

直鎖状の走化性エージェントモデルの運動性と安定性

大澤智興¹

¹ 九州工業大学大学院 情報工学研究院 物理情報工学研究系

概要

相互作用を行う自己駆動粒子集団にみられる直線上の構造は、典型的で基本的な構造とみることができる。最初に、平面上における単独の走化性エージェントの運動性を示す。次に複数のエージェントが非相互に作用することで直鎖状に連結したモデルについて提案し、その鎖の運動性と安定性について報告する。

Motility and stability of chemotactic agents that chained linearly

Chikoo Oosawa¹

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

Abstract

Self-driven particles that chained linearly can be recognized as typical and fundamental structure in wide range of many interacting self-driven particles. Here we propose a model that can form chained agents due to non-reciprocal chemotactic interactions. Firstly, motilities of single agent are shown on 2D plane, and then motility and stability of agents that chained linearly are discussed.

1 序論

自然界や社会でみられる自己駆動可能なエージェント集団が形成する時空構造は、複雑で多様であり、その現象を再現するモデルも多数提案、解析されている [1, 2]。その様な時空構造の中で、比較的単純な直鎖状に並んだエージェント集団は、非生物、細胞、昆虫、ヒトや人工物に至るまで様々なスケールで見られる典型的で基本的な構造の一つであり [1, 3, 4, 5]、直鎖状構造の形成や崩壊要因の理解は、より複雑な時空構造の理解や利用への一歩となると考えられる。

著者は、フロアフィールドモデル [6] を利用した走化性エージェントのモデルを提案し、その運動性を報告した [7, 8]。さらに、このエージェントを捕食-被食関係にも拡張した [9]。ここでは、まず、単独エージェントの運動性を示し、その後に複数の走化性エージェントが非相互に作用することで、エージェントが連なった鎖を形成するモデルを提案し、

その鎖の運動性と安定性について報告する。

2 モデルと結果

本モデルにおける各エージェントは、時間ステップごとに、2次元格子上 (x, y) を4方向に移動可能であるが、そのステップごとに、水面に浮かべた樟脳粒のようにアリのように足跡である化学物質 (フェロモン) を放出 (f_P)、その強度 I は、

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t) + f_P \quad (1)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \delta) \quad (2)$$

$$I_{x,y}(t+1) = I_{x,y}(t)(1 - \alpha) - \frac{\alpha}{4}[I_{x+1,y}(t) + I_{x-1,y}(t) + I_{x,y+1}(t) + I_{x,y-1}(t)] \quad (3)$$

に従う。ただし、 $\alpha \in [0.0, 0.5]$, $\delta \in [0.0, 1.0]$ である。式 (2) は、足跡物質の分解または昇華を意味し、式 (3) は、足跡物質の拡散を意味する。これらの作用

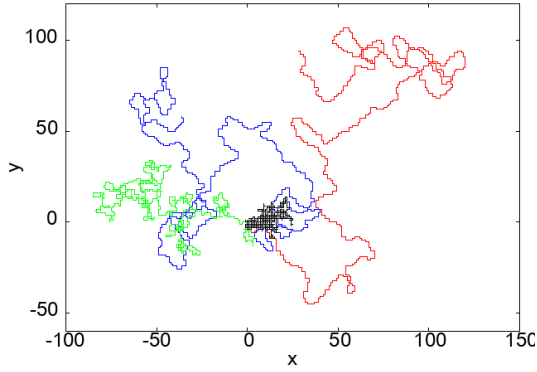


図1: 軌道の k 依存性、式 (4) の k が赤: $k = -20.0$ 、青: $k = -10.0$ 、緑: $k = -1.0$ 、黒: $k = 0.0$ の場合、 $t = 0$ で原点 $(0,0)$ をスタート位置として、 $t = 1000$ まで計算した。 $\alpha = 0.5, \delta = 0.1, f_p = 5$ とした。

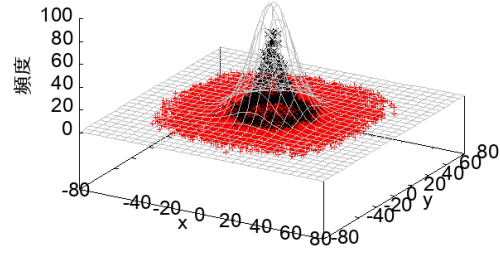


図2: $t = 100$ におけるエージェントの到達位置分布の k 依存性、式 (4) の k が赤: $k = -20.0$ 、黒: $k = 0.0$ の場合、灰色: 頻度 $\propto \exp[-(x^2 + y^2)]$ 、縦軸は 10^4 回中の出現頻度を示す。他の条件は図1と同じ。

