

Static Floor Field 法を用いた直線通路内における 群集移動のシミュレーション分析

加地大¹, 猪原健弘¹

¹ 東京工業大学社会理工学研究科価値システム専攻

概要

近年、直線通路内で一方向に進む歩行者の動きを実験によって観察し、空間内における歩行者の速度分布が管内で水のような流体を流した場合の速度分布と似た性質を示す研究が報告された。本研究では、この歩行者の速度分布の性質が各歩行者の指向性によるものだという仮説を立て、Cellular Automaton 法によってシミュレーションを行い、歩行者の速度分布について検証する。

Numerical Analysis of Pedestrian Movement in a Corridor by using Static Floor Field Method

Masaru Kaji¹, Takehiro Inohara¹

¹ Dept. of Value and Decision Science Graduate School of Decision Science and Technology
Tokyo Institute of Technology

Abstract

Recently experimental investigations have demonstrated that the velocity distribution of pedestrians in unidirectional flow in a corridor is similar to the characteristic of fluid such as water. In our study, we set up a hypothesis that the characteristic of the velocity distribution originates from the pedestrian's preference, and conduct simulations by using cellular automaton method. We then validate the results of velocity distribution of pedestrians.

1 緒言

歩行者の集団的なダイナミクスは、多くの研究者が関心を寄せる複雑系現象の一つである。このテーマに関して、多くの実験結果が報告されている。Henderson [1] は、街中の歩行者の歩行速度を分析し、歩行者の速度分布が気体分子運動論における Maxwell-Boltzmann 分布に似ていることを示した。また、Ma ら [2] は混雑状況下での人々の流れ場のオイラー記述が歩行者の動きのパターンを表せることを実験で確認した。さらに、Zhang ら [3,4] は一方通行の直線通路において、空間内の歩行者の速度分布が、管内の層流状態における水のような流体の速度分布に似た性質を持っていることを報告した。他にも、様々

なシナリオを想定した研究が行われている [5,6]。

本研究では、Zhang ら [3, 4] の研究に着目し、シミュレーションを行う。この先行研究では、一方通行の直線通路内における混雑状況下での群集挙動について動画撮影を行い、空間内の断面方向の距離と人口密度、平均移動速度の関係を分析した。その結果から、壁付近では人が比較的多く存在し、平均移動速度が遅く、その一方で道中央付近では人が少なく、移動速度が早いこと (図 1) を報告した。この原因として考えられるのは、壁側を歩きたいと思う歩行者が存在し、壁側を歩く人が増えることによって壁付近で渋滞が発生し、平均歩行速度が遅くなり、実験結果のようになったと考えられる。そこで、今回はセルオートマトン (CA) 法の一つである Multi-

Grid 法を使って壁方向への指向性がある歩行者を設定し、先行研究 [3, 4] の実験結果を再現し、結果を分析する。

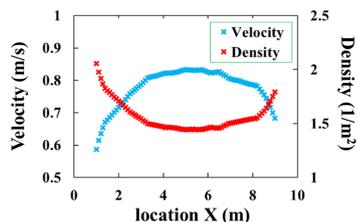


図 1: 通路 (幅 10 メートル) の断面方向の距離と歩行速度、人口密度の関係 [3]。 $x=0, 10$ はそれぞれ壁である。

2 モデル

本研究では上述したように、CA 法を使用する。CA 法とは、時間と空間を離散化し、計算する手法である。主に交通流や生物学、結晶成長の研究で扱われているが、歩行者流にも応用されている [7, 8]。この手法は、シンプルで様々なルールについて柔軟に設定することができる。今回は、CA 法の一つである Multi-grid 法 [6,9] を採用する。Multi-grid 法は複数のセルを組み合わせることで 1 つの歩行者とみなす手法で、本研究では、セル一辺を 1 cm として分析を行う。セルの大きさに関する議論を行った研究は存在する [9] が、本研究ではセルの大きさについては議論しない。

