意思決定プロセスモデルによる群集流動シミュレーション

A Simulation of Crowd Behavior with Decision Making Process Model

西川 憲明
Noriaki Nishikawa

国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター
Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
nnishikawa@jamstec.go.jp, <http://www.jamstec.go.jp/j/>

廣川 雄一
Yuichi Hirokawa

(同 上)
y-hiroka@jamstec.go.jp, <http://www.jamstec.go.jp/j/>

山田 武志
Takeshi Yamada

株式会社ベクトル総研
Vector Research Institute, Inc.
yamada@vri.co.jp, <http://www.vri.co.jp/>

印南 潤二
Junji Innami

(同 上)
innami@vri.co.jp, <http://www.vri.co.jp/>

浅野 俊幸
Toshiyuki Asano

国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター
Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
asanot@jamstec.go.jp, <http://www.jamstec.go.jp/j/>

Keywords: pedestrian, simulation, cognitive heuristics

Summary

In recent years, pedestrian flow modeling, simulation and optimization has received a surge in attention. There are two reasons for investigating pedestrian flow. One is to solve the day-to-day problems of crowded public spaces, such as stations, shopping malls, pavements and many other places. The other is to optimize evacuation procedures from densely occupied buildings and urban centers in case of an unpredicted event. Such evacuation planning can save many lives at sudden catastrophic events like tsunami. As walking is the most basic mode of transportation, many pedestrian models have been proposed. However, finding a realistic description of pedestrian behavior is extremely challenging and pedestrian modeling still remains a matter of debate. For this, the elaboration of a model is necessary. This research proposes a microscopic pedestrian simulation model based on concepts of cognitive science. In this model, the pedestrian utilizes visual cues as primary source of information to decide where to walk. The pedestrian movement is generated from bottom-up by describing behavioral heuristics and motion control process. It is clearly demonstrated by numerical analyses that this model reproduces human-like individual trajectories and facilitates smooth pedestrian traffic flows through the effective avoidance maneuvers. Our approach has potential for contribution toward investigating disaster risk reduction strategies in complex urban space.

1. はじめに

地球温暖化による台風の大型化や集中豪雨の増加、海面上昇が予測されており、既存の防災施設では対応できない水害が発生する恐れがある。また、首都直下型地震では、都内の木造密集地などで延焼範囲が広域に及ぶ大規模な地震火災が発生することが懸念されている。これらの問題に対して、群集避難行動を予測するシミュレーション技術は、ソフト施策とハード施策の両面にわたる対応策を検討する手法として大きく期待されている[Helbing 09, Helbing 15]。シミュレーションの有効性をさ

らに向上させるためには、多様で複雑な歩行者の集団挙動についてのより深い洞察に基づいた歩行者行動モデルの開発の進展が望まれる[Duijves 13, Schadschneider 09]。

大規模複合施設や高層ビルを抱擁する複雑な現代都市空間において大規模災害時の避難誘導計画を検討する場合、建物内部空間と周辺都市空間をシームレスに繋がった世界として捉えることが重要であると考えられる。すなわち、複雑化する都市空間に対して群集避難シミュレーションを実施する場合、建物内部の幾何形状まで考慮できるような歩行者行動モデルであることが望まれる。また、避難途上における群集災害の危険性を定量的に評価

するためには、混雑状態における歩行者間の接触応力を取り扱える歩行者モデルが有用であろう。

一方、歩行者行動を理解するという立場からみれば、歩行者行動に関する観測結果を直接的に再現するというよりも、歩行者内部の認知プロセスに基づいて観測結果を間接的に再現できるような歩行者行動モデルを構築するほうが有益である。

以上の観点より、本研究では既存の歩行者行動モデルの一つであるヒューリスティックモデル[Moussaïd 11]をベースとして、複雑な都市空間における災害時の安全な避難誘導計画の検討に資する歩行者流動シミュレーションモデルを提案する。認知科学的視点から構築されるヒューリスティックモデルは、歩行者に内在する意思決定プロセスを明示的に表現するものであり、この意味において直感的に理解しやすいアプローチである。

本論文の構成は以下のとおりである。提案歩行者行動モデルを2章で説明する。詳細を述べると、2.1 節から2.3 節にかけては、Moussaïd らの既存モデル[Moussaïd 11]について説明する。当該既存モデルの問題点に対する改善策として、2.4 節においては、歩行者エージェントがスタックするという非現実的な振る舞いを効果的に抑制するために、歩行者が将来軌道を計画する際の行動ヒューリスティクスを再定義する。また、2.5 節においては、歩行者の不自然な蛇行運動の発生に着目し、歩行者は意図した軌道計画を実現すべく歩行者身体の運動特性を考慮して行動するとするモデルを提案する。3 章ではモデル動作結果を議論する。最後に、結論と展望を4章に述べる。

図1 歩行者の視覚情報.

