

# 体の回転行動を考慮した群衆避難のセルオートマトンモデル

宮川大樹<sup>1</sup>, 一ノ瀬元喜<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学 工学部 数理システム工学科

<sup>2</sup> 静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列

## 概要

緊急時に人々を迅速かつ安全に避難させる方法の確立は重要である。その目的の下、群衆避難ダイナミクスを理論的に研究するセルオートマトンモデルは役立ってきた。それらのモデルの多くは避難者を $1 \times 1$ サイズの正方形で表現していたが、人間は肩幅を持つため $1 \times 2$ サイズの長方形として扱う方が妥当である。この拡張によって、避難者に横歩きと回転という2つの新しい行動が加わる。本研究では、この $1 \times 2$ サイズと、それによって生じる横歩きと回転の行動が避難時間に与える影響をシミュレーションによって調べた。その結果、回転行動は避難速度を速めること、また最適な回転確率の値が存在することが示された。

## Cellular automaton model with turning behavior in crowd evacuation

Daiki Miyagawa<sup>1</sup>, Genki Ichinose<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

## Abstract

Effective evacuation policies in emergency situations are important to save lives. To develop such policies, simulation models based on cellular automata have been used for crowd evacuation dynamics. In most previous studies of crowd evacuations, an evacuee is represented by a  $1 \times 1$  square. However, a rectangle ( $1 \times 2$ ) representation is more suitable for such models than the square representation because of evacuees' shoulder width. The rectangle representation gives two new features to evacuees' behaviors: moving sideways and turning. We developed a cellular automaton model with those features and studied the effects of them on crowd evacuation dynamics. The simulation results showed that turning behavior can make the evacuation time shorter and there is an optimal turning rate for the crowd evacuation.

## 1 はじめに

オリンピックなど多くの人々が集うイベントにおいて、突然の災害などへの対策として安全かつ迅速な避難方法を用意しておくことは最優先の課題の1つであり、これまでに数理モデルを使った理論的な研究や [1], 実際に人に避難を行ってもらった実験的な研究 [2] などが盛んに行われてきた。セルオートマトン (CA) による群衆避難の行動解析は理論的な研究の1つである [1]。これまでの多くの CA モデルでは、 $1 \times 1$ のセルサイズを1人の避難者とみなしてい

た。しかし、実際の人間は肩幅を持っており、これを上手く用いて狭いところを抜けようと横歩きや体の回転を行う。このように長方形サイズでエージェントを表現することは、対向流については研究されているものの [3], 群衆避難では行われていなかった。長方形型は避難者の行動に新しい2つの行動を生じさせる。横歩きと体の回転である。したがって、本研究では $1 \times 2$ セルの長方形型をしたエージェントを用いた CA モデルを構築し、これらの新しい行動が避難ダイナミクスに与える影響について調べた。

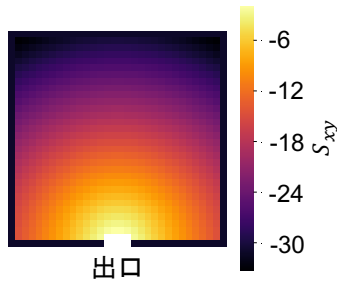


図 1: セルに区切られた部屋, 及び Static Floor Field の図示.

シミュレーションの結果, 体の回転行動は避難時間を短くすることに役立つこと, さらには, 横歩きの速さに依存して最小の避難時間をもたらす最適な体の回転率が存在することが分かった.

## 2 モデル

モデル環境は以下を想定する. 部屋は  $50 \times 50$  のセルで構成された正方形の空間であり, 周りは壁で囲まれている. 図 1 の下の壁の中央部には出口が存在する. その幅は  $1 \times 4$  セル分に固定する. シミュレーション開始時, 避難者の初期密度は  $\rho$  とする.

今回提案するセルオートマトンモデルでは, 人間の肩幅を表現するために避難者の大きさを隣り合うセル 2 個分として扱う. その拡張により, 避難者モデルが行える行動は前進 (後退), 横歩き, 回転の 3 種類になる. 前進 (後退) は長方形の長辺方向への移動, 横歩きは短辺方向への移動であり, これら二つを合わせると従来よく使われるノイマン近傍への移動と解釈できる (図 2(a) 左下). それに加え, 図 2(a) 右下に示すような回転行動も行える. 以下では回転により移動できる近傍を回転近傍と呼ぶ. 回転行動を持つこと, 及び後述する横歩きの遅さを表現できることは本モデルの特徴と言える.

