

雑踏における歩行者の運動のモデル化

田中, 祐貴
東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻

西成, 活裕
東京大学先端科学技術研究センター | (独) 科学技術振興機構さきがけ

<https://doi.org/10.15017/23413>

出版情報 : 応用力学研究所研究集会報告. 22A0-S8 (29), pp.192-195, 2011-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

応用力学研究所研究集会報告 No.22AO-S8
「非線形波動研究の新たな展開 — 現象とモデル化 —」 (研究代表者 笥 三郎)
共催 九州大学グローバル COE プログラム
「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

Reports of RIAM Symposium No.22AO-S8

Development in Nonlinear Wave: Phenomena and Modeling

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, October 28 - 30, 2010

Co-organized by
Kyushu University Global COE Program
Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry

Article No. 29 (pp. 192 - 195)

雑踏における歩行者の運動のモデル化

田中 祐貴 (TANAKA Yuki), 西成 活裕 (NISHINARI
Katsuhiro)

(Received 15 January 2011)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2011

雑踏における歩行者の運動のモデル化

Modeling of pedestrian dynamics in the crowded area

東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 田中裕貴 (TANAKA Yuki)
東大先端研, (独) 科学技術振興機構さきがけ 西成 活裕 (Nishinari Katsuhiko)

Abstract

In the cities where population density is very high such as Tokyo, we often feel stress when we are walking through the crowded area because we can't walk as we want to. In this study, I defined the crowded area first, and modeled the dynamics of pedestrian in the crowded area. Furthermore, I researched about mean travel time and diffusion phenomenon diagonal to the traveling direction by simulation and theoretical analysis. As a result, I got optimal strategies in each condition.

1 序論

歩行者の流れに関する研究は、近年益々活発になってきている。歩行者の動きはマクロには圧縮性流体と見ることができ、またその動きには非常に複雑な要因が関与しているが、特性に注目し単純化したモデルが多く提案されている。

本研究では、「雑踏における歩行者の挙動」を一次元ランダムウォークを参考にモデル化し、シミュレーションと理論解析を通してその挙動を捉えることを試みた。また、それぞれの戦略の有効性を示す指標を考案し、その比較を行った。

2 問題設定

2.1 雑踏の定義

研究を開始するにあたり、雑踏について次のような定義を行った。

1. ある密度の人が存在する。
2. 雑踏を構成する人々は、それぞれランダムな方向に進んでいる。
3. 視界には主に人のみが入り、方向感覚を失いやすい。

実際の雑踏では、多くの人はそれぞれ固有の目的方向へと進行していると考えられるが、シミュレーションおよび理論解析では二次元ランダムウォークによって近似する。また、空間は一辺 0.5m の正方形セルに、時間は 1 ステップ 1/3s に離散化して解析を行う。これにより最高移動速度が 1.5m/s となり、一般的な早歩きの色度と一致する。

2.2 解析する対象

前節の定義を満たす雑踏領域を考え、その中を一定の目的方向に進む意思を持つ歩行者が進行する状況を考える。その場合、雑踏の人々が障害となり目的の方向へとまっすぐ進む事が出来ず、目的方向と垂直な方向へのズレが生じる。今回はその「ズレ」と共に通過に要するステップ数に着目し、雑踏密度、目的方向への移動距離等のパラメータを考慮して解析を行うこととした。

3 歩行者の動きのモデル化

3.1 モデル 1

3.1.1 アップデートルール

本研究では、雑踏領域を通る歩行者の挙動について 3 種類のルール設定を行った。なお、以下では目的とする進行方向を「前方」とし、各方向を表現している。モデル 1 の更新ルールは以下の通りである (Fig.1)。

1. 前方セルに人がいない場合、確率 1 で前方セルに進む。
2. 前方セルに人がいて、左右セルともに人がいない場合、確率 $\frac{1}{2}$ ずつで左方セル、右方セルに進む。
3. 前方セル・右方セルに人がいて、左方セルに人がいない場合、確率 1 で左方セルに進む。
4. 前方セル・左方セルに人がいて、右方セルに人がいない場合、確率 1 で右方セルに進む。
5. 前方セル、右方セル、左方セル全てに人がいる場合、確率 1 で停止する。

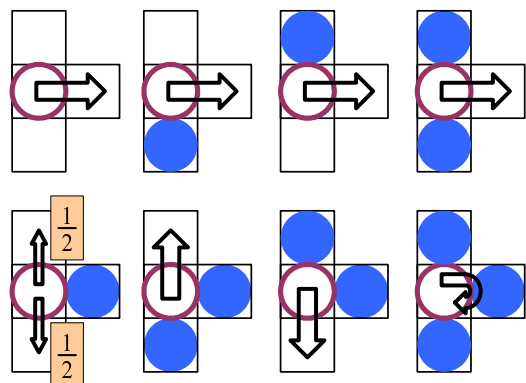


Fig. 1 Transition rule of pedestrians in model 1. Space and time are discretized. Behavior of pedestrian is decided by forward, right and left cells. So only eight patterns of transition is possible.

