した歩車混合交通モデルによる 無信号交差点の危険性評価

新屋敷 学¹・長谷川 裕修²

¹正会員 株式会社構造計画研究所（〒164-0012 東京都中野区本町4-38-13 日本ホルスタイン会館内）

²正会員 秋田工業高等専門学校准教授 土木・建築系（〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1番1号）

E-mail: hasegawa@akita-nct.ac.jp

人対車両の事故件数のうち、交差点での事故件数は全体の40%を占め、その半数が無信号交差点で発生している。また無信号交差点における出会い頭事故は、不十分な安全確認を誘発する見通しの悪い交差点形状などの道路環境的要因が比較的大きいことが報告されているが、見通しの悪さといった視環境を考慮した無信号交差点の危険性評価は不十分である。そこで本研究は、視野を考慮した歩車混合交通モデルをマルチエージェントシステムによって構築し、無信号交差点の危険性評価に適用した。その結果、隅切長が長いほど事故危険性は低下し、交差点付近に電柱がある場合は重大な事故になる可能性が増加することがわかった。

Key Words : *traffic simulation, multi agent system, pedestrian safety, traffic accident, non-signalized intersection*

1. はじめに

平成28年度における事故類型別・道路形状別交通事故件数によると、人対車両の事故件数のうち、交差点での事故件数は全体の40%を占め、その半数が無信号交差点で発生している¹⁾。交通事故が発生する要因は、人的要因、道路環境的要因、車両的要因の3つに大別される²⁾。特に、無信号交差点における自動車対歩行者の出会い頭事故は、不十分な安全確認を誘発する見通しの悪い交差点形状などの道路環境的要因が比較的大きいことが報告されている^{3)・4)}。

交差点形状の改善を目的とした対策必要箇所の抽出は主に、対象交差点での事故発生件数や交差点当たりの事故率などの事故データにより行われる。しかし、事故データに基づく方法には、交通事故はそもそも稀現象であるため、評価結果が網羅的ではない、交差点新設時など事前評価ができない、事故発生に至らない潜在的な危険性の評価ができない、対策効果の評価がすぐにできないなどの問題が指摘されている^{5)・6)}。また、北島ら⁷⁾の研究によると、交差点視環境が悪化する原因として、壁や電柱、自販機等が挙げられており、事故危険性は隅切り整備や電柱の移設によって減少すると報告されている。よって、隅切り状況や電柱の有無を考慮した交差点の安全性評価手法が必要であると考えられる。

このように、交差点環境や歩行者や自動車などの主体間の相互作用を考慮する必要がある現象のシミュレーションには、マルチエージェントシステム（Multi Agent Systems, 以下MASと記す）による人口社会モデルが有用である。MASでは、一定のルールに基づいて自律的に行動するエージェントを規定し、エージェント相互およびエージェントと環境の相互作用の結果創発される群としての振る舞いを観察することで、現象特性を明らかにし、課題の発見や問題解決に繋げることができる。

以上を踏まえて本研究は、無信号交差点の安全性評価を目的として、MASにより無信号交差点における歩車混合交通モデルを構築するものである。

2. シミュレーションモデルの概要

本研究で開発した歩車混合交通モデルはMASプラットフォームのartisoc 4.2上で実装した。シミュレーション空間は二次元連続空間で表現し、左下が原点、横軸がx軸、縦軸がy軸である。時間スケールは1ステップ0.1秒とした。また本研究では、歩行者・自動車モデルともに周辺状況を観測し加減速や停止といった行動をとる。この観測範囲を視野と定義する。本研究と同様に観測範囲の状況を把握し行動するモデルに、浅野ら⁸⁾の提案する先読み行動モデルや、離散選択モデル（the discrete

choice model)⁹⁾ が挙げられるが、これらのモデルは視野を妨げるものがない、視界が開けている状況を想定しているため、壁などの遮蔽物による死角を表現できず、本来観測できない壁裏の歩行者などに回避行動をとる欠点があった。これらの既往研究に対し、本研究では独自の視野アルゴリズムを用いて遮蔽物による死角を再現した点に新規性がある。