シミュレーションが始まると, 避難者は部屋から逃れるために, 同期的な移動プロセスを毎ステップ行って出口へ向かう.

移動プロセスの最初では, 避難者それぞれが回転するか, それとしないかを定める. それはすなわち, 次の移動地点を回転近傍から選ぶか, ノイマン近傍から選ぶかのどちらにするかを定めることと等価になる. 本モデルでは, この近傍の選択について回転率  $r$  ( $0 \leq r < 1$ ) を導入して確率的に行うことにする; 確率  $r$  で回転近傍を, 残りの確率  $1-r$  でノイマン近傍を選択する.

近傍を選んだら, 次はその中から行きたい地点を

一つ, 確率的に選択する. その際, 避難者はなるべく速く出口にたどり着きたいため, 無作為な移動ではなく, より出口に近づける地点を選びやすいということをモデル化した Static Floor Field (SFF) モデルを適用する [1]. SFF は図 1 に示されるように, 部屋の各セルに設定された, 出口から近いほど高い値を示すスカラー場である. 今回の避難者は  $1 \times 2$  セルの体を持つため, 避難者が 2 つのセルを占有しようと試みる際に獲得する SFF の値は, その 2 つのセルに割り当てられた SFF 値の平均と定める. 近傍  $\Omega$  から地点  $(x, y)$  を選択する遷移確率は SFF の値  $S_{xy}$  を用いて以下のような式で記述される.

$$p_{xy} = \frac{v \exp(S_{xy}/k)}{\sum_{(i,j) \in \Omega} \exp(S_{ij}/k)} \quad (1)$$

ここで,  $k$  は避難者の距離把握能力へのノイズパラメータであり, 小さいほど SFF の値が  $p_{xy}$  に強く影響して出口方向を選びやすくなる. 今回は  $k = 0.1$  という避難者が出口方向を認識できている状況を想定する. また,  $v$  は相対的な速度を表すパラメータである. 今回, 基準として前進を  $v = 1$  とし, 回転はそれと速度が等しいとする. 横歩きについては,  $v$  の範囲を  $0 < v \leq 1$  で変化させて, 前進に対する相対速度が遅い場合を再現できるようにする. これは, 横歩きの遅さが避難に与える影響を調査するためである. なお, 本研究では前進と後退の差別化は行わず, 後退には前進と同じ速度を与えている.

その後, 衝突が起こった場合には, 避難者をランダムに 1 人選ぶことで解消する.

以上の流れが移動プロセスになる. 出口セルにたどり着いた避難者はシミュレーションから取り除いていき, 全員が避難し終えるまでこの移動プロセスを繰り返す.

## 3 シミュレーション結果と考察

### 3.1 回転の有無における脱出時間の比較

まず最初に, 回転行動の存在が避難に及ぼす影響を調査した. その手段として, 図 2(b) に示すような, 避難者が回転を行える一般的なシナリオ (Turning) と, 極端なケースとしての回転を全く行わないシナリオとを比較することにした. 回転を行わない 2 つのシナリオは, 初期配置の際に, 出口に対して体を前向きにしているシナリオ (Forward) と, もう一つは出口に対して体を横向きにしているシナリオ (Sideways) とで分類する. なお Turning の初期配置はより自然

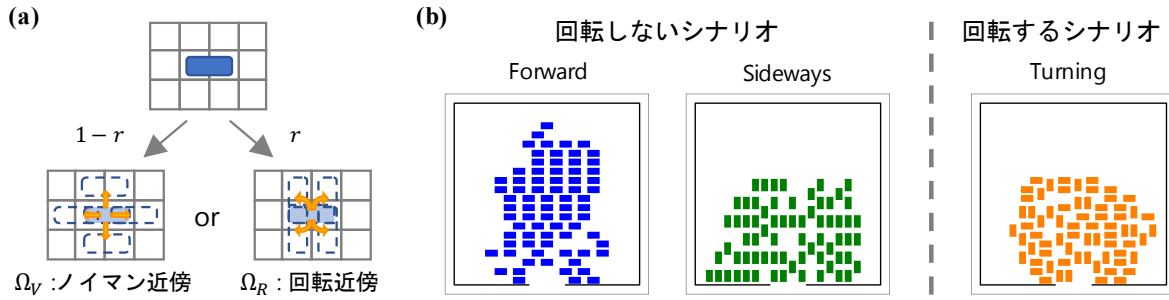


図 2: (a) 拡張したノイマン近傍と回転近傍. (b) 3 個のシナリオにおける避難途中の様子 ( $t=50$ ). 回転しないシナリオでは避難者が初期配置時の体の向きのまま避難しており, 回転するシナリオでは回転行動によって 2 つの体の向きが同時に存在することが確認できる.

