

フロアフィールドを用いた歩行者交差流のシミュレーション

高橋大樹¹, 日永田泰啓², 只木進一²

¹ 佐賀大学大学院 工学系研究科 知能情報システム学専攻

² 佐賀大学 総合情報基盤センター

概要

地下道などの交差点における歩行者の流れを考える。直行する方向に移動する歩行者をモデル化するために、フロアフィールドを用いたセルオートマトンモデルを構築する。静的・動的フロアフィールドの強度、歩行者後退確率などが、臨界流入確率、渋滞界面に与える効果についてシミュレーションを通じて検討する。

Simulations of pedestrian crossing-flow based on a cellular automaton model with floor fields

Daiki Takahashi¹, Yasuhiro Hieida² and Shin-ichi Tadaki²

¹ Department of Information Science, Saga University

² Computer and Network Center, Saga University

Abstract

Consider pedestrian flow at crossing points such as underpasses. For modeling crossing-flow of pedestrians, we construct a cellular automaton model with floor fields. We discuss the effects of strengths of static and dynamic floor fields and of the probability for backward motions on the critical injection and structure of boundaries in jam.

1 はじめに

1990年代以降、高速道路の自動車流、インターネットのパケット流、更には蟻の行列など、様々な流れ、特に渋滞形成について、理論、シミュレーション、実測の各側面から関心が寄せられている [1, 2]。歩行者の流れについては、劇場などからの避難、駅などでの複数方向の流れ、交差点などでの交差する流れなど、二次元的な流れに関心が寄せられてきている。特に、2001年に発生した、明石歩道橋での事故は、歩行者流への関心を呼び覚ました [3]。

本研究では、交差する歩行者流についてセルオートマトンモデルを用いてモデル化する。また、流量のパラメータ依存性を調査し、流量改善の方向を探る。

セルオートマトンによるモデル化では、通常、隣接したセルの情報により各セルの状態を更新する。

つまり、局所的な情報による状態更新である。歩行者流の場合、通路や歩行者が向かう方向など、システム全体に関する情報が必要である。このような情報を含むモデル化の一つとして、フロアフィールド (FF) を用いる方法がある [4]。通路や歩行者が向かう方向など、静的な情報を与える FF を「静的 FF」と呼ぶ。歩行者には、避難の場合や人混みのなかで、他の歩行者に追従するという傾向がある。このように、他の歩行者の移動情報を表現する FF を「動的 FF」と呼ぶ。これら二つの FF の、渋滞形成及び渋滞界面に及ぼす影響について検討する。

避難の場合や人混みのなかで、歩行者はより早く移動するために、しばしば後退して別の経路を探す。このような「後退」に関するパラメータが、渋滞形成に及ぼす影響についても検討する。

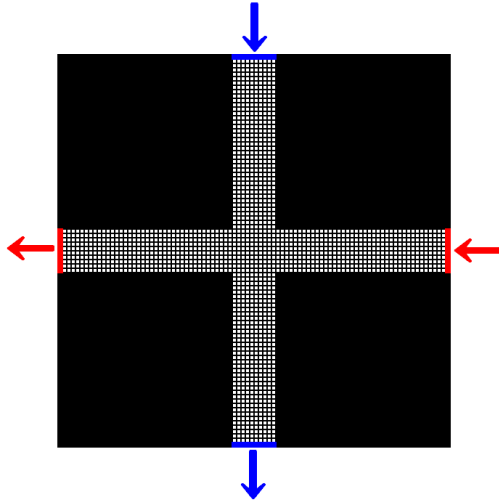


図 1: 幅 10、長さ 90 の道を交差させてシミュレーションを行う。下向きの歩行者は上から追加し、左向きの歩行者は右から追加する。

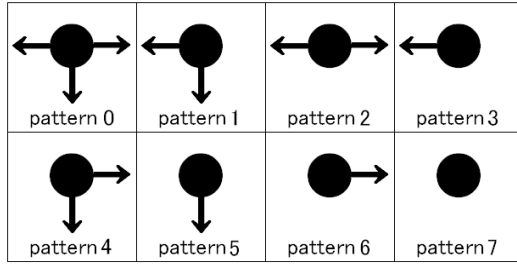


図 2: 下向きの歩行者の 8 通りの移動パターン

2 歩行者モデル

歩行者流をセルオートマトンでモデル化する。各セルには、一人の歩行者しか入ることができないとする。交差点などを想定し、幅 W 、長さ L の二つの直線路が、その中心で交差するようにする。本研究のシミュレーションでは $W = 10$ 、 $L = 90$ とする。

