

# フェロモン源探索モデルのシミュレーションとその性能評価

## Olfactory search strategies and their comparison

小林 亮太\*<sup>1</sup>  
Ryota Kobayashi

Petr Lansky\*<sup>2</sup>  
Petr Lansky

\*<sup>1</sup>国立情報学研究所  
National Institute of Informatics

\*<sup>2</sup>チェコ科学アカデミー  
Academy of Sciences of Czech Republic

Some insects, including ants, bees, and moths, can locate the source of pheromone based on the olfactory information. The olfactory search problem is not easy, because the turbulent nature of pheromone dispersal makes it a complex task. To solve the problem, the search agent must devise a strategy that works based on uncertain and partial information. Here, we simulate the agent that aims to locate a fixed pheromone source by using a random walk model for pheromone dispersal. We investigate the effect of the zigzagging behavior on the search performance.

### 1. はじめに

蟻, ハチ, 蛾などの昆虫は, フェロモンを頼りにフェロモン源に到達できる. オスのカイコガは, 視力が非常に弱いにもかかわらず, パートナーとなるメスを見つけ出すことができる. このため, オスのカイコガは性フェロモンの匂いを頼りにしてフェロモン源(メス)を探索できると考えられている [神崎 09]. 匂い(嗅覚情報)を頼りにフェロモン源探索を行う仕組みが解明されれば, 限られた不確かな情報から探索を行う新しい探索アルゴリズムが開発できるだろう.

フェロモン源探索はフェロモン濃度最大の場所を探索する問題と考えることができる. 生物において, 化学物質濃度が最大の場所を探す標準的なアルゴリズムとして "chemotaxis" (走化性アルゴリズム) [Berg90] が知られている. 走化性アルゴリズムは物質濃度勾配の反対の方向に進むアルゴリズムであり, 最適化問題で用いられる勾配法 [金谷 05] と同様のアルゴリズムである. 大腸菌などのバクテリアや細胞は, 走化性アルゴリズムを用いて化学物質濃度が最大の場所を探索していると考えられている. しかし, フェロモンは乱流的に飛散するため空間濃度分布は複雑になり, 濃度勾配を用いてもフェロモン源に到達することができない. このため, フェロモン源探索問題では走化性アルゴリズムを用いることはできない.

フェロモン源探索を行うアルゴリズムとして, 受動的, 能動的行動戦略が提案されている [Balkovsky 02]. 受動的戦略では探索者(エージェント)はフェロモンを探知するまで待ち続け, フェロモンを探知した方向に少しだけ進むことを繰り返す. 一方, 能動的戦略ではエージェントはフェロモンを探知しない間も定型的な探索行動を続ける.

本研究では, フェロモン源探索をより効率的に行うアルゴリズムを開発することを目標として, エージェントが受動的, 能動的戦略をとった場合の性能を比較した.

### 2. モデル

フェロモンの匂い情報のみからフェロモン源を探索する問題を定式化し, この問題を解くための行動戦略を紹介する.

#### 2.1 フェロモン飛散のモデル

フェロモンが大気中を飛散する現象をモデル化しよう. フェロモンは小さな塊(パッチ)状に大気中を拡散する. パッチの大きさは相関長のオーダーであり, 相関長より十分大きな空間スケールでは, パッチの拡散はブラウン運動(ランダムウォーク)として記述される.

本研究では風が吹いている状況を考え, フェロモンパッチの拡散をランダムウォーク [Berg93] でモデル化する (図 1) [Balkovsky 02]. ここでは, 2次元格子  $\mathbf{r} = (x, y)$  ( $x, y$  は整数) を考え,  $x, y$  軸を風向きに垂直, 平行な方向にとる. フェロモン源(メス)の位置を原点, エージェント(オス)の位置を  $(x_0, y_0)$  とし, フェロモン源は各時刻にフェロモンパッチを排出する. 時刻  $t$  は離散値をとる,  $t = 0, 1, 2, \dots$  とし, 各時刻にフェロモンパッチは風  $\mathbf{w}(t)$  に乗って飛散するとする,  $\mathbf{r}_p(t+1) = \mathbf{r}_p(t) + \mathbf{w}(t)$ . ただし,  $\mathbf{r}_p(t)$  は時刻  $t$  のフェロモンパッチの位置を表し, 風向き  $\mathbf{w}(t)$  は  $(-1, 1), (0, 1), (1, 1)$  の方向を, それぞれ確率  $p_L, p_0, p_R$  で取るとし,  $p_L = p_0 = p_R = 1/3$  とした.

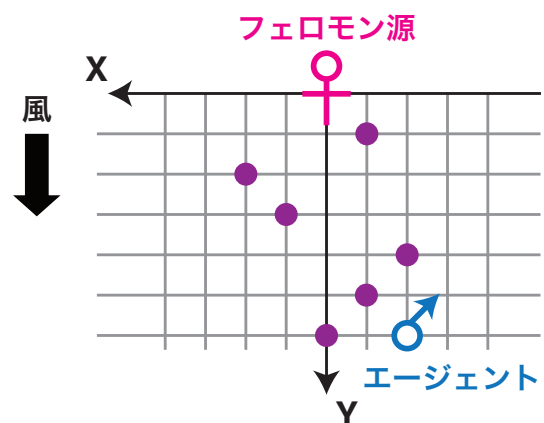


図 1: フェロモン源探索のシミュレーションの模式図. フェロモン源は原点にあり, エージェントは  $(x_0, y_0) = (-2, 6)$  にいる. 紫の丸はフェロモンパッチ, 矢印は風の平均的な方向を表す.