2. 歩行者行動モデル

本研究では、目的地および目的地までの経路や経由地が所与の歩行者を扱う。周辺歩行者や壁などの障害物がある場合に、目的地に向かう歩行者がどのように行動するかということを歩行者の意思決定プロセスからボトムアップ的に表現する。

2.1 視覚情報の表現

歩行者は視覚によって得られた情報をヒューリスティックに処理することで、自身の動きを制御していると

考える。

対象歩行者 i の振る舞いは位置座標 $\mathbf{r}_i(t)$ と歩行速度 $\mathbf{v}_i(t)$ によって記述されるとする。ここで、 t は時間を表す。簡易化のため、歩行者の人体は水平面上の半径 $R_i = m_i/\psi$ の円で表現する。ここで、 m_i は歩行者 i の質量である。また、 ψ は歩行者の質量から半径を算出する変換係数である。さらに、歩行者 i は自由歩行速度の大きさ v_i^0 によって特徴づけられるとする。また、歩行者の視野角は進行方向の左右 φ° とし、衝突回避行動のために歩行者により観測される視覚距離を $d_{\max}$ とする (図1)。

本研究では歩行者により計画された目的地までの移動経路を、交差点を表すノード集合と交差点間を表すリンク集合から構成される通路ネットワーク情報により表現する。周辺環境における通路壁の幾何形状に基づいて、歩行者 i は直線的にできるだけ長く歩いて到達できそうな通路ネットワーク上の任意の点 $\tilde{O}_i(t)$ を探索する。その後、衝突回避行動における観測領域の境界上に対応する目的点 $O_i(t)$ を設定する (図2)。なお、目的点 $O_i(t)$ の更新間隔は約1秒とした。

通路ネットワーク情報の生成方法の概要について述べると、まずは、シミュレーション領域を格子状に離散化し、各格子を歩行空間または非歩行空間のどちらかに割り当てる。続いて、歩行空間および非歩行空間に2値化された空間格子データに対して細線化フィルタ処理を施すことで抽出される情報をもとに通路ネットワーク情報が生成される。

なお、上述した通路ネットワーク情報に基づく目的点 $O_i(t)$ の設定手法は本論文において新たに提案するものであることを注記する。

図2 観測領域における目的点 $O_i(t)$ の設定.

歩行者の衝突回避行動を記述する視覚情報としては、適切な角解像度により離散化された視野角内の全ての方向 α に対し、歩行者 i が方向 α に歩行速度の大きさ v_i^0 で移動した場合に周辺障害物との衝突が最初にかかるまでの距離 $f(\alpha)$ を考える。なお、方向 α に対して衝突の発生が予測されない場合には、距離 $f(\alpha)$ を最大値 $d_{\max}$ に設定する。

距離 $f(\alpha)$ は視認している他の歩行者 j に対する衝突

距離 $f_j(\alpha)$ と壁 w に対する衝突距離 $f_w(\alpha)$ との最小値により決定される。

周辺歩行者 j との衝突距離 $f_j(\alpha)$ は, $f_j(\alpha) = v_i^0 \Delta t$ と表現することができる。ここで, Δt は衝突するまでの時間であり, 方程式

$$d_{ij}(\Delta t) = R_i + R_j, \quad (1)$$

を解くことで導出できる。関数 d_{ij} は歩行者の質量中心間の距離である。すなわち, 現在時間を $t=0$ とすると,

$$d_{ij}(\Delta t) = \|\mathbf{r}_i(\Delta t) - \mathbf{r}_j(\Delta t)\|, \quad (2)$$

である。なお, 位置座標の時間変化は,

$$\mathbf{r}_i(\Delta t) = \mathbf{r}_i(0) + \Delta t \mathbf{v}_i^0 (\cos \alpha, \sin \alpha), \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_j(\Delta t) = \mathbf{r}_j(0) + \Delta t \mathbf{v}_j(0), \quad (4)$$

により予測されるものとした。

同様に, 壁 w との衝突距離 $f_w(\alpha)$ について議論する。衝突するまでの時間 Δt は, 方程式

$$d_{iw}(\Delta t) = R_i, \quad (5)$$

を解くことで導出できる。ここで, 関数 d_{iw} は歩行者の質量中心と壁との距離であり,

$$d_{iw}(\Delta t) = \frac{|ax_i(\Delta t) + by_i(\Delta t) + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (6)$$

により与えられる。 $\mathbf{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ である。また, 壁 w の線分を表す方程式を $ax + by + c = 0$ とする。

2.2 意思決定プロセスの定式化

視覚情報に基づいた行動ヒューリスティックスを規定することで歩行者の振る舞いを記述する。具体的には, 歩行者が希望する進行方向 $\alpha_{\text{des}}(t)$ および歩行速度の大きさ $v_{\text{des}}(t)$ についての算出方法を与える。

まずは, 歩行者の希望する進行方向 α_{des} を決定する行動ヒューリスティックとして, 歩行者は周囲の障害物の存在を考慮した上で, 目的点 O_i に最も近づけそうな進行方向を選択するものと仮定する。既往論文[Moussaïd 11]においては, 歩行者により選択される進行方向 α_{des} は目的点までの距離を目的関数として,

$$d_1(\alpha) = d_{\max}^2 + f(\alpha)^2 - 2d_{\max}f(\alpha)\cos(\alpha_0 - \alpha), \quad (7)$$

