

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02104

研究課題名（和文）感覚と行動への介入装置を用いた生物の匂い源探索行動に対する適応システム解析

研究課題名（英文）Analysis of adaptive mechanisms in chemical localization behavior of animals by using novel devices to intervene in sensory and motor functions

研究代表者

倉林 大輔（KURABAYASHI, Daisuke）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00334508

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、生物が発揮する適応的な振る舞いを工学的に応用可能とすることを目的とした。生物の状況適応的な行動変容、異種情報の統合過程および行動修飾等を解析し、化学物質源探索という機能性を自律ロボットの構築および制御アルゴリズム実装により達成した。仮想現実型実験装置等による計測・逆強化学習等による情報処理解析により、障害物を含む環境において効率的な探索性能を維持できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、仮想現実を用いた新奇な計測手法等を開発し、生物の複数刺激と行動の連関を多様に計測可能とした。この結果に、ガウス過程回帰や逆強化学習を用いて抽象レベルの行動選択表現を獲得した。単に見た目の行動を模擬するのではない生物規範型行動アルゴリズムを構築した点に学術的意義がある。化学物質源追尾は多くの社会的応用が期待されており、ロボットによる実現に資する成果を得た点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research aims to reveal the mechanism of adaptive action selection exhibited by animals based on multiple sensory so that we can improve performance of robots for chemical plume tracing tasks. Through developments of novel experimental systems, such as a virtual-reality treadmill or a wind tunnel with embedded chemical sensors, we observed various situation-dependent behaviors exhibited by model animals. By informative analysis, such as inverse reinforcement learning or Gaussian regression, we build motion algorithms and implemented a chemical searching robot that works effectively not only in a free space but also obstacle regions.

研究分野：知能機械システム

キーワード：生物規範システム 適応的行動選択 匂い源探索

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昆虫のような、体が小さく神経系も小規模な生き物であっても、状況に応じて適切に異種感覚を統合的に確に行動を選択できる。現在の自律ロボットにはこのような能力が欠けており、人間社会や自然環境の中でこれらを活動させる上で障害となっている。

適応的な行動選択が求められる事例として、空気中を漂う化学物質を手掛かりにその源を探す「匂い源探索」問題がある。これは、危険物の検出や災害時の被災者探索に有効であることから、申請者らを含む多くの研究者により様々な研究が行われている。しかしながら、構築された匂い源探索ロボットは、探索成功率や環境不確定性への適応能についていまだ現実の生物に匹敵する結果を残せていない。

生物とロボットの対比においては、感覚器(センサ)の性能に言及される例が多いが、一部の感覚器が損傷しても頑健に機能を発揮する点に生物の特徴がある。この能力は、身体・環境の物理的な構造や異種感覚の相補的利用、状況依存的な行動選択の変化などによって支えられている、と申請者は仮説を立てた。

このような生物的情報処理を支えるシステム構造が明らかになることで、化学探索ロボットの実現という工学的価値も実現されると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、生物が普遍的に有する匂い源探索行動に着目し、昆虫をモデル生物として、生物的情報処理を支えるシステムの構造を明らかにすることを目的とする。また、その成果の帰結として、自律移動ロボットをベースに化学物質源探索システムを実装し、その性能を検証する。これにより、生物が持つ状況適応的な行動発現能力の解明に寄与するとともに、工学的価値を実現する。

3. 研究の方法

本研究は、カイコガ(*Bombyx mori*)雄成虫をモデル生物とする。その理由は、性フェロモンを手掛かりとして明確な雌カイコガ探索行動をとること、世代交代サイクルが短く遺伝的操作の適用を含め多様な生物学的知見があること、痛覚を有しないとされ強侵襲的な計測・実験が可能であること、である。

研究は大きく分けて(1)異種感覚刺激の網羅的な入力とその応答が計測可能な新規な計測系の実現、(2)適応的行動選択過程の情報論的解析と行動アルゴリズムの推定、(3)匂い源探索自律ロボットの構築・アルゴリズム実装と検証実験、により構成した。

