

第 31 回
交通流と自己駆動粒子系
シンポジウム
講演概要集

*Proceedings
of
the 31 th Symposium
on
Traffic Flow and Self-driven Particles*

— 2025 —

日時 : 2025 年 12 月 5 日(金) 10 : 00 - 15 : 00
6 日(土) 10 : 00 - 15 : 00

場所 : オンライン開催 (Zoom Meeting)

主催 : 交通流数理研究会

<https://mathematical-society-of-traffic-flow.github.io/symposium/>

第31回 交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム・プログラム

主催: 交通流数理研究会 Zoom 会議

2025年12月5日(金)

10:00 - 10:05 あいさつ

10:05 - 11:00 招待講演 5-s1

変形可能な自己駆動粒子の数理的表現とその集団挙動

齊藤稔

筑波大学 生存ダイナミクス研究センター

11:00 - 11:10 コーヒーブレイク

11:10 - 11:40 一般 5-1

新生神経細胞の病的凝縮に対する移動能向上の効果

松下勝義¹, 松本真実², 澤本和延², 藤本仰一¹

¹ 広島大学 統合生命科学研究科

² 名古屋市立大学医学研究科

11:40 - 12:10 一般 5-2

フロアフィールドモデルを用いた雑踏状態における歩行者対向流の定量的解析

中井颯良, 磯部雅晴

名古屋工業大学 大学院工学研究科

12:10 - 13:30 ランチブレイク

13:30 - 14:00 一般 5-3

焦燥感に誘発される歩行者行動の変化が群衆避難に与える影響のシミュレーション

三戸優¹, 長谷隆², 一ノ瀬元喜³

¹ 静岡大学 大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学 工学部機械工学科

³ 静岡大学 学術院工学領域数理システム工学系列

14:00 - 14:30 一般 5-4

走行ロボットの操縦データに基づく2次元最適速度モデルのパラメータ推定

世良田竜平¹, 本田泰²

1 室蘭工業大学 大学院工学研究科情報電子工学系

2 室蘭工業大学 大学院しくみ解明系領域

14:30 - 15:00 一般 5-5

単一の時系列データにおける渋滞発生の予兆検知について

中村佳祐¹, 岡本和也², 林邦好³, 宮路智行⁴, 友枝明保⁵

1 関西大学 総合情報学研究科

2 早稲田大学 理工学術院総合研究所

3 京都女子大学 データサイエンス学部

4 京都大学 大学院理学研究科

5 関西大学 総合情報学部

2025年12月6日(土)

10:00 - 10:30 一般講演 6-1

走化性斥力作用系における被覆時間

大澤智興

九州工業大学 大学院情報工学研究

10:30 - 11:00 一般 6-2

2次元系における接触感染

福井稔¹, 石橋善弘²

1 中日本自動車短期大学

2 名古屋大学

11:00 - 11:10 コーヒーブレイク

11:10 - 12:00 一般 6-s1

乳幼児の語彙発達とダイナミックシステムアプローチ

阪上雅昭

京都大学

12:00 - 13:00 ランチブレイク

13:00 - 13:30 一般 6-3

平均場近似を用いたランダムなしりとの解析

藤田悠朔 1, 鈴木岳人 2, 水口毅 1

- 1 大阪公立大学 大学院理学研究科物理学専攻
- 2 高千穂大学 人間科学部

13:30 - 14:00 一般 6-4

自己発現量の変化による遺伝子制御ネットワークの適応度レアイベントサンプリングの性能評価

可兒尚純 1, 石渡龍輔 2

- 1 室蘭工業大学 数理情報システムコース
- 2 室蘭工業大学 しくみ解明系領域

14:00 - 14:30 一般 6-5

営巣直後蜘蛛の巣における応力分布を再現する単純なモデル

落合宏紀 1, 石渡龍輔 2

- 1 室蘭工業大学 数理情報システムコース
- 2 室蘭工業大学 しくみ解明系領域

14:30 - 15:00

Traffic and Granular Flow 2024 @ Lyon 参加記

友枝明保

関西大学 総合情報学部

15:00 あいさつ、ディスカッション

目次

新生神経細胞の病的凝縮に対する移動能向上の効果.....	1
松下勝義, 松本真実, 澤本和延, 藤本仰一	
フロアフィールドモデルを用いた雑踏状態における歩行者対向流の 定量的解析.....	3
中井颯良, 磯部雅晴	
焦燥感に誘発される歩行者行動の変化が群衆避難に与える影響の シミュレーション.....	5
三戸優, 長谷隆, 一ノ瀬元喜	
走行ロボットの操縦データに基づく 2次元最適速度モデルの パラメータ推定.....	7
世良田竜平, 本田泰	
単一の時系列データにおける渋滞発生の予兆検知について.....	9
中村佳祐, 岡本和也, 林邦好, 宮路智行, 友枝明保	
走化性斥力作用系における被覆時間.....	11
大澤智興	
2次元系における接触感染.....	13
福井稔, 石橋善弘	
平均場近似を用いたランダムなしりとの解析.....	15
藤田悠朔, 鈴木岳人, 水口毅	
自己発現量の変化による遺伝子制御ネットワークの適応度レアイベントサン プリングの性能評価.....	17
可兒尚純, 石渡龍輔	
営巣直後の蜘蛛の巣における応力分布を再現する単純なモデル.....	19
落合宏紀, 石渡龍輔	

Traffic and Granular Flow 2024 @ Lyon 参加記	21
友枝明保	

新生神経細胞の病的凝縮に対する移動能向上の効果

松下勝義¹, 松本真実², 澤本和延², 藤本仰一¹

¹ 広島大学 統合生命科学研究科, ² 名古屋市立大学 医学研究科

概要

成人脳においても、深部領域では新たなニューロン (新生ニューロン) が誕生する。しかしこれらの新生ニューロンは脳損傷部位への侵入が難しく、自然には損傷修復に寄与できない。最近、松本らはニューロン侵入の障害がニューロンの凝集に起因することを発見した [1]。さらに、分子的な接着強化によりニューロン間の強い接着が生じると実証した。この凝集を解決することが脳損傷の修復に寄与する可能性がある。本論文では、簡便な解決策として、ニューロン移動能を促進する治療法を検証した。我々の結果は、移動促進治療の可能性を示唆する。さらに松本らが提案した接着強化の直接的解決策との併用が効果的である。

Effects of Motility Enhancement on Pathological Aggregation of New Neuron

Katsuyoshi Matsushita¹, Mami Matsumoto², Kazunobu Sawamoto², Koichi Fujimoto¹

¹Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University,

²Graduate School of Medicine, Nagoya City University

Abstract

New neurons are born in a deep region, even in the adult brain. The new neurons hardly invade the brain-injured region and, therefore, they cannot spontaneously repair the injury. Recently, Matsumoto *et al.* found that the invasion dysfunction of these neurons originates from neuron aggregation [1]. Furthermore, they demonstrated that pathological adhesion of neurons occurs due to the strengthening of molecular adhesion. Solving this aggregation may contribute to the repair of brain injury. In the present paper, as a simple solution, we examine the treatment that enhances neuron motility. Our results imply that the treatment is possible. Furthermore, it suggests that the treatment, combined with a direct solution of adhesion strengthening discussed by Matsumoto *et al.*, is effective.

1 導入

ニューロンは、高度に機能化された脳の自己組織化を可能にするほど優れた移動能を有する。出生後のヒトの脳でも、新しいニューロン (新生ニューロン) が誕生し、脳損傷を修復する潜在能力があると考えられている [2]。この新生ニューロンは脳の深部領域で生まれるため、損傷領域へのニューロンの供給には長距離を踏破する移動能が不可欠となる。実際に新生ニューロンは高い長距離移動能を有することが知られている [3]。そのため、近年、その移動能

を利用した損傷部位へのニューロン供給の研究が盛んに行われている [4, 5]。

これまでの研究で新生ニューロンは損傷領域への侵入障害を示すことが報告されている。例えば松本らは、損傷部位付近での新生ニューロンの凝集が侵入障害を引き起こすことを発見した [1]。さらに、この研究で接着分子 PSA-NCAM [6] が、その接着が強まることで機能不全に陥ることを示した [7]。この発見は接着の強化は既に遊走障害の起源として知られていたことと符合する [8]。実際、治療によって接着

を弱めると損傷部位への新生ニューロンの侵入する。

ニューロンの凝集に対する簡便な解決策として、ニューロンの移動能を高める治療法が考えられる。実際に近年、ニューロンの移動を促進、誘導する様々な治療法が著しく進歩し、成果を上げている [9, 10]。治療への応用を検討するため、モデルに基づいて移動能が凝集状態に及ぼす効果を調べた。

2 手法

本研究で我々は二次元セルラーポッツ模型 [11-13] を利用し新生ニューロンの移動のシミュレーションを行う。図 1 にその模型でのシミュレーションのスナップショットを示している。この模型は、脳内のグリア細胞が作るパイプを通る新生ニューロンの鎖状移動 (chain migration) を模したものである。パイプは図の x 軸方向に伸びており、周期境界条件が課している。 y 軸側の境界にはランダムなグリア細胞を模した障害物が配置され、新生ニューロンはこの障害を通過できない状況である。この状況は実際のマウス脳内での観察に基づいて作られた [4]。

これらの新生ニューロンは図 1 中の矢印で示される移動能ベクトルを有している。この移動能ベクトルはニューロンの持つ成長円錐側がベクトルの向く先、細胞体側が逆側になるようにしている [5]。ニューロン同士は互いに接触したとき、その接触により移動能ベクトルの向きに進む。このような移動機構は、ニューロン同士の機械的接触を介した相互認識を反映する。そのため、実際に移動するニューロンは図 1(a) に示すように互いに機械的接触を保つ移動方向に伸びた鎖を形成する。

この移動機構では細胞間の接着が機械的接触を制御することから、移動と接着が密接に相互に影響する。この影響により接着の強化による図 1(b) のような凝集はニューロンの凝集は移動の乱れを引き起こしてしまう。逆に、ニューロンの移動能の向上は、集団移動における凝集効果を解消する可能性がある。本研究は、このような効果の存在を確認した。

3 結果

本研究では、新生ニューロンの移動能の向上がニューロン凝集に及ぼす影響について検討した。結果としては期待された通り移動能の向上は、接着強化で凝集の下においてもニューロン移動の秩序化を促進できた。その移動能の範囲には上限と下限が存在し比較的小さいので、その点は応用上の注意が必要