の最小化によって算出される。ここで, α_0 は目的点の方向を表す。すなわち, $\alpha_{\text{des}} = \arg \min_{\alpha} d_1(\alpha)$ である。

続いて, 歩行者の希望する移動速度の大きさ $v_{\text{des}}(t)$ を決定する行動ヒューリスティックとして, 歩行者は選択した歩行方向にある最初の障害物までの距離に対し, 少なくとも衝突するまでの時間 τ が確保されるよう行動するものと仮定する。換言すると, $v_{\text{des}}(t) = \min(v_i^0, d_c/\tau)$ である。ここで, d_c は対象歩行者 i と希望方向 $\alpha_{\text{des}}(t)$ にある最初の障害物との距離である。さらに, 視覚情報に基づいた歩行者の意図的な衝突回避行動を記述する運動方程式を,

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i}{\tau}, \quad (8)$$

により与える。ここで, $\mathbf{v}_{\text{des}} = v_{\text{des}} \hat{\mathbf{e}}_{\text{des}}$ である。また, $\hat{\mathbf{e}}_{\text{des}}$ は α_{des} 方向の単位ベクトルである。

2.3 物理的相互作用の効果

群集が過密状態の場合, 対象歩行者は周辺の歩行者や壁との衝突により, 視覚情報によって決定されない意図しない動きとなる可能性がある。すなわち, 歩行者の意思決定とは無関係な物理的な接触力を考慮する必要がある。

歩行者同士の接触力については,

$$\mathbf{f}_{ij} = Kg(R_i + R_j - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}, \quad (9)$$

とする。ここで, $g(x) = \max(x, 0)$ である。また, $\mathbf{n}_{ij}$ は歩行者 j から歩行者 i の方向に向いた単位ベクトル, d_{ij} は歩行者の質量中心間の距離, K は定数である。

同様に, 壁 w との物理的相互作用を,

$$\mathbf{f}_{iw} = Kg(R_i - d_{iw})\mathbf{n}_{iw}, \quad (10)$$

とする。ここで, d_{iw} は壁 w との距離, $\mathbf{n}_{iw}$ は壁に垂直な方向の単位ベクトルである。

以上の議論より, 歩行者行動を記述する基礎方程式は,

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i}{\tau} + \sum_j \frac{\mathbf{f}_{ij}}{m_i} + \sum_w \frac{\mathbf{f}_{iw}}{m_i}, \quad (11)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad (12)$$

となる。

2.4 行動ヒューリスティック再訪

混雑状態の群集を対象に衝突回避行動モデルを適用した場合, 歩行者エージェントの行動選択自由度が周囲の環境により著しく制限されることで, エージェントは身動きが取れなくなり動けなくなってしまう(スタック)状態が発生し得る。衝突回避行動モデルにおける目的関数は, 歩行者エージェントの行動選択を記述するもので

あるから、スタック状態の発生事由と直接的に関係する。

本節では、目的関数(7)により引き起こされるスタック状態について議論した後に、改良目的関数を提案し、その優位性を示す。

議論を簡単にするために、歩行者エージェントを質点とし、歩行者の前方に幅 $2w$ 、厚さ無限小の壁がある状況を考える (図 3)。ただし、歩行者の眼前にある壁は物質的な壁ではなく、静止した歩行者によって構成される人の壁であるとし、歩行者位置と目的点を結んだ単一の通路リンクが敷設されているとする。また、便宜的に視覚距離 $d_{\max}=1$ 、視野角 $\varphi=90^\circ$ 、目的点方向 $\alpha_0=0$ とする。さらに、異なる角度 α に対して目的関数の値が等しい場合、絶対値の小さな角度が優先的に選択されることとする。

図 3 目的関数(7)による迂回行動選択の分岐点。

さて、目的関数(7)は歩行者が周囲の障害物と衝突するまで進むことにより得られる視野範囲内の到達地点と目的点との距離であることから、歩行者エージェントの進行方向が $\alpha=0$ となるか $\alpha \neq 0$ となるかの分水嶺となる状況を考えることができる (図 3)。この場合、壁幅 $w=\hat{w}_1$ と目的点から壁までの距離 l との間には、

$$\hat{w}_1(l) = \frac{l(1-l)}{2-l^2} \sqrt{4-l^2}, \quad (13)$$

なる関係が成り立つ。すなわち、距離 l が所与の場合、壁幅 w が $\hat{w}_1(l)$ よりも大きければ (小さければ)、歩行者エージェントの進行方向は $\alpha=0$ ($\alpha \neq 0$) となる。 $\hat{w}_1(l)$ は歩行者に壁との距離 $1-l$ がある場合に、スタックを発生させない最大の壁幅を表す。また、

$$\hat{w}_1^{\max} = \max_{0 \leq l \leq 1} \hat{w}_1(l) \approx 0.28, \quad (14)$$

である。それゆえ、 $w > \hat{w}_1^{\max}$ の壁が存在する場合には、歩行者エージェントは壁に向かってまっすぐ前進することしかできず、最終的にはスタックするという結論が導ける。現実世界における歩行者挙動との相違は明らかである。