歩行者には、下向きに動く歩行者と左向きに動く歩行者の二種類が存在する。これらの歩行者は交差点において方向転換しないことに注意する。二つの方向をもった歩行者をモデル化するために、本研究ではフロアフィールドを用いたモデル化 [4] を行う。

各歩行者の動作は、文献 [4] と同様である。概要を図 2 に示す。各歩行者の進行方向に対して、進行方向、その左右に、そのセルが空いている場合に、式 (1) の確率に従って移動する。また、後述するように、歩行者に後退を許す場合も同様である。

セル i からセル j への移動確率を以下のように定

義する。

$$p_{ij} = e^{\beta J_s \Delta_s(i,j)} e^{\beta J_d \Delta_d(i,j)} (1 - n_j) d_j \quad (1)$$

$$d_j = e^{\beta J_0} (\text{進行方向}) \quad (2)$$

$$d_j = e^{-\beta J_d} (\text{逆方向}) \quad (3)$$

パラメータ β は温度の逆数に対応し、乱雑さを調整する。 J_s 、 J_d はそれぞれ静的 FF、動的 FF の影響力を示す。 $\Delta_s(i, j)$ 、 $\Delta_d(i, j)$ は隣接するセルとの各 FF の差を示す。 n_j は、セル j の歩行者の有無を表し、そのセルに歩行者がいる場合 1、歩行者がいない場合は 0 となる。 d_j は進行方向に進む場合、直進性のパラメータ J_0 によって直進の強弱を調整する。また、逆方向に戻る場合、自ら増加させた動的 FF に影響をなくす。

各時刻での状態更新は以下の手順で行う。

1. 二種類の歩行者を上端、右端の各セルに確率 p で追加する
2. 出口に到達した歩行者を道から取り除く
3. システム内の歩行者にランダムな順番を付ける
4. 順番に従って歩行者を動かす

3 渋滞形成と渋滞界面の特徴

歩行者がシステム内に一人もいない初期状態から出発する。歩行者の流入確率 p が小さければ、交差点部分での多少の混雑があっても、渋滞は形成されない。流入確率が一定の値を超えると、交差点部分で二つの方向の歩行者が、互いに相手を遮り、渋滞が発生する。流入確率を変化させたときの、歩行者全体の流量の時間変化を図 3 に示す。ここで、流量は

$$\text{流量} = \text{平均速度} \times \text{密度} \quad (4)$$

で定義する。図 3 では、二つの方向の歩行者の流量の総和を示している。 $p = 0.04$ 、 $p = 0.08$ では流量が一定の値に安定しており、歩行者がスムーズに流れているのがわかる。 $p = 0.08$ が流量が大きいのは密度が大きくなったためである。 $p = 0.12$ 以降、渋滞を起し歩行者が動けず、流量が 0 に近づく。

次に渋滞形成の過程を図 4 に示す。 $p = 0.10$ で歩行者を追加している。各々の歩行者が他方向から移動する歩行者に流されて交差点の左下隅から界面を形成する。ここで、界面とは、二つの方向の歩行者が互いに相手の進路を遮る境界面である。流入確率が大きくなると、渋滞が交差点の左下隅から形成されることはなく、一気に形成されることに注意する。