(1)では、刺激入力と行動発現の関係を多面的に計測可能とする実験系を構築する。具体的には、化学刺激・力覚(気流知覚)・視覚をリアルタイムかつ任意にモデル生物へ提示可能な実験装置、自由行動中のモデル生物が遭遇する刺激入力と行動出力の関連を計測可能な実験系、等を構成する。これらによって、モデル生物において刺激の種類およびそれらの相関、並びに受容履歴と行動発現がどのような相関を有するか解析可能とする。

(2)では、(1)で得られた生物の行動選択過程について、情報論に基づく解析を行う。これによって、形状や大きさがモデル生物とは異なるロボットに対して、抽象化された生物の適応的行動選択に関する知見を獲得する。具体的には、逆強化学習による状態価値推定、ガウス過程回帰による知覚履歴と行動変容の相関推定、情報エントロピー推定に基づく行動出力分布遷移解析、等によって、どのような感覚知覚状態が有効な結果に結び付くと推定されるのかについて明らかにする。

(3)では、(2)までに得られた情報を小型移動ロボットへ組み込み、実環境にて匂い源探索実験を行う。実験系によって得られた状態価値の推定値に対して強化学習を再適用することで、ロボットに適した形での行動アルゴリズムを構築する。情報エントロピー推定量と行動出力分布の遷移から異種アルゴリズムへの切り替えを導入する、等の手法により、大きさや形状がモデル生物と大きく異なるロボットに対する、生物規範型行動アルゴリズムの再構成を可能とする。アルゴリズムの検証として、単純な形状の風洞のみならず、障害物を設置し気流を乱した環境における匂い源探索能力についても性能を評価し、適応的な行動選択過程がロボットにおいて実現されたか確認する。

4. 研究成果

(1) 新規な計測系の実現

本研究では、仮想環境と接続し多様なシナリオで複数の感覚入力を提示でき、その際の行動出力を精緻に計測可能な仮想現実型実験系(図1)、モデル生物の行動を追跡しながら同時に化学物質分布を推定することで、感覚入力履歴と自由行動の関係を計測可能な実験系(図2)等の新規な計測系を実現した。前者では、球体トレッドミル上にモデル生物を固定し、プッシュプル吸排気系による化学刺激提示・風刺激提示、LEDアレイによる視覚刺激を同時に提示可能とし、コンピュータ上の仮想環境における実験シナリオに沿って網羅的な応答計測を可能とした。後者では、床面に化学センサを敷き詰め、リアルタイムに化学物質の拡散状況を計測しながらガウス過