本研究では、歩行者エージェントがスタック状態に陥ることを抑制するために、目的関数(7)の代替として、

$$d_2(\alpha) = \{d_{\max} - f(\alpha) \cos(\alpha - \alpha_0)\}^2, \quad (15)$$

を用いる。目的関数 $d_1(\alpha)$ は対象歩行者が方向 α に進んだ場合に目的点にどれだけ近づけるかということを表す指標である。一方、目的関数 $d_2(\alpha)$ は対象歩行者が方向 α に進んだ場合に目的点方向にどれだけ進めるかということを表す指標となる。

図 4 目的関数(15)による迂回行動選択の分岐点。

目的関数(15)に対しても、歩行者エージェントの進行方向が $\alpha=0$ となるか $\alpha \neq 0$ となるかの分水嶺となる状況を考えることができる (図 4)。この場合、壁幅 $w=\hat{w}_2$ と目的点から壁までの距離 l との間には、

$$\hat{w}_2(l) = \sqrt{l(2-l)}, \quad (16)$$

なる関係が成り立つ。すなわち、距離 l が所与の場合、壁幅 w が $\hat{w}_2(l)$ よりも大きければ (小さければ)、歩行者エージェントの進行方向は $\alpha=0$ ($\alpha \neq 0$) となる。 $\hat{w}_2(l)$ は歩行者に壁との距離 $1-l$ がある場合に、スタックを発生させない最大の壁幅を表す。また、

$$\hat{w}_2^{\max} = \max_{0 \leq l \leq 1} \hat{w}_2(l) = 1, \quad (17)$$

である。

図 5 迂回行動選択の分岐点における障害壁の幾何特性。

さらに、図 5 で示されているように、 $\hat{w}_2(l)$ は $0 \leq l \leq 1$ に

において増加関数であり、常に $\hat{w}_2(l) \geq \hat{w}_1(l)$ を満足する。たとえば、 $l=0.4$, $w=0.4$ の状況における歩行者の進行方向は、目的関数 $d_1(\alpha)$ の場合には $\alpha=0$ 、目的関数 $d_2(\alpha)$ の場合には $\alpha \neq 0$ となる。それゆえ、衝突回避行動モデルにおいて改良目的関数 $d_2(\alpha)$ を適用することで、歩行者エージェントがスタックするという不自然な振る舞いを効果的に抑制できることが示唆される。

2.5 慣性力を考慮した運動制御

前節までに説明された意思決定プロセスにより算出される希望速度 $\mathbf{v}_{\text{des}}$ を歩行者の駆動速度として直接利用した場合、歩行者の意図に沿った歩行軌道が必ずしも得られるとは限らない。歩行者の現在速度に起因した慣性力の影響を考慮していないからである。たとえば、移動している歩行者と静止している歩行者が同じ希望速度 $\mathbf{v}_{\text{des}}$ を持っているとしよう。静止している歩行者が理想とする歩行軌道に近付くためには駆動速度として $\mathbf{v}_{\text{des}}$ を選択することが最善である。しかしながら、移動している歩行者に対しても同様に駆動速度として $\mathbf{v}_{\text{des}}$ を選択することは、意図した歩行計画の実現に最適な行為である必然性はない。また、適切な運動制御能力を欠いた酩酊者のようなふらついた歩行挙動を生じさせる可能性も存在すると推察される。

図6 慣性運動を考慮した希望速度。

本節では、慣性力の影響を考慮した希望速度の修正方法について議論する。まずは、歩行者の振る舞いを記述する基礎方程式を、

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}} - \mathbf{v}}{\tau}, \quad (18)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (19)$$

とする。ここで、 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}$ は慣性力を考慮して決定される希望速度であり、

$$\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}} = \lambda \mathbf{u}_{\text{des}} + (1-\lambda) \mathbf{s}, \quad (20)$$

$$\mathbf{u}_{\text{des}} = \mathbf{v}_{\text{des}}(t=0), \quad (21)$$

$$\mathbf{s} = v_i^0 (\cos \theta_s, \sin \theta_s), \quad (22)$$

と定義する (図6)。ここで、 t は現在を $t=0$ とする時間である。また、 $\mathbf{u} = \mathbf{v}(t=0)$ である。なお、 $\mathbf{u}_{\text{des}}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{s}$ はシミュレーションのタイムステップごとに定義される変数であることに注意されたい。

速度 $\mathbf{s}$ は速度 $\mathbf{u}$ で移動している歩行者の慣性力を低減させる、または当該慣性力を歩行者の駆動力として利用する働きをするものである。また、式(18), (19)から速度 $\mathbf{u}$ に起因した歩行者の慣性運動の減衰時間は τ である。それゆえ、慣性力を考慮した希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}$ を定義する速度 $\mathbf{u}_{\text{des}}$ と速度 $\mathbf{s}$ の線形結合の式(20)に現れる係数 λ は時間の関数であるとし、減衰時間 τ の時間スケールで、希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}$ は速度 $\mathbf{s}$ の側から速度 $\mathbf{u}_{\text{des}}$ に向かって十分に近づくものとして、