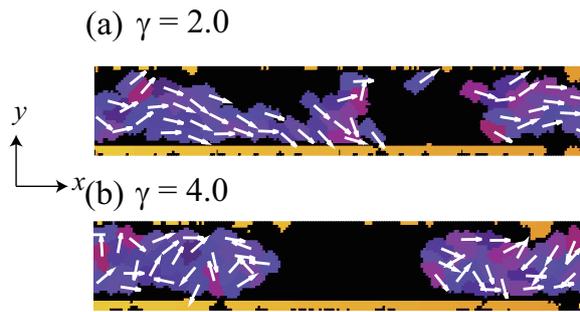


Fig. 1: シミュレーションで得られた移動中の典型的なニューロン配置で (a) 正常な接着の場合と (b) 接着が異常に強い場合に対応する (γ は接着の強さに対応する数値)。新生ニューロン、グリア細胞、細胞間マトリクスがそれぞれ紫のドメイン、黄色のドメイン、黒のドメインで表現されている。各ニューロンの矢印はそれらのニューロンの成長円錐の向きを表している。

となる。

集団速度への影響は接着強化が抑制された方が大きな効果が出る。また接着が抑制できた方が移動能が比較的小さくとも移動が秩序化する。そのためニューロン凝集の問題に対する解決策は、移動能の向上とともに接着の正常化を同時に行うことが望ましい。このような正常化法は先行研究で既に報告されており [1]、その方法の重要性は本研究からも支持される。

References

- [1] M. Matsumoto *et al.*, EMBO Mol. Med. **16**, 1228 (2024).
- [2] K. Obner and A. Alvarez-Buylla, Development **146**, dev156059 (2019).
- [3] C. Lois and A. Alvarez-Buylla, Science **264**, 1145 (1994).
- [4] M. Sawada and K. Sawamoto, The Keio Journal of Medicine **62**, 13 (2013).
- [5] N. Kaneko, M. Sawada, and K. Sawamoto, J. Neurochem. **141**, 835 (2017).
- [6] U. Rutishauser, Nat. Rev. Neurosci. **9**, 26 (2008).
- [7] F. Doetsch, J. M. Garcia-Verdugo, and A. Alvarez-Buylla, J. Neurosci. **17**, 5046 (1997).
- [8] C. P. Johnson and D. E. L. I. Fujimoto, U. Rutishauser, J. Biol. Chem. **280**, 137 (2005).
- [9] I. Ajioka *et al.*, Tissue Engineering Part A **21**, 193 (2015).
- [10] T. Fujioka *et al.*, EBioMedicine **16**, 195 (2017).
- [11] F. Graner and J. A. Glazier, Phys. Rev. Lett. **69**, 2038 (1992).
- [12] K. Matsushita, Phys. Rev. E **95**, 032415 (2017).
- [13] K. Matsushita, T. Arakaki, and K. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 114801 (2024).

フロアフィールドモデルを用いた雑踏状態における 歩行者対向流の定量的解析

中井颯良, 磯部雅晴

名古屋工業大学 大学院工学研究科

概要

対向流において、レーン形成の形成過程や性質をより定量的に解析した Nowak らの先行研究 [5] で用いられたパラメーターを参考にし、より多自由度に動ける三角格子を用いたフロアフィールドモデルにおいて追従効果や回避効果を導入し、系の振る舞いの違いを調べた。また、対象の系を長方形だけでなく三叉路等に変化させ、格子モデルによる系の最終状態の違いを定量的に調べた。

Quantitative analysis of pedestrian counter-flow in crowded condition using floor field model

Sora Nakai, Masaharu Isobe

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Abstract

In counterflow conditions, drawing on parameters used in Nowak et al.'s prior work [5], which quantitatively analyzed the formation process and properties of lane formation, we introduced following effects and avoidance effects into an FF model using a triangular grid with greater degrees of freedom. We then quantitatively examined differences in the grid model by varying the flow rate and changing the target system from a rectangle to configurations such as three-way intersections.

1 はじめに

統計物理学的観点から様々な場面で起こる渋滞を再現および解消しようとする学問として渋滞学が提唱されている [1]。この渋滞学では混雑を発生させる人間や車などを自己駆動粒子とみなし、その統計集団を研究している。雑踏高密度状態における大規模な群衆の動きは、現実の実験での再現や検証が困難であるため、適切なモデル化を行ったシミュレーションによる研究は有益である。渋滞学では人間の群集行動を表すためセルオートマトンを基にしたモンテカルロ法の一つとしてフロアフィールド (Floor Field: 以下 FF) モデルが提案されており、群衆の避

難などのモデル系として研究が行われている [2, 3]。FF モデルの中には前方歩行者への追従効果や人間の視野角・向きなどの特性を考慮したモデルも提案されている。その中でも、雑踏状態における2方向流れのレーン形成や人流凍結は基本となるモデル系であり、FF モデルにおいてもレーン形成シミュレーションが行われてきた [4]。本研究ではそのような2方向流れのシミュレーションに対し、基本的な正方格子を用いた FF モデルに加え、動きの自由度が増す三角格子を用いた FF モデルを使用し、双方のモデルによる系の最終状態の違いを比較検討した。

2 モデルと系の設定

2.1 シミュレーションモデル

本研究では、図1で示されるような正方格子、三角格子を用い、以下のFFモデルによって解析を行った。

$$q_{ij} = \exp(k_S S_{ij} + k_D D_{ij} + k_A A_{ij}) \quad (1)$$

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i,j} q_{ij}} \quad (2)$$

移動ルールとしては現在のステップの近傍セル (i, j) 情報 (S_{ij}, D_{ij}) を基に式1より q_{ij} を計算し、式2の移動確率 p_{ij} に従い、移動させる。(なお移動方向セル (i, j) に人が既にいる(衝突の場合) $p_{ij} = 0$ とした。) S_{ij}, D_{ij}, A_{ij} はそれぞれ進行方向のバイアス、動的FF(同方向の“通過痕”への引き寄せ)、予測FF(逆方向の歩行者による反発)の値を表している。また、 k_S, k_D, k_A はそれぞれ S_{ij}, D_{ij}, A_{ij} の強度を表す。

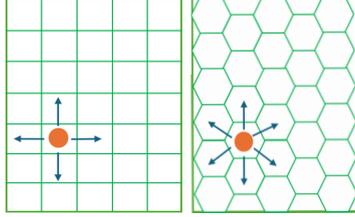


図1: (左) 正方格子と(右) 三角格子を用いたFFモデル

2.2 系の設定

幅 $L = 10$ 長さ $H = 100$ の格子点数 $M = 1000$ の系内の様々な密度 $\rho = N/M$ (M : 系の人数) において、 $k_S = 2.5$ とし、様々な k_D, k_A の値を用いて、系の最終状態の違いを調べた。境界条件は、進行方向は周期境界条件と開放境界条件の二つを考え、側壁は剛体壁と設定した。また、初期条件は歩行者をランダムに配置した。また、系の状態は [5] に従い判定した (2.3 節参照)

2.3 系の状態の判定条件

(I) グリッドロック状態

直近 50 ステップの全流量(移動総量の積算)が $\frac{1}{2M}$ 以下の場合。アンサンブル数 N_s 中 N_g 回グリッドロック判定された場合の確率 $p_{jam} = N_g/N_s$ を定義する。

(II) レーン形成状態

$$\Phi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{N_{i_n}^A - N_{i_n}^B}{N_{i_n}^A + N_{i_n}^B} \right)^2 \quad (3)$$

$N_{i_n}^A, N_{i_n}^B$ を進行方向に平行な同一セルに存在する(A)上(B)下方向の各人数とし、直近 1000 ステップ

におけるオーダーパラメータ Φ の最大値 Φ_{max} と最小値 Φ_{min} が以下の条件を満たす場合。

$$\frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}} < 0.1 \quad (4)$$

(III) 無秩序状態

(I) のグリッドロック状態ならびに (II) のレーン形成状態に判定されず、ステップ数 T が $20000\sqrt{\rho}$ を超えた場合。

3 結果

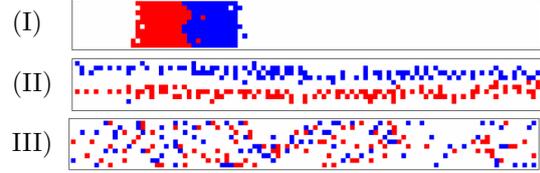


図2: (I) グリッドロック状態, (II) レーン形成状態, (III) 無秩序状態

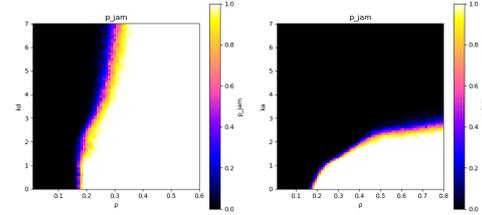


図3: 密度 ρ (左) 追従強度 $k_D > 0$ ($k_A = 0$)、(右) 反発強度 $k_A > 0$ ($k_D = 0$) に対するグリッドロック確率 p_{jam} の相図

図2はシミュレーションを行った際の三つの系の最終状態のスナップショットを示す。また図3は密度 ρ に対する k_D, k_A のグリッドロック確率である。 k_A を作用させた際、 k_D を作用させたときよりも、大きな密度であってもグリッドロックを回避することが分かった。さらに講演では、三角格子を用いたFFモデルとの比較、環境形状が系の状態に与える影響を報告する予定である。

参考文献

- [1] 西成 活裕: 渋滞学, 新潮社. (2006)
- [2] 西成 活裕: 図解雑学 よくわかる渋滞学, ナツメ社, (2009).
- [3] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, and J. Zittartz, *Physica A*, **295**, 507 (2001).
- [4] 柳澤 大地, *Japanese J. Multiphase Flow*, **28**, 312, (2014).
- [5] Stefan Nowak and Andreas Schadschneider, *Phys. Rev. E* **85**, 066128 (2012).

焦燥感に誘発される歩行者行動の変化が 群衆避難に与える影響のシミュレーション

三戸優¹, 長谷隆², 一ノ瀬元喜³

¹ 静岡大学大学院 総合科学技術研究科 工学専攻

² 静岡大学 工学部機械工学科

³ 静岡大学 学術院工学領域数理システム工学系列

概要

避難過程での移動先の奪い合いを非協力ゲームとみなす群衆避難モデルにおいて、歩行者の持つ焦燥感によってゲームでの行動が動的に変化し、ゲームの結果に応じてその焦燥感が増加するとき、歩行者の焦燥感が避難の効率やダイナミクスへ及ぼす影響をシミュレーションにより調べる。

Simulation of the Impact of Impatience on Pedestrian Behavior in Crowd Evacuation

Yu Sannohe¹, Takashi Nagatani², Genki Ichinose³

¹ Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University

² Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

³ Department of Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

Abstract

In this study, we present a crowd evacuation model in which pedestrians' behavioral choices during conflicts are considered as a non-cooperative game. We assume that pedestrians' behaviors in the game change dynamically according to their level of impatience, which in turn varies depending on the game outcomes. Through simulation experiments, we show how pedestrians' impatience affects the efficiency and dynamics of evacuation.

