

歩行者の潜在的な通過方向の選好性が回避行動に及ぼす影響

Avoidance maneuver derived from potential passing direction of pedestrians

都丸 武宜^{*†}, 布施 朋之介[†], 西山 雄大[‡], フェリシアーニ クラウディオ[§], 村上 久[†]
Takenori Tomaru, Tomonosuke Fuse, Yuta Nishiyama, Claudio Feliciani, Hisashi Murakami

[†]京都工芸繊維大学, [‡]長岡技術科学大学, [§]東京大学

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

t-tomaru@kit.ac.jp

概要

他の動物と同様に人の集団での自己組織化も個体間の局所相互作用により駆動される。では、相互作用の形態は集団のサイズで不変なのだろうか。本研究では、一人の歩行者が一人の対向者とすれ違う際に右に避けやすいという選好性が、対向者が3人になることで消失することを示す。ただし、視線データ解析から、歩行者は通過方向の選好性を潜在的には有しており、それが歩行軌跡ならびに相互作用に影響している可能性が示唆された。

キーワード：自己組織化, 予期, 運動協調

1. はじめに

人の集団での運動は、他の多くの動物で観測される集団行動と同様に、個体の局所的相互作用によって駆動される [1]。群集歩行で観測される自己組織化には、双方向流において、同方向に進む歩行者の間で自立的にレーンが形成されるレーン形成現象 [2]といった自立的に集団の運動効率を向上させる現象のみならず、stop-and-go wave や群集乱流など、群集事故に繋がる現象も知られており [3]、その根幹を為すメカニズムを解明するために集団レベル、個体レベルでの多くの研究がなされてきた [1-5]。

ソーシャルフォースモデルという粒子の運動に着想を得たモデルが多く、現象を定性的に再現可能であることからシミュレーション研究では個体が現在の位置に基づき他個体と相互作用するモデルが広く研究されてきた [6]。一方で、現実の歩行者の運動解析から、歩行者は現在の位置に基づくのではなく予期される未来の位置に基づいた相互作用を行っていることが示唆された [7]。実際に、群集歩行でのレーン形成現象において、その空間的な自己組織化は個体が互いに予期しあうことによって実現されることが明らかとなった [2]。さらに、より基礎的でミニマルな相互作用を観察するため、1対1ですれ違う単純なタスクを行う実験が行われている。ここでも個体は予め設定された運動を取る

のではなく、相互の予期を通してその場その場で対向者と運動を調整しながら歩行することが明らかとなっている [5]。以上のようにミニマルな相互作用を調べる1対1の実験と集団レベルの実験は、歩行者の運動メカニズムの解明に相補的に寄与してきた。

では、ミニマルな実験で観測される全ての性質は直ちに集団レベルでの運動へと適用可能であろうか？ミニマルな実験で観測される認知的性質の一つとして、歩行者は対向者と1対1ですれ違う際の通過方向に偏りを持つことが知られている [4]。集団での運動において、この偏りの存在により各個体が協働して同方向に回避することでスムーズなレーン形成を促進することが指摘されてきた [4]。しかし、群集での対向流歩行において、通過方向を一方のみに制限するよう教示された集団では、自然な歩行条件に比べて歩行距離が長くなるという本来の自己組織化からむしろ逸脱した振る舞いが観測された [8]。この結果から歩行者の自己組織化において、個体の運動特性が集団での運動にそのまま反映されるわけではないことが示唆される。しかし、通過方向の制限という設定は個体の自由な運動を阻害し、他個体との協調的な運動を制限した可能性がある。従って、個体が集団での運動において通過方向の偏りという性質自体を変更しているのか、あるいは、その性質を持ちつつも、他個体との相互作用を通して自己組織化に何らかの影響を与えるかどうかは明らかではない。

本研究では、基礎的でミニマルなレベルでの個体の通過方向の偏りという性質が、集団レベルにおいてどのように変化していくのかを明らかにするために、複数の対向歩行者とすれ違う1対3での対向流歩行の実験を実施した。さらに、対向者の中に予期が阻害された歩行者が存在することで、通過方向の偏りや歩行運動に与える影響を調べた。

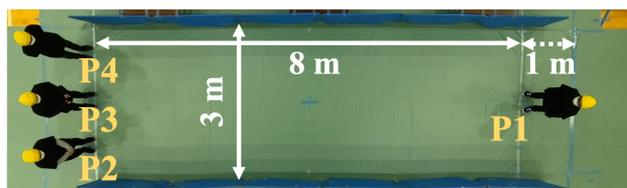


図 1. 実験通路

2. 実験手法

2.1. 被験者

実験は2021年3月に京都工芸繊維大学の体育館にて実施された。被験者は男子大学生 20 名 (22.2 ± 1.06 歳) で、5名ずつ4つのグループに分けられた。また、画像解析を簡単化するために、被験者は黄色の帽子及び黒の T シャツを着用した。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。

