

混雑時におけるミクロ歩行者流動モデルの構築

浅野美帆^{*1} 桑原雅夫^{*2} 田中伸治^{*3}

東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻^{*1}

東京大学国際・産学共同研究センター^{*2}

東京大学生産技術研究所^{*3}

本研究は、歩行者流の容量評価のためのミクロシミュレーションモデルを構築することを目的とする。近年、建物内等の混雑評価や避難行動の評価を目的として多くの歩行者モデルが提案されている。しかし、交通容量の表現が不十分である、また実観測データとの比較による検証例が少ないなどの問題点がある。本研究では、容量表現において必要と考えられる、人の動きの先読み行動に着目したモデルを新たに提案した。また検証用データを得るため、混雑時の歩行者行動を詳細に調べるための歩行者流動実験を行った。提案モデルと実験データとの比較により、本モデルが容量近傍における個々の歩行者の行動を既存モデルに比べて良好に再現していることを示した。

Microscopic Pedestrian Behavior Model in Congested Conditions

Miho ASANO^{*1} Masao KUWAHARA^{*2} Shinji TANAKA^{*3}

Department of Civil Engineering, The University of Tokyo^{*1}

Center for Collaborative Research, The University of Tokyo^{*2}

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo^{*3}

This research proposes a microscopic pedestrian simulation model for capacity evaluation. Recently, several pedestrian models are proposed to evaluate congestion in normal and/or evacuation situations. However, not many models are able to represent capacity and most of these have not yet been validated using observed data. Model proposed in this paper predicts movement of each pedestrian based on predicted behavior of surrounding pedestrians. An experiment has also been conducted in order to get validation dataset of detailed behavior of pedestrians in various types of congested conditions. This data set is used for validation of basic characteristics of the model. Proposed model represents individual pedestrian behavior at or near capacity level.

Keyword: Pedestrian, Simulation, Capacity, Experimental data

1. はじめに

本研究は、歩行者交通流の容量評価のための、ミクロな歩行者の移動モデルを構築することを目的とする。また提案したモデルについて、容量近傍時の実験観測データを用いた検証を行っている。

近年、歩行者交通についての関心がますます高まっており、ITS分野においても歩行者の経路誘導情報提供等のアプリケーションが提案されてきている。このような新たに提案される施策については、歩行者空間へ及ぼす影響の評価が不可欠である。しかし、混雑時の歩行者流動に関しては車両のように交通工学的に信頼性のある交通流モデルが未だ提案されていない。またそもそも歩行者流は、様々な方向の交通流が錯綜し複雑な流動となりうるため、流体モデルのアナロジーとしての車両交通流モデルのようなマクロ的アプローチによる体系化は困難である。したがって、個々の歩行者の行動モデルの集積により、容量をはじめとする交通工学的指標を良好に説明可能なモデルの構築が求められている。

既存のミクロ歩行者モデルには、回避・追従行動の表現のために歩行者同士の間で反発力を与えるモデル^{1),2)}や、他の歩行者に占有されない空き空間の探索を行うモデル³⁾、他の歩行者の位置や速度に応じて速度ベクトルを離散選択モデルにより決定するモデル⁴⁾等さまざまなモデルがある。しかし、混雑時の実データとの比較により検証されているものが少ないこと、また交通工学的に重要とされる容量評価の観点からの評価が不十分などの問題がある。

また既存モデルの多くがその時点の位置・速度情報に基づく意思決定を行っているが、容量近傍のような制約条件の大きい状態においては、近い将来の周辺状況を予測した上で、より戦略的に歩行行動の選択を行っていると考えられる。

一方、歩行者流の現象解析・検証のための実際の行動データの蓄積が少ないという問題もある。これまでに得られている歩行者流動観測データの多くは、駅構内等実際に運用されているスペースでの観測結果^{5),6)}である。これらは現実的な流動データが得られる一方で、取得データの条件に限りがある。条件を制御した歩行者流動実験⁷⁾も行われているが、方向別容量等の解析が不十分であること、また国による歩行者行動特性の違いが考えられることから、国内における混雑時の歩行者行動についての精査が必要である。