$$\lambda = a + (1-a) \exp\left(-\frac{t_c - t}{\tau}\right), \quad (23)$$

とする。ここで、 t_c は歩行者が周囲の障害物と衝突するまでの時間である。既に衝突 (接触) しているのであれば、 $t_c = 0$ である。また、衝突が予想されない場合には、 $t_c = d_{\text{max}}/v_i^0$ とする。 $\lambda(t=t_c)=1$ が成立することに注意されたい。続いて、係数 λ は t に関して増加関数であり、 $0 \leq \lambda \leq 1$ の条件を満足するものとし、関係式

$$1 \leq a \leq \frac{1}{1-q^{-1}}, \quad (24)$$

を得る。ここで、 $q = \exp(t_c/\tau)$ である。

歩行者の振る舞いを表す運動方程式(18), (19)を解析的に解くことで、希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}$ に対応する歩行者の将来軌道は、

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^{(0)} + a\mathbf{r}^{(1)}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^{(0)} = & (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{s})q\tau \left\{ 1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} \\ & + (\mathbf{u} - \mathbf{s})\tau \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + \mathbf{s}t, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^{(1)} = & (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{s}) \left[t + q \left\{ (t + \tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \tau \right\} \right] \\ & + \tau \left\{ \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - 1 \right\}, \end{aligned} \quad (27)$$

となる。ここで、 $\mathbf{r}$ は歩行者の現在の位置座標を原点と

する局所的位置座標である.

時刻 $t=0$ において歩行者エージェントが望む理想的な軌道は,

$$\mathbf{r}_{\text{opt}} = \mathbf{u}_{\text{des}} t, \quad (28)$$

と表現することができる. また, 予測軌道 $\mathbf{r}$ と理想軌道 $\mathbf{r}_{\text{opt}}$ の間の差異に関する評価指標を,

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{t_c} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{opt}})^2 dt \\ &= (a-1)^2 F - 2(a-1)G + H, \end{aligned} \quad (29)$$

と定義する. ここで,

$$\begin{aligned} F &= \int_0^{t_c} (\mathbf{r}^{(1)})^2 dt \\ &= (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{s})^2 \left\{ \frac{1}{3} t_c^3 - \left(q + \frac{7}{2} \right) \tau_c^2 \right. \\ &\quad + \left(q^2 + 4q - \frac{9}{2} - 3q^{-1} \right) \tau_c^2 t_c \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} (q-1) (-11q + 11 + 8q^{-1} + 2q^{-2}) \tau_c^3 \right\}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} G &= \int_0^{t_c} \mathbf{r}^{(1)} \cdot (\mathbf{r}_{\text{opt}} - \mathbf{r}^{(0)} - \mathbf{r}^{(1)}) dt \\ &= (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{s}) \cdot (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{u}) \tau_c \left\{ \frac{1}{2} t_c^2 + \left(-q - 2 + \frac{3}{2} q^{-1} \right) \tau_c \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} (1 - q^{-1}) (9q - 1 - 2q^{-1}) \tau_c^2 \right\}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} H &= \int_0^{t_c} (\mathbf{r}_{\text{opt}} - \mathbf{r}^{(0)} - \mathbf{r}^{(1)})^2 dt \\ &= (\mathbf{u}_{\text{des}} - \mathbf{u})^2 \tau_c^2 \left(t_c - \frac{3}{2} \tau_c + 2\tau_c q^{-1} - \frac{\tau_c}{2} q^{-2} \right), \end{aligned} \quad (32)$$

である.

評価指標 I は変数 a の 2 次関数である. それゆえ, 評価指標 I を最小にする変数 a は, 容易に,

$$\hat{a} = \arg \min_a I = 1 + \frac{G}{F}, \quad (33)$$

と求めることができる. さらに, 関係式(24)を考慮することで, 歩行者が選択すべき変数 a の値は,

$$a^* = \max \left\{ \min \left(\hat{a}, \frac{1}{1-q^{-1}} \right), 1 \right\}, \quad (34)$$

となる.

続いて, 方程式(22)で定義される速度 $\mathbf{s}$ について議論する. 速度 $\mathbf{s}$, すなわち θ_s の値は, 評価指標

$$\Delta I = (a^* - 1)^2 F - 2(a^* - 1)G, \quad (35)$$

を最小化すべく選択すべきである. 変数 a^* , F , G は θ_s の関数であることに注意されたい. 目的関数 ΔI が最小となる θ_s を解析的に導出することは容易ではないため, 数値的な近似解法を利用する. 具体的には, θ_s を,

$$\theta_s^n = \theta_{\text{des}} + (\pi - \theta_{\text{des}}) n / N_s \quad (n=1, \dots, N_s), \quad (36)$$

と離散化し,

$$\theta_s^* = \arg \min_{\theta_s^n} \Delta I, \quad (37)$$

により得られる $\theta_s = \theta_s^*$ に基づいて速度 $\mathbf{s}$ を決定した. また, 試行錯誤的に, θ_s の離散化数は $N_s = 5$ とした.

図7 単独歩行者の複数障害物回避軌跡.
(a) 提案モデル. (b) 既存モデル.

