

# 歩行者の集団形成に個々の身体パーツ運動が及ぼす影響

## Relationship between body parts movements and self-organization in pedestrian crowds

都丸 武宜<sup>†</sup>, 竹花 隼<sup>†</sup>, 西山 雄大<sup>‡</sup>, フェリチャーニ クラウディオ<sup>§</sup>, 村上 久<sup>†</sup>  
Takenori Tomaru, Jun Takehana, Yuta Nishiyama, Claudio Feliciani, Hisashi Murakami

<sup>†</sup>京都工芸繊維大学, <sup>‡</sup>長岡技術科学大学, <sup>§</sup>東京大学

Kyoto Institute of Technology, Nagaoka University of Technology, The University of Tokyo

t-tomaru@kit.ac.jp

### 概要

動物の運動は身体に備わる固有の器官の運動により実現される。しかし動物の群れ研究において、個体は身体を無視した質点として解析、モデル化されてきた。我々は最近、歩行者集団における個々の歩行ステップと肩の回転という身体パーツレベルの運動に着目し、集団の空間的構造形成との関係を明らかにした。本研究では、肩の回転運動を集団の構造形成の時間発展の観点からより詳細な解析を行い、構造脆弱性との関係を議論する。

キーワード：歩行者, 群集, 自己組織化, 身体パーツ

### 1. はじめに

人を含む多くの動物において観測される集団での行動は個体間の局所的な相互作用により実現される (Murakami et al., 2023). 従来、各個体は俯瞰的な視座 (絶対座標系) における距離に基づく相互作用を行うとされてきたが、近年では個体の視野を考慮したより現実的な相互作用も提案されている (Bastien & Romanczuk, 2020). しかし、多くのモデルや現実の動物の群れの解析において、個体は依然として身体を無視した「質点」として扱われていることに変わりはない。現実の個体の運動は、鳥における羽のはばたき (Portugal et al., 2014), 魚における尾鰭の運動 (Ashraf et al., 2017), 人における足の踏み出し、といった身体パーツの運動により実現され、これらと連動して集団的振舞いが生み出されるだろう。しかし、こうした個体レベルでの身体パーツの運動パターンと集団での運動との関係は未解明な部分が多い。

この問題に対し我々は最近、歩行者集団における個々の歩行ステップと肩の回転という身体パーツレベルの運動に着目し、これらと集団の空間的構造形成の関係を明らかにした (Tomaru et al., 2024a). 具体的には、横断歩道を模した直線通路において対面してすれ違う歩行者集団 (48 人) の歩行軌跡と両足の運動の両方を計測する実験を行った。そして、歩行ステップへの時間的な介入として外部から一定周期の電子メトロノ-

ム音 (120 BPM) を聞かせそれに合わせて歩行する条件 (CUE 条件) と、外音による介入を行わない条件 (NO\_CUE 条件) において集団が形成する構造の頑健性を比較した。結果として、CUE 条件においてのみ歩行ステップの同期が観測され、NO\_CUE 条件ではバラバラなタイミングでステップが更新されていることが明らかとなった。対向する流れでは、同じ方向に進む歩行者が自発的に複数の列を作ることが知られているが (レーン形成現象), CUE 条件において形成されるレーンの数は NO\_CUE 条件よりも増加することが明らかとなった。レーン数の増加は、対向歩行者間での接触面が増え、潜在的に衝突が生じやすい脆弱な構造となることを意味する。さらに、CUE 条件において、歩行者の進行方向に対する肩の回転角度の平均は NO\_CUE 条件よりも大きいことが示された。狭い通路を二人の歩行者が通り抜ける場合など、衝突の蓋然性が高い場合に歩行者は肩を回転させて避けることが知られている (Yamamoto et al., 2019). したがって、歩行ステップという個体レベルの身体パーツの運動が、集団レベルの構造形成に影響を与え、さらに肩の回転という身体パーツの運動が集団レベルの構造脆弱性として現れることが明らかとなった。