以上のことから本研究では、まず容量の再現に必

要と考えられる、先読み行動を踏まえた歩行者流動モデルを新たに提案する。次に、様々な条件下での歩行者交通流現象を観測するため、歩行者流動実験を行い、実験結果と提案モデルにおける歩行者行動特性の比較を行う。

2. 先読み行動を考慮した歩行者モデル

2-1 モデルの概要

本研究で提案するモデルは、各歩行者がシミュレーションの更新時刻ごとに次の時刻での移動速度ベクトルを算出し、その方向へと動いていくエージェント型のモデルである。歩行者の歩行の基本原理は、

- ・ 歩行者は、希望する方向に希望する速度で歩く。
- ・ 現在歩いている速度からの、急激かつ大幅な速度変更はなるべく行わない。
- ・ 壁や柱、他の歩行者などの障害物にぶつからないように歩く。

の3点であると言われており、本モデルもこれに従う。ただし障害物からの回避行動は、周辺の人を行動を先読みした上で判断するものとする。ここでは、先読みによる衝突予測にあたり以下の仮定をおく。

- 1) 周辺歩行者は、現在以降 T 秒後まで等速で移動する。
- 2) 対象歩行者は、現在以降 T 秒後まで等速で歩き続けたとして、周辺歩行者に衝突したり、近づきすぎることがないように速度ベクトルを選択する。

なお、歩行者はある半径 r をもつ円形で表されると仮定する。

2-2 選択可能な速度ベクトル

ある時刻 t に速度 $v_i(t)$ で移動している歩行者 i を考える。 i が選択しうる速度の範囲は、図1のように速度と方向にそれぞれ上限値を持つ扇形であると仮定する。この範囲内のある速度 v を取ったときの移動に伴うコストを次節以降算出し、コストが最小となる速度を次の時刻の移動速度として選択する。

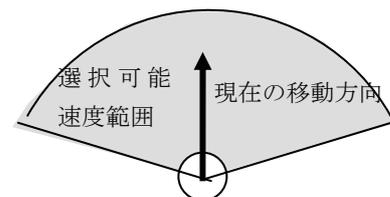


図1：選択可能な速度ベクトルの範囲

2-3 希望方向ベクトルからの差分コストの評価

1) ある瞬間の希望速度ベクトルの決定

まず現在の時刻を t とし、障害物が全くないと仮定したときの、次のステップ $t + \Delta t$ での歩行者の希望速度ベクトル $v_{di}(t + \Delta t)$ を決定する。対象とする歩行者 i の大域的な希望速度ベクトルを v_{oi} 、時刻 t での速度ベクトルを $v_i(t)$ とする。ここでの大域的な希望速度ベクトルとは、障害物がない場合に歩行者が加減速なく歩き続ける収束速度を意味する。

$v_i(t)$ から v_{oi} への1ステップでの移行は時に急激な速度変化をもたらすため、必ずしも歩行者にとって快適ではない可能性がある。そのため、瞬間瞬間の希望速度ベクトルは、パラメータ η ($0 < \eta \leq 1$) を用いて(1)式のように v_{oi} と $v_i(t)$ との線形和で表すこととする。またこれを図示したのが図2である。

$$v_{di}(t + \Delta t) = v_i(t) + \eta(v_{oi} - v_i(t)) \quad (1)$$

2) 希望速度ベクトルからの差分によるコスト

時刻 $t + \Delta t$ においては、(1)式の希望速度ベクトルが歩行者 i にとっての最適速度となるが、実際には他の歩行者の存在などのためにこの最適速度で歩くことはできない可能性がある。歩行者 i がある速度 v で歩いたときの、希望速度で歩くことができないために発生するコスト $C_{desi}(t, v)$ は、希望速度と v との距離で表されると考える。