により足跡強度場 ($I_{x,y}$) は、時間的に変化する。

2.1 単一エージェント

単一エージェントの移動確率は、ソフトマックス関数を用いて表記され、形成された強度場 $I_{x,y}$ に依存し移動し、式 (4) で表現できる。

$$p \propto \exp[k \cdot I_{x,y}] \quad (4)$$

2.2 単一エージェントの運動性

図1に、 k の違いによる軌道例を示した。図1の計算を 10^4 回行い、 $t = 100$ におけるエージェントの到達位置の頻度分布を図2に示した。図3には、運動性を指標である、平均2乗変位と2乗変位の4分位を示した。 $k < 0$ では、 $I_{x,y}$ に対して負の走化性を示す条件である。これは自己の過去に存在した場所から遠ざかる傾向を示し、その運動は1次元下の運動性と同様に、自己回避性や非マルコフ性を示している [7, 8]。しかし、エージェントの $I_{x,y}$ の感知範囲は、最近接4方向のみに限定されており、 $I_{x,y}$ も時間的に変化するため、再びスタート位置 (近傍) に戻る可能性もある。従って、 $t > 10$ では、傾きが緩やかになっている。

$k = 0$ 条件下では、移動確率は $I_{x,y}$ に依存しない、このため移動方向はステップ毎に等方的になり、ランダムウォークと一致する (図3の灰色グリッド線)。

2.3 直鎖状エージェント集団

単一エージェントの運動性メカニズムは、負の走化性のみを利用したが、エージェント間の相互作用

に正の走化性を利用する。複数のエージェントを直鎖状に行列させるために、 i 番目のエージェントと $(i+1)$ 番目のエージェントは、以下に示す式に従う、

$$p_i \propto \exp[k_{ii} \cdot I_{x,y}^i] \cdot \exp[k_{ij} \cdot I_{x,y}^j] \quad (5)$$

ここで、各々エージェントは、異なる足跡物質を放出していることに注意されたい (図4)。式 (5) の $k_{ii} < 0$ の条件では、自己の足跡に対して回避的に移動するため、これは自己駆動の成分 [7, 8] となる。その一方で、 $k_{ij} > 0$ の条件は、 j 番目のエージェントは、 i 番目のエージェントからの足跡に追従する、つまり正の走化性の成分となる。ここで、 $j = i - 1$ に限定すると、エージェント間の非相互な作用を行列 k_{ij} として表記でき、

$$k_{ij} = \begin{cases} k_{ii} < 0 \\ k_{ij} > 0 \text{ 但し, } j = i - 1 \\ k_{ij} = 0 \text{ 但し, 上記以外の } i \text{ と } j \end{cases} \quad (6)$$

となる (図5)。

N 個の全てのエージェントに対して、1ステップ内にランダムに一巡しながら、式 (5) を適用し移動させた。ただし、エージェントの排除体積効果を考慮し、移動方向に他のエージェントが存在する場合は、移動できない。

2.4 直鎖状エージェント集団の運動性

エージェント数 $N = 4, 8, 16, 32$ と変化させると共に、 $|k_{ii}| = |k_{ij}| = 0, 1, 5, 10, 20$ 、に設定し、ステッ

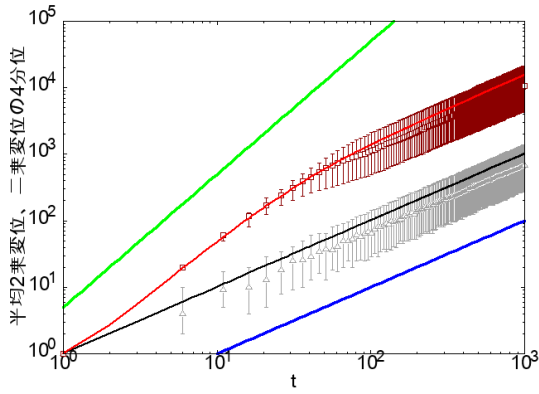


図3: 平均2乗変位と2乗変位の4分位の時間 t 依存性、赤線: $k = -20$ 、深赤□は中央値、エラーバーは、下側が第1四分位、上側側が第3四分位を示す。黒線: $k = 0.0$ 、灰△は、中央値、エラーバーは、下側が第1四分位、上側側が第3四分位を示す。緑線: 縦軸 $\propto t^2$ 、青線: 縦軸 $\propto t^1$ 、他の条件は図2と同じ。