2.2. 実験装置

実験用装置として、10 m×3 m の直線通路が設定され、コース外への移動を防止するために通路長辺の端には高さ 1.2 m のパーティションが設置された (図 1)。通路の床はポリ塩化ビニル製のカバーで覆われ、歩行者は自身の靴で歩行した。実験通路直上 (10 m) に設置されたビデオカメラ (GoPro, 2.7K, 60fps) により、歩行中の運動データが撮影された。またメガネ型視線計測装置 (Tobii Glasses 3; 100Hz, scene video; 1920×1080, 24fps) によって歩行中の視線データが計測された。

2.3. 実験手順

試行で通路に設定されたスタートラインにそれぞれ 1 人、3 人の歩行者が対面して配置され実験者のスタート合図で歩行を開始し、反対側のスタートラインの 1 m 先に設定されたゴールラインまで歩行した (図 1)。

実験条件として、3 人側の歩行者の内 1 人は歩行中の相互予期を阻害するためのタスクとしてスマートフォンを用いて簡単な足し算を行う追加課題が課された [2, 5]。追加課題が課された歩行者の位置 (1 人側からみて左; LEFT, 中; MIDDLE, 右; RIGHT) の 3 条件と全員が追加課題を実施しないベースライン条件 (BASE) の計 4 条件が実施された。また、1 人側の歩行者はメガネ型視線計測装置を装着した。

各条件 1 試行を 1 セットとして、1 グループ 15 セット (60 試行) を行い 4 グループで合計 240 試行が実施された。1 セット毎に 1 人側の歩行者が入れ替わり、すべての被験者が 1 人側の歩行者としての試行を計 3 セット行った。また、3 人側の対向歩行者及び追加課題を行う者は試行毎に残りの 4 人のうちから予め設定されたランダムな順番に従い選択され、残りの 1 人は休憩用の椅子で待機した。

被験者は、通常の歩行をすること、対向者にぶつからないようにすること、及び追加課題を与えられた場合にはできる限り多くの問題を解くことが教示された。

2.4. 解析手順

撮影された動画から Petrack [9]を用いて歩行者の運動軌跡が取得された。また、視線データは TobiiProLab [10]を用いて、1 試行毎の視線データの解析区間が設定された。具体的には、歩行開始のタイミングを実験者のスタートの合図、終了を対向者がシーンカメラの映像(視線動画) に写っていた最後のフレームと定義し、アノテーションを行なった。各試行での視線取得のエラー率を計算し、試行中のエラー率が 0.3 以上であった 3 試行及び 1 セット内での平均エラー率が 0.3 以上であった 2 つのセット (2×4 試行) を除外した。さらに機械トラブルによりデータ取得に失敗した試行が 1 つあり、合計で 228 試行が視線データの解析に用いられた。

また OpenPose [11]を用いて、視線動画上での対向歩行者の身体座標 (25 点/人) を取得し対向歩行者のどの部位に注目していたかを分類した。視線データは各時間において各身体座標との視線動画上での距離が計算され、最小距離となった部位を注目部位とした。ただし、最小距離が 150 pixel を超えていた場合にはどの対向者にも注目していないとした [12]。身体座標の時系列データと視線データは、最も近いタイムスタンプを対応させ時刻の同期を行った。

3. 結果

以下では、1 人側の歩行者を P1、3 人側の歩行者を P1 からみて、左側対向者; P2, 中央対向者; P3, 右側対向者; P4 とする (図 1)。

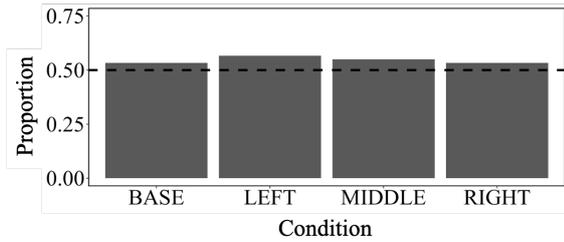


図 2. P1 右通行の割合

3.1. 歩行軌跡

まず 1 対 3 での歩行において通過方向の偏りが見られるかを明らかにするために、歩行の運動軌跡から P1 のすれ違い時の通過方向を調べた。全ての試行で P1 は、すれ違う際には P2 - P3 (左通行) もしくは、P3 - P4 (右通行) 間を通過した。図 2 に P1 の右通行の割合を示す。全ての条件において通過方向の左右の偏りはみられなかった。

