

群集運動におけるパーソナルスペースの獲得過程

江崎, 貴裕
東京大学工学部航空宇宙工学専攻

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/10.15017/23415>

出版情報 : 応用力学研究所研究集会報告. 22A0-S8 (31), pp.202-207, 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. 31 (pp. 202 - 207)

群集運動におけるパーソナルスペース の獲得過程

江崎 貴裕 (EZAKI Takahiro), 西成 活裕 (NISHINARI
Katsuhiko)

(Received 15 January 2011)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2011

群集運動におけるパーソナルスペースの獲得過程

東京大学 工学部 航空宇宙工学科

江崎 貴裕 (EZAKI Takahiro)

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

西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiko)

概要 フロアフィールドモデルの拡張として人の心理学的な排斥力を組み込んだ近接学的フロアフィールドモデルを提案し、特に領域への流入過程について調べた。モデルには新たに近接学的フロアフィールド (PFF) と閾値の概念を加えるとともに、最終配置の指標として二つの量を定義し、シミュレーションや平均場近似による計算を行った。

1 はじめに

「人の流れ」に関する問題に対しては様々な有用なモデルが考案され、これまでに一定の成果を収めてきた [1, 2, 3, 4]. 特に空間と時間を離散に区切ったフロアフィールドモデル [3] は実用上非常に便利なモデルとして対向流や避難のシミュレーションに利用されてきた.[4] しかし一方で、これらのモデルは単純化のため、前にいる他人が止まっていたら衝突しないようにある程度の距離をとった状態で止まったり、誰かが後ろから寄ってきたら適当な距離を詰めるといった現象は考慮に入れていない. これらの現象は「自分の行きたい方向」とは別に「他人には近寄りたくない」という心理的な効果によるものである. 本研究では従来のフロアフィールドモデルに心理的な排斥力の効果を含めた新しいモデルを提案し、さらにそういった効果が支配的になる「人の領域への流入」という状況を考えシミュレーションを行った. また、「止まる」状態に注目し、人の最終配置について評価する指標を導入した.

2 モデル

2.1 近接学的フロアフィールドモデル

まずはフロアフィールドモデルについて述べる. フロアフィールドモデルとはその名のとおり離散に区切ったフロアに、移動に関する値が格納されているモデルで (それをフロアフィールドと呼び、以下 FF と略記する), その値にしたがって確率的に人が移動していくモデルである. FF は基本的に静的 (Static)FF と動的 (dynamic)FF の二つで構成されるが、今回は新たに近接学的 (proxemic)FF を導入した.

2.1.1 フロアフィールド

1. 静的 FF (SFF: Static Floor Field) S_{ij}

人の行き先や、空間の価値を与えるフロアフィールド. 状況に応じて予め外部から設定する. シミュレーションを通じて変化しない. 例として、避難の場合は出口に向けて傾斜をつけた形で設定する場合が多い.

2. 動的 FF(DFF:Dynamic Floor Field) D_{ij}

人が他人を追従する効果を入れるためのフロアフィールド。蟻のフェロモンのように人が通ったフロアにその都度 +1 加算される。また、それ自身で以下のような拡散・減衰のダイナミクスを有する。ただし α, δ はそれぞれ拡散率, 減衰率。

$$D_{ij}^{t+1} = (1 - \alpha)D_{ij}^t + \frac{\alpha}{4} (D_{i+1,j}^t + D_{i-1,j}^t + D_{i,j+1}^t + D_{i,j-1}^t) \quad (2.1)$$

3. 近接学的 FF(PFF:Proxemic Floor Field) P_{ij}

人が他人に近寄りたくない心理学的な効果を入れるためのフロアフィールド。各人は自分の周りに距離の二乗に反比例する近接学的 FF を生成する (但し、自分のいるセル及び 8 近傍のセルにはすべて 1 を与える。例として図 1 に近傍 24 セルに生成する近接学的フロアフィールドを示す)。領域にいる全員分の生成する近接学的 FF を全て足し合わせたものとしてフロアの近接学的 FF を定義する。

1/8	1/5	1/4	1/5	1/8
1/5	1	1	1	1/5
1/4	1	1	1	1/4
1/5	1	1	1	1/5
1/8	1/5	1/4	1/5	1/8

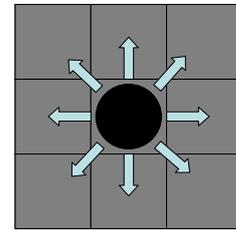
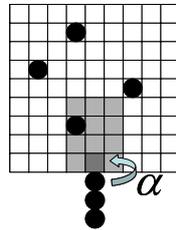


図 1: 近接学的フロアフィールド P_{ij}

図 2: 流入過程

図 3: ムーア近傍 Λ .