本研究では、この肩の回転運動をレーン形成の時間発展の観点からより詳細な解析を行い、レーン形成の構造脆弱性との関係を議論する。

### 2. 手法

#### 2.1. 実験設定

実験は 2022 年 5 月に京都工芸繊維大学の体育館で実施された。被験者は大学生 48 人 (男性 35 人, 女性 13 人, 平均年齢 =  $21.08 \pm 1.71$ ) で、24 人ずつの 2 グループに分けられた。被験者全員が両肩に ID 番号が記された黒色の T シャツを着用し、グループに基づき赤または黄色の帽子を着用した。実験は京都工芸繊維大学倫

理審査委員会の承認を受け、被験者全員から実験開始前に書面にて同意を得た。

各グループは直線通路 (10m×3m) の両端で待機し、実験者のスタートの合図とともに歩行を開始し、通路の反対側の端まで歩行した。先述したように、歩行条件として個々の歩行ステップへの時間的な介入として通路横に設置されたスピーカーから流れる電子メトロノーム音 (120 BPM) のリズムに合わせて歩行する CUE 条件及び、介入を行わない NO\_CUE 条件での試行が実施された。歩行の様子は通路直上 10 m の高さに設置されたビデオカメラ(4K, 30fps)で撮影された。

## 2.2. 解析手順

被験者の肩の回転運動を定量化するために、まず画像解析ソフト (Library Move-tr/2D) を用いて撮影された映像から、各条件 6 試行ずつ全歩行者の両肩の位置 (ID 番号の位置) をトラッキングした (図 1)。得られた両肩の座標データから各歩行者の肩の角度を計算し、その進向方向 (装置長辺方向) に対して垂直な角度との差を、「肩の回転角度」として定義した。

各試行で形成されたレーンの数は先行研究のデータを用いた (Tomaru et al., 2024b)。



図 1 肩の回転角度

## 3. 結果

図 2 に各試行の平均の肩の回転角度と形成されたレーン数を示す。CUE 条件と NO\_CUE 条件のいずれにおいても、各試行の平均の肩の回転角度と形成されたレーン数には強い正の相関があることがわかった (Pearson's correlation;  $N=12, r=0.76, p<0.01$ )。従って、やはり形成される構造と肩の回転は何らかの関係があ

ることが示唆された。

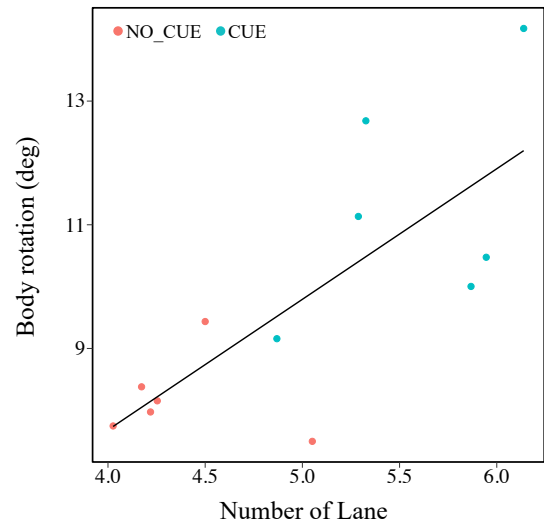


図 2 平均の肩の回転角度とレーン数

さらに、回転角度の時系列データを、レーンが形成され崩壊していく過程に応じた 5 つの時間ステージ (Tomaru et al., 2024a) に分割し、各ステージにおける平均の回転角度を求めた。図 3 に示すように、両条件に共通して見られる傾向として、肩の回転角度は、レーンが形成される過程で大きくなり、レーンの崩壊に伴い小さくなり、時間に対して山型の分布を取った。特に、NO\_CUE 条件では真ん中の 3 つのステージで肩の回転角度の値に違いはないが、CUE 条件では最もレーンが発達するステージ (Stage 3) をピークとして肩の回転角度の値が変化していることが示された。さらに、これら 3 つのステージでは CUE 条件では有意に回転角度が大きいことが明らかとなった (Welch's  $t$ -test, Stage 2;  $N_{NO\_CUE}=6, N_{CUE}=6, t=-4.55, p<0.01, \text{cohen's } d=-2.63$ , stage 3;  $N_{NO\_CUE}=6, N_{CUE}=5, t=-3.59, p<0.05, \text{cohen's } d=-2.39$ , stage 4;  $N_{NO\_CUE}=6, N_{CUE}=6, t=-4.54, p<0.01, \text{cohen's } d=-2.62$ ).