3.2. 視線分布

P1 の通過方向による視線の分布の違いがあるかを明らかにするために、全ての対向歩行者を P1 の注目領域 (Area of Interest; AOI) とし、歩行開始からすれ違うまでの時間を 0.5 s 区切りに分割した 6 区間に対して対向者に視線を向けていた割合を求めた (図 3)。全ての条件において通過方向に関わらず、1.5-2.0 区間をピークとして対向者への視線を向ける割合が減少する傾向が見られた。BASE では、2.0-2.5 区間、2.5-3.0 区間において左通行時には右通行時より有意に対向者を見ている割合が大きかった (2.0-2.5 区間; $t(52.909) = -2.801, p < 0.01, \text{Cohen's } d = -0.721$, 2.5-3.0 区間; $t(33.465) = -4.082, p < 0.001, \text{Cohen's } d = -1.316$)。また、LEFT では 2.0-2.5 区間において左通行時の対向者を見ている割合が有意に大きかった ($t(35.533) = -4.568, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.047$)。MIDDLE, RIGHT では通過方向による視線分布の割合に有意な差はなかった。ただし、MIDDLE では全区間を通して対向者への視線分布の割合が高く、特に最も視線割合が低い 2.5-3.0 区間において通過方向によらず視線割合の平均値は 5 割を超えていた。以上より歩行中の対向者に対する視線分布は通常の歩行では通過方向で違いがあり、さらに予期が阻害された歩行者の存在による影響もみられた。

先行研究から 1 対 1 でのすれ違いにおいて、通過方向に予め視線を向けることが示されている。また、3 人の対向者に対して、全ての条件において中央対向者 P3

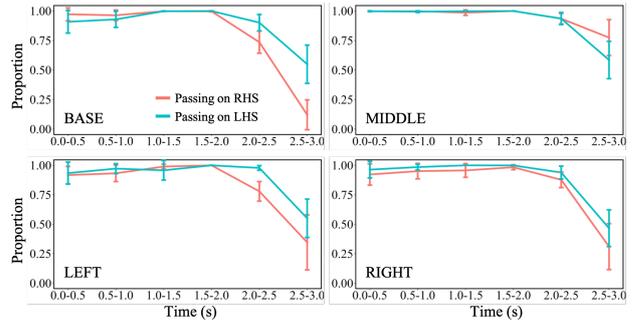


図 3. 対向歩行者への視線分布

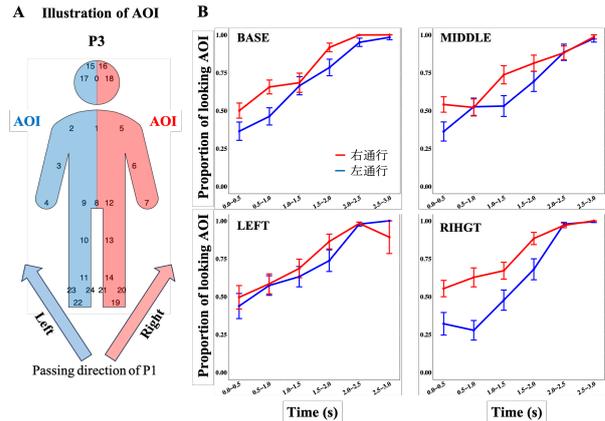


図 4. (A) 通過方向による AOI の定義領域, (B) AOI への視線分布

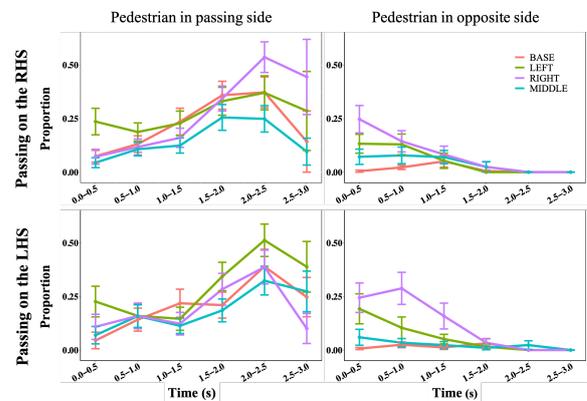


図 5. 両端の対向者への視線分布

に対して最も多くの視線が集中していた。したがって、通過方向に予め視線を向けるかを明らかにするために、P1 の通過方向側の P3 の身体領域を AOI とし視線分布を調べた。具体的には、P1 右通行時には P3 の左半身を、左通行時には右半身を AOI とした (図 4 A)。LEFT 条件を除き、左通行時には右側通行に比べて、AOI に視線を向けた割合が小さかった。特に RIGHT 条件においてその傾向が顕著であった。以上より左通行時には通過方向へ予め視線をあまり向けないことが示された。

