

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25870915

研究課題名(和文)フェロモン源探索行動のモデル化に基づく新しい探索アルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Modeling pheromone source localization behavior by an insect

研究代表者

小林 亮太 (Kobayashi, Ryota)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教

研究者番号：70549237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫は時々やってくるフェロモンを頼りにフェロモン源に到達できる。特にカイコガのオスは、視力が弱いにもかかわらずフェロモンを頼りにしてメスの場所を効率的に探索する。本研究では、フェロモン源を探索する過程を模倣したアルゴリズムを開発した。フェロモンについての探索者の観測を確率過程(点過程)としてモデル化し、ベイズ統計を用いることによりフェロモン源の位置を推定するアルゴリズムを開発した。そして、フェロモン飛散のシミュレーションを行うことで探索アルゴリズムの性能を評価した。また、点過程モデリング技術を用いてWebコンテンツの将来のアクセス数を予測する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Some insects, including ants, bees, and moths, can locate the source of pheromone based on the olfactory information. Especially, male silk moth can reach his mate (pheromone source) from sparse pheromone detections in spite of his weak eyesight. In this study we develop a search algorithm by mimicking the procedure that an insect searched a pheromone source. The pheromone detections of a searcher are described by using a Point process model and an algorithm for estimating the position of the source is derived by applying the framework of Bayesian statistics. We also evaluate the performance of search algorithms by simulating the agent that locates a fixed pheromone source. In addition, we have developed a method for predicting the future access to an online content by applying the framework of Point process.

研究分野：計算論的神経科学, 機械学習

キーワード：知能情報学 確率過程 ソフトコンピューティング シミュレーション ベイズ統計学

### 1. 研究開始当初の背景

動物は時々やってくる匂い情報を頼りに匂い源に到達できる。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）を探索していると考えられている（神崎 2009）。

フェロモン源探索はフェロモン濃度が最大の場所を探索する問題と考えることができる。生物が化学物質濃度の最大の場所を探す探索する行動を模倣したアルゴリズムとして“chemotaxis”（走化性アルゴリズム）が知られている（Berg 1990）。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る。大腸菌などの細菌やアヤメシロアや細菌は走化性アルゴリズムを利用して栄養が豊富な場所を探索していると考えられている。しかし、大気中のフェロモンは乱流状態にあるために空間濃度分布は複雑かつ非連続になる。このため、走化性アルゴリズムではフェロモン源を効率的に探索できない。

これまで、生物を参考にした最適化アルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズム（Holland 1992）や粒子群最適化（Kennedy and Eberhart, 1995）などが提案されてきた。これらのアルゴリズムは、最大化させる目的関数が完全にわかっている最適化問題に対して有効である。一方、本研究で対象とするフェロモン源探索は、目的関数が部分的に観測される場合や不確実な環境下における最適化問題と考えられる。このため、フェロモン源探索を模倣したアルゴリズムは生物を参考にした新しい最適化アルゴリズムとして広く使われることが期待される。また、フェロモン源の探索パターンを再現するアルゴリズムを開発することにより、生物学、特に動物がフェロモン源を探索する行動メカニズムの理解に貢献できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、探索者（エージェント）がフェロモン（黒丸）だけを頼りにフェロモン源（×）を探索する課題を考える（図 1）。この課題は簡単に見えるが、フェロモン拡散領域（図 1 水色部分）から外れると、いつまで待ってもフェロモンを得られなくなるため、目標に到達することは極めて困難となる（図 1B）。探索者にとってフェロモン拡散領域は未知であるため、前に進むことはリスクを伴う。確実に目標にたどり着くためには、高度な探索アルゴリズムが必要となる。本研究では「探索者は最適化問題を解いている」という仮説に基づき、効率的なフェロモン源探索行動アルゴリズムを導出する。

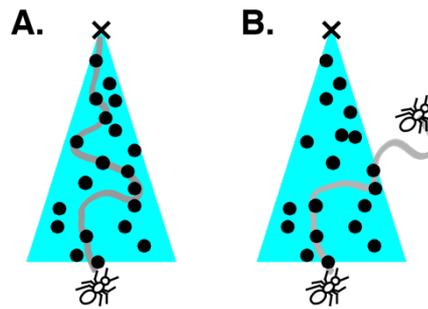


図 1: フェロモン源探索問題の模式図: 探索者（エージェント）は昆虫、目標（フェロモン源）は×印で示されており、フェロモン源からフェロモンが放出される。フェロモンは拡散しながら下へ流れていく。エージェントはフェロモンだけを頼りに目標地点を目指す。A) 目標に到達できる例。B) 目標に到達できない例。

