

先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション

Pedestrian traffic simulation model with anticipatory behavior

浅野 美帆*・桑原 雅夫**
Miho ASANO and Masao KUWAHARA

1. はじめに

本研究は、交通容量やサービスレベル等の交通工学指標の評価が可能な歩行者流動シミュレーションモデルの提案・検証を目的としている。

ターミナル駅やイベント会場等の歩行空間の設計においては、混雑状態とそれに応じたサービスレベルの定量的評価が必要とされる。旧来的な設計評価においては、対象地点の断面幅員が需要を捌くのに十分かなど個々の地点のみに着目した分析が主であった。しかしこれらの場所では需要の発生パターンが時間的に大きく変動することから、その変動を明示的に考慮した動的な交通流分析、需要パターンの面的な波及を考慮した分析が必要であり、シミュレーションモデルはその分析ツールとして有効である。

個々の歩行者の行動を表現する既存のシミュレーションには、歩行者同士の回避行動を磁石の同極同士の反発力になぞらえたもの¹⁾²⁾や、他の歩行者に近接するコストと進行方向へ向かう効用とを考慮した効用最大化モデル³⁾などがある。しかしこれら既存モデルには以下の問題点がある。第一に、複数の方向の交通流が錯綜するという歩行者交通特有の状態について、交通容量の低下や歩行者の移動負担増を評価した例は、実測・シミュレーション分析ともに少ないのが現状である。特に容量近傍において歩行者行動の再現性を評価するモデルはほとんど見られない。

第二に、現在の歩行者の位置や速度のみを用いて次の時刻の移動速度を決定するモデルがほとんどであり、他の歩行者が次にどこに移動するのかという予測が組み込まれていない。また自己の行動についても、単に一定の速度を選択するのではなく、「他の歩行者をやり過ごしてから直進する」といった戦略的な移動計画を行うモデルは見られない。これらの歩行者行動特性は後述のように、容量近傍の交通状況再現において非常に重要である。

本研究では周辺歩行者の直近の将来の行動を予測した上で自己の行動を決定する歩行者シミュレーションモデルを提案する。また、複数方向に交錯する歩行者流の容量近傍

から混雑時にかけての状態を実験により観測し、モデルの妥当性検証を行う。

2. 歩行者の先読み行動モデル

2.1. 歩行者行動の仮定

本研究では、目的地と希望する移動方向が所与の歩行者を扱う。大前提として、歩行者は目的地への旅行時間が最小となるよう、言い換えれば同じ時間内に目的地へより近づくように速度と方向を選択すると仮定する。壁や周辺歩行者などの障害物がある場合、個々の障害物の任意の時刻における位置を制約条件として、目的地方向への移動距離の最大化を行うことが理論上最適な行動となる。

ただし実際の歩行者は、直近の将来において周辺の障害物を回避できれば十分であり、遠い将来の状態については精緻な予測を行わない。したがって、以下のように歩行者の行動を規定し、移動速度を求めるものとした。

- ・直近の将来数秒後までの間（以下「先読み時間」）内の希望する方向への移動距離が最大となるように先読み時間内の速度プロファイルを選択する。
- ・先読み時間内に衝突可能性がある周辺障害物・歩行者のみを回避の対象とする。
- ・先読み時間内は、周辺歩行者は一定速度で歩き続けるとして位置予測を行う。
- ・先読み時間内は、対象歩行者は同じ方向のみ移動するが、速度の大きさは可変とする。

以上の速度決定プロセスをシミュレーション上で毎ステップ繰り返し行う。シミュレーションの一ステップは、先読み時間よりも短いものとする。したがって、一旦歩行者がある方向を選択したとしても、周辺歩行者の位置が変わることにより数秒後の予測結果も変化し、結果次のステップでの移動方向が変化することも考えられる。

