

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

藤井 秀樹^{1,a)} 西岡 智彦^{1,†1} 城所 直樹^{1,b)} 内田 英明^{1,c)} 吉村 忍^{1,d)}

受付日 2017年6月7日, 採録日 2017年12月8日

概要: 個別の交通モードを扱う大規模交通流シミュレーションが進展する一方で, 混合交通を対象とするシミュレーションモデルは少ない. 本研究では大規模かつ微視的な混合交通シミュレーションに適用可能な拡張1次元歩行者モデルを提案する. 既存の追従モデルと異なり, 直前方の歩行者からの作用を無視することで歩行者の追い越し挙動を考慮する. 群衆シミュレーションの結果から, 広く用いられる Social Force Model と同程度の精度を持ちながら提案モデルが高速に計算可能であることを明らかにした. また混合交通シミュレーションにより歩車間の相互作用を適切に再現できることを示した.

キーワード: マルチエージェントシステム, 群衆シミュレーション, 歩行者モデル, 混合交通

Development of Extended One-dimensional Pedestrian Model and Mixed Traffic Simulation of Cars and Pedestrians at Intersection

HIDEKI FUJII^{1,a)} TOMOHIKO NISHIOKA^{1,†1} NAOKI KIDOKORO^{1,b)} HIDEAKI UCHIDA^{1,c)}
SHINOBU YOSHIMURA^{1,d)}

Received: June 7, 2017, Accepted: December 8, 2017

Abstract: While large-scale traffic simulations dealing with an individual traffic mode have been progressed, there are relatively few simulation models targeting mixed traffic. In this research, the authors proposed an Extended One-dimensional Pedestrian Model that is applicable to large-scale microscopic mixed traffic simulation. Overtaking behaviors of pedestrians are considered by ignoring the effect from the immediately preceding pedestrian, unlike existing following models. It was quantitatively verified by crowd simulation that the proposed model can be computed at high speed with the almost same accuracy as the Social Force Model. Furthermore it was shown that the interactions between cars and pedestrians can be reproduced adequately by mixed traffic simulation.

Keywords: multi-agent system, crowd simulation, pedestrian model, mixed traffic

1. はじめに

モータリゼーションの進展とともに, 特に地方部における公共交通機関の衰退が続くが, このような事態は移動権の格差の拡大や高齢ドライバの事故率の増加などの要因

となっているため, 公共交通の維持・活性化のニーズが高まっている [1].

公共交通の利用促進にむけて重点的に取り組まれている施策の1つが交通結節点の改善である. 自家用自動車交通, 歩行者交通, 公共交通など多様な交通手段が集まる交通結節点において混雑緩和や乗り換えなどの利便性の向上などが考えられているが, リスクやコストの問題から事前評価が重要となる [2]. 交通結節点でなくても, たとえば花火大会やスポーツ大会, 展示会などの大規模なイベント会場周辺においては, 数多くの歩行者とそれを輸送するための交通機関の相互作用について輸送の安定性・効率性や安

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
^{†1} 現在, 東京ガス株式会社
Presently with Tokyo Gas Co. Ltd.
^{a)} fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp
^{b)} n.kidokoro@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp
^{c)} uchida@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp
^{d)} yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp

全性の観点から検討する必要がある。その際、イベントの規模や会場の立地条件に大きく依存するが、たとえば1万人から10万人程度の参加者を100台から1,000台程度の車両（シャトルバスやタクシー、自家用車など）で輸送すること、イベント会場および最寄りの乗降場・駐車場を含む地域では乗降場・駐車場と会場とを行き来する参加者（歩行者）と上記の車両が混在し相互作用することを想定しなければならない。たとえば2015年秋に和歌山県で開催された国民体育大会、全国障害者スポーツ大会の開会式の参加者はそれぞれ約21,000人、15,000人であった[3]。参加者を輸送するシャトルバス乗降場は会場から最大で20分離れた位置に設置されており[4], [5], これが分析対象の空間スケールを規定する。

また、災害時の適切な避難計画を策定する目的においても自動車交通と歩行者交通を同時に考慮することの重要性が指摘されている[6]。

交通施策の事前評価手法として交通流シミュレーションが発展してきているものの、個々の交通手段を扱ったシミュレータが多い一方で、混合交通に対応したものは比較的少ない状況にある。著者らは以前より交通流（自動車交通流）シミュレータを研究開発しており[7], [8], これとの組合せによって都市域の歩車混合交通シミュレーションを実現するため、本研究では大規模シミュレーションに適した新たな歩行者シミュレーションモデルを提案し、歩車間の相互作用について検証する。

2. 既往研究

2.1 歩行者のシミュレーションモデル

歩行者のシミュレーションモデルは巨視的（マクロスコピック）モデルと微視的（ミクロスコピック）モデルに大別される。巨視的モデルは群衆の動きを流体などの連続体に近似するものであり、微視的モデルは個々の歩行者を粒子として扱うものである。異なる目的、意図、知識や個性を持つ多くの人間からなる複雑系として交通現象をとらえる場合には微視的モデルが適している。微視的モデルの構築にはしばしばマルチエージェントシステムが採用される。

