

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カー (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 revisititations 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、ランダムウォーカー (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]。

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

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、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。

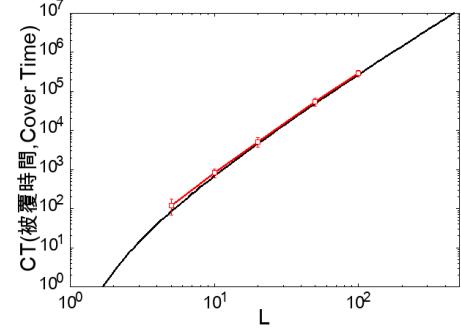


図 1: 単一 RW による CT の L 依存性: 横軸: L 、縦軸: CT、赤: 計算結果 (平均士標準偏差)、 $5 \leq L \leq 100$ 、黒実線: 式 (3) の関係を示す。

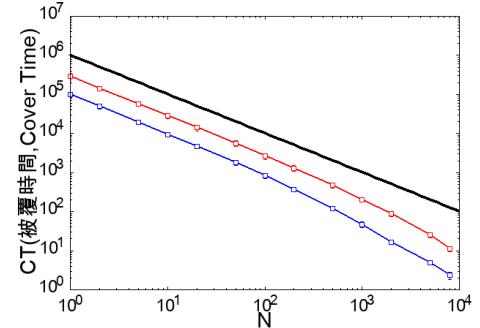


図 2: CT のエージェント数 N 依存性、横軸: N 、縦軸: CT、赤: RW (平均士標準偏差)、青: 走化性系 (平均士標準偏差)、 $1 \leq N \leq 8000$ 、 $L = 100$ 、黒実線: $\propto 1/N$ を示す。

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).