2.2. 先読みを考慮した速度選択

歩行者の希望速度ベクトルを V_f とする。図1のようにある時刻に歩行者が選択可能な速度ベクトルの範囲を、歩行者の現在の移動方向を中心として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。速度の大きさの上限値を $|V_f|$ 、方向角の上限を ψ とおく。周辺歩行者は、図2のようにやはり自分の進行方向を中心とした扇形の視界内

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 先進モビリティ連携研究センター

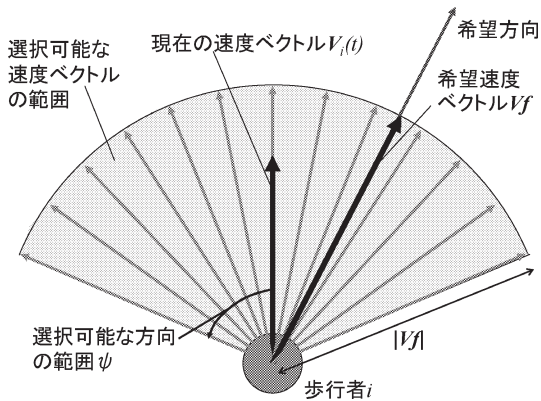


図1 選択可能な速度ベクトルの集合

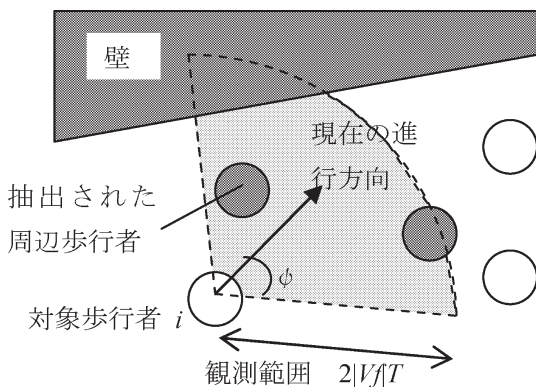


図2 抽出対象となる周辺歩行者

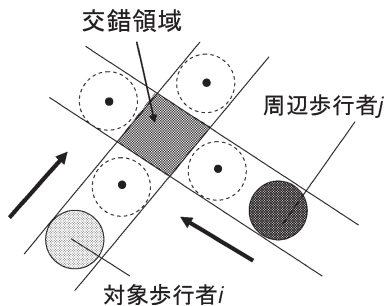


図3 方向θに移動したときの周辺歩行者との交錯領域

に入り、かつ先読み時間 T 内に衝突可能性のあるもののみ、回避の対象として抽出される。対象歩行者の時間 T 内の最大移動距離は $|V_f|T$ であるから、抽出範囲長は周辺歩行者の移動も勘案して $2|V_f|T$ とする。

今仮に歩行者 i がある方向 θ を移動方向として選択したときの、先読み時間内の最大移動距離を求める。図3は対象歩行者 i と周辺歩行者 j の位置を示したものである。 i が希望速度 V_f で方向 θ に直進し続けた場合、これらの歩行者は衝突する。図4は方向 θ に沿って、歩行者 i の時空間上の移動軌跡を描いたものである。歩行者 j が通過する位置・時間帯を灰色部分で示している。この灰色部分を超えるためには、歩行者 i が太実線のように加減速を行えば