2.1.2 閾値

電車の中や、エレベータなどの空間に人が入っていくとき、人は或る程度のスペースを自分の周りに獲得したところで動くのを止める。この効果を表すために閾値という概念を導入する。閾値 Θ は正のパラメータ Θ_{max}, k_t を用いて以下の式で定義される。

$$\Theta = \Theta_{max} \exp(-k_t W_O) \quad (2.2)$$

$$W_O = k_s S_O - k_d D_O + k_p P_O \quad (2.3)$$

W_O は各人のいるセルにおけるフロアフィールドの重みつき和。 k_s, k_d, k_p は各フロアフィールドの効果の大きさを表す正のパラメータである。

2.1.3 移動確率

各人の現在いるセル (文字 O で表す) からその近傍 (近傍は 8 セルを考える。この近傍を集合 Λ と記す) の或るセル (i, j) への移動確率を以下の式で定義する。但し、 k_s, k_d, k_p はそれぞれのフロアフィールドの影響の強さを表す正のパラメータである。

$$p_{ij} = N \exp(-W_{ij} - \Theta) \quad (i, j) \in \Lambda \quad (2.4)$$

$$p_O = N \exp(-W_O) \quad (2.5)$$

$$W_{ij} = k_s S_{ij} - k_d D_{ij} + k_p P_{ij} \quad (2.6)$$

2.2 決定論的 PFF モデル

本研究では新たに導入した近接学的な効果を見るため、また全員が停止した終状態が重要になる現象を扱うため、以下のような極限をとり、決定論的なルールを得る。これを決定論的 PFF モデルと呼び、このモデルを用いて以下の議論を進める。 $k_s/k_p, \Theta/k_p$ を一定に保って $k_s, \Theta, k_p \rightarrow \infty$ とすると、

< 決定論的 PFF モデル ルール >

1. 以下の式で各人について閾値 Θ を計算する。

$$\Theta = \Theta_{max} \exp(-k_t W_O) \quad (2.7)$$

$$W_O = k_s S_O + k_p P_O \quad (2.8)$$

セル (i, j) における静的フロアフィールドと近接学的フロアフィールドの重みつき和 $k_s S_{ij} + k_p P_{ij}$ をまとめて W_{ij} と記す。

2. 近傍のセルのうちで最も W_{ij} の値が小さいセルを決定する。この値を W_{min} と書く。
3. $W_O - W_{min} > \Theta$ ならば、 W_{min} を与える最小のセルに移動する。最小のセルが複数ある場合は等確率で一つ選択し移動する。条件が満たされない場合は移動せずにその場に止まる

2.3 流入ルール

本研究では一定の正方形領域に人が流入する現象をモデル化する。

2.3.1 密度依存流入

人が部屋などに順に入っていくとき、入り口付近の混み具合がある一定を超えると流入速度が遅くなる、という状況を考え、以下のように入り口付近(本論文では 3×4 の領域を取る)の密度 $\rho_{3 \times 4}$ に依存して流入確率を定める(図2)。ただしこの領域内にいる人の数を $N_{3 \times 4}$ とする。

$$\alpha_{dd}(\rho_{3 \times 4}) = \min \left\{ 1, \frac{1 - \rho_{3 \times 4}}{1 - \rho_{cr}} \right\} \quad (2.9)$$

$$\rho_{3 \times 4} = \frac{N_{3 \times 4}}{12} \quad (2.10)$$

3 シミュレーション

以下シミュレーションでは人数は $N = 25$ と固定して密度依存流入確率にしたがって流入させる。また、入った人がすぐ入り口から離れるように入り口セルの静的フロアフィールドの値を十分大きな値にとっておく。全員が入りきるまでの時間を流入所要時間として様々な場合について調べる。

3.1 平均場近似による近似計算

人の流入確率が落ち始めるのは入り口付近の密度が ρ_{cr} を超えてからである. その段階では領域に入った人が有る程度均一に分布していると考えられる. そこで大雑把に $\rho_{3 \times 4} \cong \rho_{L \times L}$ (ただし $L \times L$ は領域全体のサイズ) と近似する. すなわち, k 人目の人が領域に入る段階では,

$$\rho_{3 \times 4}(k) \cong \frac{k-1}{L^2} \quad (3.1)$$

また, 各人が流入したらそのステップで即座に均一化されると仮定することにより, T の期待値を以下のように計算することが出来る.

