

# データ駆動型による空間依存的な昆虫の匂い源探索行動のモデル化

## Data-Driven Modeling of Spatially Dependent Chemical Plume Tracing Behavior of Insect

○ 李 庭ミン (横国大) 正 志垣 俊介 (大阪大)  
正 眞田 一志 (横国大) 正 倉林 大輔 (東工大)

Jeongmin LEE, Yokohama National University, lee-jeongmin-gn@ynu.jp

Shunsuke SHIGAKI, Osaka University

Kazushi SANADA, Yokohama National University

Daisuke KURABAYASHI, Tokyo Institute of Technology

In this study, We propose a new concept to approach Chemical Plume Tracing (CPT) problems in complex environments expected in emergencies such as disasters and terrorism as data-driven models. CPT, which uses odor information to plan the robot's movement in preparation for obstacles and noise in emergencies, has been actively studied recently as it has huge engineering value. Since Considering all the factors in a complex environment in which robots equipped with a data-driven model are expected to be deployed takes high engineering costs, it aims to reduce the cost by dividing the complex environment into element environments with different spatial characteristics, conducting CPT experiments in each element environment, building an independent model with that data, and switching between the models autonomously to determine the next step action.

**Key Words:** Biomimetics, Behavior Prediction, Chemical Plume Tracing, Odor Source Search

### 1 緒 言

近年、生活全般に多様なロボットが投入されており、災害やテロの現場での化学物質源の特定や生存者探索などの人間が直接介入することの難しい分野へのロボットの投入も議論されている。しかし、このような分野ではロボットによる自律的な環境の把握と理解を必要とするが、多くの煙や埃、障害物などのノイズが予想されるため、従来の画像情報による探索が上手く効かない恐れがある。この時、時々刻々複雑に変化する空間中に漂う化学物質の存在から環境を把握することは障害物を克服する上に特定化学物質への追従性を高められるため、移動計画を立てる際に有効である。この環境中の匂い情報から環境を把握して移動計画を立てる一連の過程を匂い源探索 (CPT; Chemical Plume Tracing) と呼ぶ。

このことから現在匂い源探索に関する研究が活発に行われている [1][2][3]。ところで、人間を含む生物は CPT 能力を既に所有していて餌場や仲間を探す際にこの能力から目的を達成していて [4]、この行動方を工学的にモデル化することで導入コストが低減できることから、本研究では CPT 問題を解くため生物模倣モデルに着目し、カイコガ (*Bombyx-mori*) の雄成虫個体 (以下、単にカイコガと記す。) の行動方をモデル化する。

そこで、文献 [5] では風洞中のカイコガの CPT 実験からデータを獲得して匂い情報を入力とし、その時のカイコガの変位を出力としてガウス過程回帰から行動方策を得ることができた。しかし、実際に CPT 能力を持つロボットの投入が予想される環境は障害物の多い複雑な環境であるため、データドリブンベースで CPT モデルを導く場合には複数の要素が考慮されるべきである。だが、環境を構成する全ての要素を考慮することは工学的にコストがかかる。

従って、本研究では複雑な環境を構成する要素として、障害物のない環境 (以下、Open Field と記す。) と障害物の存在する環境 (以下、Obstacle Field と記す。) に分けて各要素環境ごとにデータを獲得し、データドリブンからモデルを構築してこのモデル群を自律的に切り替えて適切な行動方策を選択する手法を提案する。だが、文献 [5] では Open Field の場合のみ検証されており、この Open Field は環境に障害物が存在する環境と大きく違い、カイコガが受け取った匂い情報が Open Field と異なる可能性が高い。この時に文献 [5] と同様なアルゴリズムでデータドリブンによる生体模倣モデルを導くと与えられた環境に対する対象物の行動とずれてしまって CPT が出来ない、または本来の対象物の行動と異なる軌跡を見せる恐れがあり、その実効性に疑問が残る。