$$C_{desi}(t, v) = \|v_{di}(t + \Delta t) - v\| \quad (2)$$

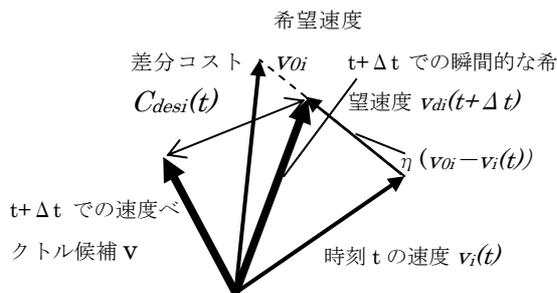


図2：希望速度ベクトルと希望速度からの差分コスト

2-4 障害物接近コストの評価

1) 周辺障害物の抽出

歩行者 i の周辺にいる歩行者や壁のうち、歩行者 i が回避判断をすべき障害物の抽出を行う。ここでは、図3に示すように、半径 L 、角度 2θ の扇形の探索範囲を設定し、その中に入っている障害物を回避対象とする。

2) 周辺歩行者の予測速度

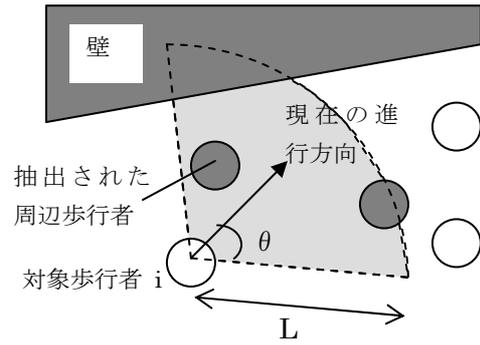


図3：周辺歩行者・壁の抽出

対象歩行者 i は、周辺歩行者 j の現時点からの移動速度を推定し、それに基づいて回避行動を行う。

推定する歩行速度 $\bar{v}_j(t)$ は、周辺歩行者の直近数ステップにおける速度の移動平均により求める。

3) 周辺歩行者との接近コスト

図4のように、時刻 t での歩行者 i, j の位置ベクトルをそれぞれ $X_i(t), X_j(t)$ とする。また j の速度は $\bar{v}_j(t)$ である。歩行者 i が速度 v をとったときの、この2人の歩行者の時刻 $t + u$ での距離 $D_{ij}(t + u, v)$ は、

$$D_{ij}(t + u, v) = \|X_i(t + u) - X_j(t + u)\| - 2r \quad (3)$$

と表される。ここから、 $D_{ij}(t + u, v)$ の $0 \leq u \leq T$ での最小距離 $D_{ijmin}(t, v)$ が求められる。

$$D_{ijmin}(t, v) = \min_u D_{ij}(t + u, v) \quad s.t. 0 \leq u \leq T \quad (4)$$

歩行者 i は、 $D_{ijmin}(t, v)$ に基づいて j との接近コスト $C_{ij}(t, v)$ を求めると考える。 $D_{ijmin}(t, v)$ が負、すなわち時刻 $t + T$ までの間に歩行者 j と衝突する場合のコストは非常に大きな値とする。

$$C_{ij}(t, v) = \begin{cases} \tau \exp(\phi D_{ijmin}(t, v)) & \text{if } D_{ijmin}(t, v) > 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

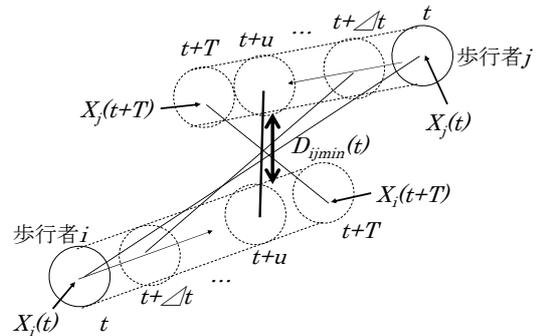


図4：周辺歩行者との接近コストの評価

4) 壁との接近コスト

壁などの静的障害物についても周辺歩行者の場合と同様に、ある速度で移動し続けた場合の $0 \leq u \leq T$ における壁との最短距離 $D_{iwmin}(t, v)$ を求める。

壁についての接近コスト $C_{iw}(t, v)$ は、

$$C_{iw}(t, v) = \begin{cases} 0 & \text{if } D_{iwmin}(t, v) > 2r \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