微視的モデルはシミュレーションにおける道路空間の扱い方によってさらに細かく分類することができる。たとえばSocial Force Model (SFM) [9] やCentrifugal-Force-based Models (CFM) [10], [11] では歩行者が2次元連続空間内を歩行するようモデル化している。歩行者の先読み行動[12]や歩幅適応メカニズム[13]の導入により改善がなされるなど、SFMやCFMは多くの研究の基盤となっている。またDiscrete Choice Model (DCM) [14]も2次元連続空間における歩行者シミュレーションモデルの一種であるが、歩行者の行動選択が離散化されている。1次元歩行者モデル(One-dimensional Pedestrian Model: OPM) [15], [16]はSFMの空間を1次元に圧縮した形式となっており、高

速化が達成され、避難シミュレーションに適用されている。

これらに対して空間をセルに離散化するアプローチもなされており、Floor Field Model [17] やMuramatsuら[18], 田島ら[19]の格子気体モデルなどは2次元離散空間モデルと分類することができる。

2.2 混合交通のシミュレーションモデル

続いて、本節では歩行者と自動車の相互作用に着目したシミュレーションの研究例をあげる。

Zengら[20]は横断歩道上の歩行者と自動車の相互作用について、歩行者と自動車との交錯を最小化するためにSFMに新たな外力項を追加した。Anvariら[21]はSFMを自動車交通流用に拡張したうえで、SFMベースの歩車混合交通シミュレーションモデルを提案した。Huynhら[22]もSFMをオートバイ、乗用車、バスのモデル化に適用し、信号交差点の混合交通シミュレーションを実現した。SFMを拡張して自動車のモデルを構築することで、同じくSFMでモデル化された歩行者との連成は比較的容易に実現可能であるが、既存の自動車交通流シミュレータの多くは1次元連続空間のモデルを採用しており、これらを再利用することはできない。加えて2次元のシミュレーションは一般的に1次元のシミュレーションよりも計算負荷が高く、大規模化は困難である。

Crocianiら[23]は階層的な道路環境を用意し、1次元の車両追従モデルと2次元のFloor Field Modelを重ね合わせる手法を提案した。自動車、歩行者はそれぞれのモデルに適合するよう構築された下位の道路環境に配置され、全体の交通状況は上位の道路環境から通知されるものとした。

Doblerら[24]はキューモデルを用いた大規模自動車交通流シミュレータであるMATSim [25]に混合交通シミュレーションモジュールを統合した。DoblerらのアプローチはMATSimが持つ道路環境の一部をキューから2次元連続空間に置き換えるものであり、2次元連続空間における各移動主体の行動ルールにはSFMに基づく。

Krajzewiczら[26]はオープンソースのマルチエージェント自動車交通流シミュレータとして広く用いられているSUMO [27]に歩行者エージェントと自転車エージェントを追加した。歩行者と自転車の移動軌跡は1次元に制約され、行動ルールはシンプルなものであったが、相互作用の効果が定性的に検証されている。

著者らはこれまでにSFMやDCMを拡張した歩行者モデルをオープンソース自動車交通流シミュレータADVENTURE_Mates [7], [8]に追加することで混合交通シミュレーションを実現してきたが[28], [29], [30], いずれも2次元連続空間の歩行者モデルであり、大規模シミュレーションを実施するためには歩行者モデルの計算量が課題として残っていた。

3. 拡張1次元歩行者モデルを用いた群衆シミュレーション

3.1 拡張1次元歩行者モデル

大規模かつ微視的なマルチエージェント群衆シミュレーションを実現するため、本研究では計算負荷の低い1次元連続空間モデルを採用することとした。既存のOPM [15], [16]では、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。歩行空間はネットワーク構造で表現され、リンクは複数の仮想レーンによって構成される。本研究で提案する拡張1次元歩行者モデル (Extended One-dimensional Pedestrian Model: ExOPM) も上記の構造によって歩道や横断歩道を定義する。これは以下の前提に基づく。

- 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。

既存の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歩行者の追い越しが考慮されない。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る。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の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 $\ddot{X}_i(t)$ を次の式 (1) で算出することとした。

$$\ddot{X}_i(t) = a_1 \left(v_i^0 - \dot{X}_i(t) \right) - a_2 \exp \left(\frac{r - (X_{i-N}(t) - X_i(t))}{a_3} \right) \quad (1)$$

ここで a_1, a_2, a_3 はパラメータであり、OPMと同じ値 [15] 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_i は歩行者の体を表す円の直径である。 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る。