1 はじめに

近年、群衆避難シミュレーションでは歩行者間の移動先競争をゲーム理論に基づき解決する枠組みを導入している [1]。これらのモデルでは、歩行者は道を譲る／譲らないという固定した戦略を有し、各衝突局面ではその戦略に従うことが前提とされてきた。

一方で、現実の避難行動、とりわけ火災など生命に直結する事態では、歩行者の心理状態は常に変化し、行動選択も変容することが指摘されている [2]。

本研究の目的は、従来のゲーム理論型避難モデルにおける固定戦略の前提を見直し、避難者の心理状

態の変化に応じてゲーム内での行動が動的に変容し得る枠組みを構築することである。本研究では、人の心理状況を表す要素の一つである歩行者の焦燥感を変数として導入し、その値に応じて衝突時の行動選択が変化するように設計する。これにより、緊急事態における心理的緊張やパニック傾向が局所的な意思決定に反映されることを可能にする。

2 シミュレーション手法

本研究では2状態4近傍のセルオートマトンを用いた部屋からの群衆避難モデルを用いる。本モデル

における部屋は $L \times L$ 個のセルで構成され、一つのセルを複数の歩行者が同時に占有することはない。また、部屋下部に幅 D_w の出口が一つ存在する。シミュレーション開始時、歩行者は部屋内へランダムに置かれ、その数は初期密度 ρ を用いて、 $L^2\rho$ となる。本研究では、 $L = 200, D_w = 20, \rho = 0.4$ とする。

歩行者は離散的な時間間隔で同期的に位置を更新する。二人以上の歩行者が同じ空間へ移動しようとするすると競合が生じ、どの歩行者が目的の空間に移動できるかは非協力ゲームの結果によって決定される。この非協力ゲームにおいて、歩行者は協力的 (C) なら道を譲り、非協力的 (D) なら他者を押しつけて空間を占有しようとする。競合の末、歩行者が目標の空間へ移動する確率はゲームの利得として与えられる (表 1) [1]。例えば、ゲームを行う n 人の歩行者がすべて協力的 (C) である場合、 n 人の中から等確率で一人が選択され、目的の空間へ移動する。ここで、 P は競争の激しさを表すパラメータであり、これが大きいほど歩行者同士が空間を奪い合う際に押し合う力や衝突時の衝撃が強くなり、結果として誰も目的の空間に移動できない可能性を表現する。

	$(n-1)C, 0D$	$mC, (n-1-m)D$
C	$\frac{1}{n}$	0
D	$\frac{1}{P}$	$\frac{1}{(n-m)(n-m-1)P}$

表 1: 利得表 (n 人による競合)

本研究のモデルでは歩行者は焦燥感 I を持ち、競合時に協力/非協力のどちらを取るかを焦燥感 I に基づいて決定する。具体的には、各歩行者の持つ焦燥感 I は 0 から 1 の実数で表現され、それを歩行者が競合時に非協力を選択する確率とする。つまり、歩行者は焦燥感 I が大きいほど冷静な判断ができず、衝突をいとわない利己的な行動を取りやすくなるようにモデルを設計する。本研究では歩行者の焦燥感 I の初期値を 0 とし、歩行者が競合によって移動できなかった場合にその歩行者の焦燥感 I を 0.01 ずつ増加させる。

3 結果と考察

図 1 は、競争の激しさを表す P の値を変化させたときの平均避難時間である。焦燥感 I の増加を考慮した本モデル (青色) と全ての歩行者の焦燥感 I が初期値の 0 のまま変化しないモデル (橙色) を比較

すると、歩行者の焦燥感 I が増加する本モデルの方が避難にかかる時間が長く、競争が激しい環境であるほど焦燥感 I が避難時間に与える影響が大きくなることが分かる。競争が激しいほど避難時間に与える影響が顕著になる要因として、競争が激しい環境では非協力的にふるまう歩行者が移動できない確率が高まり移動できない歩行者が増えること、またそれに伴って歩行者の焦燥感 I が高くなることが考えられる。

また、図 2 は、本研究で行ったシミュレーションのスナップショットである。二つの図を比較すると、競争が激しい環境 ($P = 3.0$) の方がそうでない環境 ($P = 1.0$) に比べて歩行者の焦りが高まりやすく、歩行者の分布も若干異なることが確認できる。

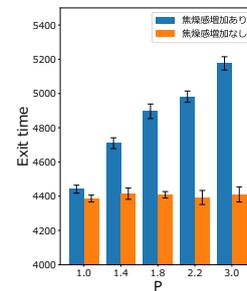


図 1: 競争の激しさが異なる環境での平均避難時間 (5 回平均)。焦燥感増加あり (青) となし (橙)。

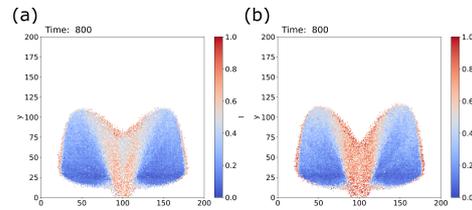


図 2: シミュレーションのスナップショット (800 ステップ経過時)。(a) $P = 1.0$, (b) $P = 3.0$ 。

参考文献

- [1] S. Bouzat, M. N. Kuperman, “Game theory in models of pedestrian room evacuation”, *Physical Review E*, **89** (2014) 032806.
- [2] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, “Simulating dynamical features of escape panic”, *Nature*, **407(6803)** (2000) 487–490.

走行ロボットの操縦データに基づく 2次元最適速度モデルのパラメータ推定

世良田 竜平¹, 本田 泰²

¹ 室蘭工業大学大学院 工学研究科 情報電子工学系

² 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域

概要

我々は以前、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台走行ロボットでのひも状走行に成功した。また、2次元最適速度モデルのパラメータを変化させることで、ロボットに4つの性格を持たせ、様々な走行実験を実施した。本研究では、人間の操縦データを取得し、そのデータに基づいてモデルのパラメータを推定した。結果として、走行において個性の影響を特に強く受けるパラメータは α と β であることが明らかとなった。

Parameter Estimation for a 2D Optimal Velocity Model Based on Mobile Robot Control Data

Ryuuhei Serata¹, Yasushi Honda²

¹ Division of Information and Electronic Engineering, Graduate school of Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan

² College of Information and System, Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

We have previously successfully performed string running with multiple robots using the 2D optimal velocity turning algorithm. Furthermore, by varying the parameters of the optimal velocity model, we endowed the robots with four distinct personalities and conducted various motion experiments. In this study, we acquired human driving data and estimated the model parameters based on that data. As a result, it became clear that the parameters particularly influenced by personality during driving are α and β .

1 はじめに

人間の行動に必要な最小限の知能を発見するというのが、我々の研究背景である。

先行研究 [1] では、2次元最適速度旋回アルゴリズムを用いた複数台ロボットでのひも状走行に成功していた。また、前年度の研究 [2] では、2次元最適速度モデルのパラメータを変化させることで、ロボットに4つの性格を付与し、それらの様々な組み合わせを用いて走行実験を試みた。その結果、異なる

性格を混ぜた走行の中には、全てのロボットを同じ性格で統一した走行よりも、よりひも状走行になりやすい組み合わせが存在した。しかし、これらの性格パラメータは様々な走行実験でのロボットの振る舞いから経験的に決定したものであり、根拠に乏しかった。そのため、本研究では人間の操縦から走行データを取得し、そのデータを元にモデルのパラメータを推定する。

2 2次元最適速度旋回アルゴリズム

2次元最適速度モデルは以下の運動方程式 (1) で表される。最適速度 \vec{V} と速度 \vec{v} の差によって、速度の変化率 (加速度) $\dot{\vec{v}}$ を求めるモデルである。

$$\dot{\vec{v}} = a(\vec{V} - \vec{v}) \quad (1)$$

ロボット自身の進行方向と、自分以外のロボットとの相対角度を θ とすると、最適速度ベクトル \vec{V} は、以下のように表される。

$$\vec{V} = V \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

最適速度ベクトルの大きさ V は、ロボット間の距離 x を用いて、以下のように表される。

$$V = \alpha(\tanh \beta(x - b) + c) \cos \theta \quad (3)$$

3 走行実験

半径 2[m] の円形コース上で走行実験を行った。コース内に 2 台の走行ロボットを配置し、10 分の間 1 台は自由に走行、もう 1 台はその後方を追従するように人間が操縦した。追従ロボットは 0.1 秒ごとに、前方の写真と左右モータ出力値を取得した。実験終了後、収集したデータから最適速度ベクトルの大きさ V を算出し、最小二乗法を用いてフィッティングを行い、最適速度モデルのパラメータ α, β, b, c を推定した。フィッティングの初期値には、従来研究 [2] における同調性性格のパラメータ $\alpha = 1, \beta = 16, b = 0.3, c = 0.9$ を用いた。

4 実験結果

8 名の操縦データを収集し、フィッティングを実施した結果、パラメータの差異が認められた。

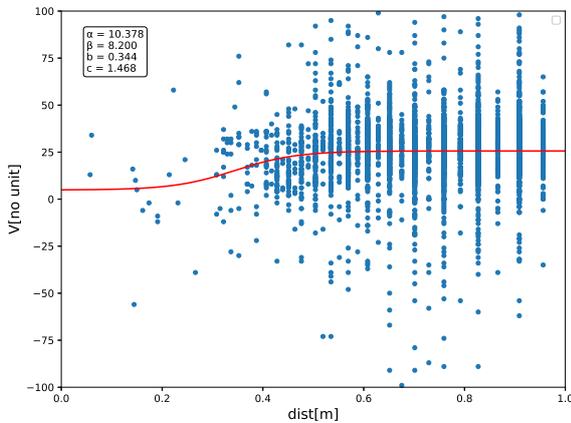


図 1: 操縦者 A の最適速度及びフィッティング結果

表 1: 各操縦者における最適速度モデルのパラメータ

	α	β	b	c
操縦者 A	10.38	8.20	0.34	1.47
操縦者 B	9.13	4.39	0.46	2.00
操縦者 C	34.90	23.14	0.11	-0.32
操縦者 D	9.80	5.11	0.36	2.00
操縦者 E	9.36	100.00	0.00	2.00
操縦者 F	22.52	0.00	0.01	1.03
操縦者 G	8.27	3.26	0.31	2.00
操縦者 H	86.97	2.89	0.00	-0.65

