



# 環境要因による連続回避本能の発生率

Human mobility considering continuous collision-avoidance due to environmental factors

堤琴里<sup>1)</sup>、田村裕一<sup>2)</sup>、佐藤克成<sup>1)</sup>

Kotori TSUTSUMI, Yuichi TAMURA, and Katsunari SATOU

1) 奈良女子大学 人間文化総合科学研究科 (〒630-8263 奈良県奈良市北魚屋西町、uak\_tsutsumi@cc.nara-wu.ac.jp)

2) 甲南大学 (〒658-0072 兵庫県神戸市東灘区岡本 8 丁目 9-1、tamura@konan-u.ac.jp)

**概要:** 対向する歩行者が連続して同じ方向に避け合い、共に前に進めなくなる現象のことを、連続回避本能と呼ぶ。本研究では連続回避本能のシミュレーションを作成し、環境要因である人数、道幅を変化させ、それに伴い変化する連続回避本能の発生率の違い・関係について定量評価を行う。さらに、作成したシミュレーションの妥当性について議論する。

**キーワード:** 連続回避本能、歩行予測、衝突処理

## 1. はじめに

歩道や建物内、廊下等、外出先で歩く場合様々な環境が考えられる。そして、歩いていると対向する歩行者とぶつかりそうになることがある。その際、両者共に相手を避けようとするが、初めに同じ方向に避けてしまうと次も避ける方向が同じになり、その次も同じ方向といった具合で連続して避け合うことで、共に前に進めなくなる現象がある。この現象は人の連続回避本能と呼ばれている。

本研究では、連続回避本能のシミュレーションを作成し、環境要因である道幅、人数を変化させ、それに伴い変化する連続回避本能の発生率の違い・関係性について定量評価を行うことを目的とする。加えて作成したシミュレーションの妥当性についても議論する。

シミュレーションで再現することによって、様々な環境での想定が可能であり、建物の建設や都市計画等、大規模な設計において事前に活用できる。また人の性質を対象としているため、実際に何人も集める必要がなく、その場の想定される得る人数に合わせて適宜設定し、連続回避本能の発生数を想定することが可能となる。さらに、VR 環境における NPC (Non Player Character) の歩行に連続回避本能のモデルを実装することで、実際人とコンピュータの融合による建造物の設計と評価も可能になる。

## 2. 連続回避本能のシミュレーション

人の流れを再現した手法に Helbing らが提唱した、Social Force Model (SFM) がある[1]。これは、歩行速度算出のために、目的地へ向かおうとする推進力や、他の歩行者と距

離を置こうとする位置関係、壁や障害物からの距離を基にして受ける力の相互作用を力学モデルとしている。

本研究は SFM をベースとして、連続回避本能を再現するための式を追加し、連続回避本能のシミュレーションを実装する。

### 2.1 アルゴリズム

歩行者の現時点(ある時刻  $t - \Delta t$ )での位置と、その時点から  $\Delta t$  後 ( $t$ ) にいると予測される位置を、図 1 中に黒丸と点状の仮想円(以下 ghost)で示す。予測位置の決定には SFM を使い、図 1 に示すように、ghost の位置は現時点での歩行者のある時刻 ( $t - \Delta t$ ) の速度ベクトル ( $\mathbf{v}_i(t - \Delta t)$ ) に、外力により生じる平均加速度ベクトルから算出した速度ベクトル ( $\frac{f_i(t)}{2m} \Delta t$ ) を足し合わせた  $\mathbf{v}_i(t)$  から導かれるものである。

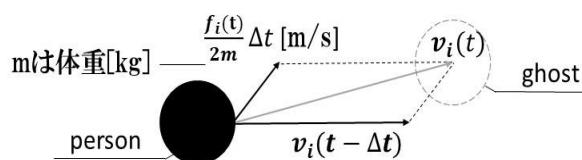


図 1 予測位置の決定

外力は、他の歩行者から受ける斥力や目的地から受ける引力の合力によって決定することとし、式(1)、式(2)で表される[2][3][4]。ただし本研究では、歩行者同士が衝突しそうな時に、式(3)で表される衝突処理により外力が決まるものとする。

$$\frac{dv_i}{dt} = f_i(t) + \xi_i \quad (1)$$

$$f_i(t) = f_i^0(t) + \sum_{j \neq i} f_{ij}^{soc}(t) + \sum_{j \neq i} f_{iw}^{wall}(t) \quad (2)$$