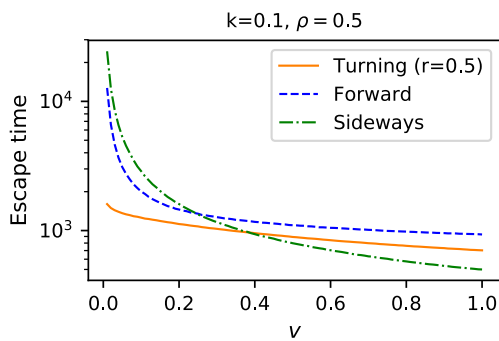


図 3: 3 個のシナリオの比較プロット. 各点につき 100 試行平均の値を使用.

な方として Forward と同じ向きを採用する.

これらのシナリオにおいて, 避難が始まってから全員が脱出し終えるまでの時間 (脱出時間: Escape time) を使って比較した. 初期密度は全シナリオで  $\rho = 0.5$ , Turning シナリオの回転率は  $r = 0.5$  とする. 図 3 に示す曲線は, 横歩きの相対速度  $v$  の変化に伴う脱出時間変化のプロットである. 全体的には,  $v$  増加に伴って脱出時間が減少しており, つまり避難の速度が速まっていく傾向が見られる. 3 つのシナリオを比較すると,  $v$  が小さい領域 ( $v < 0.37$ ) において Turning が最も避難が速く, それ以降は Sideways が最速になっていることが分かる. 横歩きの速度は前進の  $1/3$  程になるという実験結果をふまえると [4],  $v = 1/3$  は Turning が最速となる領域に含まれており, 現実に即していると言えるだろう.

シナリオ間に生じる脱出時間の差は, 体の向きによって狭い出口を抜けることの容易さが変わってくるのが原因で生じると考えている. Sideways では体を出口に対して半身にした状態に進むため, 最大で同時に 4 人脱出できるが, Forward は体を出口に正対させているため同時に脱出できるのは最大 2 人に

なる. したがって, 出口の抜けやすさでは Sideways が Forward に勝っているだろう. Turning は出口周辺に前向きの避難者と横向きの避難者の両方が集まる可能性がある. そのため, 出口からの抜けやすさという観点では Sideways と Forward の中間的であると考えるのが自然だろう. そうして導かれる出口からの抜けやすさの順序は  $v > 0.37$  での脱出時間の短さの順序に対応している.  $v < 0.37$  では Turning と Sideways の順序が逆転しているが, これは横歩きが遅すぎるため Sideways では本来の効率を達成することができないが, Turning では回転することでその状況を回避することができているためだと予想できる.

### 3.2 最短の脱出時間を与える回転率

次は Turning のみに焦点を当て, 回転率変化が脱出時間に与える影響について調査した. 初期密度は以前と同様に  $\rho = 0.5$  である. 図 4 のカラーマップは色が脱出時間を示しており, 横軸は図 3 と同様に  $v$ , 縦軸は  $r$  となっている. なお, 図中の白線は  $v$  を固定したときに最短脱出時間をとる  $r$  を繋いだ曲線であり, 言い換えれば谷底を示す線となっている. 色の分布を縦に見ると, 色が徐々に明るくなってまた暗くなっていく様子が見られる. また, 白線についても  $r = 0$  や  $r \sim 1$  といった極端な値に至らない様子が見られ, 回転率  $r$  が増加しても脱出時間は単調な変化を見せず, 極値を持つ関数としての挙動を示していると分かる. したがって, 少量の回転及び過剰な回転は避難を遅くし, その間に最適な回転率が存在するということが伺える.