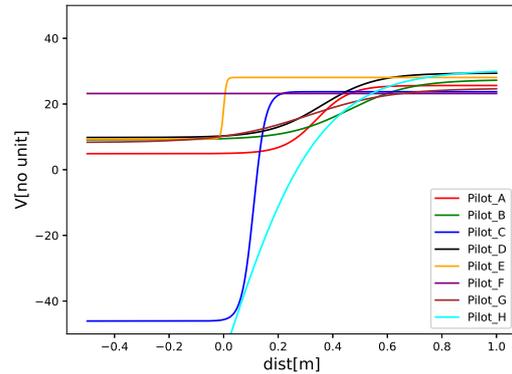


図 2: 各操縦者における最適速度モデル

表 1 および図 2 より、8 名の操縦データにおいて、差が特に大きいパラメータは α と β であることが示された。したがって、走行において個性の影響を強く受けるパラメータは α と β であると言える。

5 まとめと今後の課題

本研究では、人間の操縦データから 2次元最適速度モデルのパラメータを推定することで、特に個性の影響を受けやすいパラメータを特定した。今後、自律走行においてパラメータにより性格の違いを表現する場合には、主に α と β を変更することで調整したい。

参考文献

- [1] 山田将司, 李方正, 本田泰, 最適速度アルゴリズムによるスキッドステアリング 2D ロボットのひも状走行, 第 27 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p47-p50, (2021)
- [2] 世良田竜平, 本田泰, 最適速度旋回アルゴリズムによるヘテロ群ロボットが創発する行動, 第 30 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p13-p16, (2024)

単一の時系列データにおける渋滞発生の予兆検知について

中村佳祐¹, 岡本和也², 林邦好³, 宮路智行⁴, 友枝明保⁵

¹ 関西大学 総合情報学研究科 ² 早稲田大学 理工学術院総合研究所

³ 京都女子大学 データサイエンス学部 ⁴ 京都大学 大学院理学研究科 ⁵ 関西大学 総合情報学部

概要

本研究では、単一の時系列データからの渋滞発生の予兆検知を目的とし、時系列データからトレンド成分を除去した残差成分について分析を行った。対象は、2003年の円環状のコースを走行する密度が固定された実験データと、2018年の阪神高速道路における密度が変化する実データである。各データから算出した自己相関係数を調べたところ、その値がどちらの場合も渋滞発生前に増大する振る舞いを示すことがわかり、単一データにおける渋滞発生の予兆検知の指標となりうることを示した。

Detection of Precursors for the Onset of Traffic Congestion in Two Single Time-Series Datasets

Keisuke Nakamura¹, Kazuya Okamoto², Kuniyoshi Hayashi³,
Tomoyuki Miyaji⁴, Akiyasu Tomoeda⁵

¹ Graduate School of Informatics, Kansai University

² Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

³ Faculty of Data Science, Kyoto Women's University

⁴ Graduate School of Science, Kyoto University

⁵ Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract

This study aims to detect precursors for the onset of traffic congestion using two types of single time-series datasets. We analyzed the residual component obtained by removing the trend from the original data. Two datasets were examined: (i) experimental data in 2003, from vehicles traveling on a circular course under fixed density, and (ii) real-world data from the Hanshin Expressway in 2018 under fluctuating density. We found that the autocorrelation coefficient, calculated from each dataset, increases prior to the onset of traffic congestion in both cases. This result indicates that autocorrelation can serve as a potential indicator for the detecting precursors of congestion in a single time-series data.

1 はじめに

交通渋滞は、深刻な経済的損失を招くとともに交通事故の誘発要因ともなる、極めて重要な社会課題である。この問題の解消に向け、従来より数理モデルを用いたアプローチが展開されてきた [1]。近年で

は、計測技術の進歩が大規模データの取得を可能にし、時系列解析をはじめとするデータ駆動型手法を用いた研究が活発化している [2]。

先行研究 [3] では、システムが臨界点に近づく際に観測される臨界減速を Early-Warning Signals

(EWS)として利用し、状態遷移の予兆検知に応用している。ここで臨界減速とは、システムが外乱を受けた後、元の平衡状態へ回復する速度が低下する現象を指す。

また、[3]の理論に基づき、車両密度の増加に伴う加速度の分散及び自己相関の変化からEWSを観測した研究[4]も存在する。しかし、当該研究[4]は密度の異なる複数の時系列データを用いた分析であり、実時間で得られる単一の時系列データから遷移の予兆を捉える可能性については検討されておらず、実際の交通流データ(単一の時系列)への適用可能性に課題が残されていた。

こうした近年の研究動向と先行研究の課題を踏まえ、本研究では先行研究[3]の手法を応用し、単一の時系列データから渋滞発生の予兆を捉えることを目的とする。本講演では、その分析結果を報告し、先行研究[3]の手法の適用可能範囲の拡張を提示するとともに、高速道路におけるリアルタイムでの渋滞発生の予兆検知の可能性を示す。

2 単一の時系列データによる分析

分析対象として、密度に関して特性の異なる以下の二種類の単一の時系列データ(i,ii)を用いる。

(i) 密度が固定された単一の時系列データ

(2003年, 円環状のコースを22台の車両が周回する実験データ[5, 6])

(ii) 密度が変化する単一の時系列データ

(2018年, 阪神高速11号池田線(大阪方面)塚本合流付近, 車両走行データ)

具体的な分析手法は、まず時系列データからトレンド成分を除去し、得られた残差成分から自己相関などの指標を算出する。そして指標の時間変化を確認し、急激な増大が確認できた箇所を予兆と見なす。その結果を図1, 2に示す。図1は時系列データ(i)における加速度、図2は時系列データ(ii)における速度の残差成分より算出した、ラグ1の自己相関係数の時間変化の様子である。図1, 図2ともに、赤破線は自己相関係数が急激に増大を開始する時点より以前のデータを用いて算出した回帰直線である。図1では時刻135秒付近、図2では時刻07時15分付近において、自己相関係数の急激な増大が確認できる。

さらに、本講演では、車両走行速度以外のデータ、および他のデータセットを用いた分析結果、ならび

に自己相関係数以外の指標を用いたEWSの算出結果などについても併せて報告する。また、時系列データ(ii)に関しては、基本図から推定される臨界密度と、EWSが増大し始める時刻との比較を行った結果についても報告する。

最後に本研究で用いましたZen Traffic Dataを貸与いただきました阪神高速道路株式会社に御礼申し上げます。

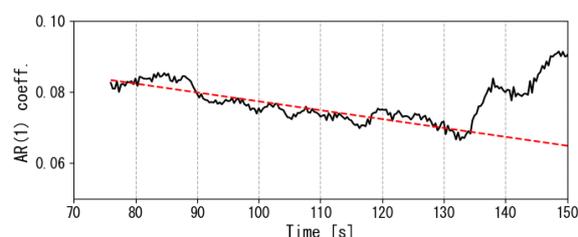


図1: AR(1) 係数 / 時系列データ (i)・加速度



図2: AR(1) 係数 / 時系列データ (ii)・速度

参考文献

- [1] 杉山 雄規, 交通流の物理, ながれ, **22**, 95-108(2003)
- [2] 玉井 魁人, 宇野 伸宏, 連続車両軌跡データを用いた個車追従モデルの推定と車両挙動多様性の分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), **77** (5), I.675-I.685 (2022)
- [3] Scheffer, M. et al., Early-warning signals for critical transitions, *Nature*, **461** (7260), 53-59 (2009)
- [4] Ghadami, A. et al., Forecasting the onset of traffic congestions on circular roads, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, **22** (2), 1196-1205 (2021)
- [5] Sugiyama, Y., et al. Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam, *New J. Phys.*, **10**, 033001 (2008)
- [6] Nakayama, A., et al. Metastability in the formation of an experimental traffic jam, *New J. Phys.*, **11**, 083025 (2009)

走化性斥力作用系における被覆時間

大澤智興¹

¹九州工業大学大学院情報工学研究系

概要

被覆時間 (cover time, CT) は未知環境の探索性能の指標である。本研究では、自己溶出 (自己放出) 分子の拡散・減衰で形成される濃度場に対し、負の走化性で応答するエージェントの数理モデルを用い、二次元格子で CT に対するエージェント数の影響を評価した。比較として斥力を持たないランダムウォーク (RW) を基準とした。RW・走化性系の双方で、エージェント数 N の増加に伴い CT は概ね $1/N$ に比例して短縮した。さらに、走化性系は斥力により探索の重複を抑制し、RW より短い CT を達成した。

Cover Time in a Chemotactic Agent System with Repulsive Interactions

Chikoo Oosawa¹

¹Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

Abstract

We study cover time (CT)—an index of exploration performance in unknown environments—using a mathematical model of agents that exhibit repulsive chemotaxis in a concentration field formed by diffusion and decay of self-secreted molecules. On a two-dimensional lattice, we evaluated how the number of agents affects CT, using random walkers (RW) as a baseline. In both RW and chemotactic systems, CT decreases approximately in proportion to $1/N$ as the number of agents N increases. Moreover, owing to repulsion, the chemotactic system suppresses redundant revisitations to already-visited sites and thus achieves a shorter CT than RW.