### 3. 研究の方法

#### (1) フェロモン飛散のシミュレーション

フェロモンは小さな塊（パッチ）状で大気中を拡散する。パッチの大きさは相関長程度であり、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（Berg 1993）。ここでは、2次元格子  $(x, y)$ （ただし、 $x, y$  は整数）を考え、 $x$  軸（ $y$  軸）を風向きに垂直（平行）な方向にとる。フェロモン源は各時刻にフェロモンパッチを排出し、フェロモン源（メス）の位置を原点、エージェント（オス）の初期位置を  $(x_0, y_0)$  とする。ここで、フェロモン源は動かないと仮定する（図 2）。

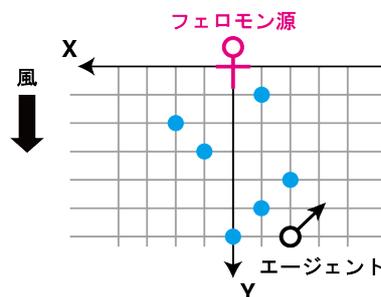


図 2: フェロモン飛散のシミュレーション エージェントは  $(-2,6)$ 、フェロモン源は原点にある。水色はフェロモンパッチ、矢印は風の平均的な方向を示す。

ここで時刻 $t$ は離散値をとる, すなわち $t = 0, 1, 2, \dots$  とする. それぞれのフェロモンパッチは以下の式に従って飛散する

$$\vec{p}(t+1) = \vec{p}(t) + \vec{w}(t)$$

ただし,  $\vec{p}(t)$ は時刻 $t$ におけるフェロモンパッチの位置を表し, 風向き $\vec{w}(t)$ は  $(-1,1)$ ,  $(0,1)$ ,  $(1,1)$  の 3 つ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.

#### (2) イベント時系列データのモデリング

イベント時系列データとはあるイベントが起きた時刻についてのデータである. エージェントがフェロモンを検出した時刻はイベント時系列と考えることができる. イベント時系列は点過程モデルを用いてモデル化される. 時刻 $t$ においてフェロモンを検出する確率を $\lambda_t$ とする. 時刻  $t_1, t_2, \dots, t_N$  にフェロモンを検出する確率は

$$P(t_1, t_2, \dots, t_N) = \prod_{t \in D} \lambda_t \prod_{t \notin D} (1 - \lambda_t)$$

と書くことができる. ただし,  $D = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ は検出時刻の集合である.

### 4. 研究成果

#### (1) フェロモン源探索アルゴリズムの性能評価

フェロモン源探索では, 探索者 (エージェント) はフェロモンを受け取ったかどうかだけを頼りにフェロモン源の場所を見つける. 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検出でき, 検出した場合はどの方向から来たか (1 ステップ前の位置)を知ることができるとする. 簡単のため, 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は動けないとする.

エージェントの行動戦略として以下の 2 つを考えた.

- ① 受動的戦略: フェロモンを検出するまでエージェントは待ちつづける. 検出した場合には, フェロモンの来た位置へ移動するという戦略が考えられる. この戦略を受動的戦略と呼ぶ.
- ② 積極的戦略: フェロモンを 1 回検出するとフェロモンの来た方向に直進し続けることが考えられる. この戦略を積極的戦略と呼ぶ. カイコガのオスがメスを探索する際には, 直線状の移動パターンを示すことが知られている.

まず, 受動的戦略をとるエージェントの探索をシミュレートして行動戦略の性能を評価した. エージェントは初めてフェロモンを検出した時刻 ( $t = 0$ ) から探索を開始するとした. シミュレーションした環境は確率的であるため, 探索にかかる時間は各試行 (シミュレーション) によって異なる. そこで

10,000 回のシミュレーションを行うことにより, 探索にかかる時間の分布を求めた. 探索時間の分布は, 初期座標  $x_0$  によらずに裾が長い分布になり, 対数正規分布でフィットできた (図 3). また, 標準的な確率分布であるガウス分布や待ち時間の典型的な確率分布であるアーラン分布 (ガンマ分布) は探索時間の分布を再現できなかった. 次に, 典型的な探索時間 (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. 典型的探索時間, 探索時間の分散は, ともに初期座標の指数関数的な依存性を持つことがわかった. この結果は, エージェントの初期位置がフェロモン源 ( $x_0 = 0$ ) から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. 次に, 積極的戦略の性能について解析した. 積極的戦略は, 1) 限られた初期条件でないと探索が成功しないこと, 2) 探索が成功する場合でもフェロモンを検出するために長い時間を待つ必要があること, が明らかになった. これらの研究成果は人工知能学会 (小林, Lansky, 2015) において発表を行った.