程回帰により空間補間を行うことで、モデル生物が受容した化学刺激履歴を計測・推定可能とした。

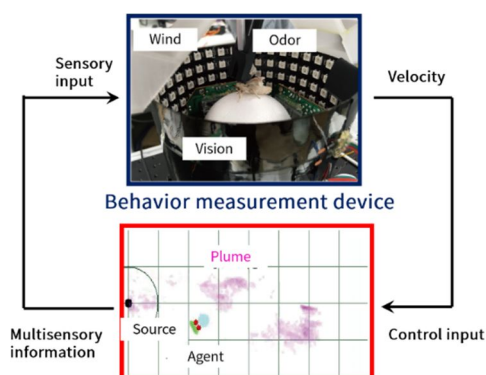


図 1：仮想現実型実験系

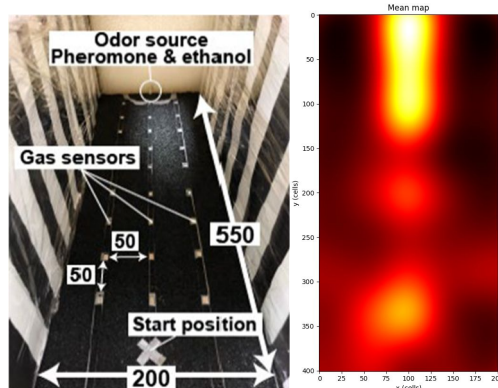


図 2：感覚入力履歴と自由行動の同時計測系

(2) 適応的行動選択過程の情報論的解析と行動アルゴリズムの推定

(1) で得られた生物の行動選択過程を利用し、匂い源探索行動における状態価値や探索過程の情報エントロピによる評価、さらには情報エントロピと発現行動分布の解析を行い、情報論的な側面からモデル生物の状況依存的行動選択について、解析を行った。モデル生物を用いた行動計測実験結果に逆強化学習を適用し、行動中の状態に対する価値関数を推定することで、モデル生物が一連の行動中にどのような感覚知覚状態が有効な匂い源探索結果に結び付くと考えうるのかについて推定できた。並行して、複数の行動アルゴリズムを仮定した上で、モデル生物の匂い源探索課程における情報エントロピを推定した。これにより、情報エントロピを探索進行度合いの基準として、アルゴリズムの切り替えが生じうることを明らかにした。

(3) 匂い源探索自律ロボットの構築と検証実験

ここでは、(2) までに得られた情報を小型移動ロボットへ組み込み、実環境にて匂い源探索実験を行った。単純な形状の風洞のみならず、障害物を設置し気流を乱した環境における匂い源探索能力についても検証し、適応的な行動選択過程がロボットにおいて実現されたか確認した。具体的には、構築したロボットは化学センサのほか、風向風速センサおよびレーザー距離計を搭載し、周囲の領域形状推定・自己位置推定を行いながら化学刺激の受容状況・風向風速センサに基づく匂い分布推定を行い、情報エントロピによる探索状態の評価を行いながら適宜行動アルゴリズムを切り替え、匂い源探索の推定を可能とした(図3)。この結果、単純な形状の風洞のみならず、障害物を設置し気流を乱した環境における匂い源探索能力についても検証し、適応的な行動選択過程がロボットにおいて実現されたことが確認できた。