1 はじめに

被覆時間 (CT) は未知環境を探索し尽くす時間 [1, 2] で、免疫細胞の病原体追跡や動物の採餌、自動掃除機に関わり、群知能の指標と考えられる。特に細菌・免疫細胞・アリは視覚に頼らず化学物質を手掛かりに、非対称な引力・斥力で集団行動するため、協調的な走化性エージェントと捉えられる [3]。

本研究では、自己放出分子の拡散と減衰により形成される濃度場に対して負の走化性 (斥力) で応答するエージェントの数理モデルを用い、二次元格子における CT の特性を、ランダムウォーク (RW)

を基準として比較する。

2 走化性モデル

負の走化性として斥力作用を実装するための移動ルールは以下の式で与える [4]。

$$I_{t+1}(\mathbf{r}) = (1 - \delta) \left[(1 - \alpha) I_t(\mathbf{r}) + \frac{\alpha}{4} \sum_{\mathbf{u} \in \mathcal{N}_4(\mathbf{r})} I_t(\mathbf{u}) \right] + f_p \sum_{a=1}^N \Delta_{\mathbf{r}, \mathbf{r}_a(t)}(1)$$

ここで、 $I_t(\cdot)$ は、 t における化学物質の局所濃度、化学物質の α は拡散率、 δ は減衰率、 f_p はエージェ

ントから放出される化学物質の量 ($f_p > 0$) を示し、 $\Delta_{i,j}$ は、Kronecker のデルタである。 $\mathbf{r}_a(t)$ は、 t におけるエージェントの位置を示し、 N は、エージェント数である。 $\mathcal{N}_4(\mathbf{r}_a(t))$ は、 t におけるエージェント位置 $\mathbf{r}_a(t)$ のノイマン近傍セル集合である。移動確率 p は、式 (2) に示すように、ソフトマックス関数を用いて記述され、濃度場 $I_t(\cdot)$ と選好性 k の両方に依存する。

$$p(\mathbf{r}'; t+1 | \mathbf{r}_a; t) = \frac{\exp[k I_t(\mathbf{r}')] }{\sum_{\mathbf{s} \in \mathcal{N}_4(\mathbf{r}_a(t))} \exp[k I_t(\mathbf{s})]} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{r}' \in \mathcal{N}_4(\mathbf{r}_a(t))$ である。 $k < 0$ では、 $I_t(\cdot)$ からの斥力作用となり、 $k = 0$ では、RW となる。従って、本モデルでは、各時刻に (i) 濃度場を式 (1) で更新 \rightarrow (ii) 式 (2) で遷移確率を計算 \rightarrow (iii) 位置を更新する。言い換えると、濃度場 $I_t(\cdot)$ の時空変化の原因をエージェント自身が作り出し、それに応じてエージェントが確率的に移動する。

3 計算条件

初期濃度 $I_0 = 0$ の $L \times L$ 正方格子の周期境界を考える。エージェントの初期位置はランダムに設定した。 L や N を変えながら、100 回試行した。CT (全ての格子点がいずれかのエージェントによって 1 回以上訪問されるまでの所要ステップ数) を計測し、100 回の平均値を求めた。ただしエージェント間には、排除体積効果を考慮した。さらに走化性系には、 $\alpha = 0.5$ 、 $\delta = 0.1$ 、 $f_p = 5.0$ 、 $k = -20.0$ を使用した [4]。

4 結果と考察

単一の RW による L に対する CT の期待値 $\mathbb{E}[\tau_{ct}]$ は、式 (3) で与えられる [1]。図 1 に、式 (3) と対応する計算結果を示す。

$$\mathbb{E}[\tau_{ct}] = \frac{4}{\pi} L^2 (\log L)^2 \quad (L \rightarrow \infty) \quad (3)$$

図 2 に、CT の N 依存性を示す。RW・走化性系の双方で、エージェント数 N の増加に伴い CT は概ね $1/N$ に比例して短縮した。走化性系のほうが、 $I_t(\cdot)$ を利用して重複訪問の抑制することで CT を短縮できるため、CT を RW よりも短縮できた。しかし、 $I_t(\cdot)$ に対してより強い斥力反応を示すパラメタセット (α 、 δ 、 f_p 、 k の組み合わせ) では、侵入あるいは脱出不可能な $I_t(\cdot)$ の閉じ込め領域が形成され、CT が計測できなくなった。

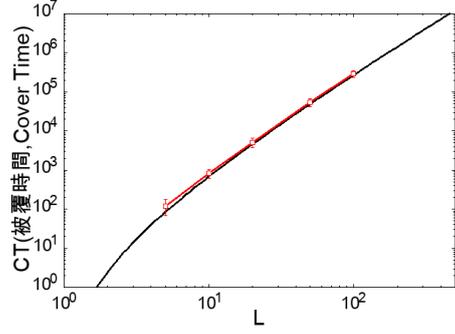


図 1: 単一 RW による CT の L 依存性: 横軸: L 、縦軸: CT、赤: 計算結果 (平均±標準偏差)、 $5 \leq L \leq 100$ 、黒実線: 式 (3) の関係を示す。

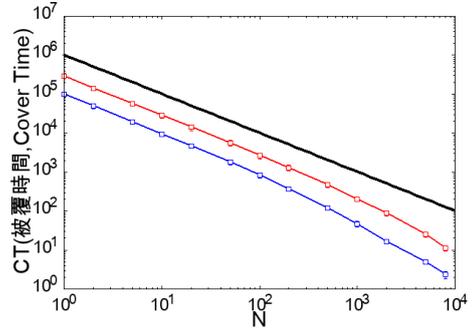


図 2: CT のエージェント数 N 依存性: 横軸: N 、縦軸: CT、赤: RW (平均±標準偏差)、青: 走化性系 (平均±標準偏差)、 $1 \leq N \leq 8000$ 、 $L = 100$ 、黒実線: $\propto 1/N$ を示す。

この問題に対しては、(i) 走化性エージェントの移動ルールに確率的最適制御 (HJB-KL 等で閉じ込め領域を回避しつつ探索を拡散させる) を適用する。(ii) k に多様性を持たせた系にすることが考えられる。

参考文献

- [1] A. Dembo, Y. Peres, J. Rosen, and O. Zeitouni, *Annals of Mathematics*, vol. 160, no. 2, pp. 433–464 (2004).
- [2] M. Chupeau, O. Bénichou, and R. Voituriez, *Nature Physics* **11**, 844–847 (2015).
- [3] D. Chowdhury, V. Guttal, K. Nishinari, and A. Schadschneider, *Journal of Physics A* **35**, L573–L577 (2002).
- [4] C. Oosawa, *Artificial Life and Robotics*, **30**, 458–464, (2025).

2次元系における接触感染

福井稔¹ 石橋善弘²

¹ 中日本自動車短期大学 ² 名古屋大学

1. まえがき

接触感染について、1個の感染源から感染が広がるための臨界感染率を求めた研究は多く、自然治癒率を1としたとき、臨界感染率は1次元、2次元でそれぞれ、 $\lambda=1.65, 0.4119$ と知られている。^{1,2)} 他方、蔓延状態から感染率がさがるときの感染消滅に至る過程の研究は少ないらしい。我々は computer simulation により昨年の1次元系に引き続き、本年は2次元系における感染消滅や平衡感染状態を調べた。

2. 感染率と感染確率

いま、感染率（期間1の間に感染事象が何回発生するか）を λ （たとえば $\lambda=1.65$ ）とする。すると期間1を経過したときに、この事象が1回以上起こる確率 r は $r=1-\exp(-\lambda)$ で与えられる（ $\exp(-\lambda)$ は0回起こる（1回も起こらない）確率）。以下ではこれを感染確率とよび、本論文では、感染率 λ ではなく感染確率 r を用いる。

3. Simulation

正方格子 $L \times L$ ($L=120$) を考え、各格子点に感染者と非感染者を同じ密度で置き、非感染者の上下左右のいずれかに感染者がいるとき、感染確率 r で感染する。感染者の治癒期間 $V=1$ とし、 $r=1$ のときの感染濃度 Q をもとめると、 $Q=1/2$ ($=V/(V+1)$)の平衡状態（図1）が得られる。

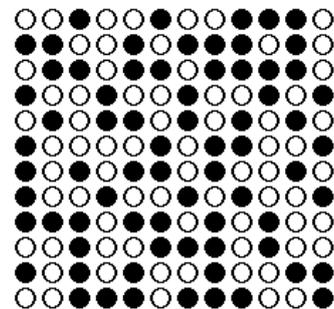


図1 $V=1$ $r=1$ $Q=0.5$
(●: 感染者 ○: 非感染者)

この状態から感染確率 r を小さくすると、各 r に依存した平衡濃度がえられる。また、臨界感染確率 r_c 以下では、感染が消滅した濃度0の状態に相転移する。これは2次相転移である。

次に、治癒に時間がかかるケース、すなわち $V=1$ ではなく、 $V=2, 3, 4, 5, 10$ について同様の simulation を行っ

た。これらをまとめると図2がえられ

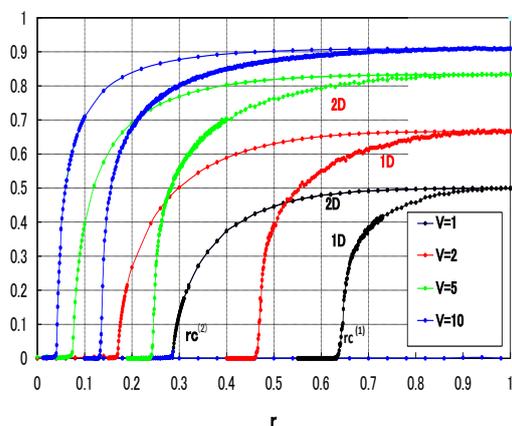


図2 1次元と2次元QのV変化

た。2次元のデータに1次元のデータも合わせて示した。横軸は感染確率 r 、縦軸は平衡濃度 Q である。 $r=1$ のとき、平衡状態における Q は全ての V において、1次元の場合と同様に $Q=V/(V+1)$ である。また、全ての2次元の臨界感染確率 $r_c(V)^{(2)}$ は、1次元の $r_c(V)^{(1)}$ に比べると小さい。

4. 結果と考察

感染濃度を $(V+1)/V$ 倍し、感染確率を $r^* = (r - r_c)/(1 - r_c)$ で規格化すると図3が与えられる。

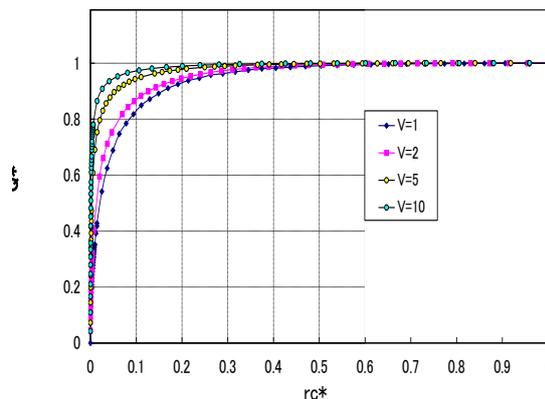


図3 規格化 $Q^*-r_c^*$ 図

また横軸に V 、縦軸に $1/r_c$ を取り、図示すると、1次元の場合のように、2次元も線形関係を示している (図4)。

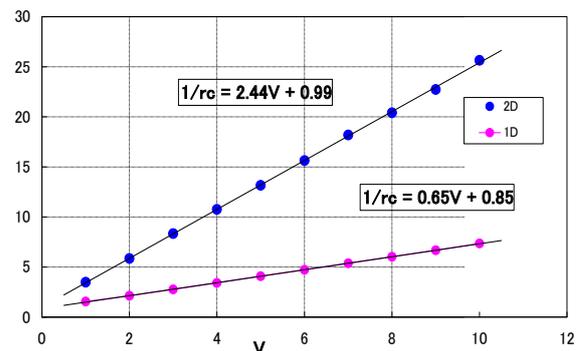


図4 $1/r_c - V$

これらの図をもとに相転移の臨界指数を求め、議論する。

参考文献

- 1) 今野紀雄「確率モデルって何だろう」(ダイヤモンド社)
- 2) 香取眞理「複雑系を解く確率モデル」(Blue Backs, 講談社)

平均場近似を用いたランダムなしりどりの解析

藤田悠朔¹, 鈴木岳人², 水口毅¹

¹ 大阪公立大学 大学院理学研究科 物理学専攻

² 高千穂大学 人間科学部

概要

しりとりは前の単語に、その末尾文字から始まる単語をつなげるゲームである。本研究ではしりとりで使用できる単語を定め、その中からランダムに単語を選ぶことを考える。我々は単語列の長さ（鎖長）に着目し、平均場近似を施した場合の鎖長分布に関する理論的な解析を行った。

Mean-field Analysis of Random Word Chain Games

Yusaku Fujita¹, Takehito Suzuki², Tsuyoshi Mizuguchi¹

¹ Department of Physics, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University

² Faculty of Human Sciences, Takachiho University

Abstract

A word chain game is a game where players connect words beginning with the last character of the previous word. In this study, a “dictionary”, namely a set of usable words in the game, is defined, and a random word-selecting process in the dictionary is considered. We focused on the chain length of each trial and analysed its distribution with a mean-field approximation.