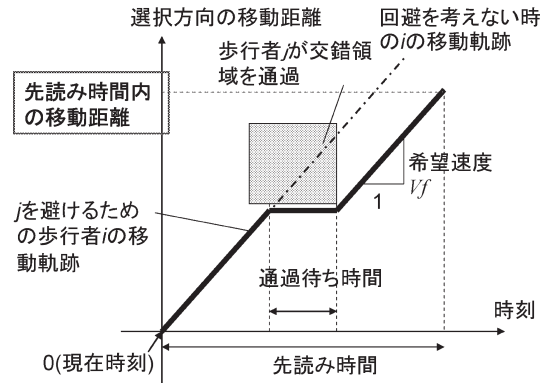


図4 交錯を回避するための移動軌跡

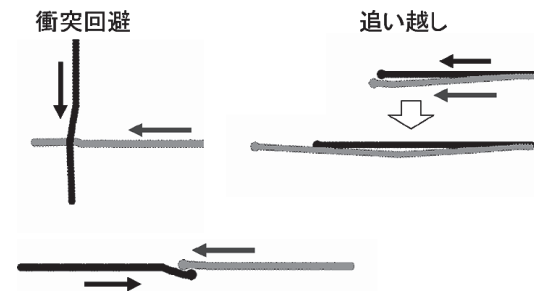


図5 少数歩行者間での回避行動

よい。同時に、図4内に示すように、先読み時間内の最大移動距離も求められる。

以上の計算を、 θ の値を変化させて行い、先読み時間内の移動可能距離が最大となる方向と、そのときの速度プロファイル(図4の太実線)を最適速度として選択する。

3. モデルの基本動作検証

提案モデルが基本的な歩行者行動を再現可能か確認するために、いくつかの仮想的な条件下での動作検証を行った。また比較のため、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次の時刻の加速度を決めるモデルであり、先読み行動は考慮されていない。パラメータは既存研究を参考に、 V_f を平均 1.35m/s、標準偏差 0.2m/s の正規分布、 $\psi = 60^\circ$ 、 $T = 2$ 秒、人体円半径 0.2m とした。

3.1. 少数歩行者間での回避行動

まず、少数の歩行者間で正面衝突、交差方向からの衝突、追突などの簡単な錯綜状態を発生させ、それぞれ歩行者の回避の仕方を示したものが図5である。このように、どの錯綜パターンについても、左右の方向転換や加減速という観測と矛盾しない行動により、適宜衝突回避を行っている。

3.2. 一方向交通における速度—密度関係

ボトルネックをもつ一方向の通路に歩行者を発生させ、そのときの歩行者流の平均速度、密度、通過交通量の関係

研究速報

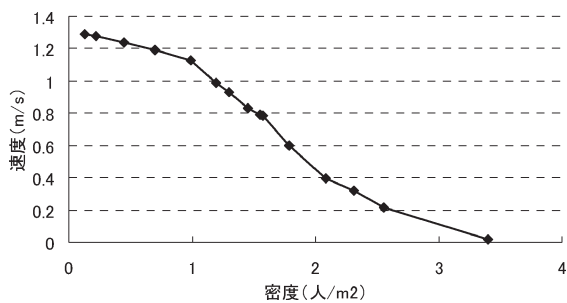


図6 一方向交通の速度・密度関係

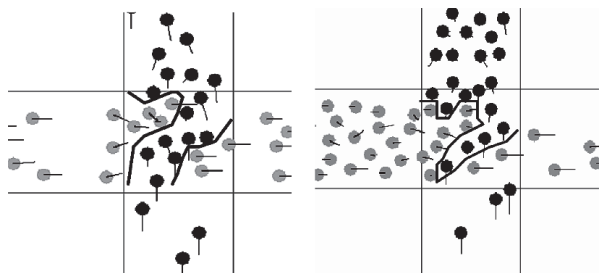


図7 二方向直交交通の縞模様生成 (提案モデル)

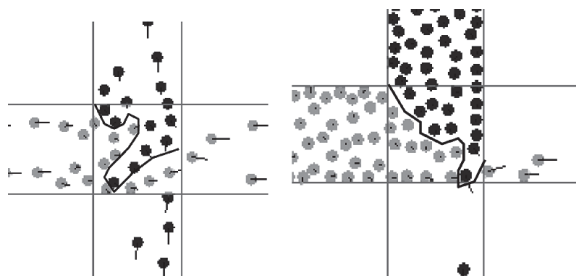


図8 二方向直交交通の縞模様生成 (Social Force モデル)