上記の議論により算出される $\theta_s = \theta_s^*$ とそれに対応する $a = a^*$ を用いることで, 慣性力を考慮した希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}(t)$ が決定される. すなわち, 現在の希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}(t=0)$ の値が歩行者の駆動速度として採用されることになる.

3. モデル動作検証と考察

本研究で提案する歩行者行動モデルの妥当性を明らかにするために, いくつかの仮想的な条件下での動作検証を行った. また, 既存のヒューリスティックモデル [Moussaïd 11] による動作結果との比較により, 提案モデルの有用性を示す.

モデルパラメータは既往研究[Moussaïd 11]を参考に,

自由歩行速度の大きさ v_i^0 を平均 1.5 m/s, 標準偏差 0.3 m/s の正規分布, 歩行者の質量 m_i を平均 60 kg, 標準偏差 5 kg の正規分布, 視覚距離 $d_{\max} = 10$ m, 視野角 $\varphi = 100^\circ$, 緩和時間 $\tau = 0.5$ 秒, 歩行者の質量から半径を算出する変換係数 $\psi = 220$ kg/m とした.

また, 計算結果の収束性の観点から, 離散化した視野角の角解像度は約 3° , シミュレーションの 1 ステップに対応する時間刻み幅は 0.1 秒とした.

3.1 単独歩行者挙動

まずは基礎的検証として, 静止障害物が複数存在する環境における単独歩行者の回避行動を調べた. 歩行者軌跡を 0.2 秒間隔でプロットした結果を図 7 に示す. 通路幅員は最大 4 m, 最小 1 m である. 図 7 には, 幅員 1 m 通路における歩行者軌跡の部分拡大図も併せて示している.

既存モデルの場合には, 提案モデルでは存在しない曲がり角付近における歩行者の蛇行運動の発生が確認できる. 換言すると, 歩行者身体の運動特性に基づき駆動速度を決定する提案モデルによって曲がり角付近における不自然な蛇行が発生しない現実的な歩行者挙動の再現が可能となる. なお, Social Force モデルにおいても, 歩行者軌跡の複雑性が問題となる点を注記する[Narang 15].

図 8 単独歩行者の壁迂回軌跡.

続いて, 歩行者の目の前に壁がある状況における単独歩行者の迂回行動を調べた. ただし, 歩行者の眼前にある壁は物質的な壁ではなく, 静止した歩行者によって構成される人の壁であるとし, 歩行者の発生位置と目的地を結んだ単一の通路リンクが敷設されているとする. 歩行者軌跡を 0.8 秒間隔でプロットした結果を図 8 に示す. 提案モデル (既存モデル) による歩行者を赤色 (緑色)

で表現している. また, 壁幅は 6 m である.

既存モデルの場合には, 歩行者は壁に向かってまっすぐ前進し, 最終的にはスタックする. 当該歩行者挙動は式(14)の解析結果から推測され得るものである. 一方, 提案モデルの場合には, 歩行者はスタックせずに自然な軌跡で目の前の壁を迂回して移動することが確認できる.

図 9 狭窄部を通過する歩行者流動の時間変化.

3.2 狭窄部を通過する歩行者流動

図 9 に示すように, 左右二つの部屋から歩行者群を流し, 狭窄部を通過する歩行者行動を調べた. 各部屋において歩行者の平均発生率は 5 ped/s, 発生総数は 50 人とした. また, 開口幅は 1 m である.

提案モデルと既存モデルにおける歩行者挙動に大きな差異は確認できなかったため, 図 9 には提案モデルの結果のみを示す.

開口部を通過できる単位時間当たりの人数は歩行者の人体円半径により物理的制限を受けることから, 開口部入口で滞留者が発生する. また, 滞留者はアーチ状の形態を形成することが観測された. 外部環境 (開口幅) によって滞留特性が規定される問題であるので, 衝突回避行動のモデル依存性は歩行者行動のマクロ特性に大きな影響は与えないと推察される. 開口部の流動係数は, 擬似乱数のシードを変えて得られた 10 回のシミュレーション結果の平均値として, 提案モデルでは 1.53 ped/ms, 既存モデルでは 1.50 ped/ms と算出された.

なお, 開口部の流動係数は, 歩行者の質量から半径を

算出する変換係数 ψ の値に依存する。本論文では、今後の実問題への展開を想定して、避難性状を安全側に予測する立場を取る。それゆえ、開口部の流動係数が概ね 1.5 ped/ms, すなわち避難計算の一般値となるように変換係数 ψ の値を設定した。

図 10 直線通路における双方向流の時間変化。
(a) 提案モデル. (b) 既存モデル.

3.3 直線通路における対向流

直線通路の両端から歩行者群を流し、対向流が発生する場合の歩行者行動を調べた (図 10). 各端部において歩行者の平均発生率は 4 ped/s, 発生総数は 100 人とした。また、通路の幅員は 6 m である。

右 (左) 端部を目的地とする歩行者を赤色 (青色), 発生領域に存在する歩行者を緑色で表現している。

図 11 直線通路双方向流における平均旅行時間.