回転率が最適なものより低い場合に避難が遅くなる理由は, 前節で説明した通り, 回転することで渋滞をうまくやり過ごせる可能性が上がるからである. 逆に最適な  $r$  より高いときに避難が遅くなるのは,

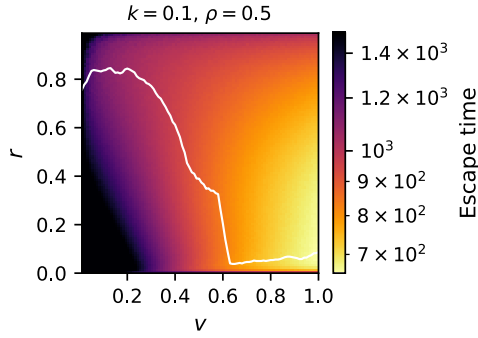


図 4:  $v$  と  $r$  の変動に対する脱出時間変化を表すカラーマップ。白線は  $v$  を固定したとき最短の脱出時間をもたらす  $r$  を繋いだ線である。各点につき 100 試行平均の値を使用。

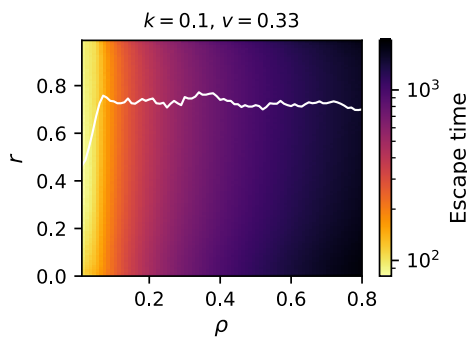


図 5:  $\rho$  ( $0 < \rho \leq 0.8$ ) と  $r$  の変動に対する脱出時間変化を表すカラーマップ。それ以外は図 4 と同じ設定である。

セルの並びに対して平行または垂直に進みたいとき、ずっと回転した場合の移動速度が、それ以外の場合の移動速度を下回るからと考えられる。また、白線の軌跡に注目すると  $v$  の変化はその最適な  $r$  に対して大きな影響を与えていることが見いだせる。

次に初期避難者密度  $\rho$  の変化は最適な回転率に影響するかを調査した。図 5 のカラーマップは色で脱出時間、横軸が初期密度  $\rho$ 、縦軸が  $r$  を表している。色の変化に着目すると、 $\rho$  が大きくなるにつれてだんだんと脱出時間も増えている。これは単純に  $\rho$  の増加による要脱出人数の増加が原因だろう。白線の動きに目をやると、 $\rho < 0.07$  では最適な回転率の値が 0.5 から 0.7 まで上昇し、 $\rho > 0.07$  では 0.7 からほとんど変化しなくなっている。白線が変化しなくなった領域では  $\rho$  が最適な回転率に影響を与えないことが明白である。対して  $\rho < 0.07$  では、密度が低すぎるあまり出口での渋滞などは稀にしか起こらないと考えられる。そのため、わざわざ横歩きを使う必要性がないため、不必要に体の向きを頻繁に変え

ることは効率の悪さを生んでしまうことが、密度が高いときほどの回転率を必要としない理由だろう。

## 4 おわりに

本研究では、避難者の肩幅を考慮したセルオートマトンモデルを構成し、回転行動と横歩きの遅さが避難に与える影響を調査した。回転の有無についての比較実験により、回転することは避難の効率化に有用であることが判明した。また、回転のしやすさを示す回転率は、中庸な値のときに最短の脱出時間をもたらしていた。こうした結果は狭い出口から抜け出るうえで、それぞれの行動に有利不利があることが原因だと予想される。回転に注目すると、ある程度の回転行動は群衆避難を速める効果を持つことが結論づけられる。それに加えて、今回は考慮していない後退の遅さを導入した場合には、回転が避難に果たす役割がさらに大きくなる可能性もある。

今回は回転かそれ以外の行動かの意思決定を確率的に行なったが、周りの状況に応じたより賢い回転の選び方を模索することもできるだろう。その際は、周囲との相互作用としてゲーム理論を導入することも考えられる。そうしたモデルの拡張は緊急時の意思決定について深い理解をもたらすと期待できる。

なお、この研究はすでに論文誌に投稿中であり、arXiv 上で公開されている [5]。

## 参考文献

- [1] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, and J. Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*, 295:507–525, 2001.
- [2] A. Tsiftsis, I. G. Georgoudas, and G. C. Sirakoulis. Real data evaluation of a crowd supervising system for stadium evacuation and its hardware implementation. *Syst. J.*, 10:649–660, 2016.
- [3] M. Fukamachi and T. Nagatani. Sidle effect on pedestrian counter flow. *Physica A*, 377:269–278, 2007.
- [4] C. J. Jin, R. Jiang, J. L. Yin, L. Y. Dong, and D. Li. Simulating bi-directional pedestrian flow in a cellular automaton model considering the body-turning behavior. *Physica A*, 482:666–681, 2017.
- [5] <https://arxiv.org/abs/1910.11580>