(Dis > thr : Dis は gohst 間距離, thr は判定閾値)

$$f_i(t) = f_{ij}^{sig}(t) \quad (\text{Dis} \leq \text{thr}) \quad (3)$$

ここで、 $\xi_i$ は揺らぎ項であり、 $f_i^0(t)$ は歩行者  $i$  が目的地から受ける引力つまり目的地への推進力、 $f_{ij}^{soc}(t)$ は歩行者  $i$  が他の歩行者  $j$  から距離を置こうとする社会的な斥力、 $f_{iw}^{wall}(t)$ は歩行者  $i$  が壁から距離を置こうとする斥力、 $f_{ij}^{sig}(t)$ は歩行者  $i$  が他の歩行者  $j$  と衝突しそうになった時に受ける力を表す。例えば、 $f_i^0(t)$ 、 $f_{ij}^{soc}(t)$ 、 $f_{iw}^{wall}(t)$ は式 (4)、(5)、(6) で表し、今回追加した  $f_{ij}^{sig}(t)$ は式 (7) で表す。

$$f_i^0(t) = \frac{v_i^0 e_i - v_i}{\tau_i} \quad (4)$$

$$f_{ij}^{soc}(t) = A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right) n_{ij} \quad (5)$$

$$f_{iw}^{wall}(t) = C_i \exp\left(-\frac{d_{iw}}{D_i}\right) n_{iw} \quad (6)$$

$$f_{ij}^{sig}(t) = E_i m_{ij} \quad (7)$$

$v_i^0$ は歩行者  $i$  の希望歩行速さ、 $e_i$ は歩行者  $i$  から見た目的地への単位方向ベクトル、 $v_i$ は歩行者  $i$  の現在の速度、 $\tau_i$ は歩行者  $i$  が元の歩行軌道に修正するまでの緩和時間、 $r_{ij}$ は歩行者  $i$  と歩行者  $j$  の人体半径の和、 $d_{ij}$ は歩行者  $i$  と歩行者  $j$  の中心間の距離、 $n_{ij}$ は歩行者  $j$  から見た歩行者  $i$  への単位方向ベクトル、 $d_{iw}$ は歩行者  $i$  と壁までの距離、 $n_{iw}$ は歩行者  $i$  が受ける壁からの法線方向単位ベクトル、 $m_{ij}$ は  $n_{ij}$ の法線ベクトル、 $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ 、 $E_i$ はモデルパラメータで、 $A_i = 18.66$ 、 $B_i = 0.69$ 、 $C_i = 500$ 、 $D_i = 0.08$ 、 $E_i = 0.2$ 、緩和時間  $\tau_i = 0.5$ 、人体半径は 30cm と設定した。男性か女性かもランダムで設定する。描画範囲は  $2 \times 15\text{m}$  と  $3.5 \times 15\text{m}$  の道を想定し、初期速度は男性ならば  $0.91 \sim 1.6[\text{m/s}]$ 、女性ならば  $0.85 \sim 1.31[\text{m/s}]$ の間でランダムに設定した。

衝突直前の判定には ghost 間距離を用いる。歩行者  $i$  の ghost と、向かってくる歩行者  $j$  の ghost の位置が 20cm より近い場合に式 (3) のように衝突処理を行う。衝突処理は、歩行者  $i$  と歩行者  $j$  が初めての衝突処理ならば、互いの中心を結ぶベクトルと垂直なベクトルに従ってどちらかの方向に避ける。図 2 のように、どちらの方向に避けるかはランダムで設定し、 $m_{ij}$ の符号によって区別した。2 回目以降の衝突処理ならば、1 つ前に避けた方向と反対のベクトル方向に避ける、もしくはその場で止まるようにした。