エージェントが直前方よりさらに前方のエージェントの情報を参照するというアイデアは、自動車交通流の場合では連続空間モデル (たとえば文献 [31], [32] など)、離散空間モデル (たとえば文献 [33], [34] など) のどちらにおいてもすでに提案されているが、それらと比べても本研究で提案するExOPMは直前方のエージェントの情報を利用せず離れたエージェントとのみ相互作用するという点で特徴的である。

例として、図1のような仮想レーン3本から構成されるリンク L_m の先頭から4番目、仮想レーン l_2 の先頭から2番目の歩行者の挙動について説明する。なおここではリンク L_m 内の仮想レーン l_n における先頭から j 番目の歩行者の位置を $x_j(m, n, t)$ と表記する。

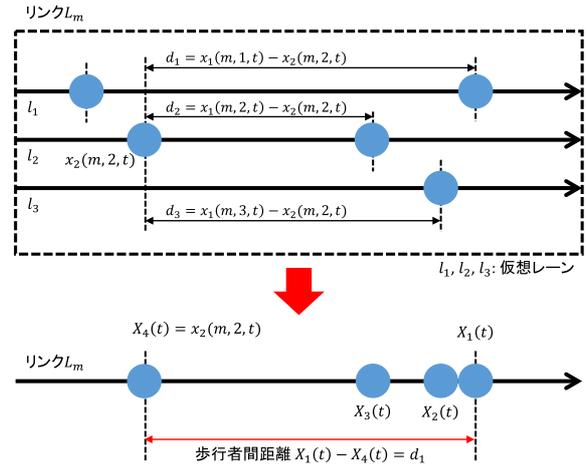


図1 ExOPMにおける追従関係
Fig. 1 Following relation in ExOPM.

いま、位置 $x_2(m, 2, t)$ にいる歩行者は同一のリンク L_m に含まれる仮想レーン l_1, l_2, l_3 の前方を確認し、各レーンで自身の直前方に存在する歩行者との距離 d_1, d_2, d_3 を取得する。ここで $N = 3$ として歩行者が3人前方の歩行者から社会的作用を受けるものとする、3番目に短いのは d_1 であるため、歩行者は次のステップで仮想レーン l_1 に移り、距離 d_1 を用いて加速度を決定する。これは、OPMにおいて幅の異なるリンク間を移動する場合と類似したルールである。

上記を仮想レーンでなくリンクでの位置関係をもとに考えると、歩行者間距離は図1下部のように $X_1(t) - X_4(t)$ となり、リンク上の自身の位置から前方 $N (= 3)$ 番目の歩行者との距離をもとに加速度を算出する。この例において前方1番目、2番目の歩行者とは相互作用しないため、1次元のモデルでありながら歩行者の追い越し挙動を表現できる。なおこの加速度決定法においてリンク上の歩行者がどの仮想レーンに存在するかという情報は実際には意味をなさないが、あまりに離れた仮想レーンの情報を参照することを避けるためには、リンクを構成する仮想レーン数は追従対象の先行歩行者を選択するパラメータ N と等しくすればよい。すなわち、概念的には N 本の仮想レーンを集約した歩行空間としてリンクを再定義する。 N がリンク中の仮想レーン数に等しいと考えた場合、その値は歩道の幅を超えない範囲で任意に設定できる。たとえば全体で仮想レーン8本の幅のある歩道をシミュレーション対象とする場合、 $N = 2$ とし1リンクあたり2本の仮想レーンを持つリンク4本を定義することも、 $N = 4$ とし1リンクあたり4本の仮想レーンを持つリンク2本を定義することも許容する。 N の与え方によって挙動が異なるが、これに関する分析は後ほど行う。また一般には歩道は双方向の通行が可能であるため、現実の道路環境に適用する場合にはそれぞれの方向の歩行者交通量を考慮して N を配分する必要がある。

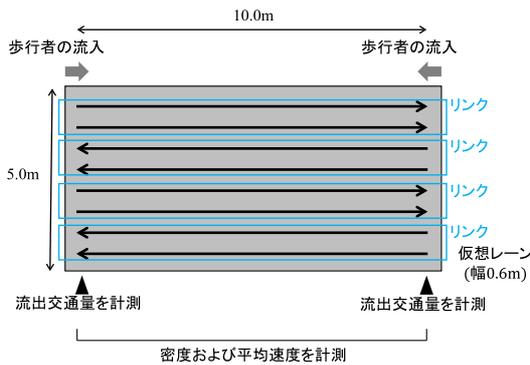


図 2 群衆シミュレーションの実験環境

Fig. 2 Simulation environment for crowd simulation.

