

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14448

研究課題名（和文）歩行者集団における自発的同期が促す自己組織化

研究課題名（英文）Relationship between spontaneous footstep motion and spatial self-organization in pedestrian crowds

研究代表者

都丸 武宜 (Tomaru, Takenori)

京都工芸繊維大学・その他部局等・特任研究員

研究者番号：90794149

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：生物で見られる集団現象では、その秩序の特徴として個々の活動の同期が挙げられる。しかし、歩行者の集団形成と個々の歩行ステップとの関係は不明な点が多い。本研究では、レーン形成実験を実施し、一定テンポのガイド音がない限り、歩行者の足並みは自発的には揃わないことを示した。またガイド音による歩行の同期は、歩行者らの横方向の動きを単調にし、形成される構造を脆弱にした。以上より、通常の歩行者集団では、個々が自分自身のタイミングで動くことで、壊れにくい流れを形成していることを示唆する。本成果は、群集マネジメントや、非同期的に運動せざるを得ない自律分散型群ロボットといった集団システムの設計に資すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、歩行者群集のみならず他の動物の群れ研究においても、相互作用における非同期性の重要性を提起するものである。また、集団行動の従来研究において身体を無視した点の運動として扱われてきた個体の運動を、自身の身体パーツの運動（例えばトリの羽のはばたき）による運動として捉え直すことの重要性も提起するものである。さらに、他分野への波及として非同期で動かざるを得ない自律分散型ロボットナビゲーションへの貢献が期待される。社会的意義としては、従来研究よりも現実に即した設定での歩行者間の相互作用のメカニズムを明らかにしたことで、歩行者交通マネジメントにおいて新たな知見をもたらす。

研究成果の概要（英文）：In collective phenomena observed in many animals, synchronization of individual activities is often cited as a characteristic of order. However, in pedestrian crowds, the relationship between individual-level temporal behaviors and group-level spatial behaviors remains largely unknown. In this study, we conducted bidirectional pedestrian flow experiments, and investigated the relationship between foot movements and the generated structure. As a result, the temporal pattern of stepping influenced the spatial pattern of movements. When the timing of their foot motions was constrained, their lateral movements from the direct path to the destination decreased, leading to instability in the generated structures. These results suggest that individuals moving at their own timing contribute the robustness of generated structures. These findings are expected to contribute to crowd management and the design of autonomously distributed swarm robotics, which are compelled to move asynchronously.

研究分野：比較集団行動学

キーワード：群集 自己組織化 非同期 同期 歩行者

1. 研究開始当初の背景

マ스ゲームや甲子園の入場行進など、多数の人々の一糸乱れぬ協調行動は見るものに驚嘆や感動を与える。こうした集団行動は、同一目標の下に規律ある行動を取ることを目的としており、集団全体を見通した規則に従うことによる弛まぬ訓練の結果である。一方、自然に生まれた集団行動はどうか？ムクドリやイワシの大群を見て同様に圧倒されるだろうし、ヒトの群集でさえ例外ではないだろう（例えば渋谷のスクランブル交差点など）。しかしこれらの場合、全体を統制する規則はなく、個々は比較的自由に振る舞っていると考えられる。つまり集団外部からの大域的な力ではなく、集団構成員の局所的な相互作用によって自己組織化しているのである。

ヒトの歩行者集団の自己組織化は近年注目を集めている。歩行者集団では、横断歩道や橋のような双方向の人の流れ（対向流）において、同じ方向を歩く歩行者のレーンが自発的に複数形成されるレーン形成現象が知られている。特にレーン形成が生じるとき、流れの量（流量、i.e., 交通効率）が向上するといった機能的意義があることが示されてきた。一方、極度に密集した歩行者集団においては将棋倒しに代表される群集事故が起こることがある。

混雑時に発生しうる事故を未然に防ぐには、避難指示や交通誘導が必要だが、偶発的に集った人々に対して外部的に個々の動きを制限し統制することは非常に困難である。自己組織化が有益な帰結をもたらすのであれば、個々の動きを制限するのではなく、あくまで歩行者自らがもつ自己組織化に寄与する性質を利用し補強するような自然な誘導ができないだろうか？以上より、将来的に歩行者集団を自然に誘導するためには、「歩行者集団が自己組織化するメカニズムとはいかなるものか」の解明が必要である。

2. 研究の目的

本研究では歩行者集団における、歩行ステップの時間的な運動パターンと集団としての空間的な組織化との関係を明らかにすることを目的とする。これまで一列歩行集団を対象とした実験研究では、集団密度が高ければ、最適化戦略（前方を歩く歩行者と同じ側の足を動かすことで限られたスペースを有効活用する）としてステップの同期が生じ、特に集団としての流量が最大となる時に最も同期が見られる。また、集団に一定周期の音を聞かせ歩行させた際に流量が上昇する。このように同期現象は集団の運動効率を左右するが、多くの従来研究では強制的に形成された集団や自己組織化を伴わない一列集団を対象としている。

