

# 時間遅れにより記憶を持つ動的フロアフィールドモデル

Dynamic Floor Field Model with Memory due to Time Delay

大澤 智興

九州工業大学 情報工学部 物理情報工学科

e-mail : chikoo@phys.kyutech.ac.jp

キーワード: 走化性、非マルコフ性、自己駆動粒子

## 1 序論

動的フロアフィールド (Dynamic Floor Field, DFF) モデルは、静的フロアフィールドモデルと同時に用いられ、歩行者の人流、避難流のモデルとして用いられてきている [1, 2]。特に DFF モデルは、エージェントである人から仮想的に放出される足跡物質により、人と人との間に、エージェント間に追従 (非対称な引力) 効果を実現しており、これは正の走化性とみなせる。著者は、DFF モデル中のパラメタを反転することで、負の走化性を実現し [3, 4, 5]、エージェント間に非対称な斥力効果を生じさせ、単独のエージェントでは、水面に浮かべた樟脳粒 [6, 7] のように、自己駆動粒子として振る舞うことを示した。今回は、過去の足跡物質の強度 (=フロアフィールドの状態) にも依存することで、時間遅れを含む DFF モデルを提案し、その性質を報告する。

## 2 モデル

DFF モデルは、時間ステップごとに、エージェントの移動は、その時点におけるエージェント近傍の足跡物質の強度  $I(t)$  (=フロアフィールドの状態) に依存して確率的に決定される。1次元下では、1ステップで左右いずれか1に方向に移動可能であり、その確率は、

$$p_{x+1}(t) = \frac{\exp[k \cdot I_{x+1}(t)]}{\exp[k \cdot I(x-1)] + \exp[k \cdot I(x+1)]} \quad (1)$$

$$p_{x-1}(t) = \frac{\exp[k \cdot I_{x-1}(t)]}{\exp[k \cdot I(x-1)] + \exp[k \cdot I(x+1)]} \quad (2)$$

となる。 $k$  は、エージェントの強度  $I$  に対する選好性を示し、 $I$  に対して正で引力、負では斥力の効果となる。足跡物質の強度 ( $I \geq 0$ ) は、式 (3) で表現され、時空間的に変化する。

$$I_x(t+1) = I_x(t)(1-\alpha)(1-\delta) + \frac{\alpha(1-\delta)}{2} [I_{x+1}(t) + I_{x-1}(t)] + (1-\delta)f_p\Delta(x-x_a) \quad (3)$$

ただし、

$$\Delta(x) = \begin{cases} 1 & x=0 \text{ の場合} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (4)$$

である。ここで、 $\alpha \in [0.0, 0.5]$ ,  $\delta \in [0.0, 1.0]$  は、それぞれ足跡物質の拡散および分解または昇華の程度を意味し、 $f_p > 0$  は、エージェントからの足跡物質の放出量、座標 ( $x_a$ ) は、エージェント位置を示す。このように、DFF モデルにおける  $I$  は、自己の履歴 (位置と時間経過) をある程度保存する外部記憶として作用し、エージェントの移動確率に影響え、結果的に非マルコフ的な運動の原因となる。また、また、式 (1)、(2) は、ソフトマックス関数であるため、平行移動に対して確率は変化しないため、

$$\Delta I = I_{x+1} - I_{x-1} \quad (5)$$

と定義すると、移動確率は、 $\Delta I$  と  $k$  で決まり、図 1 のような相図で、移動方向と選好性  $k$  の関係を整理することができる。