3.2 モデルの基本性能の検証

ExOPM は前方歩行者の影響を受けて自身の加速度を決定する追従タイプの歩行モデルを採用しており、歩行者交通量、歩行者密度、平均歩行速度の関係は外生的に与えられるのではなく、歩行挙動に影響を及ぼす個々の要因を合わせた結果として算出される。そのため、シミュレーションによって得られた各値が妥当であるかどうかを明らかにする必要がある。

図 2 に示す歩道*1を用意し、領域の両端における歩行者の発生確率を 1 [%/ステップ] から 100 [%/ステップ] (1 ステップは 0.1 [sec]) まで変えながら、発生と反対の端から流出する歩行者数、および歩道領域中に存在する歩行者数およびその速度を計測することで、歩行者の単位長さあたり交通量 Q [人/m/sec]、密度 K [人/m²]、平均速度 V [m/sec] を算出した。このとき、歩行者の希望歩行速度は平均 1.34 [m/sec] で与え、歩行者を表す円の直径は $r=0.6$ [m] とした。追従対象の先行歩行者を選択するパラメータは $N=2$ と定めた。比較対象として、2次元連続空間モデルである SFM [9]、既存の 1次元連続空間モデルである OPM [15] についても同様に計測を行った。OPM, ExOPM では同方向の仮想レーンをひとまとめにしてリンクを構成する。なお本研究において着目するのはエージェントどうしが相互作用する微視的モデルであるので、Floor Field Model や前方歩行者密度を参照してエージェントの歩行速度を決定するアルゴリズム [35] などは比較対象としない。

結果を図 3 に示す。図 3(a) は平均速度 V と密度 K の関係、(b) は平均速度 V と交通量 Q の関係、(c) は交通量 Q と密度 K の関係である。参考として、Rastogi らが現実の群衆の観測結果から導出した経験式 [36] *2 も示す。追い越しを考慮できない OPM では、低速の歩行者の存在により

*1 隣りあったリンクは相互に干渉しないため、実際には各リンクに含まれる仮想レーン数さえ図 2 と等しければ、歩道空間におけるリンクの左右関係は意味を持たない。

*2 Rastogi らは複数の地点における観測結果をもとに複数の経験式を求めたが、ここでは歩行者の希望歩行速度が本研究と同じく平均 1.34 [m/sec] であるものを用いた。

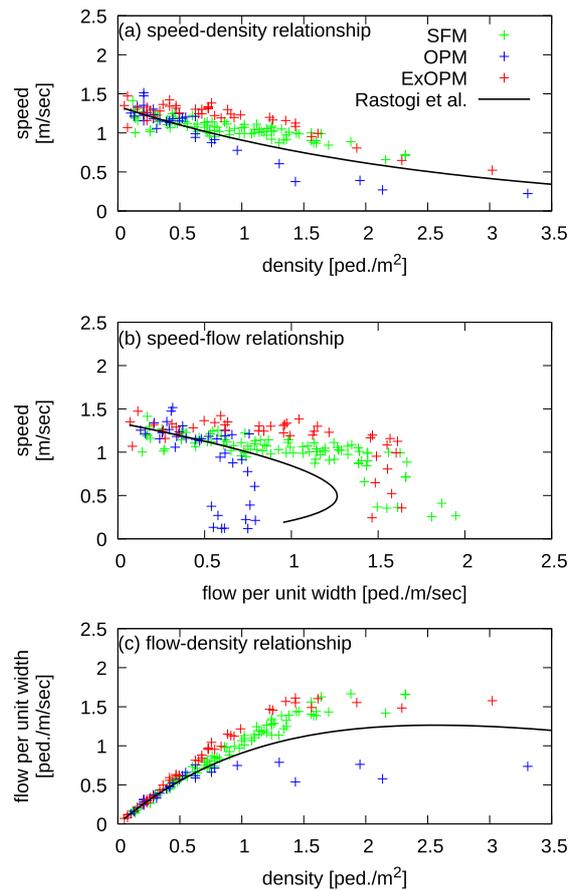


図 3 歩行者交通流の基本図

Fig. 3 Fundamental diagram of pedestrian traffic.

現実よりも低密度で渋滞状況となっていることが分かる。次章で述べるような混合交通シミュレーションへの OPM の適用を仮定した場合、歩行者が現実よりも低速で長い時間をかけて横断歩道をわたることとなり、状況によっては自動車交通に対する抵抗を過大に評価してしまうおそれがある。

一方で ExOPM は SFM と同等の精度を持っているといえる。ただし本実験は明確なボトルネックを持たない歩道を対象としているため、この結果のみで臨界密度を超えた渋滞流の再現性を議論することには注意が必要である。また ExOPM のパラメータとして OPM と同一の値を利用しており、これを改めて検討することでさらに精度が高まる可能性はあるが、今後の課題とする。

3.3 計算時間の比較

3.2 節のシナリオについて、シミュレーション内の各時刻ステップにおけるエージェント総数とエージェントの処理に要した計算時間をそれぞれのモデルで計測した。結果を図 4 に示す。図 4(a) が SFM, OPM, ExOPM の比較結果、(b) が OPM, ExOPM のみを抽出した比較結果である。なおシミュレーションには CPU: Intel Core i7 (2.93 GHz)、メモリ: 4 GB の計算機を用いた。