3. 歩行者モデル

(1) 歩行者エージェントの基本パラメータ

各歩行者エージェントの基本パラメータは、人体直径 D [m]、希望歩行速度 v_0 [m/sec]、視野角 θ [°]、視距離 S [m] の 4 つである。

a) 人体直径 D

一般に、歩行者をモデル化する場合には人体断面を三角形や円、楕円などで表現する。Fruin¹⁰⁾は、楕円の長軸、短軸を人体の肩幅と厚みの寸法で表現した人体楕円を提案している。本研究では、モデルを単純化するために、歩行者の体を円（人体円）で表現することとし、人体直径 D は Fruin による人体楕円の長軸である肩幅の寸法 $D = 0.60$ [m] とする。

b) 希望歩行速度 v_0

歩行者は、周囲の障害物等の影響によって加速・減速を繰り返しながら歩行している。しかし、周囲の障害物などから物理的・心理的影響を受けることがない場合には、歩行者自身の最も歩きやすい速度で歩行する。このような歩行速度を希望歩行速度 v_0 [m/s] とする。

Henderson の実測研究¹¹⁾によると、希望歩行速度は平均歩行速度 1.44 [m/s]、標準偏差 0.228 [m/s] の正規分布に従うため、本研究では、希望歩行速度 $v_0 = 1.44 + \sigma$ とする。ここで、 σ は平均 0 、標準偏差 0.228 の正規分布に従う乱数とする。

c) 視野角 θ ・視距離 S

歩行者は、前方にある一定の空間の状況により、回避行動を取ったり、歩行速度を変化させたりする。本研究ではその空間を歩行者エージェントの視野と定義する。本研究では、視距離は $S = 20$ [m]、視野角は左右確認をせずに交差点に進入する場合として $\theta = 120$ [°] と左右確認しながら進入する場合として $\theta = 180$ [°] とする（図-1）。

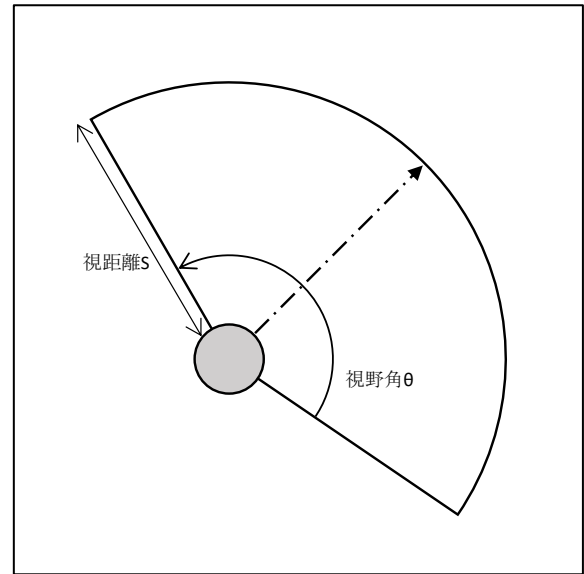


図-1 歩行者エージェントの視野

(2) 歩行者エージェント行動ルール

a) 基本行動ルール

歩行者は視野内に自動車エージェントがいない場合は、拡張一次元モデル（Extended One-dimensional Pedestrian Model, ExOPM）¹²⁾に従って加速度決定を行う。

ExOPMとは、一次元モデル（One-dimensional Pedestrian Model, OPM）¹³⁾を改良したモデルであり、藤井らによって提案された。OPMは通路や通路や部屋を高密度で移動する歩行者が列を形成する性質を利用し、この歩行者列を仮想レーンとして定義している。ExOPMも上記の構造によって歩道や横断歩道を定義している。これは以下の前提に基づいている。

- ・ 高密度環境では、歩行者は列を形成する。
- ・ 低密度環境では、列を形成しようが形成しませんが、歩行者交通量に影響を及ぼすほど歩行者の挙動に違いは現れない。

OPMが対象としていたのは避難時のきわめて高密度な歩行者挙動であるため、幅（内部に持つ仮想レーンの数で表す）の異なるリンク間を移動する場合以外では追い越し行動が考慮されない。これは通常時の道路環境のシミュレーションに適用するには過度な制約であった。そこでExOPMにおいては、歩行者エージェントが前方 N 番目の歩行者エージェントから社会的作用を受けるものとし、時刻 t におけるリンクの先頭から i 番目の歩行者の加速度は次の式によって算出される。

