

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	昆虫脳情報処理に基づく匂い源探索における適応的行動選択過程の解明と工学的実現
Title(English)	
著者(和文)	志垣俊介
Author(English)	Shunsuke Shigaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10788号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:倉林 大輔,蜂屋 弘之,中島 求,塚越 秀行,田中 博人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10788号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	機械制御システム	専攻	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	志垣 俊介		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	倉林 大輔	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor (sub)		

## 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は「昆虫脳情報処理に基づく匂い源探索における適応的行動選択過程の解明と工学的実現」と題し、全6章より構成されている。

第1章では、本論文の研究背景および目的について述べている。化学感覚に基づく匂い源探索問題は、危険物検出・災害時探索・火災発見などに有用である一方、自律型ロボットによるリアルタイムの解決が難しい問題であることを述べている。その上で、本論文では普遍的に匂い源探索能力を持つ生物であるカイコガ雄成虫 (*Bombyx mori*) に着目し、その適応的行動選択過程をモデル化することにより解決を図ることを述べている。また、カイコガ雄成虫を採用した理由である、カイコガ雄成虫は羽化後、雌を探索する行動しかならないこと、その探索は空気を漂う性フェロモンによって行われるため、刺激入力が明確でありかつ匂い源探索問題に相当することを述べている。

第2章では、本論文の目的達成のための問題設定について述べている。まず、従来研究を概観し、カイコガ雄成虫は性フェロモンを受容すると、短時間の直進 (サージ) の後に回転 (ジグザグとループ) を行う「定型行動」を発現する、という知見が古くから知られていること、またこれを記号的に模倣した研究は既に存在するが、匂い源探索性能がカイコガ雄成虫に大きく劣る点を指摘している。その上で本論文では、神経応答の計測を基盤とする定量的な解析に基づいて、匂い源探索アルゴリズムの構築を図ることを述べている。

第3章では、匂い源探索行動中のカイコガ雄成虫が、どのような状況でどのように定型行動の構成要素である直進と回転を発現しているのか、定量的な解析を行っている。この目的のために、カイコガ雄成虫を拘束することなく刺激入力・行動出力の関係を計測可能な「3自由度サーボスフィア」なる新奇な実験装置を構築するとともに、飛翔筋活動電位に基づく直進・回転動作の弁別を実現している。これによって、行動計測での不確定要素を減じ、昆虫の動作を高精度・定量的に推定可能となった。この結果、従来は固定的とされてきた直進から回転、回転から直線への遷移が状況・履歴依存的事であることが示された。具体的には、初期の刺激受容に対して複数回の受容経験後は直進行動の持続時間が減少することが明らかにされた。

第4章では、刺激受容時に回転から直進行動へ遷移する確率について、脳神経活動に基づく解析を行った。従前の知見では、カイコガ雄成虫は回転行動中に匂い刺激を受容すると直進行動に切り替わるものとされてきた。一方、生物行動の観測においては、必ずしもそのような遷移が起こらないことが報告されていた。この現象が、疲労などによる知覚レベルのものなのか、行動選択レベルのものであるかを調べるため、本章では脳への電極刺入による感覚知覚状態の解析と行動出力との同時計測を行っている。染色に基づく刺入位置確認に基づく運動生成中枢の計測により、カイコガ雄成虫では刺激受容頻度および受容履歴に基づいて、回転から直進行動への遷移確率が動的に変化し、固定的に遷移するのではないことを明らかにした。すなわち、匂い源探索を支えるアルゴリズムにおける適応的行動選択過程の一部を明らかにすることに成功した。

第5章では、第4章までに得られた知見を自律型移動ロボットへ実装し、匂い源探索における機能的影響を構成的アプローチにより検証した。具体的には、回転から直進行動への遷移確率について、刺激受容頻度およびロボット状態量の関数としてモデル化し、シミュレーションを併用してパラメタの設計を行った。また、現実のカイコガが翅の羽ばたきにより前方の空気を積極的に吸気し後方からの匂い刺激を排除している、という身体的機能性を考慮した吸気系を設計し、ロボットへ搭載した。エタノールを用いた定位実験により、従前の記号的模倣アルゴリズムや行動遷移確率を一定としたアルゴリズムに比べ、本論文で構築したアルゴリズムが定位成功率・定位所要時間の双方において優れた性能を示したことを述べている。

第6章では、本論文の主要な成果をまとめ、今後の発展について考察している。

以上を要するに、本研究は昆虫が持つ化学感覚による空間認知機能を解明し、定型的・記号的な理解から脱して定量的・状況適応的アルゴリズム構築に至らしめ、自律型移動ロボットによる匂い源探索性能の向上を実現したものである。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	機械制御システム	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 Doctor of	( 工学 )
学生氏名 : Student's Name	志垣 俊介		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main)	倉林 大輔	
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

In this study, we focus on the chemical plume tracing (CPT) problem, which is known as an engineering challenge. CPT is to find an odor source using olfactory information in the atmosphere. An animal in nature solves CPT by adaptively modifying its behavior according to the environment. Therefore, we propose a CPT solution method with high engineering value by modeling the CPT algorithm of an animal. In this study, we employ a male silkworm moth as a model.

To perform CPT in a turbulent environment, selecting the behavior adaptively plays an important role. Therefore, we first examined which behavioral modifications does the moth make during CPT. In order to evaluate behaviors quantitatively, we analyzed the CPT behavior based on flight muscle electromyogram, which is highly correlated with walking. As a result, the behavior that utilizes the odor stimulus had a significant difference between the beginning and ending of CPT. Next, we carried out simultaneous measurement experiments between CPT behavior and brain and analyzed the link between brain neural activity and behavioral patterns to clarify whether the same phenomenon occurs at a higher level such as the brain. We measured the brain neural response from LAL (Lateral Accessory Lobe) which generates the motion command. We employed a 20  $\mu\text{m}$  electrode so as not to damage the brain. As results of the relationship analysis of CPT behavior and LAL, we found that the moth modulates the behavior state transition probability depending on the number of stimuli or their frequency.

We modeled the obtained phenomenon and verified its effectiveness by using a constructive method. As a result, the search performance was improved compared to the conventional moth algorithm. This means that we elucidated the aspect of the behavior modulation mechanism.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).