

ヒューリスティックモデルによる群集シミュレーション Development of crowd simulator based on heuristic model

西川 憲明^{*1}
Noriaki Nishikawa

廣川 雄一^{*1}
Yuichi Hirokawa

山田 武志^{*2}
Takeshi Yamada

印南 潤二^{*2}
Junji Innami

浅野 俊幸^{*1}
Toshiyuki Asano

^{*1} 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 (JAMSTEC)

^{*2} 株式会社ベクトル総研
Vector Research Institute, Inc.

In recent years, crowd simulation has received a surge in attention. One of the reasons for investigating crowd flow 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. However, finding a realistic description of pedestrian behavior is extremely challenging and pedestrian modeling still remains a matter of debate. In this paper, we propose a microscopic pedestrian simulation model based on concepts of cognitive science. 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規模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。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。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。

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、本稿では歩行者の衝突回避行動の表現にヒューリスティックモデル[西川 16]を採用して、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群集流動シミュレーションモデルを提案する。

2. 群集流動シミュレーションモデル

2.1 経路探索行動

本研究では、歩行者が目的地および目的地までの経路を探索する行動表現として、道路ネットワーク情報を用いた既存経路探索モデル[西川 15]を採用する。歩行者は過去の経験や避難時の経験により、自身が把握する頭の中の地図情報が異なると考えられる。たとえば、地元住民は細部の道路までよく知っている一方、観光客など外部地域からの訪問者は主要道のみしか把握していない可能性がある。対象地域の地理に暗い歩行者の場合、目的地までの道順を知らないため周辺をうろつきな

がら新たな経路を探す行動をとるであろう。また、道路の混雑状況や被災状況などは対象地点に到達した歩行者か、その歩行者から情報伝達を受けたものにはしか知りえないであろう。当該経路探索モデルは以上の観点から構築されたものである。個々の歩行者エージェントは独自に保有する脳内地図情報を周囲の状況に応じて適宜更新し、目的地とそこに至る経路を動的に探索、選択していく。ネットワークを構成する各リンクには、(1)幅員に依存したリンク認知距離、(2)混雑状況、(3)被災状況により重み付けされた通過コストが付与される。目的地がネットワークで繋がっている場合には、この通過コストの合計値が最小となる経路を探索することで、エージェントごとの経路が決定論的に選択される。

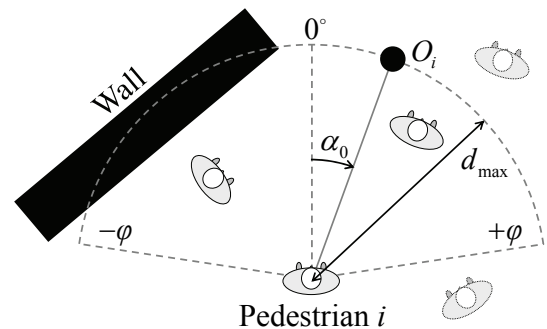


図1 歩行者の視覚情報.

2.2 衝突回避行動

本節では、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。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られる。

連絡先: 西川 憲明, 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, 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173 番 25, nnishikawa@jamstec.go.jp

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 $R_i = m_i/220$ の円で表現する。ここで、 m_i は歩行者 i の質量である。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)。

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度内の全ての方向 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。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。

それでは、視覚情報に基づいた行動ヒューリスティクスを規定することで歩行者の振る舞いを記述しよう。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 の方向にどれだけ進めるかということを考えて進行方向を選択するものと仮定する。すなわち、歩行者により選択される進行方向 α_{des} は目的関数、

$$d(\alpha) = \{d_{\max} - f(\alpha)\cos(\alpha - \alpha_0)\}^2, \quad (1)$$

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。

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 が確保されるように行動するものと仮定する。言い換える、

$$v_{\text{des}}(t) = \min\left(v_i^0, \frac{d_c}{\tau}\right), \quad (2)$$

となる。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。

さて、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、

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{v}_{\text{des}} - \mathbf{v}_i}{\tau}, \quad (3)$$

により与えよう。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。

上述した意思決定プロセスにより算出される希望速度 \mathbf{v}_{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ことが推察されよう。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。