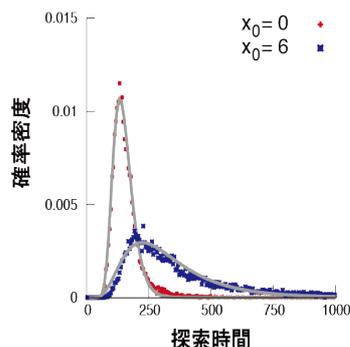


図 3: 受動的戦略の性能評価

探索時間の分布. 赤, 青は初期座標  $(0, 20)$ ,  $(6, 20)$  から繰り返し探索を行った時の探索時間の分布. 灰色は対数正規分布によるフィットを示す.

#### (2) イベント時系列解析によるモデリング

フェロモンを検出した時刻のデータをイベント時系列とみなしてモデリングを行った. 時刻 $t$ においてフェロモンを検出する確率を $\lambda_t$ とする. フェロモン検出確率は探索者の座標  $(x_t, y_t)$  に依存するので  $\lambda_t = R(x_t, y_t)$  と書ける. 3. (2) の式とフェロモン源についての事前分布を組み合わせることにより, フェロモン検出時刻からフェロモン源を推定するベイズ型アルゴリズムを導出した. 現在, このアルゴリズムに基づくエージェントの振る舞いについて研究を進めている.

また, イベント時系列データは Twitter・YouTube などのオンライン上の行動履歴, 金融市場における注文履歴, 神経スパイク, 地震発生記録など分野横断的に見られる.

本研究では、イベント時系列のモデリング技術を Web コンテンツのアクセス予測に応用した。特に Twitter のツイートに対する将来のリツイート数を予測する課題に取り組んだ。私たちは、人間の 1 日の行動パターンとコンテンツに飽きる心理の効果を取り入れた数理モデル (TiDeH) を開発した。そして、リツイートについての大規模データベース (Zhao et al., 2015) を使ってリツイート数の予測を行う評価実験を行った。その結果、開発手法 (TiDeH) は既存手法 (Zhao et al., 2015) に比べ、予測精度を大幅に向上させることを確認した。この成果は Web・ソーシャルメディア分析を扱うトップ国際会議である ICWSM 2016 (The Tenth International AAAI Conference on Web and Social Media) において発表した (Kobayashi and Lambiotte, 2016)。

また、イベント時系列データ分析と関連して以下の 2 つの共同研究に参加した。

① コミュニケーションデータ (メール・SMS の送受信履歴、携帯電話の通話履歴) をイベント時系列データとみなして分析を行った。さらに、SMS におけるコミュニケーションパターンを再現する数理モデルを開発した (Aoki et al., 2016)。

② Web コンテンツへのアクセスをイベント時系列とみなして分析を行った。さらに、睡眠や仕事などの 1 日の行動リズムやソーシャルメディア (Twitter 等) の宣伝効果などを取り入れることが可能な時系列モデルを開発した。さらに、代表的な署名サイトである「Petition.com」(<http://www.thepetitionsite.com>) から署名の履歴データと関連したツイートについてのデータを収集し、履歴データと関連ツイートデータから今後の署名数を予測する評価実験を行った (Proskurnia et al., 2017)。

<引用文献>

① 神崎 亮平, ロボットで探る昆虫の脳と匂いの世界-ファール昆虫記のなぞに挑む-, フレグランスジャーナル社 (2009)

② Aoki T, Takaguchi T, Kobayashi R and Lambiotte R, “Input-output relationship in social communications characterized by spike train analysis”, *Physical Review E*, 94, 042313 (2016)

③ Berg HC, “Bacterial micro-processing”, *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*. Vol. 55. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990.

④ Berg HC, “Random walks in biology”, Princeton University Press, 1993.

⑤ Eberhart R and Kennedy J, “A new optimizer using particle swarm theory”, *Proceedings of the Sixth International Symposium on*. IEEE, pp.39-43 (1995)

⑥ Holland JH, “Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence”, MIT press (1992).