を観測した結果が図6である。このように、自由流から、混雑流にかけて連続的に単調減少の傾向があり、既存の観測知見で得られたものに近い結果が得られた。

3.3. 90度方向に交錯する混合交通

二方向に移動する歩行者群が交錯する場合、それらの群同士が縞状に分割する状態が最も歩行者間の交錯が少ない状態であり、実際の歩行者もこのような縞状に分かれる傾向があることが知られている⁴⁾。本モデルでは、図7のように自由流、混雑流ともにこのような縞状の交通が観測された。一方SFモデルでは図8のように、混雑時には交通流がお互いに通行を封鎖してしまうようにくさび形に分裂しており、一旦混雑が発生するとその後の移動方式が現実のものとは異なっている。

3.4. 180度(対向)方向に交錯する混合交通

同様に、通路の両端から歩行者交通を流し、そのときの歩行者行動と交通容量を観測した。低交通量では二方向に分割されるものの、図9のように交通量が大きくなると別方向の歩行者を互いに押し合ってブロッキングする形になってしまう。ただし、SFモデルに比べると、より混雑し

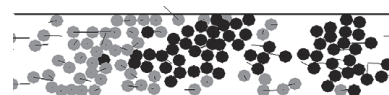


図9 二方向対向交通のスタッキング状態

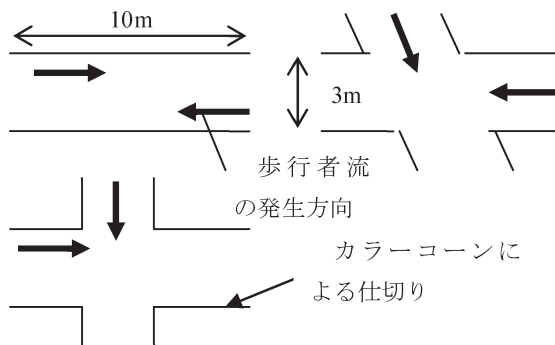


図10 実験歩行者区間の例



図11 歩行者実験のビデオ撮影例

た状態までブロッキングなく動かすことが可能であった⁵⁾。

4. 実験データとの比較によるモデル動作検証

4.1. 歩行者流動実験の概要

前章の既往の知見との比較に加えて、より定量的かつ詳細に、モデルの再現性の検討を行うため、人為的に混雑流を発生させる歩行者流動実験を実施した。これは図10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。実験では異なる交差角度、交通量、速く歩く人・遅く歩く人の混合交通など多様な交通状況が発生させた。その際、図11のように真上からビデオ撮影を行い、各歩行者の移動軌跡を取得した。

4.2. 歩行者行動の再現性検証

次に、提案モデルと実測値との比較を行った。歩行者がある瞬間に選択する移動速度について、実データによるパラメータチューニングを行った上で、実験データとシミュレーションとの比較を行ったものが図12である。このように、実験で得られた実測の歩行者速度とシミュレーショ