5) 障害物接近による総コストの評価

対象歩行者の周辺にいる個々の歩行者と静的障害物について、上記コストを足し合わせることで、ある速度ベクトルを取った際の障害物に接近・衝突することによるコストの総和 $C_{obi}(t, v)$ が求められる。

$$C_{obi}(t, v) = \sum_j C_{ij}(t, v) + \sum_w C_{iw}(t, v) \quad (7)$$

2-5 最適速度ベクトルの決定

2-2, 2-3 で算出したコストの和を最小化する速度ベクトルが、求める速度ベクトルである。実際には、取りうる速度の値を離散的に与えておき、その中から最適ベクトルを選択する。

$$v_{opt}(t + \Delta t) = \arg \min_v (C_{desi}(t, v) + C_{obi}(t, v)) \quad (8)$$

3. 歩行者流動実験と提案モデルの検証

3-1 実験概要

提案したモデルを様々な条件下の交通流と比較するため、被験者により人為的に混雑流を作成する流動実験を行った。これは図5に示すように、仕切りにより移動する方向を限定して、赤白帽を被せた被験者に対象区間を歩いてもらうというものである。実験日は2006年5月23日、被験者数は94名であった。実験のパターンの選定には表1に示すように、異なる交差角度、交通量、速く歩く人・遅く歩く人の混合交通などを考慮した。流入交通量の「最大」とは、流入コントロールをせず一気に歩行者を流入させるものである。これらの組合せのうち実験で実際に行ったのは24パターンである。その際、図6のように真上からビデオ撮影を行い、各歩行者の軌跡を取得した。

3-2 実験データの処理

まず撮影した映像から画像処理により、実験時の歩行軌跡を取得した。その際まず頭部の座標を画像

から取得し、歩行者の身長を一律170cmと仮定した上で、射影変換により床平面上の歩行者の位置座標を算出した。身長の違いなどにより考えられる最大誤差は10cmであり、精度は許容範囲内であると考えられる。

表1：実験のパターン

交差角度 (度)	流入交通量計 (人/分)	流入交通量比(%)
0	90, 最大	
90	90, 180, 最大	50:50, 75:25, 88:12
180	90, 180, 最大	50:50, 75:25, 88:12
45	180, 最大	50:50, 88:12
135	180, 最大	50:50, 88:12
0,90,180 (3方向)	180, 最大	35:35:30
0 (速度の異なる歩行者)	90, 180	(速度の速い人 : 遅い人) = 75:25, 25:75

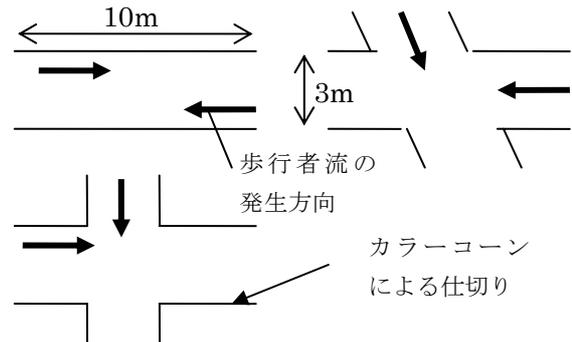


図5：実験歩行区間の例



図6：歩行者流動実験の例

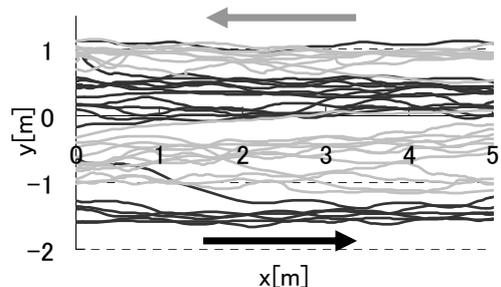


図7：縞模様の形成

図7は180度交差における歩行者群の軌跡の一例である。2方向の交錯歩行者流の場合、歩行者はお互いに別の方向に進む歩行者との錯綜を避けようとして、縞模様を形成するといわれており⁵⁾、今回の流動実験でもそれが観察されている。さらに、混雑により流量が低下している状態でも、この縞模様の状態を保ったまま歩行者が移動していることがそれぞれの実験において定性的に観測された。