以上のことから、本研究では複雑な環境に対応可能なデータ駆動型モデルを考案する際のコストを低減させる方法として Open

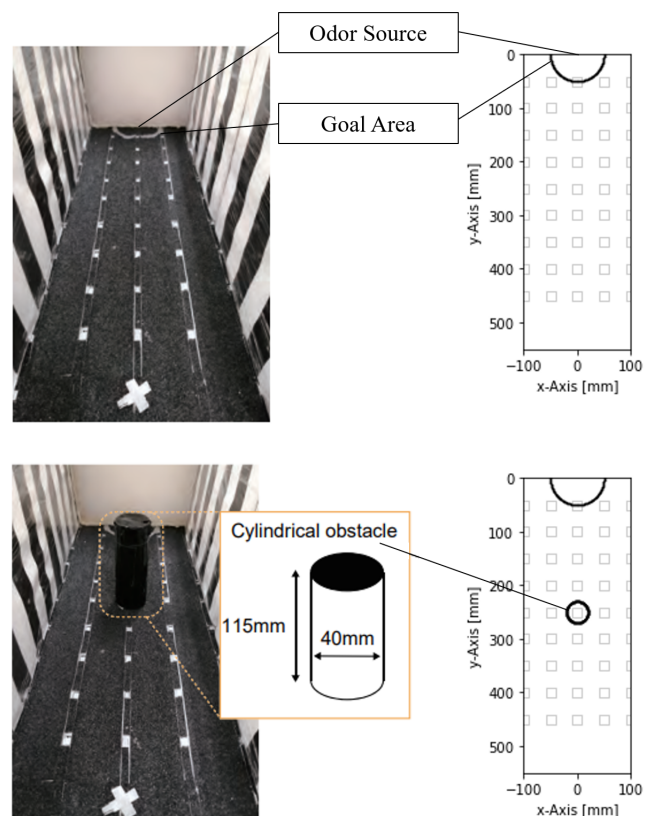


Fig.1 The view of Open field and Obstacle field of wind tunnel and the simulation environment

Field と Obstacle Field の違いを究明し、各要素環境のカイコガの CPT データから有効な複数のモデルを構築してそのモデル群を切り替えるアルゴリズムの妥当性を各要素環境における性能評価から確認する。

## 2 問題設定

### 2.1 実験環境

本研究では底にセンサーアレイが搭載されている風洞を計測システムとして、障害物のない計測システムを Open Field とする。また、考慮する障害物の形状として円筒形を採択して計測システムの中央部に設置することから Obstacle Field を実現する。この計測システムを図 1 に示す。また、各計測システムを同サイズのシミュレーション環境に再現した様子も図 1 に示す。

### 2.2 匂い情報の濃度値変化の解析

カイコガが計測システムの中を CPT する際に獲得した行動データ及びセンサーアレイの匂い濃度測定値を用いて、環境中の空間的要因によって変化する平均濃度値、分散値を調べる。

### 2.3 空間的性質の解析と判別

生物体が CPT をする際に匂い情報の周波数特性が重要な役割を果たすとの報告 [6][7] があることから、環境中の空間的要因によって変化する匂い情報を周波数特性からも解析する。周波数特性は濃度値を測定する本研究の計測システムの限界から濃度値のピークの履歴を文献 [8] の 2 次の ARX モデル (autoregressive with exogenous input) である式 (1) と式 (2) を用いて遭遇有無を判断して式 (3) から遭遇回数を算出し、式 (4) からこの遭遇回数を時間成分で割ることによって推定する。なお、推定した周波数はノイズの影響に引張られる恐れがあるため、式 (5) から各推定周波数を過去 1 秒間の平均周波数と比較した相対周波数を算出して CPT 中にカイコガが受容した匂い情報の周波数特性に特異点が存在するかを調べる。

$$\hat{u}(k) = b_0 \hat{y}(k) + b_1 \hat{y}(k-1) - a_1 \hat{u}(k-1) - a_2 \hat{u}(k-2) \quad (1)$$

$$\hat{u}_{bin}(k) = \begin{cases} \text{Detect,} & \hat{u}(k) \geq \text{Threshold} \\ \text{Not Detect,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\hat{u}(k)$  は k-ステップの時の推定入力値、 $\hat{u}_{bin}(k)$  は k-ステップの時の匂い流れの検知有無を 2 進数で表現した値、 $\hat{y}(k)$  は k-ステップの時のセンサーの出力値の時間微分であって、 $a_1, a_2, b_0, b_1$  は実験係数である。ここで、 $a_1, a_2, b_0, b_1$  は文献 [8] を参照にして決定する (表 1)。

Table 1 文献 [8] を参照にして決定した各実験係数の値

$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$
-0.981	0.0165	0.283	-0.271

$$N(k) = \sum_{k=\tau}^k \hat{u}_{bin}(k), \tau : \text{Iteration} \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{N(t)}{\tau} \quad (4)$$

$$f_r(t) = \frac{f(t)}{\bar{f}}, \bar{f} : \text{Mean frequency} \quad (5)$$

### 2.4 モデルの切り替えのアルゴリズム

上記の解析結果から適切な独立した複数のモデルを各要素環境のカイコガの CPT データから構築し、環境の条件から能動的にモデルの入れ替えをするアルゴリズムを作成して両要素環境において CPT シミュレーションを行って性能を検証することでアルゴリズムの汎用性を検証する。この時、モデルの性能評価は比較群の中で最も指標の良くて、その性能が両要素環境において維持できるかを中心にして行う。