1 はじめに

しりとりは、“りんご”→“ごりら”→“らっぱ”→…のように、前の単語にその末尾文字から始まる単語をつなげていくゲームである。他のルールとしては、(i) 一度使用した単語は再度使用できない (ii) 次の単語がなくなったら終了（負け）がある。本研究では、使用できる単語の集合（辞書）を定め、ゲームの勝敗や戦略を度外視したランダムなしりとりを考える。すなわち、単語は残されている選択可能な単語の中からランダムに選び、選択された単語は辞書から消す、という過程を終了するまで繰り返す。こうしてできる鎖長（しりどりの単語列の長さ）がどのようになるのかに着目した。

図1は文学作品“Moby-Dick” [1] に登場する英語の名詞19088語で50000回ランダムなしりとりを実行したときの鎖長の分布である。この非対称な分布はどのように得られるのかという疑問が提起される。

しかしMoby-Dick辞書には26文字が使われており、分布を求めるのは容易ではない。本論文では、使用されている文字の数が2という単純な場合に限定し、その鎖長分布について、近似を用いた解析結果を報告する。

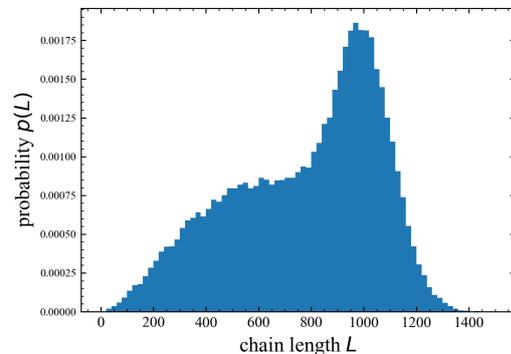


図1: Moby-Dick 辞書の鎖長分布 ($N = 50000$)

2 解析手法

辞書の単語数を D 、しりとりに使われる文字の数を C とすると、辞書は文字を頂点 (頂点数 C)、単語を辺 (リンク数 D) とする多重有向ネットワークを構成する。そして、ランダムなしりとりはそのネットワーク上の自己回避ランダムウォーク (SAW) に対応する。図2に小さな辞書ネットワーク ($D = 8, C = 3$) 上の長さ $L = 5$ の SAW の例を示す。

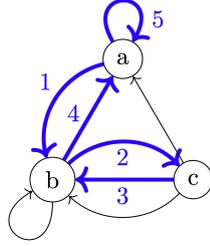


図 2: 青矢印は単語列 “adverb” → “basic” → “climb” → “banana” → “area” に対応、黒矢印は使われなかった単語を表す。

文字 θ の入次数を $k_{in,\theta}$ 、出次数を $k_{out,\theta}$ とすると、しりとりは次の式を満たす文字 θ で終了する。

$$k_{in,\theta} \geq k_{out,\theta}. \quad (1)$$

(1) 式を満たす文字を終了可能文字と呼び、満たさない文字を終了不能文字と呼ぶ。そして、しりとりが鎖長 L かつ文字 θ で終了する確率を $p_\theta(L)$ で表す。

以下では $p_\theta(L)$ そのものではなく、平均場近似を施した鎖長分布 $\tilde{p}_\theta(L)$ を取り扱う。平均場近似とは、与えられた辞書の各文字の入次数と出次数を保ったまま、頂点同士をランダムにつなぎかえてできる一連の辞書群 (シャッフル辞書群) に対する平均を意味する。

3 結果

$C = 2$ のシャッフル辞書群の鎖長分布 $\tilde{p}_\theta(L)$ は負の超幾何分布に従うことが判明した。終了可能文字を x 、終了不能文字を z とすると、 $\tilde{p}_x(L)$ は次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{p}_x(L) = & \frac{1}{2} \frac{\binom{L-1}{k_{out,x}-1} \binom{D-L}{k_{in,x}-k_{out,x}}}{\binom{D}{k_{in,x}}} \\ & + \frac{1}{2} \frac{\binom{L-1}{k_{out,x}} \binom{D-L}{k_{in,x}-k_{out,x}-1}}{\binom{D}{k_{in,x}}}. \end{aligned} \quad (2)$$

L/D をカバーレートと呼ぶ。(2) 式と負の超幾何分布の統計量 [2] をもとに、カバーレートの最大値 L_{max}/D 、最小値 L_{min}/D 、平均値 L_{mean}/D を計算すると、

$$\frac{L_{max}}{D} = 1 + \frac{k_{out,x} - k_{in,x} + 1}{D} \quad (3)$$

$$\frac{L_{min}}{D} = \frac{k_{out,x}}{D} \quad (4)$$

$$\frac{L_{mean}}{D} \simeq \frac{k_{out,x}}{k_{in,x}} \quad (5)$$

と求められる。ただし、平均値の計算には $D \gg 1$, $k_{in,x} \gg 1, k_{out,x} \gg 1$ の近似を用いた。数値計算でも (3)–(5) 式が成立することが確認された。図3は平均値についての計算結果の一例であり、 D が大きくなるにつれて (5) 式の関係に漸近している。

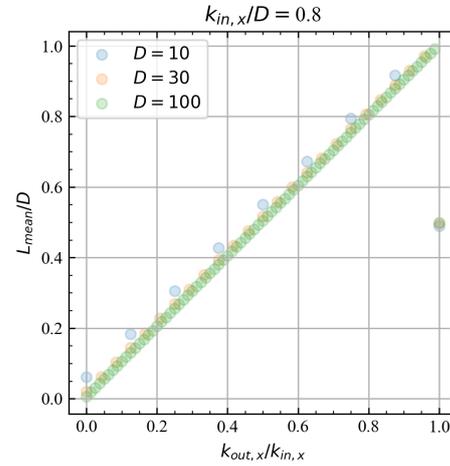


図 3: $\frac{L_{mean}}{D}$ の $\frac{k_{out,x}}{k_{in,x}}$ 依存性 ($\frac{k_{in,x}}{D} = 0.8$ に固定)

参考文献

- [1] Project Gutenberg, <https://www.gutenberg.org/ebooks/2701>
- [2] R. A. Khan, Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, B(1960-2002), **56**(1994) 309.

自己発現量の変化による遺伝子制御ネットワークの適応度 レアイベントサンプリングの性能評価

可兒尚純¹, 石渡龍輔²

¹ 室蘭工業大学 理工学部 数理情報システムコース,

² 室蘭工業大学 しくみ解明系領域

概要

本研究では、遺伝子制御ネットワークにおけるレアイベントサンプリングにおいて、自己発現量の変化による高適応度のネットワークサンプリングの性能変化について調べる。具体的には応答関数の閾値を変化させることで自己発現量を定義し、MCMCによるサンプリングを行うことでサンプリング時間と高適応度ネットワークの出現確率にどのように影響するか実験を行う。

Fitness of gene regulatory networks due to changes in gene expression levels: Performance evaluation of rare event sampling

Takazumi Kani¹, Ryosuke Ishiwata²

¹ Mathematical Information Systems Course, Faculty of Science and Engineering,
Muroran Institute of Technology, Japan

² Mechanism elucidation field Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

We examine how the performance of high-fitness network sampling varies with changes in self-expression levels during rare event sampling in gene regulatory networks. Specifically, we define self-expression levels by adjusting the threshold of the response function, and, using the multicanonical MCMC, perform numerical experiments to examine how sampling time and the likelihood of high-fitness networks' occurrence are affected.

1 はじめに

遺伝子制御ネットワーク (GRN) はいくつかの頑健性を備えており、外乱にさらされてもシステムが機能を失わない。特に高適応度 GRN の変異頑健性は進化の過程で獲得されると考えられている。よって GRN の変異に対する適応度ランドスケープを探索することで、進化経路に依存しない機能と頑健性の普遍的特性が議論できる。そこで頑健性の調査として、適応度をエネルギーとみなした GRN の簡易モデルを用いた MCMC を実行することにより、高適応度の GRN を効率的にサンプリングすることがで

きる [1]。文献 [1] では変異としてエッジの付け替えを行い、MCMC に基づくレアイベントサンプリングをしている。しかし自己発現量の変化による GRN のサンプリング性能変化は明らかになっていない。

そこで本研究では自己発現量の変化による高適応度 GRN のサンプリング性能変化について実験を行う。

2 モデルと従来手法

2.1 GRN モデル

GRN ではノード N を遺伝子、エッジを調節相互作用 $J_{ij}(\pm 1, 0)$ として遺伝子間の調節関係

(+1: 促進, -1: 抑制)のみを扱う有向ランダムグラフで表現する. 各ノードには発現量 x_i という変数を割り当て, 発現量の動的挙動を以下で仮定する.

$$x_i(t+1) = R(I(t)\delta_{i,1} + \sum_{j \neq i} J_{ij}x_j(t)) \quad (1)$$

$$R(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-b))} \quad (2)$$

ここで $R(x)$ は応答関数であり, $I(t)$ は入力信号である. 入力信号は入力ノードのみに作用し, 文献 [1] と同様に $a = 1, b = 0$ とした. この発現量 x_i をもとにした感度 s_i を以下で定義する.

$$s_i = |\bar{x}_i(1) - \bar{x}_i(0)| \quad (3)$$

\bar{x}_i は発現量の時間平均であり, GRN ではこの入力 $I = 0, 1$ の差に可能な限り鋭敏に反応することを求める. このとき出力ノードを最大発現量を示したノードとし, その出力ノードの感度を適応度 f とした.