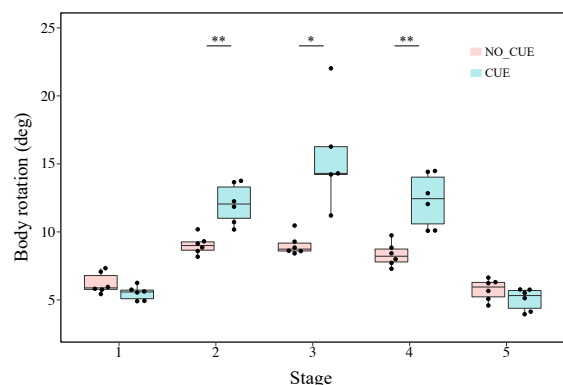


図 3 各ステージでの肩の平均角度

#### 4. おわりに

本研究では外的な聴覚キューによる時間的な運動パターンへの介入による歩行者集団の自己組織化への影響を個体の振る舞いのレベル、肩の回転運動による回避に着目し解析を行った。結果として、組織化されたレーンの数が増えるほど、肩の回転角度が多くなることが明らかとなった。さらに、聴覚キューにより歩行者がステップのタイミングを同期させて歩行する場合には、レーンが形成され始めてから崩壊するまでの間に特に肩の回転角度が増加しており、歩行者は対向者との衝突を避けるために、体を回転させる必要があったことが示された。以上より、個体レベルでの時間的な運動パターンの制約は集団レベルでの空間的な運動パターンにまで波及し、その結果個体の振る舞いのレベルの運動として構造の脆弱性が現れることが示された。

#### 文献

- Ashraf, I., Bradshaw, H., Ha, T. T., Halloy, J., Godoy-Diana, R., & Thiria, B. (2017). Simple phalanx pattern leads to energy saving in cohesive fish schooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(36), 9599-9604.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1706503114>
- Bastien, R., & Romanczuk, P. (2020). A model of collective behavior based purely on vision. *Science advances*, *6*(6), eaay0792.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aay0792>
- Murakami, H., Abe, M. S., & Nishiyama, Y. (2023). Toward comparative collective behavior to discover fundamental mechanisms underlying behavior in human crowds and nonhuman animal groups. *Journal of Robotics and Mechatronics*, *35*(4), 922-930.  
<https://doi.org/10.20965/jrm.2023.p0922>
- Portugal, S. J., Hubel, T. Y., Fritz, J., Heese, S., Trobe, D., Voelkl, B., Hailes, S., Wilson, A. M., & Usherwood, J. R. (2014). Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight. *Nature*, *505*(7483), 399-402.  
<https://doi.org/10.1038/nature12939>
- Tomaru, T., Nishiyama, Y., Feliciani, C., & Murakami, H. (2024a). Robust spatial self-organization in crowds of asynchronous pedestrians. *Journal of the Royal Society Interface*, *21*(214), 20240112.  
<https://doi.org/10.1098/rsif.2024.0112>
- Tomaru, T., Nishiyama, Y., Feliciani, C., & Murakami, H. (2024b). Data and Code for Robust spatial self-organization in crowds of asynchronous pedestrians (Version 1). figshare.  
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23820534.v1>
- Yamamoto, H., Yanagisawa, D., Feliciani, C., & Nishinari, K. (2019). Body-rotation behavior of pedestrians for collision avoidance in passing and cross flow. *Transportation research part B: methodological*, *122*, 486-510.  
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.008>