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = a_1 \left(v_i^0 - v_i(t) \right) - a_2 \exp \left(\frac{r - \Delta X_{i,i} - N(t)}{a_3} \right) \quad (1)$$

ここで、 a_1, a_2, a_3 はパラメータであり、本研究では山下¹³⁾と同じ値を用いる ($a_1 = 0.962$, $a_2 = 0.869$, $a_3 = 0.214$)。 v_i^0 は歩行者の希望歩行速度、 r は歩行者の体を表す円の直径、 $\Delta X_{i,i-N}(t)$ は追従歩行者との距離である。 N は歩行者が自分より何人前の歩行者に追従するかを設定するパラメータであり、本研究では藤井¹²⁾らと同様に $N=2$ を用いる。

b) 対自動車行動ルール

歩行者は視野内に自動車エージェントがいるとき、速度 $v_i(t)=0$ として、即時停止する。

(3) 歩行者エージェントの歩行位置・交通量

歩行者エージェントの歩行位置を図-2に示す。歩行者は右側歩行と左側歩行の二種類とした。

仮想レーン数は2本とし、レーン1は道路端から0.5[m]、レーン2はレーン1から0.7[m]とした。また、交差点を横断する歩行者発生率は交通量 $Q_{ped} = 20$ [人/h] に従う正規分布とした。

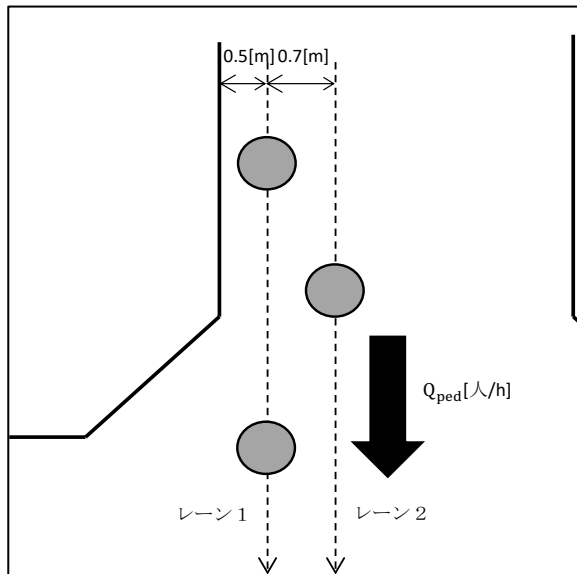


図-2 歩行位置・交通量

4. 自動車モデル

自動車エージェントは車コアエージェントと車サブエージェントの計8つのエージェントによって構成される。以降に示す行動ルールは全てコアエージェントの行動ルールであり、サブエージェントはコアエージェントとの相対座標が変わらないように移動する。

(1) 自動車エージェントの基本パラメータ

各自動車エージェントの基本パラメータは、車体幅、反応時間 t [sec]、標準速度 v_0 [m/sec]、視野角 θ [°]、視距離 S [m] の5つである。

a) 車体幅

本モデルでは、車の寸法は、長さ3.2[m]、幅1.6[m]の長方形とする(図-3)。

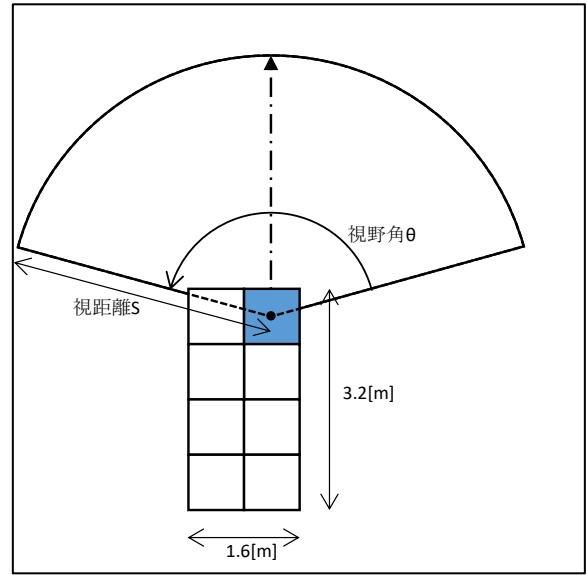


図-3 自動車エージェントの概要

b) 標準速度 V_0

本研究では、生活道路内の交差点を想定するため時速30kmである標準速度 $V_0 = 8.33$ [m/s] とする。

c) 視野角 θ ・視距離 S

自動車エージェントは視野によって周囲の状況を把握する。視野の大きさは歩行者同様、車コアエージェントの中心点から20[m]の扇型とし、扇型の中心角は120[°]とする。