以上のモデル化により，進行方向の自由を奪われ方向感覚を失い，雑踏のいない空間を目指してさ迷う様子が表現できる．なお，本研究では後方に進む確率は0としているが，感覚的にも妥当な仮定であろう．

3.1.2 退出位置の拡散方程式

歩行者の目標進行方向に Y 軸，その垂直方向に X 軸をとる．流入点を $(0, 0)$ とし， $F(X, Y)$ を「歩行者が (X, Y) を通過する確率」とする．平均場近似により歩行者が各方向に進む，もしくは停止する確率を表すと，次の差分方程式が成り立つ．

$$F(X, Y + 1) = (1 - \rho)F(X, Y) + \frac{1}{2}\rho(1 - \rho^2)F(X - 1, Y + 1) + \frac{1}{2}\rho(1 - \rho^2)F(X + 1, Y + 1) + \rho^3F(X, Y + 1) \quad (1)$$

式 (1) をまとめると以下ようになる．

$$F(X, Y + 1) - F(X, Y) = \frac{1}{2}\rho(1 + \rho)\{F(X - 1, Y + 1) + F(X + 1, Y + 1) - 2F(X, Y + 1)\} \quad (2)$$

式 (2) を X, Y とともに同じスケールで連続極限をとる．連続近似した確率分布を $f(x, y)$ とすると，以下の微分方程式が得られる．

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{2}\rho(1 + \rho)\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (3)$$

これは拡散係数 $D = \frac{1}{2}\rho(1 + \rho)$ の拡散方程式なので，初期条件 $f(0, 0) = 1$ の下で解くとガウス分布の解が得られる．

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dy}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dy}\right) \quad (4)$$

3.1.3 退出位置の分散と平均偏差

拡散係数が $D = \frac{1}{2}\rho(1 + \rho)$ と表されるので， y セル通過後の分散は

$$\sigma_1^2(y) = 2Dy = \rho(1 + \rho)y \quad (5)$$

となる．同様に平均偏差を計算すると，

$$Mdev_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| \frac{1}{\sqrt{4\pi Dy}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dy}\right) dx = \sqrt{\frac{2y\rho(1 + \rho)}{\pi}} \quad (6)$$

となる．

3.2 モデル 2

3.2.1 アップデートルール

2 つ目のモデルは，歩行者の x 座標に依存するルールである．

$x = 0$ の時は，モデル 1 と同じとし， $x > 0$ の時は，パラメータ $\gamma (0 < \gamma < 0.5)$ を用いて，以下のようなルールとした．

1. 前方セルに人がいない場合，確率 1 で前方セルに進む．

2. 前方セルに人がいて，左右セルともに人がいない場合，確率 $1 - \gamma$ で左方セル，確率 γ で右方セルに進む．
3. 前方セル・右方セルに人がいて，左方セルに人がいない場合，確率 $1 - \gamma$ で左方セルに進み，確率 γ で停止する．
4. 前方セル・左方セルに人がいて，右方セルに人がいない場合，確率 γ で右方セルに進み，確率 $1 - \gamma$ で停止する．
5. 前方セル，右方セル，左方セル全てに人がいる場合，確率 1 で停止する．

$x < 0$ の時は，上記で γ と $1 - \gamma$ を入れ替えたものとなる (Fig.2)．このモデルでは，モデル 1 よりも志向性が強いがあ

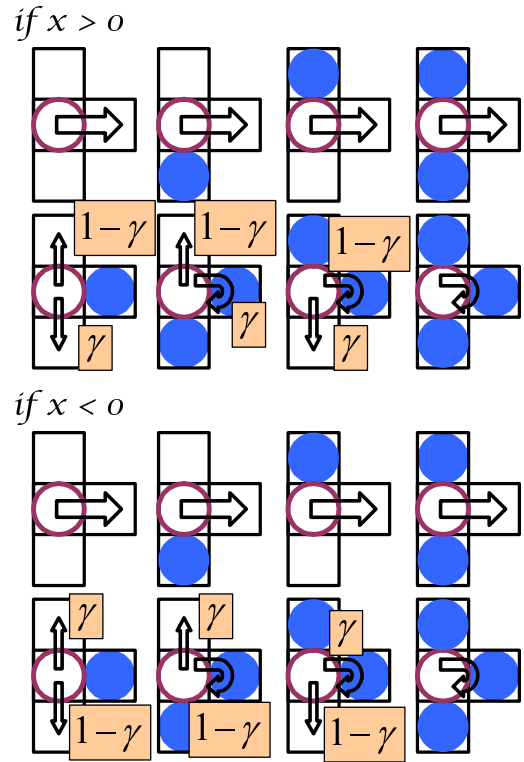


Fig. 2 Transition rule of pedestrians in model2. Behavior depends on x and γ .