## 3 実験結果

### 3.1 匂い情報の濃度値変化の解析結果

各環境の領域を Obstacle Field で障害物が存在する  $y = 250[\text{mm}]$  を基準として  $y < 250[\text{mm}]$  の時に Area A,  $y > 250[\text{mm}]$  の時に Area B として分割して解析した時、環境中の匂い情報の平均濃度値及び分散値は空間的要因に遭遇した後の領域において空間的要因がない時と遭遇する前の領域との有意差が存在することが分かった (図 2, Steel Dwass's test,  $**p < 0.01$ )。

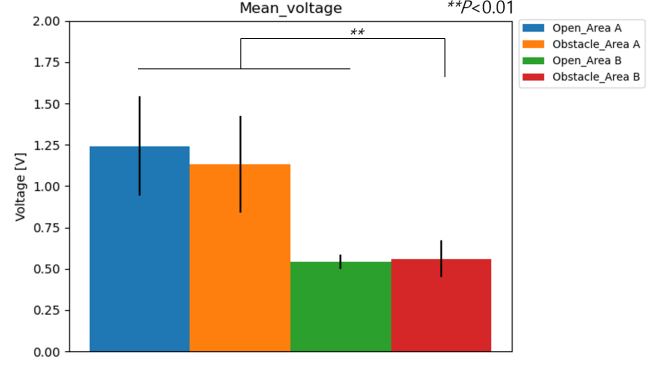


Fig.2 Comparison of concentration values between regions divided by spatial factors (Steel Dwass's test,  $**p < 0.01$ )

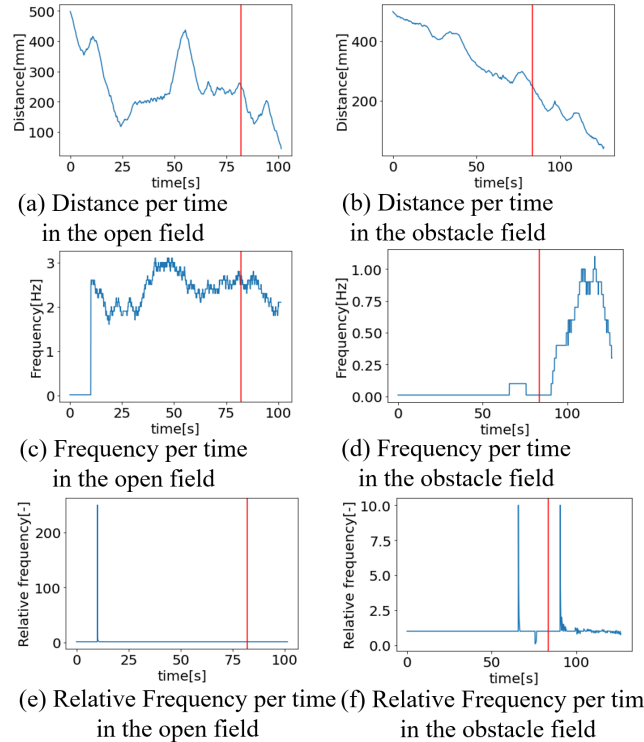


Fig.3 Estimated frequency and relative frequency calculated from ARX model. The red line means the last change in the area in which an individual exists.

### 3.2 空間的性質の解析と判別の結果

Obstacle Field の場合、カイコガが空間的要因によって生成される境界線の近くにいる時に匂い情報の周波数特性が大きく変化して (図 3(d)), 相対周波数からは特異点を観測することができた (図 3(f)). しかし、Open Field の場合、ARX モデルの初期待機時間を除けば CPT 探索中には周波数特性の変化及び相対周波数の特異点がないことが観測できた (図 3(c),(e)). この結果から生物は匂い情報検知周波数から環境を把握して行動方策を決定しているとの仮説をたてた。

### 3.3 CPT シミュレーション結果

上記の結果から各要素環境から適切にモデルを構築して、相対周波数の変化から環境を把握してモデルの切り替えを行う新しいモデルのアルゴリズムを提案できた (図 4). また、このアルゴリズムを用いて CPT シミュレーションを行い、両要素環境においての汎用性が大きく改善されたことが分かった (図 5). また、本研究では基準変動量を 30[%] と 50[%] に分けて実験を行い、50[%] の変動量を基準とした時がより優れた性能となることが分かった。

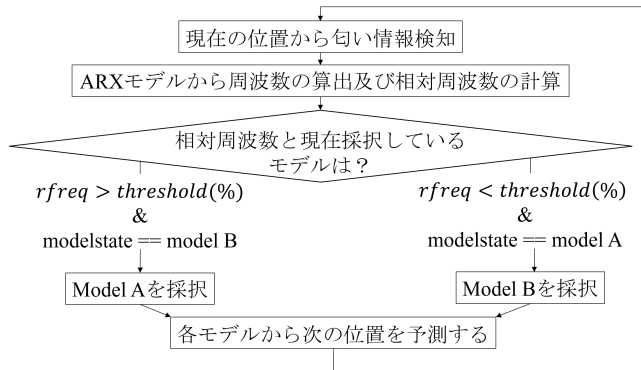


Fig.4 The algorithm for determining action plans with Relative Frequency autonomously