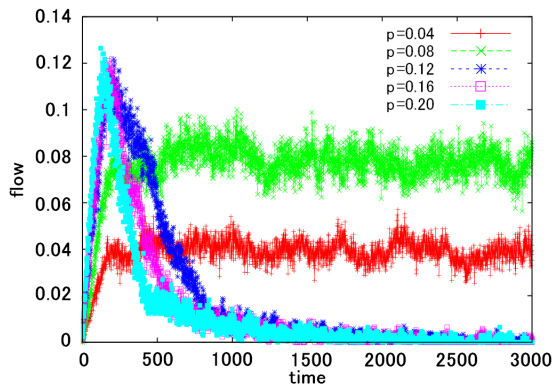


図 3: 流入確率を変化させたときの、流量の時間変化

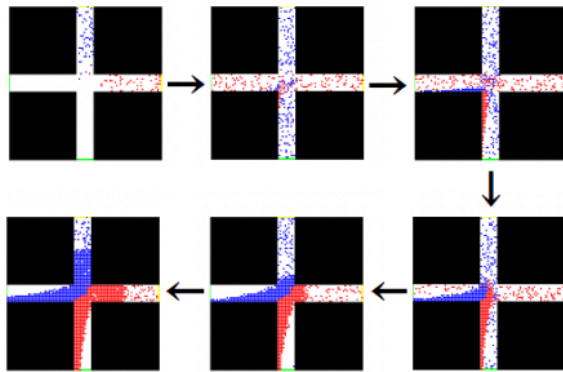


図 4: 渋滞形成の過程

3.1 流入確率の変化と渋滞形成面

流入確率 p の増加に伴って、渋滞が発生するだけでなく、交差点での渋滞の界面の特徴が変化する。流入確率を変化させた際の界面の例を図 5 に示す。交差点だけを拡大し、一つの流入確率毎に 3 つのサンプルを載せている。

流入確率が臨界値よりわずかに大きい場合、渋滞は、交差点の左下隅からゆっくりと成長する。このため、界面で二つの方向の歩行者は混じりあわず、滑らかな界面が形成される。

更に流入確率を増加させると、交差点の 45 度の線を越えた先で、異なる方向の歩行者に進路を遮られ停止する歩行者が発生する。この結果、界面は凸凹になり、界面から孤立して停止する歩行者も発生する。

このような、界面が左下隅から形成される過程とその特徴は、道路の幅 W を大きくしても不変である。

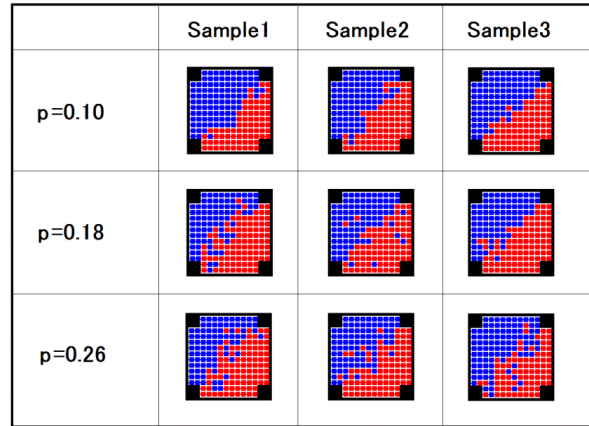


図 5: 流入確率 p の変化における渋滞形成面

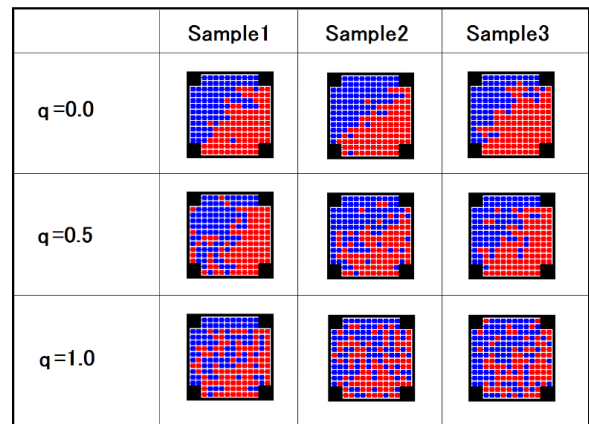


図 6: 後退確率 q の変化における渋滞形成面

3.2 後退確率の変化と渋滞形成面

後退確率とは、歩行者が進行方向に対して、進行方向、その左右いずれの方向にも動けなかった場合のみ後退できるという確率である。避難の場合や人混みに入ってしまった場合、歩行者は、進行方向とは逆方向に後退することで進路を拓こうとする場合がある。そこで、図 2 の移動方法に加えて、後退以外の移動可能性が無い場合に、確率 q で後退を許すこととする。

後退の可能性を入れたことは、渋滞の界面の様子にも影響を与える。後退確率を変化させた際の界面の例を図 6 に示す。図 5 と同じく、交差点だけを拡大し、一つの流入確率毎に 3 つのサンプルを載せている。