る程度さ迷っている状態を表すことができ，「さ迷い」度合いの強さはパラメータ γ に依存する．なお， $\gamma = 0.5$ の場合はモデル 1 と一致する．

3.2.2 退出位置の定常分布

上記アップデートルールより，平均場近似を用いると以下の三本の差分方程式が得られる．

$$F(0, Y + 1) = (1 - \rho)F(0, Y) + \rho^3F(0, Y + 1) + 2\rho(1 - \rho)(1 - \gamma)F(1, Y + 1) \quad (7)$$

$$F(1, Y + 1) = (1 - \rho)F(1, Y) + \rho^2F(1, Y + 1) + \frac{1}{2}\rho(1 - \rho^2)F(0, Y + 1) + \rho(1 - \rho)(1 - \gamma)F(2, Y + 1) \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
F(X, Y + 1) &= (1 - \rho)F(X, Y) + \rho^2 F(X, Y + 1) \\
&\quad + \rho(1 - \rho)\gamma F(X - 1, Y + 1) \\
&\quad + \rho(1 - \rho)(1 - \gamma)F(X + 1, Y + 1) \quad (9)
\end{aligned}$$

Y 方向に十分歩行した場合の X 方向の定常分布を $F(X)$ と表す．試行関数 $F(X) = Z^X$ を用いると，以下の解が得られる．

$$F(0) = C_0 \left(\frac{2\gamma}{1 + \rho} \right) \quad (10)$$

$$F(X) = C_0 \left(\frac{\gamma}{1 - \gamma} \right)^{|X|} \quad (11)$$

なお， C_0 は以下の通りである．

$$C_0 = \frac{(1 + \rho)(1 - 2\gamma)}{2\gamma(2 - 2\gamma + \rho)} \quad (12)$$

3.2.3 退出位置の分散と平均偏差

上記の分布を用い，定常状態到達後の分散と平均偏差を，定義に基づいて算出した．

$$\begin{aligned}
\sigma_2^2 &= \sum_{X=-\infty}^{\infty} X^2 F(X) \\
&= \frac{(1 + \rho)(1 - \gamma)}{(1 - 2\gamma)^2(2 - 2\gamma + \rho)} \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Mdev_2 &= \sum_{X=-\infty}^{\infty} |X| F(X) \\
&= \frac{(1 + \rho)(1 - \gamma)}{(1 - 2\gamma)(2 - 2\gamma + \rho)} \quad (14)
\end{aligned}$$

3.3 モデル 3

3 つ目のモデルは， X 方向への動きを完全に排除したモデルである．ルールとしては

1. 前方セルに人がいない場合，確率 1 で前方セルに進む．
2. 前方セルに人がいる場合，確率 1 で停止する．

と非常にシンプルに表される．退出時の X 座標が 0 となり，分散，平均偏差共に 0 となる事は自明である．

4 3 モデルの比較

4.1 Mean travel time と退出座標

各モデルについてシミュレーションを行い (モデル 2 については $\gamma = 0.25$ とした)，1 セルの Mean travel time を比較した．グラフによると，各密度においてモデル 1 が最小，モデル 3 が最大となっており，実感とも合っているといえる (Fig.3) ．

また，25 セル通過時の退出座標の分散をシミュレーション，理論で比較を行った．概ね一致しており，前節の差分方程式は妥当であると言えよう．なお，モデル 2 の理論値については定常状態の値を用いているため，特に低密度条件においては理論値がシミュレーション結果を上回っている (Fig.4) ．

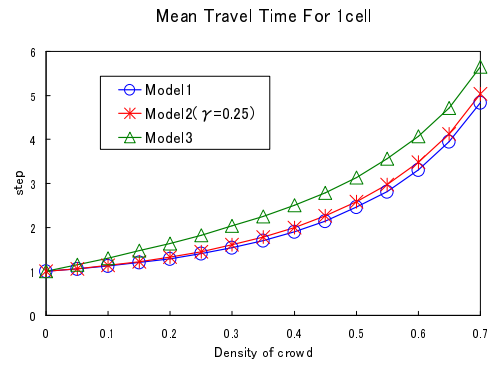


Fig. 3 Simulation result of mean travel time for 1 cell of each model.