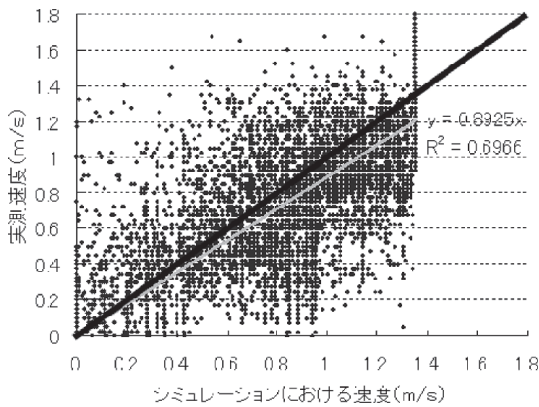


図12 歩行者の選択速度の実測とモデル比較

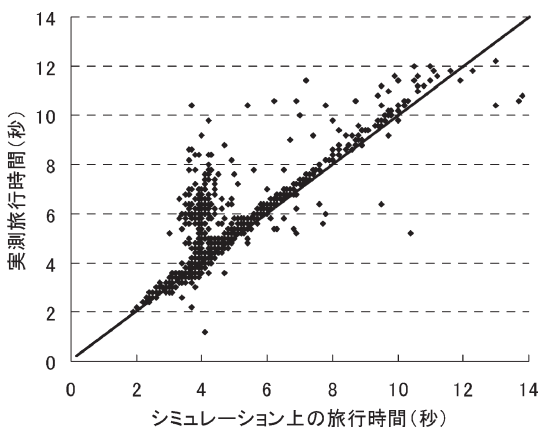


図13 歩行者の旅行時間の再現性比較

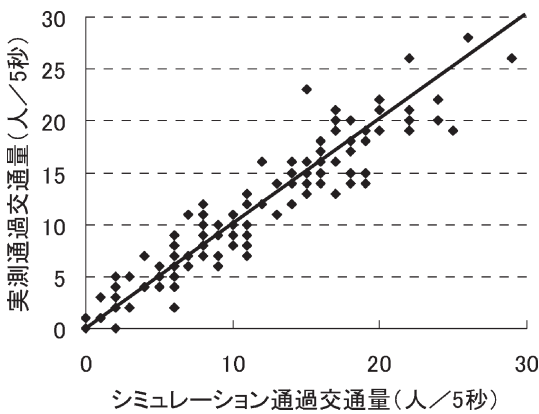


図14 通過交通量の再現性

ン結果との間には、よい相関関係が見られる。

また、個々の歩行者が交錯区間を通行するのに要する旅行時間の実測—シミュレーション値の比較を行ったのが図13である。一部のケースにおいて、歩行者の旅行時間を過小評価する例が見られた。このようなケースでは、歩行者の空間占有パターンが実測と異なっていたためと考えられる。少数の歩行者の移動行動が変化すると、図7のような縞模様のパターンは大きく変化し、個々の歩行者の旅行

時間が安定的に現れないのは実験でも観測されており、ここでも同様の状況が発生したと考えられる。ただし、個々の歩行者の旅行時間は変わっても、方向全体としての通過行動は変わらない。シミュレーションでもこの状態は反映されており、図14のように通過交通量に関しては実測—シミュレーション間でよい再現性が得られた。また紙面の都合上割愛するが、歩行者同士の交錯による負担を示すコンフリクト指標⁶⁾も、混雑—非混雑、交錯角度による負担の違いについてよい再現性が得られている。

5. おわりに

本研究では、周辺歩行者の行動を先読みした上で歩行者の移動速度を決定する移動モデルを構築した。先読み行動の導入の結果、容量近傍から混雑時にかけての歩行者の行動を良好にモデリングできていることを示した。本研究で示した行動モデルは物理モデルと異なり、歩行者の行動メカニズムに立脚していることから、高齢者やグループ歩行といった歩行者の個人特性の要素を今後付加していくことも容易であると考えられる。

対向方向ケースでは、大きな交通量が発生するとスタックしてしまう問題もある。これを改善するためには、譲り合い行動や、別方向の歩行者群をより遠方からあらかじめ避けるような上位の行動モデルを組み込む必要がある。

なお本モデルでは、歩行者が移動可能な空き空間を探すことのできる程度の密度を対象としており、満員電車のように周辺歩行者から接触応力を受けるほど混雑した状態は想定していない。このような状況との間をシームレスに表現するためには、歩行者間の接触応力を表現する物理モデルの考え方を取り入れる必要がある。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会特別研究員制度の支援を受けており、ここに謝意を表します。

(2007年3月15日受理)

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) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一 (1996) "被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について", 土木学会論文集, Vol.537 (I-35) pp. 233-244.
- 3) Hoogendoorn, S. P. (2004) "Pedestrian flow modeling by adaptive control", Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting.
- 4) 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.
- 5) 浅野美帆, 桑原雅夫, 田中伸治 (2006) "混雑時におけるミクロ歩行者流動モデルの構築", 第5回 ITS シンポジウム講演集
- 6) 佐野友紀, 高柳英明, 渡辺仁史 (2002) "空間—時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価" 日本建築学会計画系論文集, Vol.555, pp. 191-198