⑦ Kobayashi R and Lambiotte R, “TiDeH: Time-Dependent Hawkes Process for Predicting Retweet Dynamics”, *ICWSM 16*, pp.191-200 (2016).

⑧ Proskurnia J, Grabowicz P, Kobayashi R, Castillo C, Cudre-Mauroux P, and Aberer K, “Predicting the success of online petitions leveraging multi-dimensional time-series”, *WWW 2017*, pp. 755-764 (2017).

⑨ Zhao Q, Erdogdu MA, He HY, Rajaraman A, and Leskovec J, “Seismic: A self-exciting point process model for predicting tweet popularity”, *KDD 2015*, pp. 1513-1522 (2015).

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Proskurnia J, Grabowicz P, Kobayashi R, Castillo C, Cudre-Mauroux P, and Aberer K, “Predicting the success of online petitions leveraging multi-dimensional time-series”, 査読有, *WWW 2017*, pp. 755-764 (2017).  
DOI: 10.1145/3038912.3052705

② \*Kobayashi R, \*Nishimaru H and Nishijo H, “Estimation of excitatory and inhibitory synaptic conductance variations in motoneurons during locomotor-like rhythmic activity”, 査読有, *Neuroscience*, 335, pp.72-81 (2016)  
\*: Equal Contribution.  
DOI: 10.1016/j.neuroscience.2016.08.027

③ Aoki T, Takaguchi T, Kobayashi R and Lambiotte R, “Input-output relationship in social communications characterized by spike train analysis”, 査読有, *Physical Review E*, 94, 042313 (2016)  
DOI: 10.1103/PhysRevE.94.042313

④ Koyama S and Kobayashi R, “Fluctuation scaling in neural spike trains”, 査読有, *Mathematical Biosciences and Engineering*, 13, pp.537-550 (2016)  
DOI: 10.3934/mbe.2016006

⑤ Kobayashi R and Lambiotte R, “TiDeH: Time-Dependent Hawkes Process for Predicting Retweet Dynamics”, 査読有, *ICWSM 16*, pp.191-200 (2016).  
DOI:なし

⑥ Kobayashi R and Kitano K, “Impact of slow  $K^+$  currents on spike generation can be described by an adaptive threshold model”, 査読有, *Journal of computational neuroscience*, 40, pp.347-362 (2016)  
DOI: 10.1007/s10827-016-0601-0

⑦ Kobayashi R and Kitano K, “A method for estimating of synaptic connectivity from spike data of multiple neurons”, 査読有, *Nonlinear Theory and Its Applications IEICE*, 7, pp.156-163 (2016)  
DOI: 10.1587/nolta.7.156

⑧ Kostal L and Kobayashi R, “Optimal decoding and information transmission in Hodgkin-Huxley neurons under metabolic cost constraints”, 査読有, *BioSystems*, 136, pp.3-10 (2015)  
DOI: 10.1016/j.biosystems.2015.06.008

⑨ Kobayashi R, He J, and Lansky P, “Estimation of the synaptic input firing rates and characterization of the stimulation effects in an auditory neuron”, 査読有, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 9:59 (2015)  
DOI: 10.3389/fncom.2015.00059

⑩ Kobayashi R, Namiki S, Kanzaki R, Kitano K, Nishikawa I, and Lansky P, “Population coding is essential for rapid information processing in the moth antennal lobe”, 査読有, *Brain research*, 1536, pp.88-96 (2013)  
DOI: 10.1016/j.brainres.2013.05.007

⑪ Kobayashi R and Kitano K, “Impact of network topology on inference of synaptic connectivity from multi-neuronal spike data simulated by a large-scale cortical network model”, 査読有, *Journal of computational neuroscience*, 35, pp.109-124 (2013)  
DOI: 10.1007/s10827-013-0443-y

[学会発表] (計 34 件)

主要なもののみ記載

① 小林亮太, Kostal L 「エネルギー代謝を考慮に入れた神経細胞の最適な情報伝達」, 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (CCS), 2016年11月.

② Aoki T, Takaguchi T, Kobayashi R, and Lambiotte R, “Input-output relationship in social communication datasets characterized by neuronal spike train analysis”, *Conference on Complex Systems (CCS 2016)*, Nederland, Sep. 2016.

③ Kobayashi R, Kurita S, Yamanaka Y, Kitano K, and Shinomoto S, “Testing the statistical significance of synaptic connectivity”, *Neural Coding 2016*, Germany Aug. 2016.