2.2 サンプリング手法 (MCMC)

文献 [1] では高適応度 GRN のサンプリングのためにレアイベントも含めたマルチカノニカルモンテカルロ法(MCMC)を採用している [2]. 通常のMCMCでは重みを固定してメトロポリス法による状態密度のサンプリングを行っている. しかし文献 [2] では状態密度の一樣サンプリングのため, サンプリング時の重みを Wang-Landau 法 [3] に基づきエネルギーごとに随時更新している. そしてこのエネルギー E の重みを同じエネルギーをもつ状態の数 $\Omega(E)$ に反比例させることで状態密度の一樣サンプリングを実現している. またMCMCではエネルギーとして任意の量を設定することができ, 文献 [1] と本研究ではエネルギーを適応度とみなしている. 従来手法では操作としてエッジをランダムに選択し, 調節相互作用をそのままに別のエッジに付け替える操作を行う. そしてエッジの付け替え前後の適応度変化を調査する.

3 提案手法

3.1 自己発現量の変化によるサンプリング

GRN では各ノードの初期値発現量を自己発現量としている. 従来では自己発現量を $x_i = 0.5$ で固定している. そこで自己発現量の変化による高適応度

GRN のサンプリング性能変化を考えるため, 本研究では自己発現量を変化させた場合のサンプリング性能と従来のサンプリング性能を比較する. 具体的には式 (2) の b の閾値を変化させることで自己発現量を定義し, 応答関数は文献 [1] のままMCMCを実行する. そして自己発現量の変化がサンプリング時間と高適応度 GRN の出現確率にどのように影響するのか実験する.

4 まとめ

今後は提案手法に基づいてサンプリングした高適応度 GRN の頑健性の普遍的特性と従来モデルでの普遍的特性の変化について調査を行う.

参考文献

- [1] Shintaro Nagata, Macoto Kikuchi, Emergency of cooperative bistability and robustness of gene regulatory networks, June 29, 2020, <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007969>
- [2] Nen Saito, Yukito Iba, Koji Hukushima, Multicanonical sampling of rare events in random matrices, last revised 4 Mar 2013 (this version, v2), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1002.4499>
- [3] Fugao Wang, D.P.Landau, An efficient, multiple range random walk algorithm to calculate the density of states, March, 2001, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.2050>

営巣直後の蜘蛛の巣における応力分布を再現する単純なモデル

落合宏紀¹, 石渡龍輔²

¹ 室蘭工業大学 数理情報システムコース, ² 室蘭工業大学 しくみ解明系領域

概要

蜘蛛の巣はバイオミメティクスの観点から注目されている。本研究では先行研究の解析的計算が可能なモデルを発展させ、巣の構造の設定をより自然界の蜘蛛の巣、特に営巣直後に見られる螺旋状に横糸を持つ形状のモデルを作成し、その構造的特性を解析する。

A simple model reproducing stress distribution in spider webs immediately after nest-building

Hiroki Ochiai¹, Ryosuke Ishiwata²

¹ Mathematical Information Systems Course, Faculty of Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, Japan, ² Mechanism elucidation field Muroran Institute of Technology, Japan

Abstract

Spider webs are attracting attention from a biomimetic viewpoint. In this study, we propose a model that replicates the structure of natural spider webs, specifically the spiral-shaped configuration with cross threads observed immediately after web construction, based on previous research [2]. We analyse its structural characteristics.

1 はじめに

蜘蛛の巣は損傷を許容するテンセグリティを自然界に再現する好例としてバイオミメティクスの観点から注目されている [1]。ここで言うテンセグリティとは、引っ張り強度と圧縮強度のつり合いによって安定する構造である。本分野の先行研究では、数理モデルを用いて蜘蛛の巣を再現、分析を行うことで力学的特性と構造の関係进行分析している。本研究は解析的計算が可能なレベルでの単純なモデルを作成した先行研究 [2] から、巣の構造の設定をより自然界の蜘蛛の巣に近づけモデル化を行う。具体的には、蜘蛛の営巣過程で見られるように、横糸を縦糸に対し螺旋状に接続した場合を考える。また、先行研究で簡略化されている横糸と枠糸が巣全体にもたらす影響を考慮したうえで、横糸が損傷

した場合もテンセグリティ構造を保っているかを検討する。

2 従来モデルと提案モデルの違い

従来モデルと提案モデルの違いとして、横糸を同心円状ではなく螺旋状に接続していること、枠糸を計算に含めていること、縦糸にかかる力を異なる形で計算していることがあげられる。

2.1 従来モデルの表現方法

先行研究のモデル化は弾性素材の構造解析の文脈から、バネ定数の異なる縦糸と横糸 (図 1) にそれぞれフックの法則を適用している [3]。

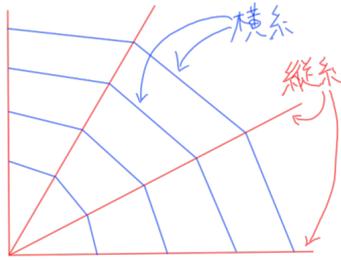


図1: 蜘蛛の巣の基本的な部分構造 蜘蛛の巣の基本的な部分構造. 注視点から同心円状に伸びているのが縦糸, 円周方向に伸びているのが横糸である.

縦糸にかかる力の式は以下の通りである.

$$F_{m+1} = F_m + \alpha^2 \frac{k_m/l_m}{K/L} (F_1 + \dots + F_m)$$

$$(\alpha = 2\sin(\frac{\pi}{N}), N: \text{縦糸の本数})$$

F_m は巣の中心から数えて $m-1$ 番目の結節点と m 番目の結節点の間の縦糸にかかる応力, K は縦糸のバネ定数, k_m は横糸のバネ定数で, L, l_m はそれぞれ縦糸の自然長と横糸の自然長である.

実験値から巣にかかる力は強度の高い糸に逃げていくことがわかっている [4]. 上記の式は横糸がもたらす放射方向の応力が縦糸に逃げていく様子が表現されている. 多くの蜘蛛は螺旋状に横糸を出す, 先行研究のモデルでは結節点の横のつながりを同心円状にすることで簡略化している (図2). これにより, 横糸がもたらす接線方向の力が打ち消されている (図3).

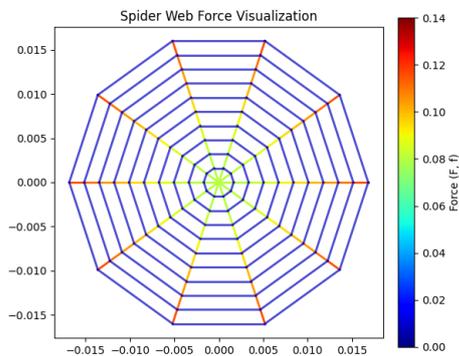


図2: 同心円状の横糸を持つ巣の応力分布 糸にかかる応力をカラーバーを用いて図示したもの. 赤色に近い程応力が高い.

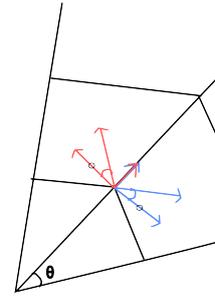


図3: 応力の打消し 青と赤の線はそれぞれ左右の横糸の応力先行研究 [2] のモデルでは同心円状に横糸がつながっているため, 横糸の応力のうち接線方向の応力は打ち消される (図中の○がついた矢印).

2.2 提案モデルの表現方法

本研究で提案するモデルは巣の構造を結節点どうしの横のつながりをアルキメデスの螺旋を利用して表現し, 追加で巣全体を支える枠糸を持たせたものである. また, 横糸の構造を先行研究から変更したため, 本研究では縦糸の計算に横糸から掛かる縦糸方向の力を考慮したものに変更する.

3 今後の課題

今後の課題としては螺旋状に接続された横糸の応力を考慮し縦糸の応力を表現する式を立てることと, 枠糸に応力が流れる様子を表現する式を立てることである.

4 まとめ

本稿では蜘蛛の巣の単純な数理モデルについて先行研究の手法の確認ができた. より自然な構造におけるテンセグリティを物理的に解析するため, 今後はモデル化について検討を行う.

参考文献

- [1] Lorraine H. Lin, et al. Letters to Nature, 1995, 373, 146.
- [2] Aoyanagi Y., Okumura K., Physical Review Letters, 2010, 104, 038102.
- [3] Nakagawa S., Okumura K., Journal of the Physical Society of Japan, 2007, 76(11), 114801–1–114801–4.
- [4] Alam M. S., Wahab M. A., Jenkins C. H., Mechanics of Materials, 2007, 39(2), 145–160.

Traffic and Granular Flow 2024 @ Lyon 参加記

友枝明保¹

¹ 関西大学 総合情報学部

概要

2024年12月2日(月)から5日(木)にかけて、フランスのリヨンにて、第15回目となるTraffic and Granular Flow (TGF) 2024が開催され、フランス、ドイツ、日本、中国、オランダをはじめ、世界各国から150名近い研究者や専門家が集結した。本稿では、この長年続く国際会議Traffic and Granular Flowの歴史にも触れつつ、日本からの参加者の一人として、TGF2024に関して報告する。

Traffic and Granular Flow 2024 @ Lyon: A Participant's Report

Akiyasu Tomoeda¹

¹ Faculty of Informatics, Kansai University

Abstract

Traffic and Granular Flow (TGF) 2024, the 15th installment of this long-standing international conference series, was held in Lyon, France, from December 2 (Mon.) to December 5 (Thu.), 2024. Nearly 150 researchers and specialists from around the world—including France, Germany, Japan, China, and the Netherlands—gathered to present and discuss recent advances in the study of traffic, pedestrian, collective (animal) behavior, and granular flow phenomena. This report provides an overview of TGF2024 from the perspective of a participant from Japan, while also touching upon the historical background and development of the TGF conference series.