以上の議論より、慣性力の影響を考慮した希望速度の修正方法を考えよう。まずは、歩行者の振る舞いを記述する基礎方程式を、

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}} - \mathbf{v}}{\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (5)$$

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、

$$\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}} = \lambda\mathbf{u}_{\text{des}} + (1-\lambda)\mathbf{w}, \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{\text{des}} = \mathbf{v}_{\text{des}}(t=0), \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{v}(t=0), \quad (8)$$

$$\mathbf{w} = v_i^0(\cos\theta_w, \sin\theta_w), \quad (9)$$

と定義する(図 2)。ここで、 t は現在を $t=0$ とする時間である。また、係数 λ は時間の関数であるとし、

$$\lambda = a + (1-a)\exp\left(-\frac{t_c - t}{\tau}\right), \quad (10)$$

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、 $t_c = d_{\max}/v_i^0$ 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

$$1 \leq a \leq \frac{1}{1-q^{-1}}, \quad (11)$$

を得る。ここで、 $q = \exp(t_c/\tau)$ である。

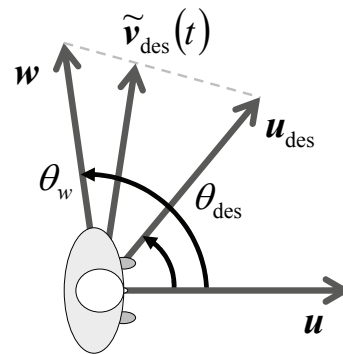


図 2 慣性運動を考慮した希望速度。

希望速度 $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{des}}$ に対応する歩行者の将来軌道 \mathbf{r} は運動方程式 (4), (5) を解析的に解くことで導出できる。一方、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、歩行者の現在の位置を原点とする局所的位置座標において、

$$\mathbf{r}_{\text{opt}} = \mathbf{u}_{\text{des}}t, \quad (12)$$

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}_{opt} の間の差異に関する評価指標を、

$$I(\theta_w, a) = \int_0^{t_c} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{opt}})^2 dt, \quad (13)$$

と定義する。

慣性力を考慮した希望速度 $\tilde{v}_{des}(t)$ を規定する変数 θ_w , a は評価指標 I の最小化を目的に半解析的に算出できる。すなわち、現在の希望速度 $\tilde{v}_{des}(t=0)$ の値が歩行者の駆動速度として採用されることになる。

さて、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、

$$f_{ij} = Kg(R_i + R_j - d_{ij})n_{ij}, \quad (14)$$

とする。ここで、 $g(x) = \max(x, 0)$ である。また、 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、

$$f_{iw} = Kg(R_i - d_{iw})n_{iw}, \quad (15)$$

とする。ここで、 d_{iw} は壁 w との距離、 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、

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{\tilde{v}_{des} - v_i}{\tau} + \sum_j \frac{f_{ij}}{m_i} + \sum_w \frac{f_{iw}}{m_i}, \quad (16)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i, \quad (17)$$

となる。

3. 検証実験と考察

本研究で提案する群集流動シミュレーション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検証実験を行った。

モデルパラメータは既往研究を参考に、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 $\phi = 100^\circ$ 、緩和時間 $\tau = 0.5$ 秒とした。

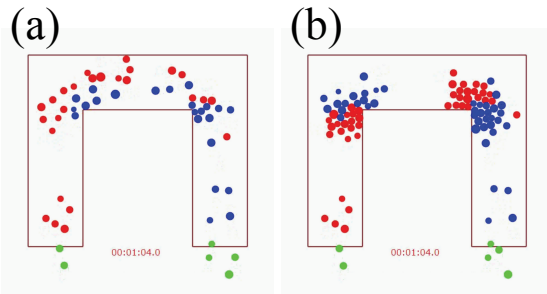


図3 コの字型通路における対向流。
(a) 提案モデル。(b) 既存モデル。

3.1 コの字型通路における対向流

コの字型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 3)。衝突回避行動の表現に

既存モデル[Moussaïd 11]を適用した結果も併せて示している。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 100 人とした。また、通路の幅員は 4 m である。