④ Nishimaru H, Inoue K, Kobayashi R, Vidiella S, Matsumoto J, Iwasato T, and Nishijo H, “Localization of the pattern generating circuits responsible for hopping gait in the  $\alpha$ -chimaerin mouse spinal cord”, *The 39th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, Japan, July 2016.

⑤ 小林亮太 「脳における計算の仕組み～ハードウェアとアルゴリズム～」, 第2回人工知能学会 汎用人工知能研究会, 2016年3月. (招待講演)

⑥ 小林亮太, Kostal L 「エネルギー代謝を考慮に入れた神経細胞の最適な情報伝達について」, *日本物理学会 第71回年次大会*, 2016年3月.

⑦ Kobayashi R and Shimono M, “Computer simulation of global brain dynamics at the neuronal resolution”, *SFN 2015, USA*, Oct 2015.

⑧ Nishimaru H and Kobayashi R, “Extracting synaptic inputs to motoneurons during locomotor-like rhythmic activity in the neonatal mouse spinal cord in vitro”, *The 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, Japan, July 2015.

⑨ Kobayashi R, “Estimation of excitatory and inhibitory input rate from a single voltage trace”, *CNS 2015 Workshop “Stochastic Neural Dynamics”*, July 2015. (招待講演)

⑩ Shimono M and Kobayashi R, “Dynamics on global brain networks at the neuronal resolution”, CNS 2015, Czech Republic, July 2015.

⑪ Kobayashi R and Kitano K, “How slow K<sup>+</sup> currents impact on spike generation mechanism?”, CNS 2015, Czech Republic, July 2015.

⑫ 小林亮太, Lansky P 「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」, 2015 年度人工知能学会全国大会, 2015 年 5 月.

⑬ 小林亮太 「脳神経シミュレーションによる人工知能技術開発の試み」, ワークショップ 第 1 回 人工知能による科学・技術の革新, 2015 年 4 月. (招待講演)

⑭ Kobayashi R, “Effect of slow K<sup>+</sup> currents on spike generation mechanism of a neuron”, Rhythms and Waves in Neural Systems-From Mathematics to Neuroscience -, Japan, Mar. 2015. (招待講演)

⑮ Nishimaru H, Kobayashi R, Itohara S, and Iwasato T, “Synaptic modulation of spinal motoneurons during locomotor-like rhythmic activity in the alpha-chimaerin knockout mouse in vitro”, SFN 2014, USA, Nov. 2014.

⑯ 小林亮太, 北野勝則 「遅いカリウム電流が神経細胞の信号処理に与える影響」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月.

⑰ Kobayashi R and Kitano K, “Effects of slow K<sup>+</sup> current on the spike threshold of a neuron”, The 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Japan, Sep. 2014.

⑱ Okino M, Kobayashi R, and Kitano K, “A comparison of methods for estimating synaptic connectivity based on the simulated spike data”, JNNS 2014, Japan, Aug. 2014.

⑲ Kobayashi R, “Estimation of excitatory and inhibitory input rates from a single voltage trace”, Mathematical Modeling and Statistical Analysis in Neuroscience, Denmark, July 2014. (招待講演)

⑳ Kobayashi R and Kitano K, “Slow potassium currents underlie the spike threshold dynamics of multi-timescale adaptive threshold model”, SFN 2013, USA, Nov. 2013.

㉑ Kobayashi R and Kitano K, “Estimating synaptic connections from multiple spike trains based on a coupled escape rate model”, CNS 2013, France, July 2013.

㉒ Kobayashi R, “A simple model that can accurately predict spike timings generated by various kinds of neurons”, Workshop “Neural Coding: Information Beyond Shannon”, Czech Republic, July 2013.

㉓ Kobayashi R, Namiki S, Kanzaki R, Kitano K, Nishikawa I, and Lansky P, “Decoding odor identity from neural activity in the moth antennal lobe”, Neuro2013, Japan, June 2013.

[図書] (計 0 件)  
特になし

[産業財産権] (計 0 件)  
特になし

[その他]  
ホームページ等  
[http://www.nii.ac.jp/faculty/informatics/kobayashi\\_ryota/](http://www.nii.ac.jp/faculty/informatics/kobayashi_ryota/)

<http://research.nii.ac.jp/~r-koba/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 亮太 (KOBAYASHI, Ryota)  
国立情報学研究所・情報学原理  
研究系・助教  
研究者番号：70549237

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし