

# 歩行者集団の配置を参照して動く障害物を用いた 出口退出過程の制御

三浦康也, 杉山雄規

名古屋大学 情報科学研究科 複雑系科学専攻

## 概要

歩行者集団の出口退出運動において、出口付近に障害物を設置することにより歩行者の混雑が緩和され、退出運動をスムーズにできる場合があることが知られている。そこで我々は、歩行者集団の配置に応じて障害物を移動させることで、歩行者の流れを制御することを試みた。そのために、Earth Mover's Distance と呼ばれる分布間の距離尺度と多次元尺度構成法を組み合わせることにより、歩行者集団の配置を一点で表す低次元空間を構成した。モデルを用いた数値シミュレーションにおいて、構成した低次元空間上の点の位置を参照して障害物を移動させたところ、効果的な退出過程を実現することができた。

## Control of evacuation dynamics from an exit by using a moving obstacle based on configuration of pedestrians

Yasunari Miura, Yuki Sugiyama

Department of Complex Systems Science, Graduate School of Information Science, Nagoya University

## Abstract

Several studies on evacuation dynamics of pedestrians from an exit have shown that an obstacle placed in front of the exit can solve congestion of pedestrians and decrease the evacuation time. In this study, We control pedestrian flow by moving an obstacle as a function of a configuration of pedestrians and then realize more effective evacuation process. For this purpose, by using Earth Mover's Distance and Multi-dimensional scaling, we construct a low-dimensional space in which a configuration of pedestrians is represented as a point. By numerical simulation using a mathematical model, we show that the obstacle moved as the function of a position in the low-dimensional space can realize effective evacuation dynamics.

## 1 はじめに

近年、生物や人間の集団において、局所的な相互作用から巨視的な動的構造を創発する現象が盛んに研究されている。しかし、このような巨視的なダイナミクスを外部から制御、誘導することを試みた研究はあまりなされていない。集団の振る舞いを制御する数理的枠組みを構築することは、人や動物の群れの誘導、交通渋滞の解消、株式市場における暴騰・

暴落の回避など、実社会への応用の観点から重要である。また、外部からの働きかけに対する集団のマクロな応答を調べることは、集団現象の法則性を理解するうえでも意義があると考えられる。

集団がマクロレベルでひとつの対象のように振る舞うとき、そのダイナミクスを制御するためには、個々の要素を局所的に制御するのではなく、外力や環境の変化といった集団全体に影響を及ぼすマクロな制御パラメータを用いるのが有効である。そして、

時々刻々と変化する集団全体のマクロな様相をフィードバックして、制御に用いるパラメータを適切に時間変化させていかなければならない。

我々は、そのようなフィードバック制御を行う具体的現象として、歩行者集団の出口退出過程に注目した。この過程において、障害物を出口付近に設置することにより歩行者集団の混雑が緩和され、退出運動をスムーズにできるという結果が、モデルを用いた数値計算および実験から得られている [1, 2, 4, 3]。そしてその効果は、障害物を配置する位置に依存することが分かっている。この結果は、多数の歩行者からなる歩行者流というマクロな現象を、ひとつの障害物の配置位置をパラメータとしてコントロールできることを示唆している。そこで我々は、歩行者集団のマクロな配置状況に応じて障害物を移動させることにより、更に効果的な退出運動を実現することを試みた。具体的には、平常時は障害物を出口から遠ざけておいて、歩行者集団の混雑が発生しそうな配置になったところで障害物を出口付近に移動させることで、歩行者の流れの制御を行う。これは、時間変化する歩行者集団の配置を参照変数、障害物の位置を制御パラメータとするフィードバック制御システムを構築することに対応する。

## 2 歩行者モデル

本研究において、我々はソーシャルフォースモデルと呼ばれる自己駆動粒子モデルを用いて解析を行う [5]。このモデルにおいて、歩行者を表す個々の粒子の時間発展は次の運動方程式で記述される。

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\mathbf{x}}_i(t) &= \frac{v_0 e_i^{\text{exit}}(t) - \dot{\mathbf{x}}_i(t)}{\tau} \\
 &+ \sum_{j \neq i} [\mathbf{f}_{ij}^{\text{soc}}(t) + \mathbf{f}_{ij}^{\text{phy}}(t)] \\
 &+ \sum_b [\mathbf{f}_{ib}^{\text{soc}}(t) + \mathbf{f}_{ib}^{\text{phy}}(t)] \quad (1) \\
 \mathbf{f}_{ij}^{\text{soc}}(t) &= -A \exp\left(-\frac{d_{ij}(t) - 2r}{B}\right) \mathbf{n}_{ij}(t) \\
 \mathbf{f}_{ij}^{\text{phy}}(t) &= C\theta(2r - d_{ij}) \mathbf{n}_{ij} \\
 &+ D\theta(2r - d_{ij})[(\dot{\mathbf{x}}_j - \dot{\mathbf{x}}_i \cdot \mathbf{t}_{ij})] \mathbf{t}_{ij}
 \end{aligned}$$

$m, r$  はそれぞれ粒子の質量と半径を表し、 $\mathbf{x}_i$  は粒子  $i$  の位置、 $e_i^{\text{exit}}$  は粒子  $i$  から出口を向く単位ベクトル、 $e_{ij}$  は粒子  $i$  から  $j$  を向く法線方向の単位ベクトル、 $\mathbf{t}_{ij}$  はそれに直行する接線方向のベクトルであり、 $\theta$  は階段関数である。右辺第 1 項は目的地 (この場合は出口) を目指す自己駆動力を表す。第 2 項は

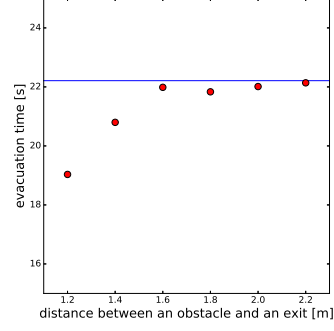


図 1: 障害物と出口の間の距離に対する平均退出時間 (粒子数 40). 青い線は障害物を置かない場合の平均退出時間を表す。

周囲の粒子との相互作用を表し、接触を避けようとする力 (social force) と、接触時に働く法線方向の力 (反発力) および接線方向の力 (摩擦力) からなる。第 3 項は壁や障害物との相互作用を表し、第 2 項と同じ関数形で与えられるものとする。

パラメータの値は、 $r = 0.3$  m,  $m = 60$  kg,  $v_0 = 1.5$  m/s,  $\tau = 0.1$  s · kg,  $A = 1.0 \times 10^3$  N,  $B = 0.08$  m,  $C = 1.0 \times 10^3$  N,  $D = 0.3 \times 10^3$  kg/s とし、粒子数は 40 とした。出口退出のシミュレーションを行う部屋は 1 辺が 15m の正方形とし、その 1 辺の中央に幅 0.7m の出口を 1 つ配置した。そして出口正面に障害物を配置し、出口からの距離を様々に変えながら、全粒子が退出するのに要する時間を計算した結果を図 1 に示す。このとき、部屋の奥半分のスペースに粒子をランダムに配置してシミュレーションを 30 回行い、退出時間の平均を求めた。図 1 より、障害物を出口から 1.2m の位置に置いたとき、平均退出時間は最小となり、障害物を置かない場合に比べて 3 秒ほど短縮されていることが分かる。なお、障害物を 1.2m より近づけると、粒子が出口の端と障害物に挟まれて動けなくなってしまうため、退出時間は計算できなかった。

歩行者が一斉に出口に押し寄せる非常事態においては、上述のように、出口付近に障害物を置くことで退出時間を短縮することができる。しかし、出口で混雑が発生していない平常時においては、障害物の存在は歩行者にとって邪魔でしかない。また障害物を設置せずに混雑が発生する場合においても、最初から出口に近い位置にいた何人かの歩行者は、混雑が発生する前に退出できていることがシミュレ

ションの動画から見て取れる。このことから、平常時は障害物を出口の脇にどけておいて、集団が「混雑が起ころうな配置」を形成したときに障害物を出口付近に移動させる、という制御方針が考えられる。

### 3 次元削減

2次元平面上の  $N$  個の粒子の配置は  $2N$  次元の高次元データであり、可能な配置パターンは無数に存在する。そのような高次元空間のデータを引数として、障害物の運動を定める関数を設定することは事実上不可能である。そこで、全粒子の配置の類似度をおおまかに特徴づける低次元空間を構成し、配置パターンをその空間上の1点で表すことで、「混雑が起ころうな配置」をその空間上のある領域として指定することを考える。我々はそのような低次元空間を次の手順で得る。