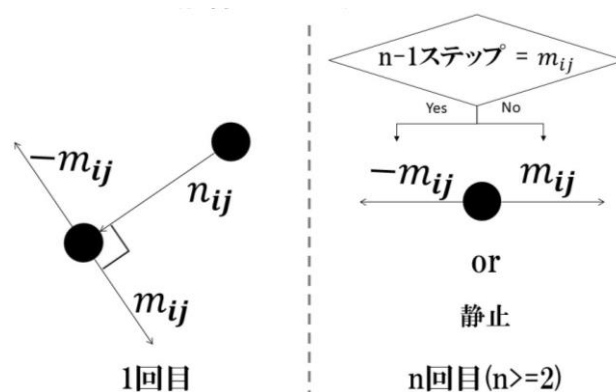


図 2 : 衝突処理

## 2.2 プログラム構成

上記で示した式を Python により実装し、環境要因である道幅・人数を変化させ、連続回避本能の発生数を算出する。プログラムの流れを図 3 に示す。

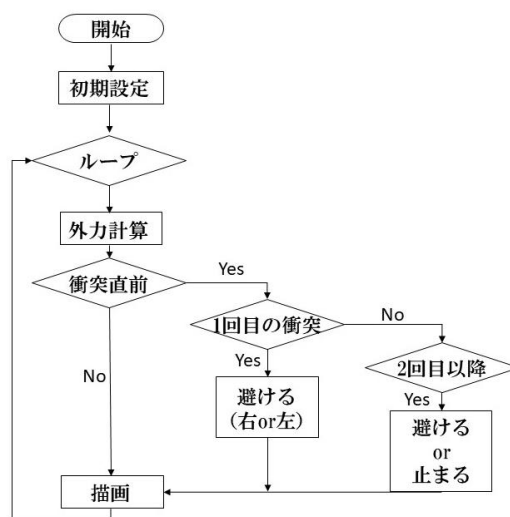


図 3 : フローチャート

初期設定では、歩行者の位置や数を決めミュレーション空間内に配置する。その後 ghost の位置に歩行者を配置し、次の ghost の位置を図 3 の 外力計算において決定する。その後、全ての歩行者に対して衝突直前の判定をする。衝突直前と判定された場合は、衝突が 1 回目なのか 2 回目以上なのかで処理の内容が変わり、初めての衝突ならば  $m_{ij}$  の符号をランダムで決定し、左右どちらかに避けるようにする。n 回目 ( $n \geq 2$ ) ならば n-1 回目の  $m_{ij}$  の符号を反転させどちらに避けるか決定する、もしくは外力  $f_i(t)$  を  $\vec{0}$  にし、その場で止まる処理をした。また、計算ステップは 0.1 秒とし、描画した。単位は SI 単位とした。シミュレーション実行様子を図 4 に示す。

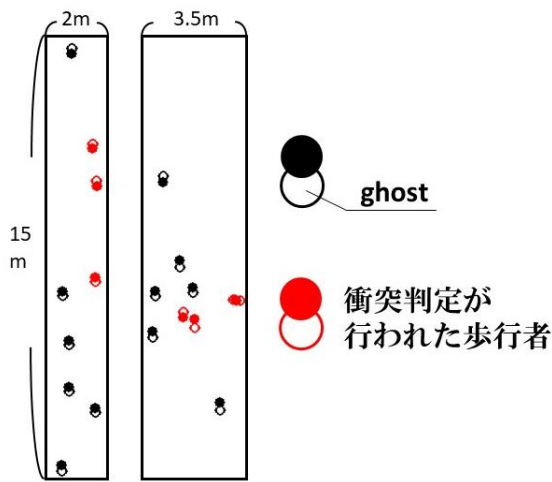


図4：シミュレーション実行の様子

### 3. 実験

本研究では、環境要因である道幅と人数を変化させ連続回避本能の発生率について検証する。

道幅は学校の廊下幅 2m と、通行に必要な歩道幅 3.5m を想定した。いずれも道の長さは 15m とした。また、道を歩く人数は 5～15 人の範囲で、2 人おきに設定した。各条件でシミュレーションは 10 回ずつ繰り返した。

#### 3.1 実験 1

歩行者の初期位置はランダムとした。場合の結果を図 5 に示す。横軸は人数、縦軸は 10 回の試行の平均発生回数を示す。

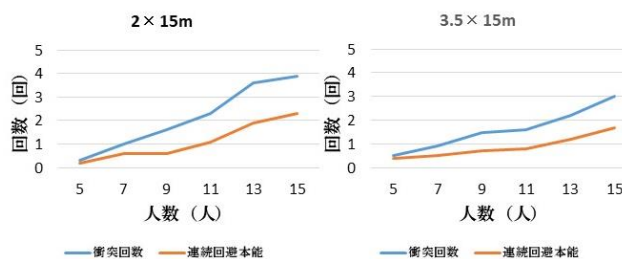


図5：ランダムな初期位置でのデータ

図 5 の結果から、道幅が広い場合に衝突回数が減り連続回避本能の起こる回数も少なくなった。また、どちらの道幅でも人数が増えるごとに衝突回数が増え、それに伴い連続回避本能の回数も増えた。ここでいう衝突回数とは、衝突判定に入った回数を示しており、うまく避けた回数と連続回避本能に発展した場合の両方を含む。道幅が広い、もしくは人数が少ないために人口密度が低くなれば衝突回数は減っており、予想通りの結果となった。