歩行者集団の自己組織化への歩行同期現象の寄与を解明するには、自律的に形成される集団を対象にしつつ歩行ステップの運動パターンと、その集団形成への影響を実験的に検討する必要がある。本研究では、対向流歩行の群集実験を実施し、自律的に形成されたレーンに属する歩行者に歩行周期の同期が見られるかを明らかにする。さらに、歩行者に一定周期の音を聞かせることで、自発的ではなく外的に引き起こされた同期がレーンの形成や壊れやすさに与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では前述したように、対向流歩行のレーン形成実験を実施した。具体的には、横断歩道を模した直線通路（10 × 3 m）において対面して向き合う48人の歩行者（片側24人ずつ）がすれ違う実験を実施した（図1）。歩行者の時間的な運動パターンへの介入のために、実験条件として、スピーカーから一定周期の電子メトロノーム音（120 beats/min）を聞かせてそのテンポに合わせて歩行する条件を設定した（CUE条件）。さらに、何も音を聞かせない条件も設定した（NO_CUE条件）。条件毎に20試行ずつ実施し、条件間での結果の比較を行った。また、実験通路直上（10 m）にビデオカメラが設置され歩行者の運動の様子が撮影された。さらに、歩行者24人の両足首には小型の加速度センサが装着され、歩行中の両足の運動データが取得された。

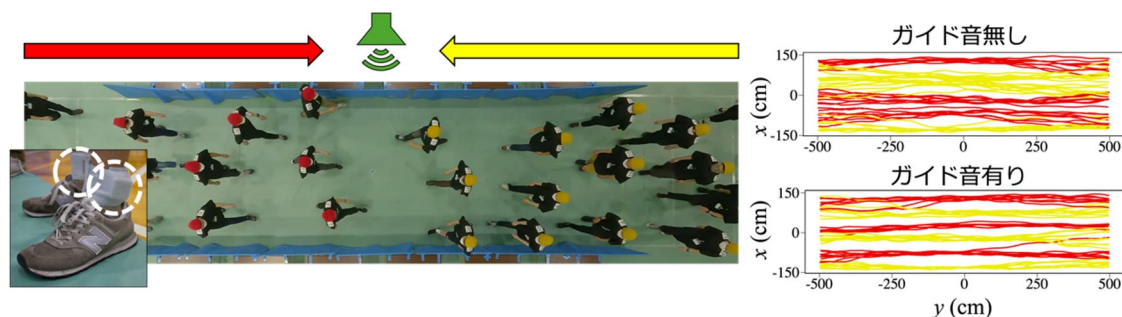


図1. レーン形成実験の様子および、ガイド音がない場合とある場合の歩行軌跡。歩行者の帽子、歩行軌跡の色は進行方向に対応（矢印の方向）。差し込み図は歩行者の装着した加速度センサを示す。

4. 研究成果

まずは、歩行者の両足の運動データから歩行ステップの同期を確かめた。すると CUE 条件のみでステップの同期が生じており、NO_CUE 条件ではステップはバラバラであることがわかった (図 2)。また、こうした傾向は集団の中において、空間的・時間的にも変化はなかった。このことより、ガイド音という外的な指標のない通常の歩行における集団でのパターン形成時には、個体の運動パターンは同期せず、多様なタイミングで歩行していることが示唆された。

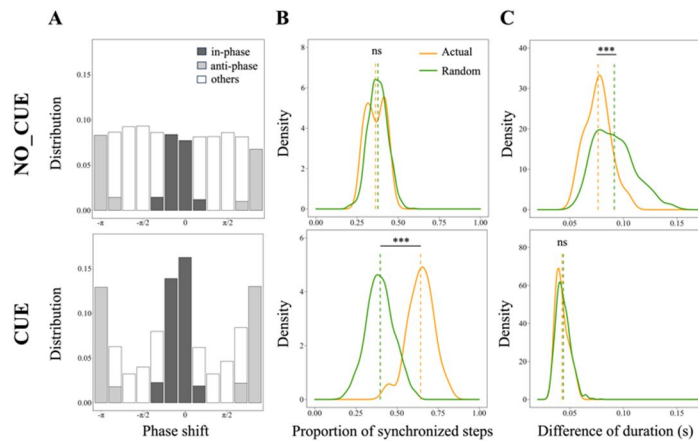


図 2. 歩行ステップの位相差の分布 (A)、同期したステップとステップのずれの分布 (B, C)