ブ数 $t = 0 \sim 1000$ まで計算した。初期位置は、ステップ数に対して十分広い平面を用意し、その中心に直鎖状に配置した。これら鎖状エージェントの運動性を評価するために、初期位置からの平均2乗変位を N 個の全てのエージェントから求め、運動性の指標とした。図6は、大きい N かつ小さい t で、運動性が低くなっている。これは、全てのエージェントが追従運動を開始するまで先行するエージェントが移動し空きスペースを作るつようがあるためである。また、 $|k_{ii}| = |k_{ij}|$ が大きいほど、自己駆動(自己回避)する確率が増えるため、直進性が増大した(図1, 図7)。

さらに N が大きいほど、 $|k_{ii}| = |k_{ij}|$ が小さい程、分裂や融合が見られた。これは鎖の長さが伸びるため、分裂する確率も上がるためであるが、これら断片が移動中に融合することもあり、結果として時間的に、分裂と融合を繰り返す複雑な運動を示した。特に、分裂現象は、エージェント鎖が交差する時に生じやすかった、各エージェントの移動は、式(5)に従って移動するが、同時に排除体積効果もあるため、同じ位置に複数のエージェントが共存することは許されていない。その一方で、エージェントは、走化性で移動するため鎖が交差することは許されている。従って、エージェント鎖が交差することで局所的な渋滞を引き起こされ、結果的に追従するエージェントが先行するエージェントの足跡を見失うことで分裂が生じやすくなると考えられる。

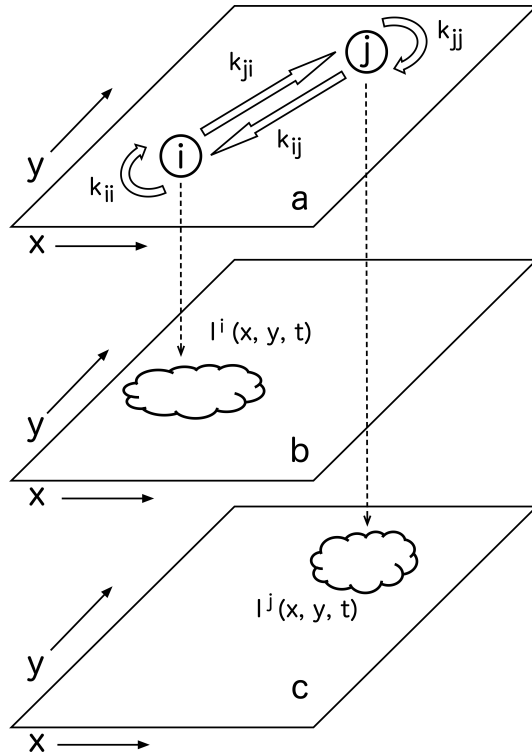


図4: 直鎖モデルの説明、a: エージェントの位置と式(5)中のパラメータを示す。b,c: 各々エージェントからの足跡空間 $I_{x,y}$ を示す。エージェント毎に異なるフェロモン、化学物質を用いている。

3 展望

提案モデルのような現象は、ジャコウネズミのキャラバン行動や、ヤヌス粒子 [3]、ロボットによる集団ひも状走行 [5] などで見ることができ。分裂や融合の現象の解析には、鳥の群れサイズ分布で示された解析方法 [4] が適用できるかもしれない。

本報告では、単一の鎖について述べたが、複数の鎖を用意し、それら複数鎖間の相互作用によりレーン形成などの時空構造の形成条件や要因など調べることもできる。これに近い条件として、線虫では、短距離ネマチック相互作用が生じていることが示唆されている [10]。

さらに、式(6)について、 $k_{1N} > 0$ を導入すると、エージェント鎖の先頭と末端を連結させることができ、環を形成させることもできる。また、Kano モデル [11] のパターン Y [12] において直鎖状の構造がみられ、このような構造は、式(6)に対応する相互作用行列を変更することで実現している。そこで、本モデルにおいても人工生命のモデルとしての可能性を探究できる。

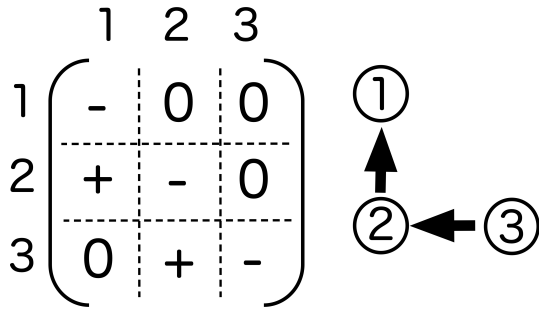


図 5: エージェント数 $N = 3$ の場合の直鎖状の相互作用行列 k_{ij} 、対角成分の負 (-) は、自己回避 (駆動) 成分であり、+ は追従成分を示す。