次に、歩行者の形状について説明する。従来の CA 法では 1 つのセルを 1 人の歩行者と見なすため、歩行者の形状は正方形と見なされた (図 2 左)。また、正方格子においては、一般的に左右上下の 4 方向 (Neumann 近傍) もしくは斜め方向も考慮した 8 方向 (Moore 近傍) を採用するのが一般的だが、これらの場合、移動方向に限りがある。また、セル間での移動になるので移動速度、移動距離にも制限がある。本研究では multi-grid 法を採用することにより、この問題点を解消する。まず細かくしたセルを円状に複数組み合わせることによって、歩行者を再現する (図 2 右)。また、セルを細かくすることによって、移動距離や移動方向を柔軟に設定する。歩行者の大きさは人によって違うが、今回は簡単のため歩行者全員を直径 40 cm の円状とする。

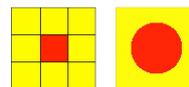


図 2: 従来の CA 法の歩行者 (左) と今回採用する CA 法の歩行者図 (右)。黄色い部分は空間、赤い部分が歩行者を表している。

次に、歩行者のパーソナルスペースを設定する。Hall [10] によると、人は会話や、歩行時に一定以上の間隔を他人と取ろうとする傾向にあり、その範囲内に侵入されると不快感を示す領域を一般的にパーソナルスペースと呼ぶ。このパーソナルスペースには、図 3 左のように密接距離、固体距離、社会距離、公共距離に分類される。密接距離における近接相 (0 ~ 15 cm) は、家族や恋人といった親密な人間のみ入ることを許される空間である。今回はこの密接距離における近接相を使う。さらに Katz [11] によれば、図 3 右のように、パーソナルスペースは巻貝の殻のような形をしていると報告している。このとき、歩行者の前方、すなわち進行方向に比較的広いパーソナルスペースが存在する。本研究では図 3 右のように歩行者の周りの円状の空間 (密接距離の近接相) と進行方向のパーソナルスペースを考慮した三角形を組み合わせたものを、歩行者のパーソナルスペースと定義する。また、進行方向のパーソナルスペースは歩行速度によって変化することが Jelic の研究 [5] によって確かめられている。そこで、[5] を参考にして歩行者が秒速 V m で移動するときの進行方向のパーソナルスペースの長さを $H(V)m$ として $H(V)$ を以下のように定義する。今回は歩行者が図 3 で示されたパーソナルスペース内に他人や障害物を侵入させないように移動する。

$$H(V) = 1.01 V + 0.37 \quad (V < 0.8),$$

$$H(V) = 4.22 V - 2.28 \quad (0.8 \leq V < 1.3),$$

$$H(V) = 3.20 V \quad (1.3 \leq V).$$

また、本研究で使用する空間は、図 4 のような直線通路を想定する。道の端の黒い部分は壁を表している。また、直線通路内において、それぞれエリア α 、 β 、 γ と定義する。まずエリア α で歩行者を一定の人口密度になるようにランダムに配置し、エリア β を通してエリア γ に向かって移動させる。エリア γ に到達した歩行者はその空間から取り除かれる。今回は $W = 5$ m、エリア β の長さ $L_\beta = 30$ m、

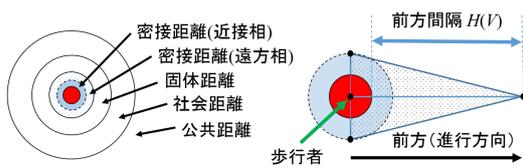


図3: Hall によるパーソナルスペースの図 [10] (左) と Katz による巻貝状のパーソナルスペース [11] (右)。進行方向のパーソナルスペース $H(V)$ は、歩行者の進行速度で変化する。

エリア α 、 γ の長さを $L_\alpha = L_\gamma = 1 \text{ m}$ とする。また、エリア α 内で生成される歩行者の数は、各タイムステップにおいて常にエリア α 内の人口密度が ρ (人/ m^2) になるように設定する。今回は $\rho = 1.8$ とする。