$$T_{app} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\alpha_{dd}(\rho_{L \times L})} \quad (3.2)$$

$$= \sum_{k=1}^N \frac{1}{\min \left\{ 1, \frac{1-k-1}{1-\rho_{cr}} \right\}} \quad (3.3)$$

臨界密度は $\rho_{cr} = 0.2, 0.4$ の 2 条件で, 部屋のサイズ (1 辺のセル数) を 7 から 15 まで変化させて流入時間をシミュレーションで計算したものと近似計算したグラフが図 4. 部屋が十分大きくなると, 入り口付近が混み出す前に全員が入りきってしまうので最小の 25 ステップに収束する. 逆に部屋が小さくなると, 流入確率の低下の影響が出てくることがわかる. 近似計算については, おおよその特徴は捉えられているといえる.

3.2 入り口位置と流入時間所要時間

入り口を中心だけでなく, 様々に変化させた結果が図 5. 入り口を角に設定した条件を「corner」, 角から m セル隣に設定した条件を「 m -cell」とする. また, 流入は密度依存流入で $\rho_{cr} = 0.2$ とした. なお入り口が角にあるときの入り口付近の密度は 8 セルの密度で算出している. 入り口の位置による影響は特に領域が狭いほど顕著で, 一般に入り口を角に設定した時の所要時間が最長になっている. また, 領域のサイズ $L = 7, 9$ の条件で $2cell$ に入り口を設定したときの流入時間が最低になっており, 適当な箇所に入り口を作ると左右対称である真ん中に入り口をつくるよりも流入が早くなる場合があることを示唆している. 逆に領域のサイズが十分大きいときは入り口の corner からの距離を $2cell$ 以上取っておけば大きな変化はない. 本シミュレーションでは領域の境界に人が集まりやすいため, 入り口が角及び $1cell$ の場合は境界に集まった人の影響で (入り口付近の人が邪魔で) 流入速度が落ちると考えられる.

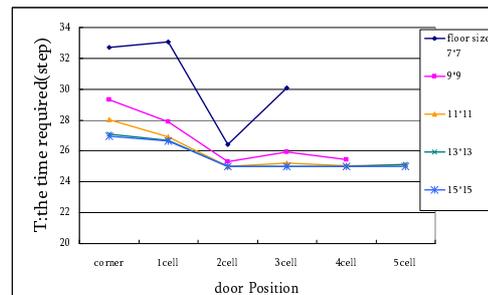
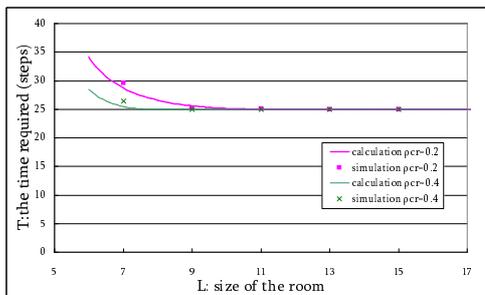


図 4: 領域のサイズと流入所要時間 $\rho_{cr} = 0.2, 0.4$ 図 5: 入り口の位置と流入所要時間 $\rho_{cr} = 0.2$

3.3 閾値に関するパラメータと流入時間の関係

Θ_{max}, k_t を変えたときにどのように変化するかを調べたのが図 6. 結果を見ると, 基本的に流入所要時間は Θ_{max} に関して単調増加, k_t に関して単調減少となっている. これは各人の「動きやすさ」の度合いとも対応している. すなわち, Θ_{max} が大きいほど閾値は大きくなり, k_t が小さいほど閾値の減衰が遅くなり相対的に閾値が大きくなる, という特徴がそのまま出ている. 閾値が大きくなると動きづらくなるため, 領域の端まで進まずに入り口付近で止まる. その効果で後から入ってくる人の邪魔になり (密度上昇・流入確率減少) 全員が流入するまでの時間が長くなる. 尚, $k_t = 0$ の場合は閾値が減衰しないがために, Θ_{max} が大きくなると入り口で詰まってしまう. また, 流入確率は入り口付近で決まるため有る程度以上領域が広くなると, 領域のサイズの影響があまり出ない. また, 領域が小さいほど組み合わせ論的なばらつきが出ていることも見て取れる.