(2) 自動車エージェント行動ルール

自動車は視野内に歩行者・自動車のどちらがいても反応時間をおいて Generalized force model (GFM)¹⁴⁾ によって加速度決定する。GFMとは先行車の影響を仮想的な斥力として車両に与えるモデルであり、次式で表される。

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = f_i^0(v_i(t)) + \sum_{j \neq i} f_{ij}(t) + \xi_i(t) \quad (2)$$

ここで、 $v_i(t)$ は時刻 t における車両 i の速度であり、 $f_i^0(v_i(t))$ は車両 i の希望速度までの加速力、 $f_{ij}(t)$ は車両 j から受ける斥力、 $\xi_i(t)$ は揺らぎ及びその他の影響を表す項である。本研究では $\xi_i(t)=0$ とする。

GFMは先行車の情報のみにもとづく加速度決定モデルであるが、藤井ら¹⁵⁾は道路環境を反映する仮想先行車を導入することで、あらゆる要因に対してGFMを適用できるように拡張した。本研究も同様に既往研究に従い、周囲の歩行者といった道路環境を仮想先行車とし、GFMに適用した。

GFMを用いて求められる加速度の絶対値が大きすぎ

る場合にはそれを補正する。藤井ら¹⁵⁾と同様に本研究では最大加速度は $2.0[\text{m/s}^2]$ とし、急ブレーキ時の加速度は $-8.0[\text{m/s}^2]$ とした。加速度が決定された後、それに従い速度と車両位置が更新される。

(3) 自動車エージェントの走行位置・交通量

本研究では、自動車の右左折による巻き込み事故や自動車同士の出会い頭事故などは考慮せず、交差点進入時の自動車と歩行者の出会い頭事故を再現することを目的としている。よって、自動車は交通量 $Q_{\text{veh}} = 50[\text{台/h}]$ に従う正規分布で発生し、一方向一断面から交差点に進入するものとする。図-4に自動車の進行方向が右の場合の交通条件を示す。また、自動車の走行位置は、進行方向左手側の壁際から $0.4[\text{m}]$ の位置とした。図-5に自動車の進行方向が右の場合の走行位置を示す。