2次元モデルである SFM では、 n 人の歩行者がそれぞれ他の歩行者 $n - 1$ 人から受ける影響を計算するため、計算量は理論的には $O(n^2)$ である。リンクを小領域に分割することで探索時間を節約可能であるが、特に高密度の環境において計算負荷が高くなる傾向は変わらない。1次元モデルである OPM では n 人の歩行者それぞれについて、その直前方の歩行者 1 人のみから受ける影響を計算する。このとき、仮想レーンの始点からの距離順でソートされたリストを用いることで直前方の歩行者には定数時間でアクセスできるため、計算量は $O(n)$ に抑えられる。ExOPM でも同様のリストを利用できるが、OPM と異なり追い越しが発生するため、毎ステップでリストをソートしなおす必要がある。そのため OPM より余計な計算時間がかかるが、追い越しの頻度はエージェント数と比較して十分に小さく、結果的には OPM に大きく変わらない計算時間となる。

3.4 パラメータ N に関する考察

本研究で提案する ExOPM は、追従対象の先行歩行者を選択するためのパラメータ N を持つが、これは歩道の幅を超えない限り任意に設定することができる。ただしあまりに大きな N を与えることは、仮想レーンによってモ

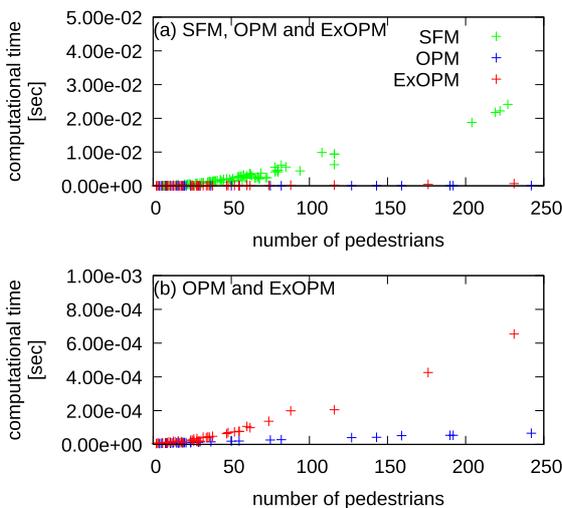


図 4 各モデルの計算時間

Fig. 4 Computational time of each model.

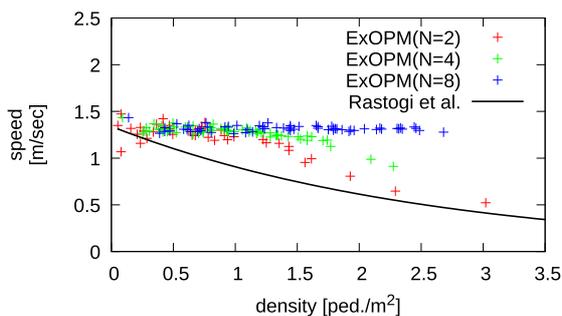


図 5 パラメータ N に関する感度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis about parameter N .

デル化された歩行者列を大きく逸脱した追い越しを許容することを意味する。本節では 3.2 節のシナリオについて、ExOPM のパラメータを $N=2, 4, 8$ と変えながらシミュレーションを実施し、その影響を評価した。なお、 $N=1$ である ExOPM は OPM と等価である。

得られた平均速度 V と密度 K の関係を図 5 に示す。 N が大きくなるにつれ、密度の増加にともなう平均速度の低下が緩やかになり、経験式との誤差が大きくなる。精度の観点からは $N=2$ を利用すればよいといえる。すなわち、1ステップあたり最大 1 人の低速歩行者を追い越せるような設定でよい。

4. 混合交通シミュレーション

4.1 混合交通のモデル化

本章では、3 章で提案した ExOPM を用いた歩車混合交通シミュレーションについて述べる。

シミュレーションに用いる自動車は連続 1 次元空間の微視的モデルによってモデル化され、車線を走行する車両は先行車との車間距離や速度差に基づいて挙動を決定する。加速度決定アルゴリズムには追従モデルの 1 種である Generalized Force Model [37] を採用した。

自動車エージェントは車線からなる車道を走行、歩行者エージェントは歩道および横断歩道を歩行するものとし、横断歩道を相互作用領域と定めた。エージェント間の相互認知の模式図を図 6 に示す。自動車エージェントの予定走行車線上に横断歩道が存在し、かつ歩行者が横断中である場合には、横断歩道手前で停止できるような減速度を車両に与える。一方で歩行者は横断歩道に接近すると自分が横断歩道をわたりきるまでに必要な時間を予測し、それまでに自動車横断歩道に到着しないと判断できた場合に横断を開始する。

4.2 横断歩道における相互作用の検証

混合交通シミュレーションモデルのベンチマーク問題として、左折自動車交通に対する歩行者交通の影響を評価する。信号交差点において直進車が歩行者から影響を受ける

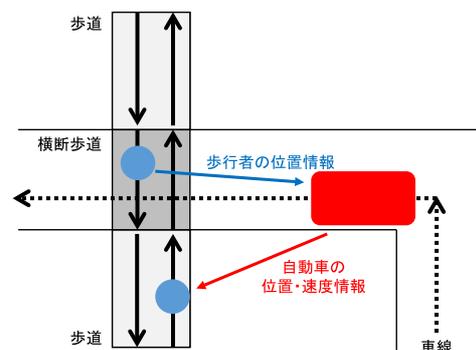


図 6 歩車間の相互認知の模式図

Fig. 6 Conceptual image of pedestrian-car mutual perception.