3.4 最終配置の評価

3.4.1 指標の導入

まず, 人の配置の“良さ”をあらわす指標を二つ導入する. 一つはエネルギー E (Energy) で以下の式で定義される.

$$E = \sum_{k=1}^N W_k \quad (3.4)$$

すなわち領域内にいる人のいるセルにおける重みつきフロアフィールド和 W を全部足し合わせたものである. この値が小さければ全体として人が感じているストレスが小さい (=スペースが広くつかわれている) ことを表し, 逆にこの値が大きければ全体としてストレスが大きい (=スペースが狭くつかわれている) ことを表す. また, もう一つの量 U (Unevenness) を以下の式で定義する.

$$U = \sum_l -p(l) \log p(l) \quad (3.5)$$

ただし, l は領域内にいる各人と他人までの最短距離で, $p(l)$ は N 個の最短距離のうちから一つ無作為に選んだときにその値が l である割合である. すなわち, N 個の最短距離のうち, その値が l であるようなものの個数を $n(l)$ とすると, 上の式は

$$U = \sum_l -\frac{n(l)}{N} \log \frac{n(l)}{N} \quad (3.6)$$

と書き直せる. これは情報エントロピーと同じ形をしており, 「最短距離のばらつき」を表している.

3.4.2 シミュレーションによる E, U の実現可能な点

入り口から一定確率流入 (流入確率 $\alpha_{geo} = 0.5$) させ, 25 人入りきった後の最終配置の E, U を計算し, プロットすることにより $E-U$ 平面での実現可能な点について観察する (図 3.4.2). Θ_{max} が小さい領域ではエネルギー E が小さく空間が広く使われている. また, エネルギー E の分散は小さく不均一さ U の分散は大きい. 逆に Θ_{max} が大きい領域ではエネルギー E が大きく, その代わりに不均一さ U が小さい. これは人が動きにくいために入り口付近でより高密度で詰まっていることによる. また, エネルギー E の分散は大きく不均一さ U の分散は小さい.

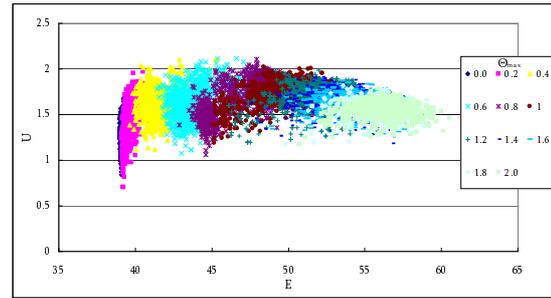
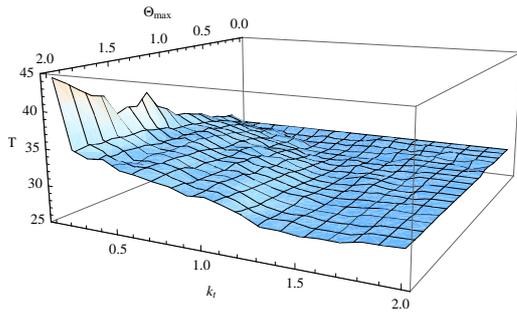


図 6: Θ_{max}, k_t と流入所要時間の関係 $L = 7, \rho_{cr} = 0.2$ 図 7: Θ_{max} を変化させたときの E と U の取りうる範囲

4 結論

今回導入した近接学的フロアフィールドモデルにより、一定領域に人が入っていく状況を再現できた。入り口の流入ルールを定めることで、全員入りきるまでの時間が変化することを平均場近似とシミュレーションで示し、また入り口の位置によってもダイナミクスが変化することを確認した。最終配置に関しても新たな指標を導入することにより、起こりうる配置を定量化することが出来た。

参考文献

- [1] Dirk Helbing and Péter Molnar, Social force model for pedestrian dynamics, Phys. Rev.E, 51, 4282-4286 (1995).
- [2] Masakuni Muramatsu and Tunemasa Irie and Takashi Nagatani. Jamming transition in pedestrian counter flow. Physica A, 267:487-498, 1999.
- [3] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz, Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton, Physica A, 295, 507-525 (2001).
- [4] Ansgar Kirchner and Andreas Schadschneider, Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, Physica A, 312, 260-276 (2002).