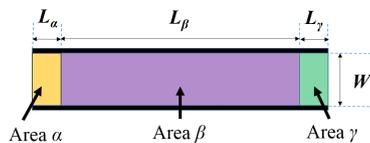


図4: 今回想定するシミュレーション空間 ($W = 5 \text{ m}$ 、 $L_\beta = 30 \text{ m}$ 、 $L_\alpha = L_\gamma = 1 \text{ m}$)。

次に Floor Field 法について説明する。Floor Field 法 [7] とは、歩行者たちの目的地を設定し、その目的地までの指向性を設定する Static Floor Field 法と、アリがギ酸を使って自分の通った経路を残す習性を参考にして、目的地の場所を把握していない歩行者が他人の通った道を通るようにする Dynamic Floor Field 法の2つに分けられる。本研究においては、歩行者全員が目的地 (エリア γ) の場所を知っていると仮定する。故に、今回は Static Floor Field 法のみを採用する。Static Floor Field 法は、空間内のセルに対して、目的地から順に数字を付けて、指向性を表現する。すなわち、目的地のセルを 1 として、隣り合うセルに対して近い順に 2, 3, ... と定義し、歩行者が現在地のセルの数字より小さいセルの数字を目指すよう設定することで目的地までの移動を表現する。例えば、図5のパターン A では、空間のセルを順に紫、青、水色、黄、赤の順に数字が大きくなると定義して、歩行者が左から右へ、カラーリングされた等高線の法線方向に、左から右に一直線に進むように設定される。本研究では壁への指向性を考

慮するため、パターン B、C、D のような場合を想定する。パターン B では、道の中央部を隔てて歩行者たちが壁方向に進みながら目的地へ進もうとすることを表している。パターン C は壁付近にいる歩行者ほど、壁方向への指向性が強いことを表している。一方でパターン D は道中央付近にいる人ほど壁への指向性があるように設定する。これらのパターンを考慮してシミュレーションを行う。

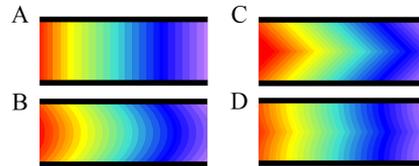


図5: 直線通路内における Static Floor Field の等高線 (歩行者は赤のセルから順に黄、水色、青、紫のセルに移動する)。

また、歩行者の移動アルゴリズムは以下の順に考慮される。

1. 歩行者は理想歩行速度 V_{ideal} でフロアフィールドの等高線の法線方向 (理想方向) に移動しようとする。
2. もし他の歩行者や壁が原因で理想方向にいけなない場合はその速度で他にに行ける場所を探し、進めればそこに移動する。
3. もし他の歩行者や壁が原因でその歩行速度で動けそうにない場合は、速度を下げ理想方向に移動しようとする。
4. 移動できるまで 2. と 3. を繰り返す。
5. V_{min} でも移動できない場合は、その場所で立ち止まる。

歩行者の動作アルゴリズムは決定的に行われ、歩行者を動かす順番は先行研究 [6] より、出口に近い歩行者から順番に更新する手法を採用する。故に歩行者の移動方向が重なることによる衝突は起こらない。

3 結果と考察

図6は空間内における歩行者の移動の様子である。図の黒い部分は壁、黄色い部分は空間、赤い部分は歩行者、青い部分は歩行者のパーソナルスペースをそれぞれ表している。パーソナルスペースの尖った部分が進行方向を表しているので、この図から歩行者たちは左から右に移動していることがわかる。

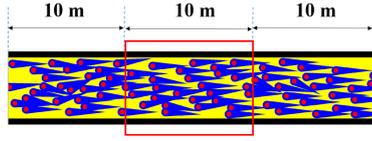


図6: 空間内 (エリア β) で歩行者が移動している様子。図の黒い部分は壁、黄色い部分は空間、赤い部分は歩行者、青い部分は歩行者のパーソナルスペースをそれぞれ表している。