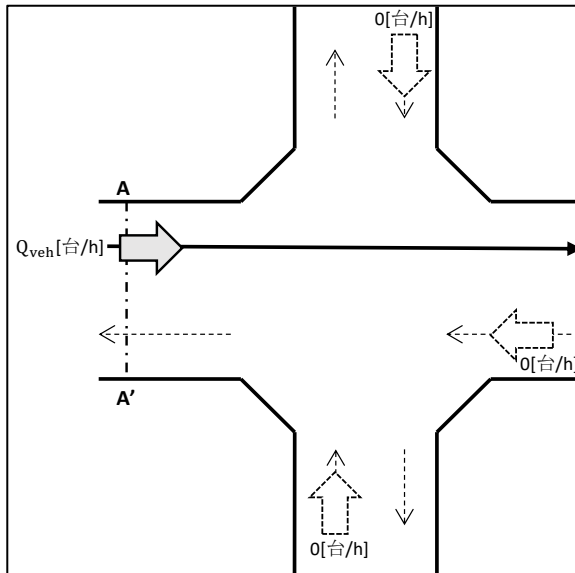


図-4 自動車の交通条件（進行方向右）

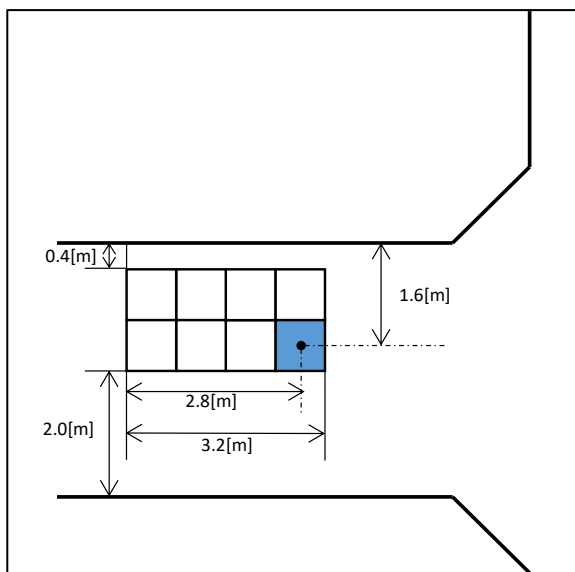


図-5 自動車の走行位置（進行方向右）

5. シミュレーション条件と評価方法

交差点形状は優先道路側の幅員を 4.0m 、非優先道路側の幅員を 3.7m 、電柱の直径を 350mm とする（図-6）。また、電柱の設置位置は壁際から 175mm 、隅切端から 200mm とした（図-7）。シミュレーション条件は、隅切長 $L=2.0, 3.0, 4.0\text{m}$ 、交差点付近の電柱の有無、および自動車の進行方向右または左である。それぞれの条件で、シミュレーション内で24時間の実験をそれぞれ10回ずつ試行した。

事故の危険性は、1)自動車エージェントのヒヤリハット回数、2)歩行者と自動車の接触事故発生件数、3)接触事故発生時の自動車の速度、それぞれ10回の試行結果の平均によって評価する。ヒヤリハットの定義については、平松¹⁶⁾らと同様に、自動車のブレーキ時の加速度が $0.5G$ 以上となる急ブレーキを検出し、かつその中で衝突可能性のある相手がいたもの、と定義した。