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、スムーズな歩行者交通流が実現されている。一方、既存モデルの場合には、曲がり角付近で顕著な滞留の発生が確認できる。

歩行者は目的地への旅行時間が最小となるよう行動する。それゆえ、歩行者は曲がり角の内側を進もうとする。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。

3.2 群集混雑時の迂回行動

静止障害物が複数存在する環境を対象として、群集混雑が発生した場合における歩行者の迂回行動を調べた(図 4)。通路幅員は最大 4 m、最小 1 m である。歩行者は現在選択している各リンクに応じて色付けして表現されている。

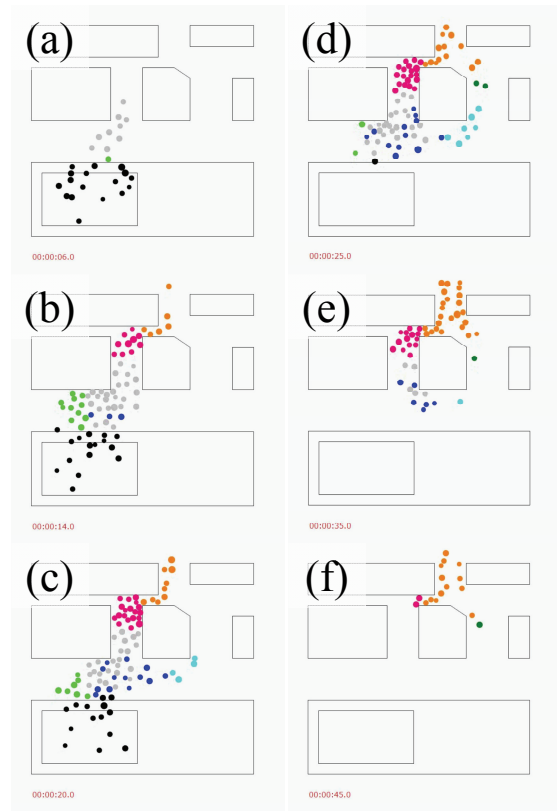


図4 群集混雑による迂回行動。

シミュレーションの開始直後、発生地点から出発した歩行者群は目的地までの最短経路を選択し進んでいく。その後、通路幅員 1 m の狭窄箇所が歩行者の流動性を阻害することで滞留が生じる。混雑状況を認知した歩行者は、目的地に至るリンク通過コストの合計値を最小とする経路を探索することで、迂回路を選択するかどうかを適応的に判断して行動する。

3.3 地図情報の初期値と経路探索行動

歩行者が独自に保有する地図情報の初期値が経路探索行動に与える影響について調べた。歩行者には 2 つの目的地候

補の位置が所与され、個々の地図情報にしたがって経路を選択するものとする(図5)。

地図情報の初期値の与え方としては以下の3種類のエージェント属性に対してそれぞれ異なる設定方法を適用する。

- (1) 地域住民(対象地域の地理に明るい)
- (2) 来街者(対象地域の地理に暗い)
- (3) 地図を見る人

地域住民の場合、まずは、発生地点から半径 R 以内のリンクは幅員に係わらず、完全既知情報とする。 $R = 80 \text{ m}$ とする。続いて、道路の認知率を道幅 w と発生地点からの距離 d の関数として、認知している道路を確率的に割り当てる。具体的には、半径 R 以内に存在する既知リンクを探索開始リンクとして、当該リンクと接続している未知リンクに対する認知率、

$$P = \frac{Kw - d}{Kw - R}, \quad (18)$$

に基づき、当該エージェントにおいて既知リンクとするかどうかの判定を行う。 $K = 125$ とする。すなわち、発生地点から 500 m 離れた幅員 4 m の道路の認知率は 0 である。その後、幅員 W 以上のリンクは完全既知情報とする処理を実施する。 $W = 8 \text{ m}$ とする。