最後に予期が阻害された対向者の影響をより詳細にするために、両端の対向歩行者 P2, P4 に対する視線の

分布を調べた。まず、通過方向側の P2, P4 を AOI とすると、全ての条件において通過方向に関わらず、AOI への視線の割合は歩行開始から徐々に大きくなり、3.0-3.5 区間では減少するという傾向が見られた (図 5 左)。また、LEFT では、左右通行時に 0.0 - 0.5 区間で視線を向ける割合が大きかった。一方で通過方向と反対側の対向者を AOI とした場合、BASE では通過方向に関わらず視線をほとんど向けていなかった (図 5 右)。これに対し LEFT, RIGHT では通過方向に関わらず、歩行開始時に視線を向ける割合が大きかった。予期が阻害された対向者の存在により、通常よりも視線が複数の歩行者に分散されることが明らかとなった。

4. おわりに

本研究では、1対1でのすれ違い時の通過方向の選好性への対向者の人数の増加による影響を明らかにするために、1対3での歩行者がすれ違う実験を実施した。また、予期が阻害された対向者がいることによるすれ違い行動への影響を調べた。歩行軌跡の解析では歩行者の通過方向の選好性、一方向への偏りは観測されなかった。しかし、視線分布のデータから、左通行場合には、右通行に比べて視線分布の進行方向に対する偏りが小さいことが分かった。また、予期が阻害された対向者の存在が、視線分布に影響を与えた。

通過方向の偏りが生じなかった原因として、複数の対向者が存在する場合には、そもそも選好性が生じない、あるいは潜在的な選好性が存在していたが、対向者の運動に合わせて通過方向を変更し結果として偏りが生じないという2つの可能性があげられる。BASEにおいて、左通行時には右通行時よりもすれ違い直前での対向者に視線を向ける割合が大きかった。これは左通行時には潜在的な選好性により通過方向の決定が遅れ、対向者に最後まで注意を払う必要があった可能性を示唆する。さらに、先行研究より、歩行者は進行方向に対して予め視線を向けることが明らかにされている[5]。しかし、左通行時のP2の通過方向側の身体領域への視線の偏りは右通行時に比べて小さかった。これらの結果から、歩行者は複数の対向歩行者が存在する場合にも通過方向の選好性を持ち、歩行開始直後には右通行を企図していたが、対向者の運動から何かしらの情報を取得し、左通行へと変更した可能性が示唆された。以上より偏りは生じなくなったというよりも、潜在しており、それ故に柔軟なすれ違いを可能としてい

ると考えられる。集団が大規模な場合にもこの潜在性は相互の予期を通して個体間で影響を与え合い集団でのスムーズなレーン形成に寄与する可能性がある。

また、相互予期阻害条件で歩行者は、中央歩行者 P3 が予期を阻害されている場合、対向者への視線をすれ違い直前まで向けていた。この特徴は、1対1のすれ違いと同様の結果となり、対向者が増え、注意を向ける対象が増える環境においても、運動が不確かな歩行者に対して注意を払うことが示された。さらに、両端に予期が阻害された歩行者がいる場合、歩行開始直後に通過方向と反対側の歩行者に対しても視線を向けていた。これは予期が阻害された歩行者の存在により、通常よりも探索的な視線の使い方を行っている可能性があり、注視対象の増加による歩行者の認知的負荷の増加を示唆する。これらは、相互予期の阻害された歩行者によるミニマルなレベルで観測される歩行への影響と集団レベルで観測される自己組織化の阻害との関連とを繋ぐ新たな証拠となるだろう。

文献

- [1] Moussaïd, M., et al. (2009). "Collective information processing and pattern formation in swarms, flocks, and crowds." *Topics in Cognitive Science*, 1(3), 469-497.
- [2] Murakami, H., et al. (2021). "Mutual anticipation can contribute to self-organization in human crowds." *Science Advances*, 7(12), eabe7758.
- [3] Alnabulsi, H., & Drury, J. (2014). "Social identification moderates the effect of crowd density on safety at the Hajj." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 9091-9096.
- [4] Moussaïd, M., et al. (2009). "Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1668), 2755-2762.
- [5] Murakami, H., et al. (2022). "Spontaneous behavioral coordination between avoiding pedestrians requires mutual anticipation rather than mutual gaze." *iScience*, 25(11).
- [6] Helbing, D., & Molnar, P. (1995). "Social force model for pedestrian dynamics." *Physical Review E*, 51, 4282-4286.
- [7] Karamouzas, I., Skinner, B., & Guy, S. J. (2014). "Universal power law governing pedestrian interactions." *Physical Review Letters*, 113(238701).
- [8] Bacik, K. A., Bacik, B. S., & Rogers, T. (2023). "Lane nucleation in complex active flows." *Science*, 379(6635), 923-928.
- [9] Boltes, M., et al. (2021). "PeTrack (v0.9)." Zenodo.
- [10] <https://www.tobiiipro.com/ja/product-listing/tobii-pro-lab/>
- [11] Cao, Z., et al. (2021). "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 43(1), 172-186.
- [12] Hessels, R. S., et al. (2020). "Looking behavior and potential human interactions during locomotion." *Journal of Vision*, 20.