提案モデルにおいては、歩行者集団による自発的なレーン形成が観測できる。同じ方向に向かう歩行者群はあたかも専用のレーンを設置しているかのごとく振る舞い、効率的な歩行者交通流が実現される。一方、既存モデルの場合には、別方向に向かう歩行者を互いに押し合っ

て妨害する挙動が顕在化することで、歩行者集団の流動性は悪化する。なお、歩行者の発生総数、すなわち歩行者数密度が低い場合には、提案モデルと既存モデルの両者においてレーン形成が観測できることを注記する。

続いて、提案モデルと既存モデルによる歩行者行動特性を定量的に比較するために、歩行者の発生総数を変化させた場合に平均旅行時間がどのように変化するかを調べた (図 11). 提案モデル (既存モデル) の結果は赤色 (青色) で表現している。歩行者の発生総数は最小 2 人から最大 800 人までとした。また、各発生総数における平均旅行時間は、擬似乱数のシードを変えて得られた 10 回のシミュレーション結果の平均値として算出した。

当然のことながら、提案モデルと既存モデルの両者において、歩行者の発生総数が増加すれば、平均旅行時間も増加することが確認できる。また、既存モデルと比較して、提案モデルの平均旅行時間は常に小さく、その差異は歩行者の発生総数が増加するに従い大きくなることが観測できる。

図 12 直線通路双方向流における旅行時間の頻度分布。
(a) 歩行者数 200 人. (b) 歩行者数 800 人.

さらに、歩行者の発生総数を 200 人および 800 人とした場合の旅行時間の相対頻度分布を図 12 に示す。提案モデル (既存モデル) の結果は赤色 (青色) で表現している。歩行者の発生総数が大きくなると、相対頻度分布のピーク値は減少し、分布形状はブロード化することが、提案モデル、既存モデルの両者に共通して確認できる。

3.4 複雑通路における対向流

同様に、複雑通路の両端から歩行者群を流し、対向流が発生する場合の歩行者行動を調べた (図 13). 各端部において歩行者の平均発生率は 1 ped/s, 発生総数は 300

人とした。また、通路の幅員は 4 m である。

右下 (左下) 端部を目的地とする歩行者を赤色 (青色)、発生領域に存在する歩行者を緑色で表現している。

提案モデルの場合には、曲がり角付近で幾分混雑するものの、直線通路の結果と同様にスムーズな歩行者交通流が実現される。一方、既存モデルの場合には、曲がり角付近で大きな滞留の発生が確認できる。

図 13 複雑通路における双方向流の流動性状。
(a) 提案モデル。 (b) 既存モデル。

歩行者は目的地への旅行時間が最小となるように行動する。それゆえ、歩行者は曲がり角の内側を進もうとする (図 2)。しかしながら、内側で歩行者が滞留し、外側が空いている状況であれば、歩行者は滞留場所を迂回するように行動する。曲がり角付近の滞留者数は歩行者エージェントの衝突回避能力を具現化したものと理解することができる。

図 14 複雑通路双方向流における平均旅行時間。

本論文では、衝突回避行動における目的点 O_i の設定方

法を提案モデルと既存モデルで同一としている。それゆえ、歩行者の希望する進行方向を決定する行動ヒューリスティックを記述している目的関数(7)と(15)の違いが、提案モデルと既存モデルにおける歩行者エージェントの衝突回避能力の差異を生み出していると推察される。

図 15 複雑通路双方向流における旅行時間の頻度分布。
(a) 歩行者数 200 人。 (b) 歩行者数 600 人。

続いて、提案モデルと既存モデルによる歩行者行動特性を定量的に比較するために、歩行者の発生総数を変化させた場合に平均旅行時間がどのように変化するかを調べた (図 14)。提案モデル (既存モデル) の結果は赤色 (青色) で表現している。歩行者の発生総数は最小 2 人から最大 600 人までとした。また、各発生総数における平均旅行時間は、擬似乱数のシードを変えて得られた 10 回のシミュレーション結果の平均値として算出した。

当然のことながら、提案モデルと既存モデルの両者において、歩行者の発生総数が増加すれば、平均旅行時間も増加することが確認できる。また、既存モデルと比較して、提案モデルの平均旅行時間は常に小さく、その差異は歩行者の発生総数が増加するに従い大きくなることが観測できる。歩行者の発生総数が 600 人の場合、既存モデルの平均旅行時間は提案モデルの約 2 倍となる。

さらに、歩行者の発生総数を 200 人および 600 人とした場合の旅行時間の相対頻度分布を図 15 に示す。提案モデル (既存モデル) の結果は赤色 (青色) で表現している。歩行者の発生総数が大きくなると、相対頻度分布のピーク値は減少し、分布形状はブロード化することが、提案モデル、既存モデルの両者に共通して確認できる。

大規模イベント会場や都市インフラ施設などでの災害発生時の群集避難行動において、歩行者の安全性が危惧される高密度歩行者流あるいは歩行者の滞留現象の発

生予測に関して、提案モデルと既存モデルの間には大きな隔たりが存在する。

図 16 大規模水害時における群集避難のシミュレーション結果。
(a) 交差点周辺。(b) 全体俯瞰図。

4. まとめ

本研究では、行動ヒューリスティクスに基づき、歩行者が将来軌道を計画する際の意思決定プロセスを定式化した。さらに、歩行者は意図した軌道計画を実現すべく歩行者身体の運動特性を考慮して行動するとするモデルを提案した。