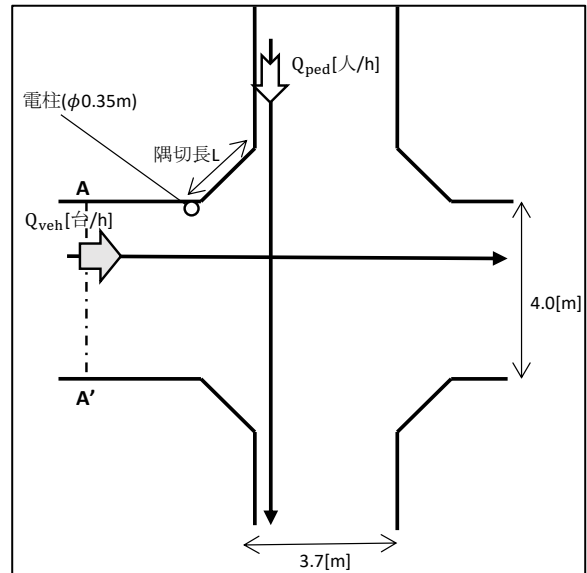


図-6 交差点形状

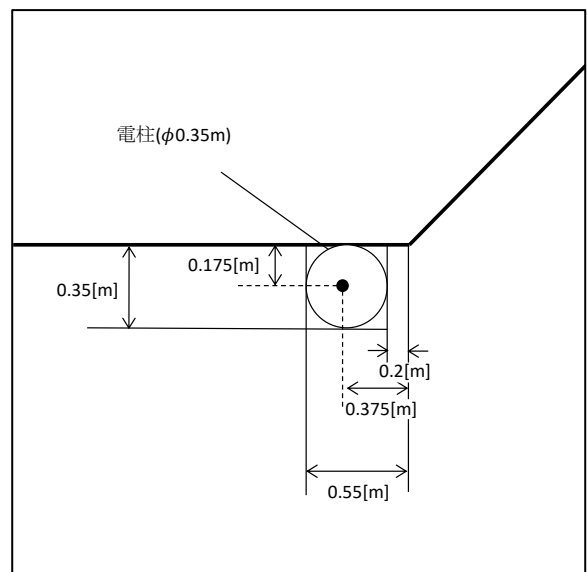


図-7 電柱の位置

表-1 シミュレーション結果

計算条件				視野角 120°			視野角 180°		
電柱	歩行位置	車両方向	隅切長 [m]	ヒヤリハット [回/day]	事故件数 [回/day]	事故速度 [km/h]	ヒヤリハット数 [回/day]	事故件数 [回/day]	事故速度 [km/h]
有	右	右	2.0	12.2	3.9	19.6	8.7	1.0	14.8
			3.0	13.0	3.1	18.6	5.7	0.0	-
			4.0	10.9	3.4	13.5	5.3	0.0	-
		左	2.0	1.8	0.0	-	0.0	0.0	-
			3.0	0.7	0.0	-	0.0	0.0	-
			4.0	0.3	0.0	-	0.0	0.0	-
	左	右	2.0	11.0	2.8	9.4	1.8	0.0	-
			3.0	11.4	1.0	7.7	0.8	0.0	-
			4.0	12.5	0.3	1.8	0.0	0.0	0.0
		左	2.0	14.8	1.1	5.0	7.5	0.0	-
			3.0	11.0	0.3	13.0	8.4	0.0	-
			4.0	10.6	0.0	-	7.5	0.0	0.0
無	右	右	2.0	10.3	3.1	16.3	2.8	0.0	-
			3.0	9.3	1.9	12.0	0.1	0.0	-
			4.0	9.5	0.7	8.0	0.0	0.0	-
		左	2.0	1.6	0.1	5.8	0.1	0.0	-
			3.0	1.0	0.1	4.6	0.0	0.0	-
			4.0	0.2	0.0	-	0.0	0.0	-
	左	右	2.0	9.6	0.5	9.3	0.0	0.0	-
			3.0	8.2	0.0	-	0.0	0.0	-
			4.0	8.7	0.0	-	0.0	0.0	-
		左	2.0	13.4	1.1	5.1	8.5	0.0	-
			3.0	13.6	0.2	3.1	8.8	0.0	-
			4.0	12.0	0.0	-	7.2	0.0	-

表-2 道路環境別のシミュレーション結果

計算条件		視野角 120°			視野角 180°		
電柱	隅切長 [m]	ヒヤリハット数 [回/day]	事故件数 [回/day]	事故速度 [km/h]	ヒヤリハット数 [回/day]	事故件数 [回/day]	事故速度 [km/h]
有	2.0	10.0	2.0	11.4	4.5	0.3	14.8
	3.0	9.0	1.1	13.1	3.7	0.0	-
	4.0	8.6	0.9	7.7	3.2	0.0	0.0
無	2.0	8.7	1.2	9.1	2.9	0.0	-
	3.0	8.0	0.6	6.6	2.2	0.0	-
	4.0	7.6	0.2	8.0	1.8	0.0	-

6. 結果と考察

表-1にシミュレーションを10回試行した平均の結果を示す。また、表-2は表-1の結果を道路環境別に平均をとったものである。表-1より以下のことがわかる。

- ・ 左右確認がない場合（視野角120°）の右側歩行時は右方向からの車両によるヒヤリハット数・事故件数がほとんどであり、左方向からの車両によるヒヤ

リハット数・事故件数は稀である

- ・ 左右確認がない場合の左側歩行時は車両方向の違いによるヒヤリハット数・事故件数の差が少ない
- ・ 左側歩行時は、右側歩行時に比べてヒヤリハット数が多い
- ・ 右側歩行時は、左側歩行時に比べて事故件数が多い

表-2より、以下のことがわかる。

- ・ 隅切長が長いほど、ヒヤリハット数・事故件数は減少し、事故速度も概ね減少した

- ・ 電柱がない場合は、電柱がある場合に比べてヒヤリハット数・事故件数・事故速度ともに減少した
- ・ 左右確認がある場合（視野角180°）は、左右確認がない場合にくらべてヒヤリハット数・事故件数は減少したが、事故速度には差が見られなかった

以上より、本研究により明らかになったことは以下の3点である。

- 1) 隅切長・電柱の有無という道路環境要因は事故の頻度および事故の重大性に作用する
- 2) 歩行者の左右確認は事故の頻度には大きく作用するが、事故の重大性には作用しない
- 3) 歩行者が左右確認を行ったとしても、道路環境要因によっては事故にあう可能性がある