1 国際会議 Traffic and Granular Flow の概要

Traffic and Granular Flow (TGF) は、1995年にドイツ・ユーリッヒで第1回が開催されて以来、ほぼ2年周期¹で世界各地にて開催されており(表1)、物理学、数理科学、土木工学、都市工学、情報科学、計算科学、安全工学など、多様な分野の研究者が集い、横断的にその知見を連携する学際的な場として発展してきた。

開催当初は、その名称の通り、高速道路交通流と粉粒体の類似性に焦点が当てられていた[1]が、

2026年に開催予定のTGF2026(Bristol, England)のwebsite[2]では、TGFが対象とする研究領域は、交通流(traffic) / モビリティ・輸送システム(mobility) / 粉粒体(granular flow) / 歩行者・避難ダイナミクス(pedestrian and evacuation dynamics) / 自走粒子系(self-propelled particles) / 群集ダイナミクス(collective behaviour)へと広がっており、さらに、ロボティクスと生物システムも特別テーマとして取り上げるといった記載がある。このように研究対象は確実に広がっているが、いずれも「多粒子系の相互作用によって巨視的なパターンが現れる」という特徴を共有しており、TGFはこうした複雑系における混雑・流れ・集団現象の理解を共通のテーマとして据えている。

¹2021年だけ新型コロナウイルス感染症の世界的流行により1年遅れて2022年に開催

表 1: Conference History

Year	Location	Proceedings
2026	Bristol (GBR)	
2024	Lyon (FRA)	Link
2022	Delhi (IND)	Link
2019	Pamplona (ESP)	Link
2017	Washington D.C. (USA)	Link
2015	Delft (NLD)	Link
2013	Jülich (DEU)	Link
2011	Moscow (RUS)	Link
2009	Shanghai (CHN)	None
2007	Paris (FRA)	Link
2005	Berlin (DEU)	Link
2003	Delft (NLD)	Link
2001	Nagoya (JPN)	Link
1999	Stuttgart (DEU)	Link
1997	Duisburg (DEU)	Link^a
1995	Jülich (DEU)	Link

^a 1997 年の Proceedings については、Springer のサイトで見つからなかったため、amazon の販売ページを Link 先として設定している。

また、国際会議としては小規模であり、参加者同士の距離が近いことも TGF の特徴である。コーヒープレイクやポスターセッションの場では、自然発生的に議論の輪ができ、若手研究者が著名な研究者と直接意見交換を行う様子もしばしば見られる。日本の交通流・歩行者流研究コミュニティにとっては、実験・理論・シミュレーションの成果を国際的に発信するとともに、海外の動向を効率よく把握できる貴重な機会となっている。

過年度の TGF に関して調査したデータを一つ報告する。2024 年までの各 TGF の Proceedings を振り返って、日本からの貢献²を調査したところ、図 1 に示すように、おおよそ 10% 前後の割合で推移していることが分かった。ただし、2009 年は Proceedings が発刊されなかったため（お蔵入り...）空白としている。2001 年は名古屋での開催のため、そして 2024 年については日本の大学に勤めておられる外国籍の研究者の国際共著論文により日本の割合が増えている。なお、これまでの TGF の歴史やテーマの変遷などの詳細については、TGF2024 の中に

²ここでの貢献は、各会議の Proceedings に掲載されている論文総数のうち、著者の中に日本の大学等に所属する者が加わっている論文数の割合として考える。

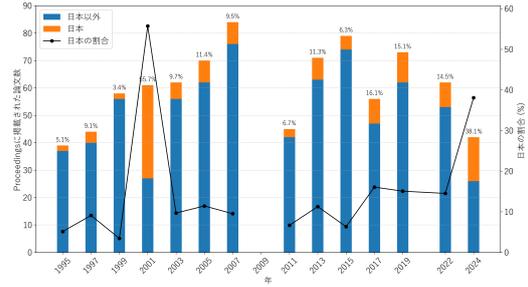


図 1: 各会議における論文数と日本の占める割合。

Prof. A. Schadschneider による報告 [1] があるので、そちらを参照されたい。

2 TGF2024@Lyon

2024 年 12 月 2 日（月）から 5 日（木）にかけて、フランスのリヨンにて、第 15 回目となる TGF2024 が開催された。参加者は 150 名近くにのぼり、Proceedings への寄稿（ポスター発表を含む）は、

- Granular flow : 5 件
- Collective (animal) behaviour : 2 件
- Urban traffic : 11 件
- Pedestrian dynamics : 24 件

とのことであった。会議は 4 日間、午前・午後ともに前半に Invited Talk や Highlighted contributed talk が配置され、後半で 2 部屋に分かれたパラレルセッションという構成であった。パラレルセッションでは、Pedestrian Dynamics のセッション同士が並列となる時間帯もあったが、全体を通して、実験や実測データを用いた発表が従来以上に多く、実証的な研究の比重が高まっている印象を受けた。

Invited talk は 8 件あったが、その中でも印象的だった講演の一つとして、Prof. D. Bartolo による講演 “Emergence of Collective oscillations in dense crowds” を簡単に紹介させていただく。本講演内容は Proceedings には含まれていないが、2025 年に Nature に掲載された研究内容 [3] に関連するものであり、密集した群衆に見られる集団的な “うねり” について、映像データと数理モデルによってその特徴を明らかにしたものである。具体的には、スペイン・パンプローナで開催されるサン・フェルミン祭（別名：牛追い祭り）のオープニングセレモニー（Chupinazo）における群衆映像（2019 年、2022 年、2023 年、2024 年：図 2 は 2023 年）を解析し、その結果、密集状態の群衆では、外部からの指示や刺激なしに、局所



図 2: [3]において, Supplementary Video 3 として公開されている 2023 年のサン・フェルミン祭における群衆映像 (筆者がスクリーンショットをとって画像化したもの)。



図 3: Coffee Break (提供: TGF2024 実行委員会)。

的な向きが周期的に変化する chiral oscillation (向きを持つ周期運動) が自発的に形成されることを明らかにしていた。さらに、この現象がサン・フェルミン祭に特有のものではないことを確認するため、2010 年の Love Parade 群衆事故映像も分析し、同様の chiral dynamics が観測されたことも報告していた。スペクトル解析の結果、これらの“うねり”はランダムな揺れではなく、約 18 秒の周期を持つ秩序的な振動であることが示され、群衆の危険な集団挙動が発生する以前に、リアルタイム監視によってその兆候を検知できる可能性を示唆する、非常に興味深い内容となっていた。

ポスターセッションは、初日と二日目にそれぞれ 1 時間のセッション枠が確保されており、筆者の共同研究者である栗原空良氏 (関西大学, D3) も、近年取り組んでいる OpenStreetMap を用いた地図作成と大阪梅田の有事に備えた避難シミュレーションについて発表した。図 3 に示すように、休憩時間には会場ロビーに飲み物と軽食が用意されており、ポスターで聞いた内容の続きを議論するなど、フォーマルな質疑応答とは別の、インフォーマルな交流の場としても機能していた。

今回の TGF2024 の会期は、リヨンで毎年開催される「Fête des Lumières (光の祭典)」の期間と重なっており、エクスカションでは、この光の祭典に合わせてライトアップされているフルヴィエール大聖堂を訪れた。リヨン歴史地区の一部として世界遺産に登録されているこの大聖堂は、フルヴィエールの丘の頂上に建ち、そこからリヨンの街並みが一望できる素晴らしい眺望スポットであった。日が沈むにつれて各所でライトアップが始まり、大聖堂にもプロジェクションマッピングによるカラフルな光

の演出が施されていた (図 4)。

Gala Dinner は、Palais de la Bourse という場所 (図 5) で行われた。歴史的な建物のホールでコース料理をいただきつつ、生バンドの演奏やタンゴ (のような) ペアダンスも披露され、研究発表の場とはまた異なる雰囲気の中で、各国の参加者と親睦を深めることができた。

会議最終日は、フライトが翌日であったこともあり、セッション終わりにリヨンの街中を散策した。チョコレートに詳しい岡本和也氏 (早稲田大学, D3) の提案のおかげで、BERNACHON (ベルナシオン) というリヨン発祥で、世界的に有名なショコラトリーを訪れ、店舗でしかいただけないガトー・プレジダン (Le Président) (図 6) を味わうことができた。他にも、到着日に空港からホテルへ向かう途中、日本の方に教えていただいたレストランが予想以上に素晴らしく、リヨン発祥とされるオニオングラタンスープ (図 7) に魅了されて、滞在中について 2 度も足を運んでしまった。

図 8 は、会期中に学会会場で撮影した写真である。TGF シリーズの中心的な人物の一人であり、交通-群集ダイナミクス研究を長年牽引してきた Prof. A. Schadschneider に、筆者が共同研究している若手研究者を紹介するとともに、筆者が初めてご挨拶させていただいたときから既に 17 年も経っていることの驚きを共有し、次回の会議での再会を約束した。このように、国際会議の場で海外の研究者と直接顔を合わせて議論し、学生たちが研究のトレンドを把握するとともに、研究者ネットワークを広げることのできる機会を提供できたことは、個人的にも大きな収穫であった。



図 4: フルヴィエール大聖堂のライトアップ



図 5: Gala Dinnerの会場であるパレ・ド・ラ・ブルス。



図 6: ベルナシオンのガトー・プレジダン



図 7: ブラッスリー・ジョルジュのオニオングラタンスープ



図 8: 学会会場にて。左から、筆者、Prof. A. Schadschneider, 岡本和也氏 (早稲田大学, D3), 栗原空良氏 (関西大学, D3)。

3 TGF2026@Bristol 情報

今回の TGF2026 は、2026 年 6 月 16 日から 19 日に、イギリスのブリストルで開催される [2]。学会 website に掲載されている Key Dates (2025 年 11 月 25 日時点) を表 2 にまとめているので、参考にされたい。なお、TGF2026 では、講演に関するフルペーパーを Collective Dynamics[4] へ投稿する機会が与えられる旨 website に記載がある。著者負担の掲載料が不要な diamond open access ジャーナルであることも踏まえると、Collective Dynamics への投稿の機会は、会議で発表した成果を広く公開するための魅力的な選択肢になるのではないだろうか。

以上、TGF シリーズの概要と TGF2024@Lyonの様子について簡単に紹介した。本稿が、今後 TGF2026 への参加や発表を検討される際の参考情報として役立てば幸いである。最後に、会期中に議論や助言を通じて多くの刺激を与えてくださった皆様に、この場を借りて深く感謝申し上げる。

表 2: Key Dates for TGF2026

Date	Event
20th January 2026	Deadline for abstract submission
Early March 2026	Notification of acceptance
March 2026	Registration opens
24th May 2026	Registration closes
16th–19th June 2026	Conference
July 2026	Deadline for proceedings paper submission

参考文献

- [1] A. Schadschneider and M. Schreckenberg, EPJ Web of Conf. **334** (2025) 00002.
- [2] Traffic and Granular Flow 2026, <https://tgf26.blogs.bristol.ac.uk/>, (閲覧日: 2025 年 11 月 25 日)
- [3] Gu, François, et al., Nature **638** (2025) 112–119.
- [4] Collective Dynamics, <https://www.collective-dynamics.eu/index.php/cod>, (閲覧日: 2025 年 11 月 25 日)

シンポジウムについてのお問い合わせは、下記までお願いします。

交通流数理研究会

世話人： 杉山雄規

Email: sugiyama.yuuki.w5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

Web: <https://mathematical-society-of-traffic-flow.github.io/>