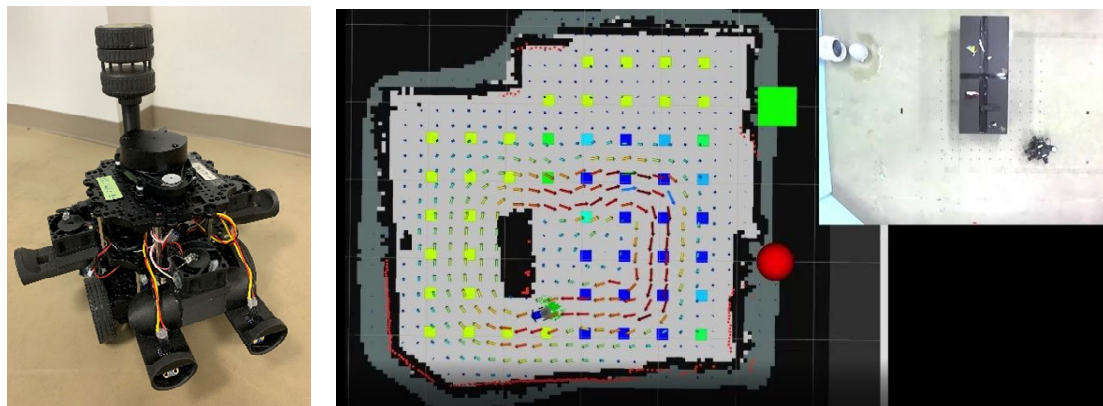


図 3：構築した自律移動ロボット（左）による匂い源探索実験（右）。レーザー距離計を用いて環境形状を測定しながら風向センサにより環境中の気流を推定し、得られた化学センサ応答から匂い源の位置を確率的に推定することで行動を決定する。右図の正方形は動作中のロボットが匂い源の存在確率を推定した値を色で示しており、明るい色ほど可能性が高いと判断している状況を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hernandez-Reyes Cesar A., Fukushima Shumpei, Shigaki Shunsuke, Kurabayashi Daisuke, Sakurai Takeshi, Kanzaki Ryohei, Sezutsu Hideki	4. 巻 15
2. 論文標題 Identification of Exploration and Exploitation Balance in the Silkworm Olfactory Search Behavior by Information-Theoretic Modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fncom.2021.629380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shigaki Shunsuke, Ohashi Hirono, Sakurai Takeshi, Shimizu Masahiro, Hosoda Koh, Kurabayashi Daisuke	4. 巻 4
2. 論文標題 Real-Time Odor Discrimination Using Single Antenna of Insect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Letters	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LSENS.2020.3024606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 OKAJIMA Kei, SHIGAKI Shunsuke, SANADA Kazushi, KURABAYASHI Daisuke	4. 巻 86
2. 論文標題 Flicking: variable sampling method for chemical plume tracing by an autonomous robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shigaki Shunsuke, Shiota Yusuke, Kurabayashi Daisuke, Kanzaki Ryohei	4. 巻 28
2. 論文標題 Modeling of the Adaptive Chemical Plume Tracing Algorithm of an Insect Using Fuzzy Inference	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Fuzzy Systems	6. 最初と最後の頁 72~84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TFUZZ.2019.2915187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigaki Shunsuke, Okajima Kei, Sanada Kazushi, Kurabayashi Daisuke	4. 巻 4
2. 論文標題 Experimental Analysis of the Influence of Olfactory Property on Chemical Plume Tracing Performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2847 ~ 2853
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2921948	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigaki Shunsuke, Haigo Shoma, Hernandez Reyes Cesar, Sakurai Takeshi, Kanzaki Ryohei, Kurabayashi Daisuke, Sezutsu Hideki	4. 巻 14
2. 論文標題 Analysis of the role of wind information for efficient chemical plume tracing based on optogenetic silkworm moth behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 046006 ~ 046006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/ab1d34	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okajima Kei, Shigaki Shunsuke, Suko Takanobu, Luong Duc-Nhat, Hernandez Reyes Cesar, Hattori Yuya, Sanada Kazushi, Kurabayashi Daisuke	4. 巻 18
2. 論文標題 A novel framework based on a data-driven approach for modelling the behaviour of organisms in chemical plume tracing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of The Royal Society Interface	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsif.2021.0171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hernandez-Reyes Cesar, Shigaki Shunsuke, Yamada Mayu, Kondo Takeshi, Kurabayashi Daisuke	4. 巻 4
2. 論文標題 Learning a Generic Olfactory Search Strategy From Silk Moths by Deep Inverse Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics	6. 最初と最後の頁 241 ~ 253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMRB.2021.3129113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Mayu, Ohashi Hirono, Hosoda Koh, Kurabayashi Daisuke, Shigaki Shunsuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Multisensory-motor integration in olfactory navigation of silkworm, Bombyx mori, using virtual reality system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7554/eLife.72001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shigaki Shunsuke, Minakawa Natsuki, Yamada Mayu, Ohashi Hirono, Kurabayashi Daisuke, Hosoda Koh	4. 巻 33
2. 論文標題 Animal-in-the-loop System with Multimodal Virtual Reality to Elicit Natural Olfactory Localization Behavior	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 4211 ~ 4211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2021.3609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Kei Okajima, Shunsuke Shigaki, Kazushi Sanada, Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題 Chemical plume tracing model learning from insect behavior
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mayu Yamada, Shunsuke Shigaki, Hirono Ohashi, Masahiro Shimizu, Koh Hosoda, Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題 Measurement and Analysis of Odor Source Search Behavior of Insect Using Virtual Reality System
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	Cesar Hernandez Reyes, Kei Okajima, Shunsuke Shigaki, Daisuke Kurabayashi, Kazushi Sanada