まず、様々な粒子配置のスナップショットからなるデータ集合を用意し、データ点間の類似度を計算する。なお、室外に退出した後の歩行者の位置には興味が無いので、退出済みの歩行者の位置変数は出口の中心点に固定するものとする。配置間の類似度は、Earth Mover's Distance と呼ばれる量を用いて表すことにする [6]。Earth Mover's Distance とは、分布の間の類似度を計る距離関数の一種であり、一方の分布から他方の分布へ変形させるのに必要なコストの最小値として定義される。ここでは、粒子の配置を分布と考え、一方の配置から他方の配置へ粒子を移動させるコストを考えることで、配置の間の Earth Mover's Distance を計算する。粒子の移動コストとしては、2点間のユークリッド距離を採用する。

そして、得られたデータ点間の Earth Mover's Distance に対して多次元尺度構成法を適用する [7]。多次元尺度構成法とは、近いデータ同士が近い点同士、遠いデータ同士が遠い点同士で表されるような、低次元空間を構成する次元圧縮手法である。これにより、全粒子の配置という  $2N$  次元のデータは、2次元平面上の1点  $(\psi_1, \psi_2)$  で表わされることになる。なお、多次元尺度構成法では原点に対応するデータを任意に選ぶことができるが、ここでは全員が退出した状態を原点に選ぶことにする。

データ集合としては、粒子をそれぞれ縦2列、4列、10列に並べた状態を初期状態とし、全粒子が退出するまでの過程における1秒ごとのスナップショットのデータを用いることにする。このデータ集合を、上記の手法で得られた  $\psi_1 - \psi_2$  平面で表したものが

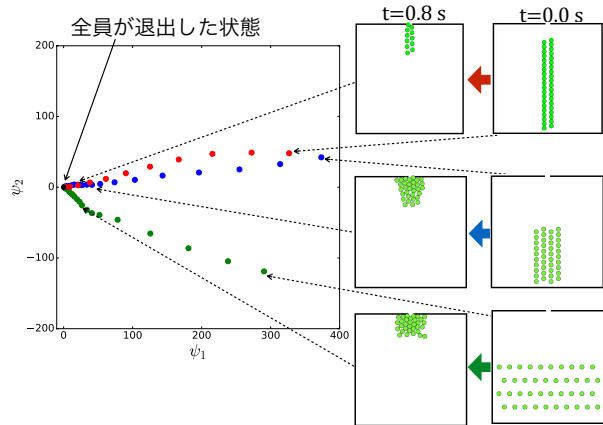


図 2: 多次元尺度構成法で得られた 2 次元平面上の点列と、実空間上の粒子集団の時間発展の対応

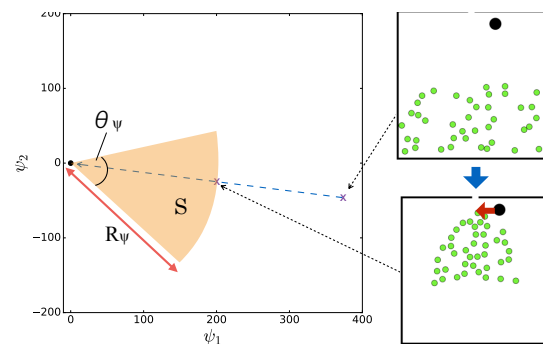


図 3:  $\psi_1 - \psi_2$  平面上の点の位置に基づくフィードバック制御。はじめは障害物を出口の横に置いておき (右上の図内の黒い点)、粒子全体の配置が  $\psi_1 - \psi_2$  平面上の領域  $S$  に入ったところで、障害物を出口正面の方向に動かかし始める。

図 2 である。

一般に、多次元尺度構成法で構成された空間変数の意味を知ることは困難であるが、今回のケースでは次のように推測することはできる。つまり、原点からの距離は、歩行者全体の重心と出口の距離に対応しており、角度成分が出口の幅に対する歩行者分布のばらつき(分散)を特徴づけていると考えられる。

### 4 フィードバック制御

図 2 を見ると、ある配置から退出が完了するまでの時間発展は、 $\psi_1 - \psi_2$  平面において、ある角度から原点に吸引される軌道に対応していることがわかる。ここで、混雑が発生する場合の時間発展を、ある角度領域  $\theta_\psi$  に広がる扇形の領域  $S$  を通過する軌道として定義できると仮定する。ここで、「混雑が発

生する場合の時間発展」とは、「出口正面に障害物を設置したときに、退出時間が短縮されるような時間発展を生成する初期配置からスタートする時間発展」であるとする。 $\theta_\psi$  を同定するために、ランダムな初期配置を多数用意し、混雑が発生する場合の時系列データを多数収集する。そして、それらのデータを  $\psi_1 - \psi_2$  平面に埋め込むことにより同定された扇形領域の角度の範囲が図 3 内に示された  $\theta_\psi$  である。領域  $S$  の半径  $R_\psi$  は後で決める。