次に、個体の運動パターンが、集団レベルでの構造に与える影響を調べた。形成されたレーンの数は、NO_CUE 条件は CUE 条件よりも有意に形成されたレーンの数が少ないことが明らかとなった (図 3A)。理論研究から、レーン数は、不安定性と関係があると考えられている。つまり、レーンの数が増えると対向歩行者との接触面が増加し、衝突が起こる可能性の増加につながる。したがって足並みが揃っていることで不安定な構造を作ることが示唆された。

また、こうした構造の不安定性をいくつかの指標から定量的に評価した。まずは潜在的な衝突の可能性を調べた。これは、ある時間において、歩行者が現在の歩行スピードを維持したまま同じ方向に歩き続けた場合に生じる衝突を定量化したものである。結果として、潜在的な衝突の可能性は距離・時間ともに CUE 条件の方が NO_CUE 条件よりも高いことが明らかになった (図 3B, C)

さらに、構造の不安定さは個人レベルの振り舞いにおいても観測された。歩行者それぞれの両肩の位置座標を取得し、体の回転運動を定量化したところ、CUE 条件において有意に体の回転角度が大きいことが明らかになった。したがって、歩行者が対向歩行者との回避を衝突寸前でかろうじて避けている可能性が示唆された。

以上の結果から、歩行者集団の対向歩行において、時間的な運動パターンへの介入が、空間的なパターン形成に影響を与えることが示された。さらに、集団での運動において個々の運動が通常は非同期的なものであり、非同期性が個々の運動の自由さと多様性を生み出し集団の頑健性に寄与することが示された。これらの結果は Journal of the Royal Society Interface に掲載された。

本研究の成果は、人やそのほかの動物の群れでの相互作用における非同期性の重要性を提起し、歩行者交通マネジメントや、非同期で動かざるを得ない自律分散型ロボットナビゲーションへの貢献が期待される。

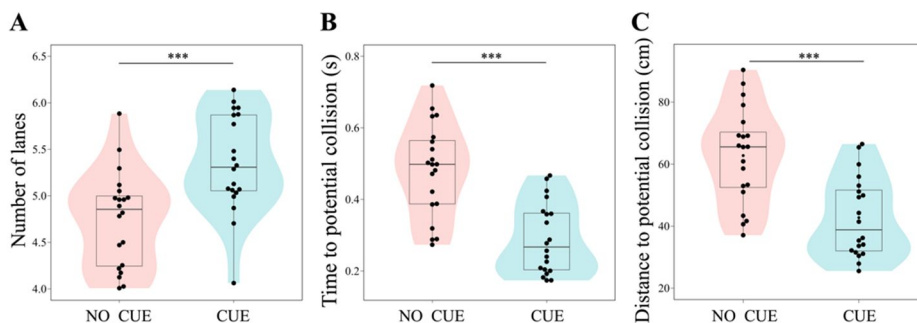


図 3. 形成されたレーンの数 (A) 及び潜在的な衝突の可能性 (B, C)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Murakami Hisashi、Tomaru Takenori、Feliciani Claudio、Nishiyama Yuta | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Spontaneous behavioral coordination between avoiding pedestrians requires mutual anticipation rather than mutual gaze | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 iScience | 6. 最初と最後の頁 105474 ~ 105474 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.isci.2022.105474 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Tomaru Takenori、Nishiyama Yuta、Feliciani Claudio、Murakami Hisashi | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Robust spatial self-organization in crowds of asynchronous pedestrians | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Journal of The Royal Society Interface | 6. 最初と最後の頁 20240112 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsif.2024.0112 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Feliciani Claudio、Murakami Hisashi、Tomaru Takenori、Nishiyama Yuta | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Stimulus-Induced Swarming in Soldier Crabs | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 International Conference on Cellular Automata for Research and Industry | 6. 最初と最後の頁 292 ~ 302 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-14926-9_26 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 都丸 武宜、村上 久、西山 雄大、FELICIANI Claudio、JIA Xiaolu、谷田 桜子 |
| 2. 発表標題 歩行者集団における歩行周期の同期とその自律性 |
| 3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 都丸 武宜, 布施 朋之介, 西山 雄大, FELICIANI Claudio, 村上 久 |
| 2. 発表標題 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 |
| 3. 学会等名 日本認知科学会第40回大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>動きを読み合う歩行者たちの即興的な運動協調 https://www.kit.ac.jp/2022/11/news221111/ パラパラな足並みが頑健な集団的パターンを形成する https://www.kit.ac.jp/2024/05/news20240529/</p> |
|--|

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | | |
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|