2. 発表標題	Combination of Reinforcement Learning and Bio-inspired Odor Source Searches under a Time-Variant Gas Mapping
3. 学会等名	IFAC 2020 World Congress (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	山田真由, 大橋ひろ乃, 倉林大輔, 細田耕, 志垣俊介
2. 発表標題	昆虫の匂い源探索行動における異種感覚の機能解析と検証
3. 学会等名	第33回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	岡島慶, 志垣俊介, 眞田一志, 倉林大輔
2. 発表標題	匂い刺激入力と匂い源探索行動の同時計測システムの構築
3. 学会等名	第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Mayu Yamada, Shunsuke Shigaki, Hirono Ohashi, Masahiro Shimizu, Koh Hosoda, Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Odor Source Search Behavior of Male Silkworm depend on the Wind Information
3. 学会等名	日本比較生理生化学会 第42回山形大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Ryota Yanagawa, Kai Kurabayashi, Kei Okajima, Shunsuke Shigaki, Yuya Hattori, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Variable Capture-Angle Sampling for Chemical Plume Tracing by an Autonomous Mobile Robot
3. 学会等名	IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Kei Okajima, Shunsuke Shigaki, Cesar Hernandez Reyes, Kazushi Sanada, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Analysis of the Effect of Sampling Strategy: Flicking for Chemical Plume Tracing by an Autonomous Robot
3. 学会等名	IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Shunsuke Shigaki, Kei Okajima, Kazushi Sanada, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Experimental Analysis of the Influence of Olfactory Property on Chemical Plume Tracing Performance
3. 学会等名	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Haigo Shoma, Shunsuke Shigaki, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Bio-Inspired Behavior Modulation of Chemical Plume Tracing Robot based on Wind Information
3. 学会等名	IFAC 1st Workshop on Robot Control (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Cesar Hernandez Reyes, Shumpei Fukushima, Shunsuke Shigaki, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Fusion of Cognitive and Reactive Algorithms for Chemical Plume Tracing on an Autonomous Mobile Robot
3. 学会等名	SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	志垣俊介, 倉林大輔
2. 発表標題	昆虫の嗅覚ナビゲーション行動解析のための感覚介入システム
3. 学会等名	第32回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	見越郁也, 志垣俊介, 服部佑哉, 倉林大輔
2. 発表標題	空気中の化学刺激受容における移動速度に依存した情報抽出に関する実験的検討
3. 学会等名	計測自動制御学会SI2019講演会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Kei Okajima, Shunsuke Shigaki, Takahiro Chiba, Cesar Hernandez Reyes, Kazushi Sanada, and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題	Analysis of the Female Searching Behavior in Silkworm Moth by Simultaneously Measuring the Change of Odor Distribution
3. 学会等名	日本比較生理生化学会第41回東京大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 志垣俊介, 岡島慶, 眞田一志, 倉林大輔, 清水正宏
2. 発表標題 嗅覚応答特性が与えるナビゲーション性能への影響評価
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡島慶, 志垣俊介, 眞田一志, 倉林大輔
2. 発表標題 平行リンク機構を用いた能動的なサンプリング範囲切り替えシステム構築 - 匂い源探索における効果検証 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志垣俊介, 眞田一志, 倉林大輔
2. 発表標題 昆虫の適応行動理解のための移動型トレッドミルの構築
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunsuke Shigaki, Kei Okajima, Kazushi Sanada and Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題 Insect-Inspired Odor Intake Method for Chemical Plume Tracing in an Outdoor Environment
3. 学会等名 The 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mayu Yamada, Hirono Ohashi, Daisuke Kurabayashi, Koh Hosoda and Shunsuke Shigaki
2. 発表標題 Investigation of Wind Influence on Odor Source Search Behavior of Silkmoth by Virtual Reality System
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mayu Yamada, Hirono Ohashi, Koh Hosoda, Daisuke Kurabayashi, and Shunsuke Shigaki
2. 発表標題 Speed Modulation Mechanism of Insect by Integrating Odor and Wind Sensory Information during Odor Source Localization
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Duc-Nhat Luong, Daisuke Kurabayashi
2. 発表標題 Switch planning algorithms for odor source localization in obstacle region based on the entropy gain rate of information
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤 壮, Cesar Hernandez Reyes, 服部 佑哉, 山田 真由, 志垣 俊介, 倉林 大輔
2. 発表標題 逆強化学習を用いたカイコガの匂い源探索における報酬関数および行動戦略の推定
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 皆川 夏希, 山田 真由, 大橋 ひろ乃, 細田 耕, 倉林 大輔, 志垣 俊介
2. 発表標題 昆虫の嗅覚ナビゲーションシステム解明のための遠隔操作系の確立
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	志垣 俊介 (Shunsuke Shigaki) (50825289)	大阪大学・基礎工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	服部 佑哉 (Hattori Yuya) (30709803)	呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・准教授 (55401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------