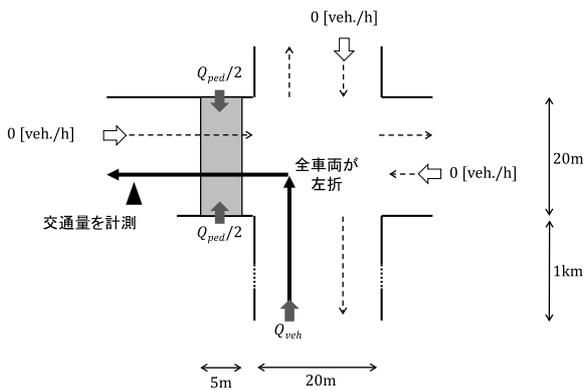


図 7 混合交通シミュレーションの検証環境

Fig. 7 Verification environment for mixed traffic simulation.

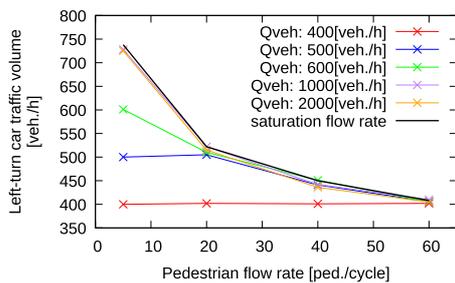


図 8 歩行者交通流と左折車の交通量

Fig. 8 Pedestrian flow and left-turn car traffic volume.

ことはほとんどなく、右折車は対向車線の直進車との相互作用の影響が大きい場合があり歩行者の影響のみを抽出できないため、左折車に着目した。図 7 のような横断歩道付き交差点を用意し、1つの端点から流入する車両の交通量を $Q_{veh}=400, 500, 600, 1,000, 2,000$ [台/h] とし、それらがすべて交差点を左折するものと定めた。横断歩道をわたる歩行者の交通量を $Q_{ped}=5, 20, 40, 60$ [人/サイクル] とし、シミュレーションを実行して左折車の交通量を計測した。信号現示は自動車用信号が青 30 秒・赤 30 秒、歩行者用信号が青 20 秒・赤 40 秒と設定した。

左折車線の飽和交通流率の経験式は式 (2) で与えられる [38]。ここで S_L は左折車線の飽和交通流率 [台/青 1 時間]、 $\alpha_W, \alpha_G, \alpha_T$ はそれぞれ車線幅、勾配、大型車の混入に関する補正係数であり、本研究ではすべて 1 を用いる。 C は信号のサイクル長であり、 G, G_P はそれぞれ自動車、歩行者用の青信号の現示時間である。 f_P は横断歩行者による左折車の通行の低減率であり、文献 [38] に定められている。

$$S_L = 1800\alpha_W\alpha_G\alpha_T \frac{(1 - f_P)G_P + (G - G_P)}{C} \quad (2)$$

シミュレーション結果と式 (2) から得られる左折車線の飽和交通流率の経験式を図 8 に示す。自動車交通量 Q_{veh} 、歩行者交通量 Q_{ped} がともに小さな場合にはすべての車両が左折できている一方で、いずれかの交通量が大きな場合には、飽和交通流率以上の車両が左折できておらず、経験

式とよく合致していることが分かる。本研究で提案する ExOPM が歩行者のマクロな交通流特性を精度良く再現できることは 3.2 節で述べたとおりであるが、本節の結果により、横断歩道上の歩車混合交通シミュレーションにも ExOPM を適用可能であることが示されたといえる。

5. 結論

本研究では大規模な混合交通シミュレーションに適用することを目的として拡張 1 次元歩行者モデル (ExOPM) を提案し、群衆シミュレーションのマクロな特性と横断歩道における歩車間相互作用の再現性について定量的に検証した。ExOPM は 1 次元連続空間モデルでありながらリンク内における追い越し挙動を表現可能であり、OPM における制約が緩和されている。

群衆シミュレーションの検証を通じて、ExOPM は 2 次元連続空間モデルである SFM と同程度の精度でマクロ特性を再現できる一方で、計算コストは SFM よりきわめて小さく、大規模シミュレーションに適用可能であることを示した。

さらに交差点における混合交通シミュレーションにより、横断歩行者の交通量に応じて左折自動車交通が適切に制限されることを明らかにし、混合交通シミュレーションのための歩行者モデルとしても利用できることを示した。