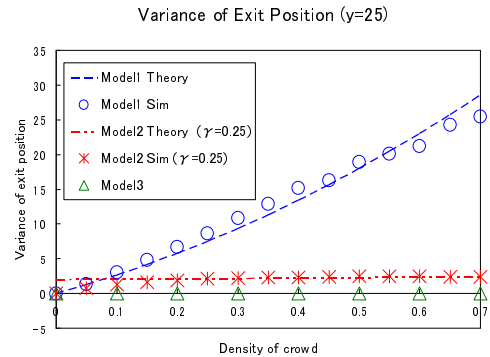


Fig. 4 Simulation and theoretical result of variance of exiting position. Both results agree with each other in model1 and model2.

4.2 統合的な比較指標の導入

続いて，各モデルを統合的に評価する指標を導入した．これを Cr と呼ぶことにすると，

$$Cr = (l + Mdev) * MTT \quad (15)$$

となる．ここで l は通過したセル数， MTT はシミュレーションにより算出した 1 セルあたりの Mean travel time である．この指標は，ある一点からある一点に到達するための仮想的な所要時間を示しており，値が小さいほど良い．

幾つかの条件の下で各モデルの Cr の比較を行った．グラフによると， l と ρ の条件により最適な戦略が変化する事が分かる．具体的には l が十分大きい場合にはモデル 1 が， l が小さく密度が高い場合はモデル 3 が最適であり，その中間の条件ではモデル 2 の Cr が最小である (Fig.5 - Fig.7) ．モデル 1 は空いているセルを求めて動き回るモデルであるので，「急がば回れ」をセルオートマトン上で再現したモデルといえよう．一方モデル 3 は前のセルが空くのひたすら待つモデルであり，言わば「急がば待て」を体現しているといえる． Cr の比較により，必ずしも「急がば回れ」とするのが良いとは言えない事が分かる．

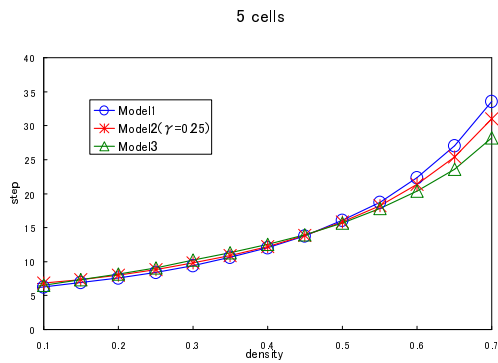


Fig. 5 Cr of each model when $l = 5$. In high density, model3 is the best.

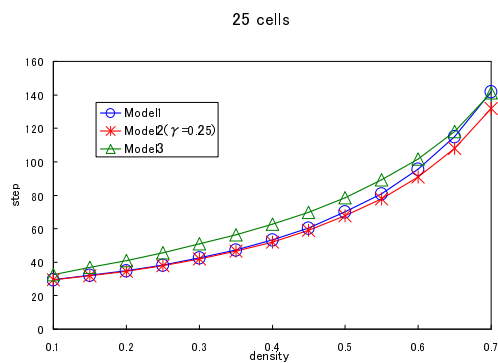


Fig. 6 Cr of each model when $l = 25$. In this condition, model2 is the best.

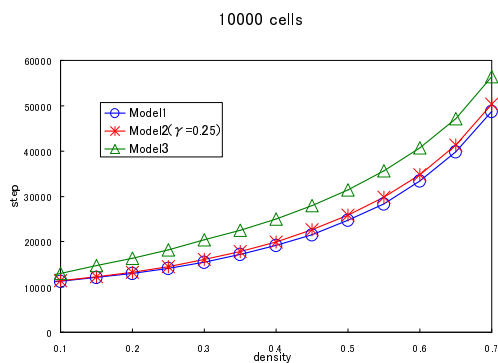


Fig. 7 Cr of each model when $l = 10000$. In this condition, model 1 is the best.

5 結論

本研究では、雑踏を通過する歩行者の挙動について3種類のモデル化を行い、シミュレーションと共に特に退出時の位置について理論的な考察を行った。更に、各モデルを統合的に比較する指標を新たに導入し、3モデルの比較を行い、条件により最適な戦略が異なることを示した。

今後の課題としては、実験値との定量的な比較や、Mean travel time の理論解析が挙げられる。

参考文献

- [1] 西成活裕「渋滞学」新潮社 (2006)
- [2] Bastien Chopard and Michel Droz, *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*, Cambridge University Press, New York (1998)
- [3] Toru Ohira and Jack D. Cowan, *Delayed random walks*, Phys. Rev. E52, 3277 (1995)