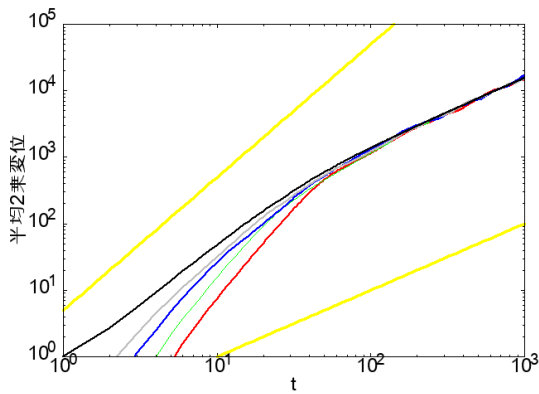


図 6: 平均 2 乗変位の時間 t 依存性、 $|k_{ii}| = |k_{ij}| = 20$ のみを示す。黒、灰、青、緑、赤は、それぞれ $N = 1$ (図 3 の赤と同じ)、4, 8, 16, 32 である。上黄線: 縦軸 $\propto t^2$ 、下の黄線: 縦軸 $\propto t^1$ を示す。

参考文献

- [1] 小田垣孝, 佐野幸恵, 山崎義弘, 山本健, 社会物理学, 共立出版 (2022)
- [2] H. Murakami, M. Abe, Y. Nishiyama, J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.4, pp.922-930, (2023)
- [3] D. Nishiguchi, J. Iwasawa, H.-R. Jiang, M. Sano, New J. Phys. 20 015002 (2018)
- [4] Y. Hayakawa, S. Furuhashi, Phys. Rev. E 86, 031924 (2012)
- [5] 若月ある, 川野多佳也, 宮島高志, 本田泰, 第 24 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム論文集, p33-36, (2018)
- [6] A. Kirchner, K. Nishinari, A. Schadschneider, Phys. Rev. E, 67, 056122 (2003)

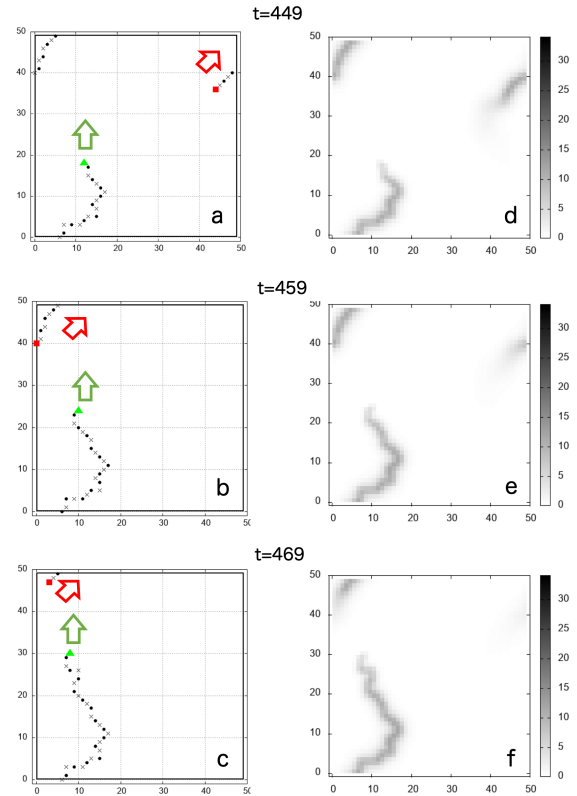


図 7: エージェント鎖の例: $N = 32, |k_{ii}| = |k_{ij}| = 10$ 、周期境界条件下であるため足跡や鎖が境界を跨いでいる。左側の列は、鎖状の走化性エージェントの位置を示す。右側の列は、全てのエージェントからの足跡の総量 (図 4b,c 層の合計) を示し、一番右側のバーは足跡の強度表示である。上から時間経過を示しているおり、a と d、b と e、c と f は、それぞれ同じ t の状態を示している。緑三角と赤四角は、それぞれ鎖の先頭と末端を示す。●と×は、それぞれ偶数番目と奇数番目のエージェントであり、白抜き大きな矢印は、先頭 (緑) と末端 (赤) のエージェントの移動方向を示している。

- [7] 大澤智興, 第 26 回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, pp.55-58 (2020)
- [8] 大澤智興, 信学技報, vol.122, no.280, NLP2022-61, pp.21-26 (2022)
- [9] C. Oosawa, J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.4, pp. 918-921, (2023)
- [10] T. Sugi, H. Ito, M. Nishimura, K. H. Nagai, Nat. Commun. 10, 683 (2019)
- [11] T. Kano, K. Osuka, T. Kawakatsu, N. Matsui, A. Ishiguro, Proc. 14th Euro. Conf. Artif. Life(ECAL), pp.237-244 (2017)
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=1doJowB9yc0>