連絡先: 小林 亮太, 国立情報学研究所, 東京都千代田区一ツ橋  
2-1-2, r-koba@nii.ac.jp

## 2.2 探索者の行動戦略

フェロモン源探索問題における探索者 (エージェント) の目的は、フェロモン情報を頼りにフェロモン源の場所を見つけることである。エージェントは、フェロモンパッチが当たったかどうかを感知でき、感知した場合はどこから来たか (1 ステップ前の位置) を知ることができると仮定する。また、エージェントは風下に行くことはできない、つまり  $y$  座標を増加させる方向に動くことはできないと仮定する。この問題を解くための代表的な行動戦略を紹介する。

1 つの行動戦略として、フェロモンパッチを感知するまでエージェントはじっと待ちつづけ、感知した場合は、パッチの来た位置へ移動するアルゴリズムが考えられる [Balkovsky 02]。この行動戦略を受動的戦略と呼ぶことにする。

もう一つの行動戦略として、フェロモンパッチを感知しなくてもジグザグ状の定型行動を行うことが考えられる。座標  $(a, b)$  から来たフェロモンを感知したとすると、フェロモン源は 2 つの直線  $y = -x + b - a$ ,  $y = x + b - a$  で囲まれた部分に存在するはずである。そこで、ジグザグ状にフェロモン源が存在する領域を全探索する戦略が考えられる [Balkovsky 02]。この行動戦略を能動的戦略と呼ぶことにする。カイコガのオスがフェロモン源探索行動を行う際には、ジグザグ状の移動パターンを示すことが知られている [Kanzaki 92]。

## 3. 結果

受動的行動戦略をとるエージェントの探索行動をシミュレーションし、探索にかかる時間を計算することにより行動戦略の性能を評価した。エージェントの初期座標を  $(x_o, y_o)$  とし、エージェントは初めてフェロモンを検出した時刻 (時刻  $t = 0$ ) から探索を開始するものとした。

まず、受動的行動戦略をとるエージェントの探索時間の分布をシミュレーションにより求めた。初期座標  $x_o$  によらず、探索時間は裾が長い分布になり、対数正規分布でフィットできる。(図 2A) また、ガウス分布や待ち時間の標準的な確率分布であるアーラン分布 (ガンマ分布) では、探索時間分布を正確にフィットできなかった。次に、典型的な探索時間 (探索時間の最頻値)、探索時間の分散が初期座標にどのように依存するかを調べた。ただし、最頻値はフィットされた対数正規分布から見積もった。典型的な探索時間、分散ともに、初期座標の指数的な依存性  $\sim \exp(Bx_o^2)$  を持つことがわかった。(図 2B) この結果は、フェロモン源の正面 ( $x_o = 0$ ) からエージェントが少しでも外れると探索の性能、信頼性が大幅に劣化することを示している。能動的行動戦略の性能を評価した結果については、発表当日に紹介させていただく予定である。

## 謝辞

議論していただいた西川郁子教授 (立命館大学) に感謝いたします。

## 参考文献

- [神崎 09] 神崎 亮平: ロボットで探る昆虫の脳と匂いの世界 – ファーブル昆虫記のなぞに挑む –, フレグランスジャーナル社, (2009)
- [金谷 05] 金谷 健一: これなら分かる最適化数学 – 基礎原理から計算手法まで共立出版, (2005)

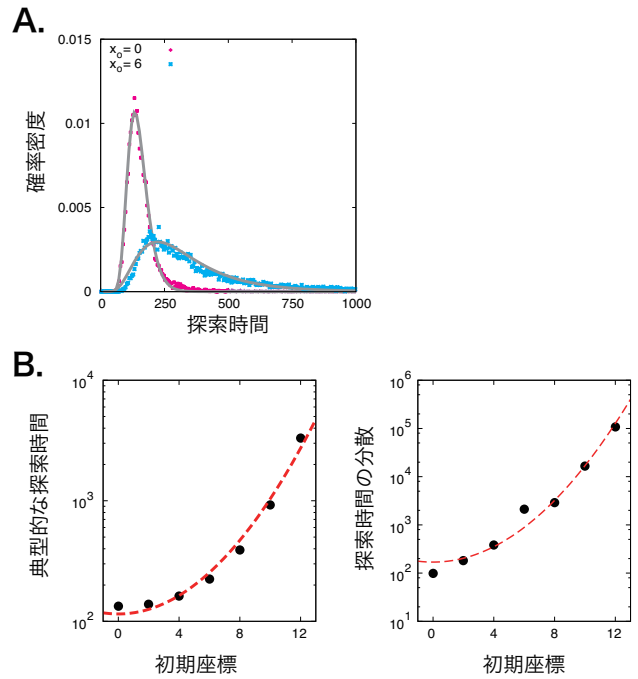


図 2: 受動的エージェントの探索にかかる時間。A: 探索時間の確率分布。マゼンタ, シアンは初期座標  $(0, 20)$ ,  $(6, 20)$  から繰り返し探索を行った時の探索時間の確率分布。灰は対数正規分布によるフィットである。B: 典型的な探索時間, 探索時間の分散の初期座標  $x_o$  依存性。赤い点線は関数  $A \exp(Bx_o^2)$  によるフィットを表す。

- [Balkovsky 02] Balkovsky, E, and Shraiman, B.I.: Olfactory search at high Reynolds number, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 99, pp. 12589 (2002)
- [Berg90] Berg, H.: Bacterial Microprocessing, Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, vol. 55, pp. 539–545 (1990)
- [Berg93] Berg, B. C: Random Walks in Biology Princeton University Press, Princeton, (1993)
- [Kanzaki 92] Kanzaki, R., Sugi N, and Shibuya, T.: Self-generated zigzag turning of Bombyx mori males during pheromone-mediated upwind walking, Zoological Science 9: pp. 515–527 (1992)