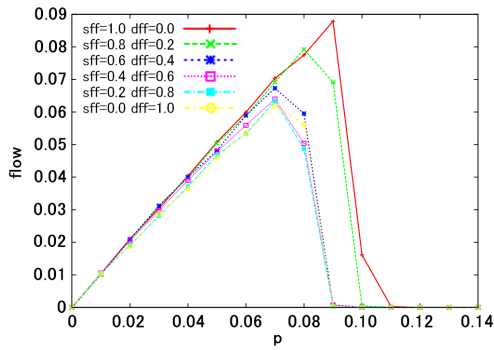


図 7: 様々な FF による流量との関係。縦軸は流量、横軸は流入確率を示す。

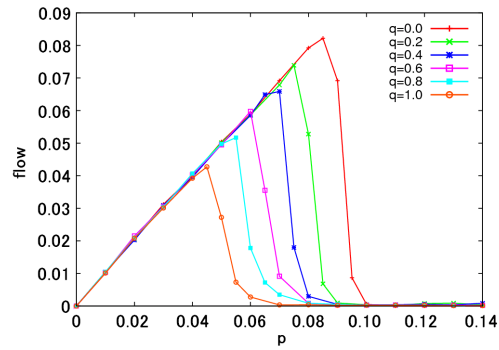


図 8: 後退確率の変化と流量との関係。縦軸は流量、横軸は流入確率を示す。

4 フロアフィールド及び後退確率の定常流量への影響

システムは、長時間の後に定常的な状態となる。流入確率が臨界値以下ならば、定常的に歩行者が流れる状態が実現する。臨界値以上ならば、交差点で歩行者が互いに進路を遮り、完全な停止状態が発生する。本節では、フロアフィールド (FF) 及び後退確率が、定常的な流量に与える効果について検討する。システムの平均流量を式 (4) で定義する。

平均速度は全体に対して進行方向へと動いた歩行者のシステム内の全歩行者に対する割合を示す。進行方向と逆に動いた場合、平均速度はマイナスに寄与する。

4.1 フロアフィールドの変化と流量の関係

フロアフィールド (FF) を変化させながら、 $p = 0.00$ から $p = 0.14$ までの流入確率に対して、流量を 100 個計測し、その平均をグラフの点として示したものを図 7 に示す。静的 FF がより大きい場合、流量ピーク・臨界値共に最大となるが、 $sff = 0.6$ $dff = 0.4$ よりも静的 FF を弱くしても流量に大きい変化はみられない。一定の静的 FF より低くすると、温度の逆数 β を 0 にしたものとほぼ同じ流量グラフになったため、一定の静的 FF より低くなると流量の変化に影響しないと考えられる。

4.2 後退確率と流量の関係

FF を固定し、後退確率 q を変化させながら、 $p = 0.00$ から $p = 0.14$ までの流入確率に対して、流量を 100 個計測し、その平均をグラフの点として示したものを図 8 に示す。 q が大きくなるにつれて臨界

値は大きくなり、流量が大きい状態で安定する。これは後退することによりできたスペースに歩行者が入ることにより、渋滞の隙間を抜けることができる現象によるものである。

5 まとめと今後の課題

渋滞の界面は、流入確率や後退確率によって、凸凹になったり、界面から孤立して停止する歩行者がいたり、その形成に変化が起こる。フロアフィールド (FF) の流量への影響では、静的 FF は流量を改善する方向に働くが、動的 FF の値によっては必ずしも改善に繋がるとは言えない。後退確率の流量への影響は、渋滞を起こした際、後退確率が大きい方がスムーズに人が流れることがある。また、温度の逆数 β を 0 にしたものと一定以下の静的 FF の挙動が同じになったため、一定以下の静的 FF は歩行者の動きに影響しないと言える。

今後の課題としては、FF の変化におけるさらなる流量の分析が必要である。また、方向毎の非対称性、界面の特徴の定量化が今後の課題である。

参考文献

- [1] C. Appert-Rolland, et al., *Traffic and Granular Flow '07* (Springer, 2009).
- [2] A. Schadschneider, et al., *Stochastic Transport in Complex Systems* (Elsevier Science, 2010).
- [3] http://www.kobe-np.co.jp/news_now/asagiri.shtml
- [4] C. Burstedde, K. Klauk, A. Schadschneider, J. Zittartz, *Physica A* 295 (2001) 507-525.