来街者における地図情報の初期値設定に関しても、上述の地域住民の場合と同様の処理を実施する。ただし、 $R = 40 \text{ m}$ 、 $K = 62.5$ 、 $W = 12 \text{ m}$ とする。発生地点から 250 m 離れた幅員 4 m の道路の認知率は 0 である。また、来街者については半径 R の範囲外で幅員 W^{min} 未満のリンクは確定的に未知リンクであるとする条件を付加する。 $W^{\text{min}} = 4 \text{ m}$ とする。

携帯電話やスマートフォン等の機器を操作して地図を見ながら移動するエージェントについては、ネットワーク情報を完全既知情報として与える。

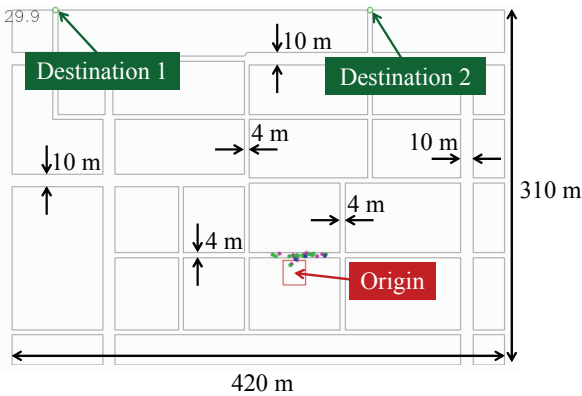


図5 シミュレーション空間。

地域住民 13 人、来街者 14 人、地図を見る人 3 人が発生地点から目的地に向かう様子を図6に示す。地域住民は緑色、来街者は赤色、地図を見る人は青色で表現されている。

地域住民の場合、発生地点から目的地1までの距離は約 300 m 、目的地2までの距離は約 250 m であるため、目的地付近の幅員 4 m の道路の認知率は約半分になる。最短経路に含まれる道路を認知していない地域住民は、遠回りして目的地2に向かう。

一方、来街者の場合には目的地付近の幅員 4 m の道路の認知率は非常に低いため、どちらの目的地への経路もあらかじめ分かっている者の割合が増大する。目的地までの道順を

知らない来街者は、保有する地図情報において現在地から最寄りの目的地の方向に向いている経路を優位に選択して進んでいく。この探索行動中に未知のリンクを発見することができ、来街者の頭の中の地図情報は徐々に更新されていく。結果として、来街者の大半は目的地2に向かうことになる。

なお、当然のことではあるが、地図を見ながら移動する人は最短経路を通して目的地2に向かう。

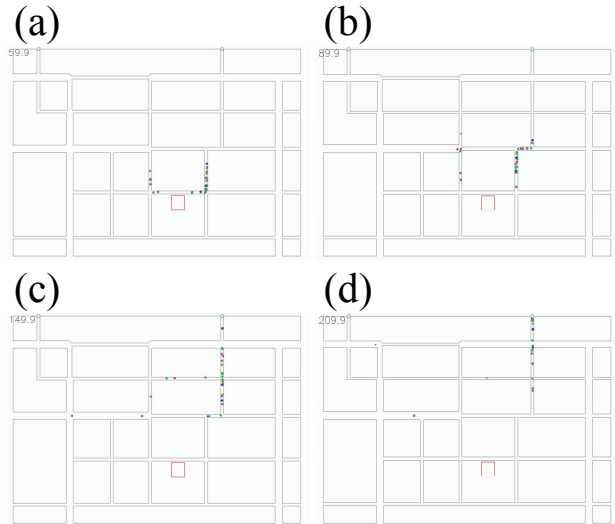


図6 経路探索行動。

4. おわりに

本稿では、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アプローチのもと、複雑な都市空間における災害時の避難誘導計画の検討に資する群集流動シミュレーションモデルを構築した。

仮想的なシナリオ実験により、既存モデルでは不自然なスタッキングが発生する環境においても、提案モデルは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。さらに、歩行者の脳内地図情報を基盤とした経路探索行動モデルの有用性に対する予察的な検討を実施した。

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

- [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.
- [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.
- [西川 16] 西川憲明, 廣川雄一, 浅野俊幸, 山田武志, 印南潤二: “ヒューリスティックモデルによる歩行者シミュレーション”, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2016 (JAWS2016) 予稿集, 2016.