本論文における検証は単純な道路構造に限ったものであり、たとえば曲線部を含む歩道における挙動は未検証であるが、特に混合交通として横断歩道上の歩車間相互作用を考えた場合、歩行空間そのものは単純な幾何形状であり、提案モデルは十分に適用可能であるといえる。歩行者の 2 次元連続空間モデルを用いた既存の混合交通シミュレーション [28], [30] と同様、横断歩道上の歩行者のみを自動車交通流シミュレータに組み込むこともできる。

一方で曲線部の影響を考慮するためには現時点のモデルでは不十分であり、曲率に応じた希望歩行速度の低下率をパラメータとして歩行空間に与えることで曲線部における減速を模擬するなどの拡張が考えられる。また ExOPM は広場やスクランブル交差点のような歩行者の動線が互いに交錯するような道路環境には適用できない。このような場合には適切な領域境界を設け、たとえば SFM と ExOPM を切り替えながら適用するなどの工夫を施す必要がある。これらについては今後詳細に検討する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H01785 および 16H02907 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 国土交通省：平成 28 (2016) 年版 交通政策白書 (2016).
- [2] 石坂久志：駅前広場における管理の現状と今後の方向性、運輸政策研究, Vol.12, No.4, pp.2-10 (2010).
- [3] 紀の国わかやま国体・紀の国わかやま大会実行委員会：東

- 日本大震災復興支援第 70 回国民体育大会「紀の国わかやま国体」第 15 回全国障害者スポーツ大会「紀の国わかやま大会」報告書, 入手先 (<http://www.wakayama2015.jp/common/attention/2016/03/25/25166>) (参照 2017-09-27).
- [4] 紀の国わかやま国体・紀の国わかやま大会実行委員会: 紀の国わかやま国体観戦ガイドブック, 入手先 (<http://www.wakayama2015.jp/common/kansenguide>) (参照 2017-09-27).
- [5] 紀の国わかやま国体・紀の国わかやま大会実行委員会: 紀の国わかやま大会ハンドブック, 入手先 (<http://www.wakayama2015.jp/common/handbook>) (参照 2017-09-27).
- [6] 内閣府 (防災担当): 中央防災会議「防災対策推進検討会議津波避難対策検討ワーキンググループ」(第 6 回) 議事概要について, 入手先 (<http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/6/pdf/gaiyou.pdf>) (参照 2017-06-01).
- [7] 吉村 忍, 西川紘史, 守安 智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発, シミュレーション, Vol.23, No.3, pp.228–237 (2004).
- [8] Yoshimura, S.: MATES: Multi-Agent Based Traffic and Environment Simulator – Theory, Implementation and Practical Application, *CMES: Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol.11, No.1, pp.17–25 (2006).
- [9] Helbing, D. and Molnár, P.: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, Vol.51, No.5, pp.4282–4286 (1995).
- [10] Yu, W.J., Chen, R., Dong, L.Y. and Dai, S.Q.: Centrifugal Force Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, Vol.72, p.026112 (2005).
- [11] Chraïbi, M., Seyfried, A. and Schadschneider, A.: Generalized Centrifugal-force Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, Vol.82, p.046111 (2010).
- [12] Asano, M., Iryo, T. and Kuwahara, M.: Microscopic Pedestrian Simulation Model Combined with a Tactical Model for Route Choice Behaviour, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.18, No.6, pp.842–855 (2010).
- [13] von Sivers, I. and Köster, G.: Dynamic Stride Length Adaptation According to Utility and Personal Space, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.74, pp.104–117 (2015).
- [14] Antonini, G., Bierlaire, M. and Weber, M.: Discrete Choice Models of Pedestrian Walking Behavior, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.40, No.8, pp.667–687 (2006).
- [15] 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).
- [16] Yamashita, T., Okada, T. and Noda, I.: Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-Scale Pedestrian Flow, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.6, No.2, pp.137–146 (2013).
- [17] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. and Zittartz, J.: Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-dimensional Cellular Automaton, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.295, No.3–4, pp.507–525 (2001).
- [18] Muramatsu, M., Irie, T. and Nagatani, T.: Jamming Transition in Pedestrian Counter Flow, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.267, No.3, pp.487–498 (1999).
- [19] 田島祐輔, 村松将邦, 長谷 隆: チャンネル内歩行者流の格子気体シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.67, No.655, pp.603–609 (2001).
- [20] Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H. and Iryo-Asano, M.: Application of Social Force Model to Pedestrian Behavior Analysis at Signalized Crosswalk, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.40, pp.143–159 (2014).
- [21] Anvari, B., Daamen, W., Knoop, V.L., Hoogendoorn, S.P. and Bell, M.G.H.: Shared Space Modeling Based on Social Forces and Distance Potential Field, *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, pp.907–916, Springer International Publishing (2014).
- [22] Huynh, D.N., Boltze, M. and Vu, A.T.: Modelling Mixed Traffic Flow at Signalized Intersection Using Social Force Model, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.10, pp.1734–1749 (2013).
- [23] Crociani, L. and Vizzari, G.: An Integrated Model for the Simulation of Pedestrian Crossings, *Cellular Automata for Research and Industry Proceedings*, pp.670–679, Springer International Publishing (2014).
- [24] Dobler, C. and Lämmel, G.: Integration of a Multimodal Simulation Module into a Framework for Large-Scale Transport Systems Simulation, *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, pp.739–754, Springer International Publishing (2014).
- [25] Charypar, D., Axhausen, K. and Nagel, K.: Event-Driven Queue-Based Traffic Flow Microsimulation, *Transportation Research Record*, Vol.2003, pp.35–40 (2007).
- [26] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Härrî, J. and Spyropoulos, T.: Including Pedestrian and Bicycle Traffic into the Traffic Simulation SUMO, *10th ITS European Congress* (2014).
- [27] Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Rössel, C. and Wagner, P.: SUMO (Simulation of Urban MObility) – an Open-source Traffic Simulation, *4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling*, pp.183–187 (2002).
- [28] 藤井秀樹, 仲間 豊, 吉村 忍: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発第二報: 歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較, シミュレーション, Vol.25, No.4, pp.274–280 (2006).
- [29] 藤井秀樹, 吉村 忍: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発第三報: 多階層歩行者モデルの開発と歩車混合交通シミュレーション, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.70–78 (2011).
- [30] 吉村 忍, 藤井秀樹, 内田英明, 加納達彬: 混合交通流シミュレータによる岡山駅前路面電車軌道延伸計画の交通影響評価, 交通工学論文集, Vol.3, No.4, pp.B.1–B.10 (2017).
- [31] Bexelius, S.: An Extended Model for Car-following, *Transportation Research*, Vol.2, No.1, pp.13–21 (1968).
- [32] 西山 翔, 清水光輝, 脇田佑希子, 北 栄輔: Chandler タイプの多台参照追従モデルの安定性解析, 計算数理工学論文集, Vol.11, pp.53–58 (2011).
- [33] Schneider, J. and Ebersbach, A.: Anticipatory Drivers in the Nagel-Schreckenberg-Model, *International Journal of Modern Physics C*, Vol.13, No.1, pp.107–113 (2002).
- [34] 増岡達也, 荒井幸代: 前方情報を考慮した走行ルールによるメタ安定相の発生と特徴の解析, 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.92, No.11, pp.1935–1944 (2009).
- [35] 野中陽介, 大西正輝, 山下倫央, 岡田 崇, 島田敬士, 谷口 倫一郎: 大規模な避難シミュレーションのための歩行速