仮想的なシナリオ実験により、提案モデルは現実的な歩行軌跡を表現できるとともに、既存モデルではスタッキングが発生する環境においても安定してスムーズな歩行者交通流を実現できることが示された。

今後の取り組みとしては、人流測定実験から得られた観測データと比較検証することで、シミュレーションモデルの高度化を進める。具体的には、逐次型データ同化手法を用いることで、人の流れを高精度に推定する技術の確立を目指す。

また、現実世界への応用としては、都市部における大規模洪水発生時の避難問題の把握や対応策の検討を目的に、広域群集避難シミュレーションを実施しているところであり(図 16)、別途論文として発表の予定である。シミュレーションモデルの概要については文献[廣川 16, 西川 15]をご覧ください。

謝辞

本研究は、文部科学省ポスト「京」萌芽的課題 2「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研

究(多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発)」の元で実施したものです。

◇ 参考文献 ◇

- [Duives 13] Duives, D.C., Daamen, W., Hoogendoorn, S.P.: “State-of-the-art crowd motion simulation models”, *Transportation Research Part C*, vol.37, pp.193-209, 2013.
- [Helbing 09] Helbing, D., Johansson, A.: “Pedestrian, crowd and evacuation dynamics”, In: Meyers, R.A. (ed.), *Encyclopedia of Complexity and System Science*, vol.16, pp.6476-6495, Springer, 2009.
- [Helbing 15] Helbing, D., Brockmann, D., Chadeaux, T., Donnay, K., Blanke, U., Woolley-Meza, O., Moussaïd, M., Johansson, A., Krause, J., Schutte, S., Perc, M.: “Saving human lives: What complexity science and information systems can contribute”, *Journal of Statistical Physics*, vol.158, no.3, pp.735-781, 2015.
- [廣川 16] 廣川雄一, 西川憲明, 浅野俊幸, 坂井隆志, 山田武志, 印南潤二: “都市河川氾濫時における大規模避難シミュレーションの可視化”, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, vol.36, suppl. no.1, 2016.
- [Moussaïd 11] Moussaïd M., Helbing D., Theraulaz G.: “How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol.108, no.17, pp.6884-6888, 2011.
- [Narang 15] Narang, S., Best, A., Curtis, S., Manocha, D.: “Generating pedestrian trajectories consistent with the fundamental diagram based on physiological and psychological factors”, *PLoS ONE*, vol.10, no.4, e0117856, 2015.
- [西川 15] 西川憲明, 廣川雄一, 浅野俊幸: “歩行者避難シミュレーションにおける環境知識及び認知情報を考慮した動的経路探索モデルの構築”, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2015 (JAWS2015) 予稿集, 2015.
- [Schadschneider 09] Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried, A.: “Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications”, In: Meyers, R.A. (ed.), *Encyclopedia of Complexity and System Science*, vol.5, pp.3142-3176, Springer, 2009.

[担当委員: 鳥海 不二夫]

2016 年 12 月 2 日 受理

—— 著 者 紹 介 ——

西川 憲明 (正会員)

2005 年広島大学大学院先端物質科学研究科量子物質科学専攻博士課程後期修了。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員。博士(理学)。マルチエージェントシミュレーション、大規模数値計算技術の研究開発に従事。2011 年地盤工学会地盤環境賞, 2014 年日本計算工学会論文賞などを受賞。日本計算工学会, IEEE 各会員。

廣川 雄一（正会員）

2005 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構地球情報基盤センター研究員。Multi-Agent Systems を用いた歩行者のモデル化, High Performance Computing などの研究に従事。

2016 年可視化情報シンポジウム アートコンテスト 金賞受賞。博士（情報科学）。日本機械学会，情報処理学会各会員。

山田 武志（正会員）

2000 年東京学芸大学大学院教育学研究科 数学教育専攻修士課程修了。現在、株式会社ベクトル総研主任研究員。主としてマルチエージェント人流シミュレーションの研究開発と人流シミュレーションを活用した施設計画，都市防災計画等に関するコンサルティング業務に従事。土木学会，日本火災学会各会員。

印南 潤二

2008 年山梨大学大学院医学工学総合教育部（現医工農学総合教育部）持続社会形成専攻博士後期課程修了。博士（工学）。同年、株式会社ベクトル総研入社。主に、マルチエージェントシミュレータの開発、これを用いた分析，コンサルティング業

に携わる。

浅野 俊幸（正会員）

2008 年横浜国立大学大学院環境情報学府リスクマネジメント専攻修了。博士（工学）。2007 年独立行政法人防災科学技術研究所主幹研究員，現在，国立研究開発法人海洋研究開発機構上席技術研究員。地球情報基盤センターにおいて，地球シミュレータ等の

HPC システムの外部共用促進，マルチエージェント人流シミュレーションの研究開発と社会実装に従事。情報処理学会会員。2009 年情報知識学会論文賞などを受賞。