また今回実験で観察された密度は、交差交通における最大値で5人/m²程度であった。これは待ち行列における Fruin の LOS F⁸⁾に相当する。このように、瞬間的にはあるが非常に混雑した状況を含む、歩行者交通流の状況を撮影することができた。

3-4 実験データとの比較によるモデル検証

1) 設定パラメータ

取得した個々の歩行者の軌跡データを用いて、前章で提案したモデルのパラメータチューニングを行った。チューニング後のパラメータを表2に示す。

表2：パラメータチューニング結果

項目	設定値	項目	設定値
最大速度	1.8(m/s)	最大方向変更角	90(度)
歩行者の人体円半径 r	0.45(m)	周辺障害物の探索距離 L	3(m)
希望速度	1.35(m/s)	周辺障害物の探索角度 θ	90(度)
先読み時間 T	3(秒)	接近コスト τ	0.2(m/s)
希望速度パラメータ η	0.7	接近コスト ϕ	-0.3(1/m)

これを用いて、混雑レベルに応じたモデルの表現特性を以下で検証する。なお、提案モデルとの比較のために、既存の Social Force (SF) モデル²⁾によるパフォーマンス検証も同時に行った。SF モデルは、周辺歩行者の位置情報に基づく反発力と希望する方向へ向かう力を元に対象歩行者の加速度 α ($t + \Delta t$)を決めるモデルであり、先読み行動は考慮されていない。その決定式は前章の表記を用いて、以下で表される。

$$\alpha_i(t + \Delta t) = v_{id}(t + \Delta t) + \sum_j \exp(\phi D_{ij}(t)) \quad (9)$$

2) 検証1：1人だけにモデルを適用する場合

まず、実験時の2方向流の180度と90度の交差のケースについて、歩行者群のうち1人だけにモデル

を適用した場合の行動を実測と比較した。ここでは最初に歩行者群を実験における実測の位置情報に基づいて動かしておく。次に歩行者群のうち1人について、移動中のある瞬間に提案モデルを適用し、そのときに対象歩行者の選択速度を調べた。

歩行者の選択する速度ベクトルは、左右どちらかに避けるか、あるいは加減速するかのいずれかに大まかに分けられる。ここでは、選択した速度ベクトルを実際速度分布を考慮して図8の9パターンに分類し、ある瞬間の交通状況について、歩行者がいずれのパターンを選択したかの的中率を確認した。表3はその結果を示している。これによると、歩行者密度が大きくなるほど速度選択的中率が低下する。また提案モデルにおける的中率は、臨界密度においてSFモデルよりも向上しており、先読み行動が容量近傍の状態における歩行者の意思決定に影響することがわかる。

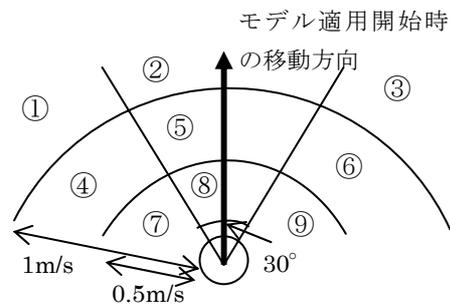


図8：的中率探索のための速度選択パターン

表3：密度レベル別の速度選択的中率

的中サンプル数 (的中率)	非混雑時 (密度 < 0.7人/m ²)	臨界時 (密度 0.7~1.2人/m ²)	混雑時 (密度 > 1.2人/m ²)
提案モデル	92 (88%)	73 (83%)	58 (62%)
SFモデル	93 (89%)	66 (75%)	60 (65%)
総サンプル数	105	88	92

3) 検証2：全体にモデルを適用する場合

提案モデルについて、一定の流入交通量を与えて実験時と同じ3m幅の通路に対面2方向から歩行者を流入させた際の状態について検証した。設定した交通量は非混雑時(80人/分/一方向)、臨界時(120人/分/一方向)、混雑時(160人/分/一方向)の3ケースである。なお、実験時の双方向の10秒間最大通過交通量は48人(=288人/分)であった。