度モデルの精緻化, 電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, Vol.133, No.9, pp.1779-1786 (2013).

- [36] Rastogi, R., Ilango, T. and Chandra, S.: Pedestrian Flow Characteristics for Different Pedestrian Facilities and Situations, *European Transport*, Vol.53, pp.1-21 (2013).
- [37] Helbing, D. and Tilch, B.: Generalized Force Model of Traffic Dynamics, *Physical Review E*, Vol.58, No.1, pp.133-138 (1998).
- [38] 日本道路協会 (編): 道路の交通容量, 丸善 (1984).



藤井 秀樹 (正会員)

2009年東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士後期課程修了。同大学人工物工学研究センター特任助教を経て、2010年より同大学大学院工学系研究科システム創成学専攻助教。2013年より同専攻講師。博士(環境学)。マルチエージェントシステムの交通流シミュレーションへの応用等に関する研究に従事。人工知能学会、日本シミュレーション学会、交通工学研究会等各会員。



西岡 智彦

2014年東京大学工学部システム創成学科卒業。2016年同大学大学院工学系研究科システム創成学専攻修士課程修了。修士(工学)。在学中は群衆シミュレーションおよび混合交通のモデル化に関する研究に従事した。



城所 直樹

2016年東京大学工学部システム創成学科卒業。現在、同大学大学院工学系研究科システム創成学専攻修士課程在学中。学士(工学)。混合交通シミュレーションの応用に関する研究に従事。日本機械学会学生会員。



内田 英明

2010年千葉大学工学部都市環境システム学科卒業。2012年東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻修士課程修了。修士(工学)。企業での勤務を経て、現在、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻博士後期課程在学中。人工知能学会、日本機械学会各会員。



吉村 忍

東京大学工学部原子力工学学科卒業、同大学大学院工学系研究科原子力工学専門課程修士課程および博士課程修了。工学博士。同大学院工学系研究科助教等を経て、現在は同研究科システム創成学専攻教授。知的シミュレーションの研究開発と工学分野、社会・環境分野への応用に関する研究・教育に従事。日本計算力学連合会長、日本機械学会理事・フェロー、国際計算力学連合常任理事・フェロー等。