7. まとめ

本研究は、交差点の安全性評価を目的として、MASにより無信号交差点における歩車混合交通モデルを構築した。

シミュレーション結果より、隅切長が長いほど事故危険性は低下することがわかった。また、交差点付近に電柱がある場合、ないとときと比較して接触事故時の自動車の速度が大きく、重大な事故になる可能性が増加することがわかった。

以上より、隅切長や電柱の有無が危険性に影響することが明らかになった。よって、交差点新設時には隅切長を十分に確保し、視界を妨げる可能性のある電柱を設置しないことが望ましいといえる。

今後の課題として、今回構築した歩車混合交通モデルを使用し、実際の交差点でのヒヤリハット・事故データとシミュレーション結果を比較し、本モデルの再現性を定量的に検証することなどがあげられる。

今後の展望として、本研究で提案した視野アルゴリズムは死角を表現可能なため、例えば建物内での歩行者の避難シミュレーションにも適用が可能であり、大きな発展可能性を有している。

謝辞

本研究は株式会社構造計画研究所よりartisoc 4.2 standardのアカデミックライセンスの提供を受け実施した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：平成28年中の交通事故発生状況，2017
- 2) 澤喜司郎：交通安全論概説（改訂版），成山堂書店，pp.66-70，2002
- 3) 交通事故総合分析センター：道路環境からみた出

会い頭事故，イタルダ・インフォメーション，No.69，2007.

- 4) Mori, M., Horino, S., Kitajima S., Ueyama, M., Ebara, T. and Tani, T: Ergonomics solution for crossing collisions based on a field assessment of the visual environment at urban intersections in Japan, *Applied Ergonomics*, Vol. 39, pp. 697-709, 2008
- 5) 中村英樹，浅野美帆，大口敬，浜岡秀勝，鈴木一史：効果的な交通安全対策立案のための信号交差点安全性定量評価シミュレーション手法の開発，平成21年度タカタ財団助成研究論文集，ISSN 2185-8950，2010
- 6) 高島一彦，古池弘隆，森本章倫：交差点における自動車の走行特性からみた交通事故の潜在的危険性に関する分析，土木学会論文集，No. 716/IV-57，pp.39-52，2002
- 7) 北島創，種本大悟，望月敬啓，上山勝，森みどり，堀野定雄：視環境から見た交差点の出合頭事故危険性の評価，人間工学，Vol.41，特別号，pp.166-167，2005
- 8) 浅野美帆，桑原雅夫：先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション，生産研究，59巻，3号，pp.184-187，2007
- 9) Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M.: Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B*, Volume 40, Issue 8, pp.667-687, 2006
- 10) John J. Fruin（著），長島正充（訳）：歩行者の空間—理論とデザイナー—，鹿島出版会，1977
- 11) 兼田敏之：artisocで始める歩行者エージェントシミュレーション 原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまで，構造計画研究所，2010
- 12) 藤井秀樹，西岡智彦，城所直樹，内田英明，吉村忍：拡張1次元歩行者モデルの構築と交差点における歩車混合交通シミュレーション，情報処理学会論文誌，Vol.59，No.3，pp.874-881，2018
- 13) 山下倫央，副田俊介，大西正輝，依田育士，野田五十樹：一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用，情報処理学会論文誌，Vol.53，No.7，pp.1732-1744，2012
- 14) Helbing, D. and Tilch, B.: Generalized force model of traffic dynamics, *Physical Review E*, Vol. 58, pp. 133-138, 1998
- 15) 藤井秀樹，吉村忍，高野悠哉：マルチエージェント交通流シミュレーションにおける交通事故モデリング，人工知能学会論文誌，Vol.26，No.1，pp.42-49，2011
- 16) 平松真知子，寸田剛司，小竹元基，鎌田実：一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究，自動車技術会論文集，Vol.45，No.4，pp.717-722，2014

A STUDY ON RISK EVALUATION AT NON-SIGNALIZED INTERSECTION
USING MIXED TRAFFIC MODEL OF CARS AND PEDESTRIANS
CONSIDERING AGENTS' FIELD OF VIEW

Manabu SHINYASHIKI and Hironobu HASEGAWA