#### 4 考察

環境中の空間的要因から変化する匂い流れの特性を匂い流れの濃度値と周波数特性から調べることができて、環境中に障害物が存在する場合には Area A と Area B に分けてカイコガの行動データと匂い情報を獲得する必要があると考えられる。また、カイコガが CPT 中に受容する周波数特性と相対周波数が障害物の有無から大きく異なることと生物体の CPT 行動方策に匂い情報の検知周波数が大きい役割をとの報告 [6][7] から、本研究では自律的な行動方策の切り替えの条件として相対周波数を採択した、

上記のことから、Open Field からは全領域のデータを、Obstacle Field からは Area B のデータから独立にモデルを構築して相対周波数からモデルの切り替えを行って CPT するデータ駆動型による適応型生体模倣モデルを構築することが出来た。この新しいモデルを先行研究 [5] の単一データ駆動型生体模倣モデルと相互比較した結果、成功率の面からみると先行研究 [5] のモデルは Open Field での高い性能が Obstacle Field では維持できないことに対して、新しいモデルの場合には変動量の設定値に関わらず約 75[%] 以上の成功率を守ることができて、新しいモデルの方がより優れた性能を持つことが分かった (図 5(a), (b))。また、成功率と探索所要時間の割合の指標である SPT(Success rate Per unit Time) は高いほど良い性能を意味して、この SPT の面からみると Open Field ではモデル間の優位を決めることができないが、Obstacle Field ではモデルの切り替えを行うことがより優れた性能を持つことが分かった。特に、成功率及び SPT の面から相対周波数の水準として 50% と設定した時に他のモデルと比べて両要素環境において最も性能がいいことが分かった (図 5(c), (d))。

以上のことから、各要素環境で獲得したデータから相対周波数の変動量から自律的に行動方策を決定して CPT 探索することが両要素環境に有効であることが分かった。このことから、本研究で提案したモデルの切り替えのアルゴリズムが要素環境の組み合わせからなる複雑な環境にも有効に効く可能性があると考えられる。

#### 5 結 言

本研究では工学的に価値の高い CPT 問題を解決するために導入コストの低い生体模倣モデルに着目した。また、カイコガの CPT 実験から工学的モデルを導く際に空間的要因が及ぼし得る影響が分かって、空間的要因からカイコガが受容する匂い情報の周波数特性及び相対周波数が異なることが分かった。なお、モデルを相対周波数から切り替える適応型生体模倣モデルの提案ができて、新しいモデルの改善された実効性がシミュレーション環境から検証出来た。

しかし、実環境のエージェントに搭載して検証できていないため、実環境からの検証が必要であると考えられる。また、本研究では考慮する障害物の形状として円筒形を採択したが、実際の環境に存在すると予想される障害物の形状は多様であり、豊富な要素環境のデータから実際の環境に存在し得る障害物の形状に対応させるための工夫もし続ける必要がある。さらに、金網のように匂いは通過できるがエージェントは通過できない障害物に遭遇した際の対応方法も考案してデータ駆動型生体模倣モデルの汎用性



Fig.5 Comparison of the CPT performance (n=50)

をより高める必要があると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Vergassola, Massimo, Emmanuel Villermaux, and Boris I. Shraiman. " 'Infotaxis' as a strategy for searching without gradients." *Nature* 445.7126 2007: 406-409.
- [2] Pang, Shuo, and Jay A. Farrell. "Chemical plume source localization." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 36.5 2006: 1068-1080.
- [3] Chen, Xin-xing, and Jian Huang. "Odor source localization algorithms on mobile robots: A review and future outlook." *Robotics and Autonomous Systems* 112 2019: 123-136.
- [4] 下澤橋夫監集, "昆虫ミメティックス-昆虫の設計に学ぶ-" (株) エスティー エス 2008
- [5] Okajima, Kei, et al. "A novel framework based on a data-driven approach for modelling the behaviour of organisms in chemical plume tracing." *Journal of the Royal Society Interface* 18.181 2021: 20210171.
- [6] Demir, Mahmut, et al. "Walking Drosophila navigate complex plumes using stochastic decisions biased by the timing of odor encounters." *Elife* 9 2020: e57524.
- [7] Celani, Antonio. "Olfactory navigation: Tempo is the key." *Elife* 9 2020: e63385.
- [8] Shigaki, Shunsuke, Muhamad Rausyan Fikri, and Daisuke Kurabayashi. "Design and experimental evaluation of an odor sensing method for a pocket-sized quadcopter." *Sensors* 18.11 2018: 3720.