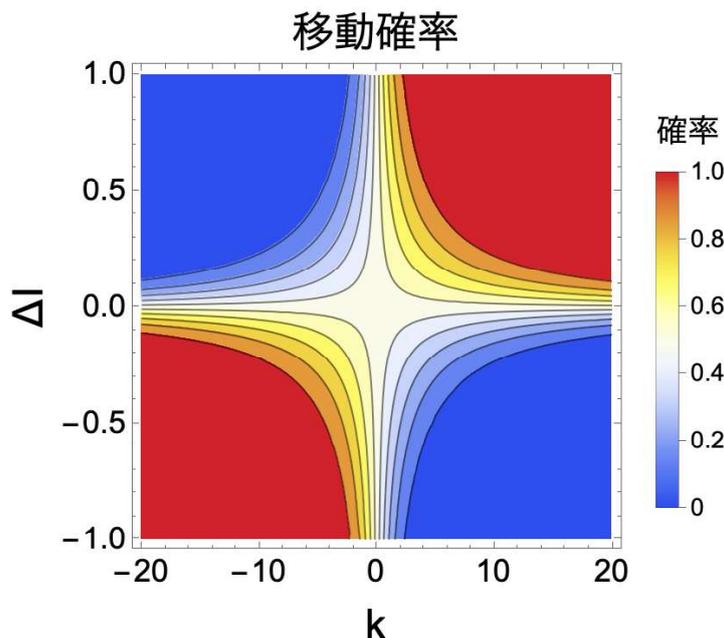


図 1. 相図: 選好性  $k$  と  $\Delta I$  で決まる移動確率: 右上の赤色系領域は、対応する  $k > 0$  で濃度勾配を上る可能性が高い。右下の青色系領域は、対応する  $k > 0$  で濃度勾配を下る可能性が高い。左下の赤色系領域は、対応する  $k < 0$  で濃度勾配を下る可能性が高い。左上の青色系領域は、対応する  $k < 0$  で濃度勾配を上る可能性が高い。 $k = 0$  や  $\Delta I = 0$  では、移動方向が等方的になりランダムウォークになる。

### 3 時間遅れを含んだモデル

さらに、これを、過去の  $I$  状態に依存する、 $t - 1$  までの時間遅れを項を含むように表現すると、

$$p_{x'}(t, t - 1) \propto \exp[k_t \cdot I_{x'}(t)] \exp[k_{t-1} \cdot I_{x'}(t - 1)] \quad (6)$$

$$\propto \exp \left[ \sum_{i=0}^1 (k_{t-i} \cdot I_{x'}(t - i)) \right] \quad (7)$$

$$\propto \exp[k_t \cdot I_{x'}(t)] \exp[mk_t \cdot I_{x'}(t - 1)] \quad (8)$$

となる。ここで、

$$mk_t = k_{t-1} \quad (9)$$

と定義すると、式 (8) 中の  $m (\in [-1, 1])$  は、エージェントの過去の寄与の程度を示し、内部記憶のように作用する。例えば  $m = -1$  では、過去の選好性 ( $k_{t-1}$ ) と現在の選好性 ( $k_t$ ) がタイムステップ毎に反転する。また、 $m = 1$  では、過去の選好性 ( $k_{t-1}$ ) と現在の選好性 ( $k_t$ ) が一致する。

### 4 結果

上記のモデルを数値計算した。 $m < 0$  では、エージェントの選好性がタイムステップ毎に正や負に反転するため、 $I$  の勾配を上り (引力)、下り (斥力) を交互に繰り返す傾向がみられた。 $m > 0$  で

は、 $m = 0$  に比べて正や負の選好性が強化されることになった。例えば、 $k_t < 0$  の場合は、いったん破れた  $I$  の空間的対称性が維持されやすくなり、より直進性が安定化された。また、 $\delta < 1$  であっても、式 (6) の括弧中が 0 に近い場合には、エージェントは、ランダムウォークに近い振る舞いを示した。このように、 $m$  を変化させると、現在や過去の  $I$  に対する選好性の強弱、正負を変更することも可能で、時間遅れを含まないモデル (式 (1)~(4)) に比べてより多様な運動状態が出現した。

これらの結果を図 1 に基づいて説明すると、式 (6)~(9) で示した、時間遅れの寄与は、図 1 における縦軸上下方向への移動と捉えることができる。

## 5 展望

式 (5) を全ての過去 [8] に依存するように拡張すると、

$$p_{x'}(t, t-1, t-2, \dots, t-n) \propto \exp \left[ \sum_{i=0}^n (k_{t-i} \cdot I_{x'}(t-i)) \right] \quad (10)$$

となる。

また、この時間遅れを含む DFF モデルは、二次元平面や多粒子系 (マルチエージェント) へも容易に拡張できる。さらに、DFF モデルは式 (1)~(4) にあるように足跡物質の反応と拡散などがメカニズムの基礎にある、これは、エージェントが気体や液体をのような溶媒中を移動していることを想定している。従って、種々の流体力学的な効果を導入することもできる。

## 参考文献

- [1] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz, Physica A, Vol.295, pp. 507-525, (2001).
- [2] A. Kirchner, K. Nishinari, A. Schadschneider, Phys. Rev. E 67,056122(2003).
- [3] C. Oosawa, J. Robot. Mechatron., Vol.35 No.4, pp. 918-921, (2023).
- [4] C. Oosawa, Proc. of The Twenty-Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2024 (AROB 29th 2024) pp.857-861, (2024).
- [5] C. Oosawa, J. Robot. Mechatron., Vol.36 No.4, pp. 982-988, (2024).
- [6] Y.Matsuda, K.Ikeda, Y.Ikura, H.Nishimori, N.J.Suematsu, J. Phys. Soc. Jpn. 88,093002 (2019).
- [7] K. Ikeda, H. Kitahata, Y. Koyano, Japan J. Indust. Appl. Math. 41, 1413-1449 (2024).
- [8] G. M. Schütz, S. Trimper, Phys. Rev. E 70, 045101(R) (2004).