図9, 10, 11は各ケースにおけるシミュレーション開始30秒後のSFモデルと提案モデルでの歩行者の

分布を示したものである。非混雑時では、どちらのモデルでも異なる方向同士が避けあって縞模様を形成するが、臨界時にはSFモデルでは方向の異なる歩行者同士が避けきれずぶつかり合うことによりお互いに通行不可能な状態になり、著しく流量が低下する。提案モデルの場合は、臨界時にも縞模様状態を保ち、歩行者を捌くことができる。

ただし提案モデルでも、容量を超えるほどの需要が流入した場合には、実際の歩行者のように縞模様を保ちつつけることができなくなり、流量が低下してしまう。これは、実際の歩行者の場合は、他の方向の歩行者の通路を確保することで結果的に自己の旅行時間を短くしようとするが、今回のモデルは近視眼的に常に先に進むことが望ましいとする意思決定行動を行っているためと考えられる。

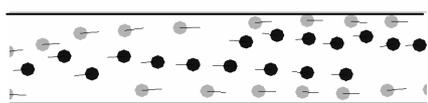
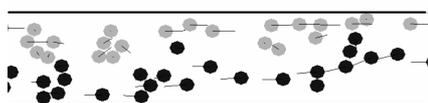


図 9：非混雑での 2 方向歩行者流
(上：提案モデル，下：SF モデル)

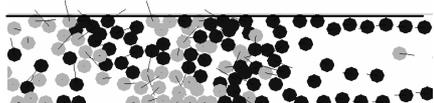
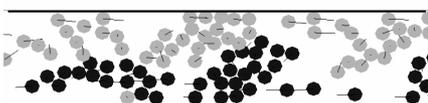


図 10：臨界時の 2 方向歩行者流
(上：提案モデル，下：SF モデル)

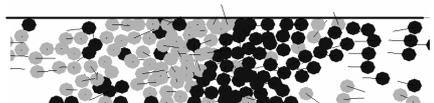
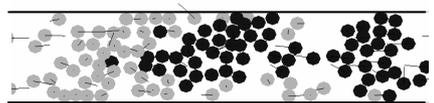


図 11：混雑時の 2 方向歩行者流
(上：提案モデル，下：SF モデル)

4. まとめ

本研究では、周辺歩行者の行動を先読みすることにより、容量近傍時の歩行者の行動をより精緻に表現できるモデルを提案した。実験データとの比較により、容量近傍における歩行者の行動の再現性が向上していることを確認した。

しかし本モデルでも、一旦混雑が始まってしまうと、縞模様状態を保つことができなくなり流量が一気に下がってしまう。今後は、歩行者を方向別の「群」として大まかに認識する、より高次の先読み行動や方向選択モデルを組み込み、混雑発生後についても表現が可能なシームレスなマイクロ歩行者行動モデルを構築することが課題として挙げられる。

謝辞

本研究は日本学術支援機構の支援を受けており、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Helbing, D. *et al.* (2002) "Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations", *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, p.p.21-58.
- 2) 杉本太一, 目黒公郎 (2002) "楕円形個別要素法を用いた人間の避難行動解析に関する基礎的研究", 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.123-124
- 3) 中山晴幸, 大村武馬 (1993) "歩行者の歩行挙動の検討とそのシミュレーション", 土木計画学研究・講演集, Vol.16, pp.179-184
- 4) Antonini, G. *et al.* (2006) "Discrete choice models of pedestrian walking behavior", *Transportation Research Part B*, Vol. 40, pp.667-687.
- 5) 中祐一郎 (1978). "鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究." 鉄道技術研究報告 Vol. 1079, pp. 1-131.
- 6) Lam, W. H. K. *et al.* (2003). "A generalised function for modeling bi-directional flow effects on indoor walkways in Hong Kong." *Transportation Research Part A*, Vol.37, pp. 789-810.
- 7) Daamen, W. and Hoogendoorn, S. P. (2003) "Experimental research of pedestrian walking behavior", *Transportation Research Record*, Vol. 1828, pp.20-30.
- 8) Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board.