ここで、我々は障害物を以下のルールに従って移動させることにする。まず、出口正面 1.2m の位置に置かれた障害物を横に 2.5m ずらして、退出する粒子の邪魔をしないようにしておく。そして、粒子の配置が、 $(\psi_1, \psi_2)$  平面上において、図 3 内の領域  $S$  に入ったところで、障害物を出口正面に向かって横向きに動かす始める。また、障害物を動かす速さ  $V_0$  を、集団が出口に向かう速さに比例させるために、次の式で与える。

$$V_0 = a \|\dot{r}_\psi\| \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

$\dot{r}_\psi = \sqrt{(\dot{\psi}_1)^2 + (\dot{\psi}_2)^2}$  は  $(\psi_1, \psi_2)$  平面上の点の動径方向の速度であり、集団が出口に向かう速さを表している。定数  $a$  の値は 0.2 m/s とした。障害物は出口正面に到着したところで移動を止める。

ここで、障害物を動かす始めるタイミングを決める領域  $S$  の半径  $R_\psi$  の適切な値を決めなくてはならない。そのために、部屋の奥半分の領域に粒子をランダムに配置した初期状態を 30 個用意し、それぞれについて上記のルールに従ったフィードバック制御を行い、退出時間の平均値を計算した。その結果を図 4 に示す。この図を見ると、 $R_\psi$  が 200 前後のとき、障害物を出口前に固定する場合よりも退出時間を短縮できていることが分かり、退出時間を最小にする最適な値が存在することも確かめられる。 $R_\psi$  の値が大きすぎると、障害物を出口前に移動させるのが早すぎるため、はじめから出口前に障害物を置いておく場合と退出時間が変わらない(図 4 の右端)。一方、 $R_\psi$  の値が小さすぎると、障害物を動かす始めるのが遅すぎて、混雑の発生を防ぐことが出来ないため、退出時間が長くなってしまいうことも分かる(図 4 の左端)。

## 5 まとめと展望

歩行者退出過程において、歩行者集団の配置に応じて適切に障害物を動かすことにより、退出時間を

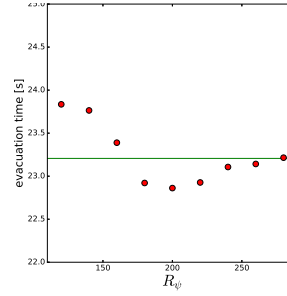


図 4: フィードバック制御を特徴づける領域  $S$  の半径  $R_\psi$  に対する平均退出時間. 緑色の線は、障害物を出口前に固定した場合の平均退出時間を示す。

短縮できることができた。また、混雑が発生しない平常時には障害物は出口の脇に置かれたままなので、平常時の退出においてもこの制御方針は有効である。

今回用いた手法、つまり歩行者全体の配置を特徴づける低次元空間を構成し、その空間上の位置と速度の関数としてフィードバック制御を行うという手続きは、部屋の形状などの条件がより複雑な状況においても適用可能である。またこの手法を使う上で、数理モデルは時系列データを生成するために使われているのみである。つまりこれはモデルフリーな手法であり、観測データに直接適用することができる。

また、集団内の微視的要素を個別に捉えるのではなく、巨視的様相を表現する低次元空間上の振る舞いを参照して集団全体の挙動を制御するというアプローチは、歩行者集団に限らず、複雑系と呼ばれるシステム一般に対して有効であると思われる。

## 参考文献

- [1] D. Helbing, I. Farkas, P. Molnár and T. Vicsek, *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (2002) 21.
- [2] A. Kirchner, K. Nishinari and A. Schadschneider, *Phys. Rev. E* **67** (2003) 1784.
- [3] 川口寿裕, 第 20 回交通流のシミュレーションシンポジウム (2014) 83.
- [4] K. Nishinari, Y. Suma, D. Yanagisawa and A. Tomoeda, *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008* (2008) 293.
- [5] D. Helbing and P. Molnár, *Phys. Rev. E* **51** (1995) 4282.
- [6] Y. Rubner, C. Tomasi and L. J. Guibas, *Int. J. Compt. Vision* **40** (2000) 99.
- [7] W. S. Torgerson, *Psychometrika* **17** (1952) 401.