さらに、この空間内において、歩行者の速度分布と人口密度を空間ごとに分析した。歩行者たちがエリア α からスタートし、移動し始めてから十分に時間がたってから、通路の中央付近 (図6の赤枠内) のエリア内の歩行者の動きの様子を分析した。今回はタイムステップを t として、 $51 \leq t \leq 150$ の間において、赤枠内に存在する歩行者の位置座標とそのときの出口方向成分の速度を集計し、通路の断面方向のエリアごとの人口密度と、平均歩行速度を計算し図7に示した。パターンAにおいては、歩行速度、人口密度ともに空間に依存しない様な結果が得られた。一方で、パターンB、C、Dにおいては壁付近への指向性を考慮しているため、いずれも壁付近の人口密度が上昇し、平均歩行速度が道中央付近に比べて遅くなっていることが分かる。特に、パターンBとDにおいては、道中央付近を歩行しようとする者がほとんど存在しないという結果が得られた (図7右)。パターンCにおいては比較的図1の先行研究の結果と定性的に似ており、歩行速度と人口密度のオーダーが合う結果となった。故にパターンCが壁への指向性を導入したときに得られる結果として一番近いものといえる。すなわち、単方向直線通路においては、壁付近の歩行者ほど壁側を歩こうとする、と解釈できる結果となった。

4 結言

本研究では、CA法の一つである Multi-grid 法を使って、単方向直線通路内における歩行者のシミュレーションの分析を行った。そして、先行研究の実験結果のような速度分布を再現するために歩行者の形状やパーソナルスペース、移動速度を考慮した。また、歩行者の壁方向への指向性を導入するために Static Floor Field 法を使用して様々な空間場を想定し、空間内の速度分布を分析した。これにより、先

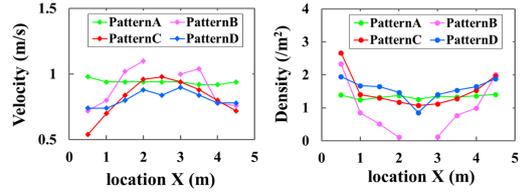


図7: 空間と人口密度の関係 (左) と空間と平均歩行速度の関係 (右)。緑色がパターンA、ピンク色がB、赤色がC、青色がDの結果をそれぞれ示している。パラメータはタイムステップを t として、時間間隔 $\Delta t = 0.5$ s、 $V_{ideal} = 60$ cells/timestep (= 4.32 km/h)、 $V_{min} = 3$ cells/timestep (= 6 cm/s) とする。 V_{min} については Johansson の研究 [12] を参考にした。

行研究の速度分布の結果と一致するパターンが存在することを確認した。この結果から、歩行者には壁側への指向性が存在し、壁側を歩く人が増加することによって、壁側の平均歩行速度が遅くなるという現象を再現することができた。

今後の課題としては、Static Floor Field の等高線の形状や、出口幅、人口密度、平均歩行速度といったパラメータを変化させることで、全体の挙動がどのようになるかを分析することが挙げられる。また、この手法を拡張することができれば、直線通路だけでなく、曲がり道やT字路などの空間における歩行者の密度分布や速度分布をシミュレーションによって予測することができるようになると思われる。

参考文献

- [1] L. F. Henderson, *Nature* **229** 381-383 (1971).
- [2] J. Ma *et al.*, *J. Stat. Mech* **2013.02** P02028 (2013).
- [3] X. L. Zhang *et al.*, *J. Stat. Mech.* **2012.08** P08012 (2012).
- [4] X. L. Zhang *et al.*, *Physica A* **392.12** 2781-2791 (2013).
- [5] A. Jelic *et al.*, *Phys. Rev. E* **85.3** 036111 (2012).
- [6] J. Zhang *et al.*, *Physica A* **387.23** 5901-5909 (2008).
- [7] A. Kirchner *et al.*, *Physica A* **312.1** 260-276 (2002).
- [8] Y. Suma *et al.*, *Physica A* **391.1** 248-263 (2012).
- [9] W. G. Weng *et al.*, *Physica A* **374.2** 821-826 (2007).
- [10] E. T. Hall, "The hidden dimension", Doubleday, (1966).
- [11] D. Katz, "Animals and men", Longmans, (1937).
- [12] A. Johansson, *Phys. Rev. E* **80.2** 026120 (2009).