しかし初期位置を描画空間内のランダムな位置に配置すると、道の端点付近に初期位置された歩行者が端点方向に向かい、他の歩行者と接触する間もなく、プログラム実行早々に居なくなる場合がある。そのため、試行ごとに結果のばらつきが大きいと考えた。そこで実験 2 では、歩行者の初期配置のばらつきを改善し再度実験した。

#### 3.2 実験 2

実験 2 では、歩行者の初期位置は描画空間（道）の両端 5m の範囲内でランダムに配置することとした。さらに、歩行は遠い側の端点方向に進むこととした。結果を図 6 に示す。

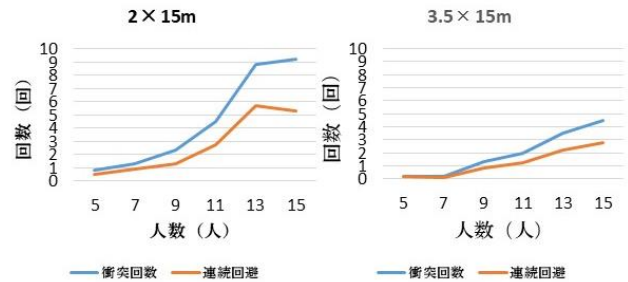


図6：上下 5m で初期位置を統一したデータ

実験 1 の時と同様に、道幅・人数による変化は人口密度が多ければ衝突回数が増え、それに伴い連続回避本能の回数も増える傾向にあった。しかし、試行ごとのばらつきを改善した結果、プログラム実行直後に居なくなる歩行者がおらず、全歩行者がほぼ同じ距離を歩くこととなった。そのため、他の歩行者との接触機会も増え、実験 1 と比べると全体的に衝突回数、連続回避本能の回数ともに増加している。

### 4. 考察

実験結果をもとに衝突・連続回避本能の回数について議論する。実環境における衝突回数とシミュレーション内での衝突回数では、シミュレーション環境下における方が多く発生している印象がある。衝突回数に伴い連続回避本能の回数も多くなっていると考えられる。例えば、2m 幅の廊下を 5 人が歩くと、平均 1 回程度の衝突や連続回避本能が生じることになる。これらの回数が増える原因としては、他者との斥力が小さいことが挙げられる。これはモデルパラメータを変化させることで改善できる。実際モデルパラメータを倍の値や半分の値にすると衝突回数が減った。モデルパラメータをどの数値に設定すれば実環境に近くなるのか検証していく必要がある。

また、今回は 50% の確率でランダムに避ける方向を決定していたが、衝突回避する際の要素として、壁側には避けない、人の多い方には避けないなどの衝突回避に関与する要因を組み込む必要がある。

### 5. むすび

人流シミュレーションである SFM をベースとして歩行者同士が衝突しそうな時の式を追加し、連続回避本能のシミュレーションを構築した。そして、環境要因である人数・道幅を変化させ、連続回避本能の発生率を調べた。その結果、人数が増えるほど歩行者同士の接触が増え衝突回数・連続回避本能の回数ともに増加傾向にあることがわ

かった。道幅でも同様の結果が得られ、狭い場合に人口密度が高まり衝突回数・連続回避本能の回数が増加傾向にあった。しかし実環境とシミュレーション空間ではその回数に差があると考えた。そのため今後はシミュレーションの妥当性の検証が必要である。検証は、VR 環境において実際の参加者と NCP による歩行で実施する予定である。また、パラメータ値の検討や、壁方向には避けない等の要素を式に追加することで実環境との差を改善することが今後の課題となる。

#### 参考文献

- [1] D.Helbing and P.Molnar “Social Force model for pedestrian dynamics, ” Physical Review E, vol. 51, no.5, pp.4282-4286, 1995
- [2] 藤井秀樹、“人流のシミュレーション”、一般社団法人日本シミュレーション学会、Vol18 No3、pp.42-46、2019-09
- [3] 伊織 瞳、藤田 悟、廣津 登志夫、“歩行予測を取り入れた群衆の2相シミュレーション”、マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集、263-269、2017-06-21
- [4] PDF 文書 “ソーシャルフォースモデルを基にしたスーベニアショップの混雑シミュレーション” [http://www.msi.co.jp/s4/solution/userscase\\_pdf/tmu\\_fukuoka.pdf](http://www.msi.co.jp/s4/solution/userscase_pdf/tmu_fukuoka.pdf)(参照:2020.08.03)