

令和 4 年 4 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14943

研究課題名（和文）全方位移動型トレッドミルによる昆虫の適応的行動選択指標の獲得と工学的再現

研究課題名（英文）Acquisition and Reproduction of Adaptive Behavioral Selection Indexes in Insect Using Omnidirectional Moving Treadmill

研究代表者

志垣 俊介 (Shigaki, Shunsuke)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：50825289

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、昆虫の雌定位行動を題材として、昆虫が有する状況適応的な行動選択指標の獲得に取り組んだ。全方位移動型昆虫トレッドミルという新奇の行動計測装置を構築し、昆虫に与える感覚刺激と昆虫が出力する行動に介入する実験を行った。運動への遅れを設定した場合、感覚フィードバックにより行動を補正していること、また感覚に対して遅れ時間を設定した場合、感覚入力のスレを補正しようと積極的な探索行動が発現するという結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果によって、人工システムが不得意とするむだ時間に対して、小規模な神経系で構成される昆虫がどのように対処しているのかを全方位移動型トレッドミルと呼ぶ新奇な実験系を通して知ることになった。介入系を用いてさらに実験・解析を進めることで、小規模な神経系でありながら適応的な振る舞いを支える内部コントローラを解き明かすことが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I addressed the acquisition of situational dependent behavior selection indicators of an insect, using the female localization behavior of a silkworm as the target. I developed a novel behavior measurement device, an omnidirectional moving treadmill for the insect, and carried out experiments in which I intervened in the sensory stimuli given to the moth and its output behavior. I found that when setting a delay time to the movement, the behavior was compensated by sensory feedback, and when setting a delay time to sensory input, active searching behavior occurred in order to compensate for the discrepancy in sensory input.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：全方位移動型トレッドミル 雌定位行動 生物模倣型ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化によって人材確保が困難になっている我が国では、その打開策として自律ロボットによる省人化に注目が集まっている。しかし、現状の自律ロボットは工場のような事前に想定された環境に対しては高効率にタスクを実施可能であるが、人間との共存、もしくは自然環境中でロボットを用いることは未だ実現されていない。これを実現させるためには、多様な環境情報に基づき適切に行動を選択することが重要である。

自然界の生物、特に昆虫は全身で 10 万個程度の神経細胞しか有さず、それらの応答速度は数 100Hz 程度であるにも関わらず、リアルタイムに状況を判断し、餌場や交配相手を探索する優れた能力を有している。昆虫は多様な感覚器によって周囲の環境や自身の身体状況を把握し、適応的に行動選択を行っている。この昆虫の適応能力は細胞生理学や生化学等により網羅的に調べられてきたが①、行動中の感覚入力や脳神経応答と行動選択の連関モデル及びその機能性については計測が難しく、解明が十分ではなかった。昆虫の適応能は環境及び身体の特性と神経情報処理の相互作用から生じると考えられる。

そこで本研究では、昆虫を取り巻く環境・身体・脳神経系の関係を維持した状態で、神経行動学によりその関係性を同時に計測する。また、神経行動学データは情報熱力学の観点から解析を行うことで、なぜこの状況下でその行動を選択したのか、という点を定量的に評価する。生物の行動出力は環境とのインターフェイスである身体を通じて情報を獲得し、脳神経系がそれを処理し、身体を制御した結果である。従来の統計的手法解析では、昆虫の感覚入力から運動制御までの一連の情報処理メカニズムを解明することはできても、適応的な行動選択という背景まではわからない。そこで、生物の探索行動を情報熱力学におけるエントロピー(情報エントロピー)によって解析することで、生物の探索行動が最適化問題を解くかのように情報の不確実さを最小にする方向(匂いの発生源がありそうな方向)に行動選択をしているかどうかを解析できると期待できる。これらの手法により、昆虫の持つ適応的な行動選択過程を獲得でき、昆虫のように極限環境で作業可能なロボットシステムの実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、昆虫の匂い源探索行動を題材に、適応的な行動選択指標の獲得を目指す。昆虫は周囲の匂い情報を頼りにその発生源を特定する能力を普遍的に有しており、彼らは刺激入力に対して行動を選択する際の優れた状況的適応性を有している。この状況適応性を解明するためには、昆虫が身体・環境の特性をどのように活用しているかを知る必要がある。そのためには、脳神経情報処理系の判断と実際に発現した行動、さらには行動により生成されたフィードバックを昆虫がどのように受け取っているのかを正確に弁別して解析する必要がある。

したがって本研究では、リアルな環境移動中の行動を計測しつつ、昆虫の感覚系や運動系に介入可能な新奇の全方位移動型トレッドミルを構築し、昆虫のシステム構造を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、昆虫が嗅覚を手掛かりに餌場や交配相手等の匂い源へ到達・定位する行動①に注目し、不確実性の高い環境に対する状況的適応的な行動選択過程のモデル化とその機能的貢献について明らかにする。モデル生物にはカイコガ雄成虫(以降、単にカイコガと記す。)を用いる。その理由として、カイコガは小さな身体にも関わらず大きな行動能力を有すること、嗅覚刺激入力に対する行動出力が明瞭であること、である。

カイコガは、性フェロモンを頭部にある触角で検知すると定型的な行動パターンを発現することで、匂い源である雌に定位可能である。このとき、カイコガは単純に定型的行動パターンを繰り返しているのではなく、状況に応じて行動パターンを選択もしくは調整することで探索性を向上させていることが示唆されている。しかし、どのような状況下でこういった行動調整を行っているか、については未だ明らかになっていない。これを解明するためには、状況適応的な行動選択過程の背景を探る必要がある。そこで本研究では、環境・身体・脳神経系の関係を維持した状態でカイコガの感覚系と運動系に介入可能な全方位移動型トレッドミルの構築と介入操作を行なった際のカイコガの応答計測および解析を実施した。

4. 研究成果

本研究の成果は主に、(1)感覚系と運動系に介入可能な全方位移動型トレッドミルの構築、(2)感覚-運動系への介入を行なった際の対象生物の応答解析である。

(1) 感覚系と運動系に介入可能な全方位移動型トレッドミルの構築

本研究では「全方位移動型トレッドミル」と呼ぶ新たな実験装置を提案した(図 1)。この装置は計測対象の行動出力を計測しながら、昆虫の行動を正しく実験装置の駆動系に反映するこ

とで、匂い源探索というタスクを達成する。カイコガは六足歩行運動により移動することから進行方向だけでなく進行方向と直交する横方向の運動も考慮する必要がある。そこで、トレッドミルの駆動系には全方向に移動可能なオムニホイールを採用し、昆虫の移動量を制約条件無しに正確に反映することを可能とした。また、全方位移動型トレッドミルにはカイコガと同様に二つの化学感覚センサを搭載しており、この二つの化学感覚センサの応答によってカイコガに性フェロモン刺激を提示した。カイコガは性フェロモンの受容状況に応じて行動を変化させるが、この行動変化は球体型のトレッドミルによって観測され、全方位移動型トレッドミルの駆動系へと伝達される。これにより、自由歩行実験のようにリアルな環境を移動しながら、匂い刺激入力と行動出力の連関関係を高精度に計測可能とした。

(2) 感覚-運動系への介入を行なった際の対象生物の応答解析

上記の全方位移動型トレッドミルを用いて対象生物の雌定位行動を計測した。実験に際して、カイコガに提示する感覚刺激および運動出力に対して遅れ時間を設け、むだ時間に対するカイコガのシステム構造を検討した。具体的には化学感覚センサが匂いを検知してから、ある時間経過した後にカイコガに性フェロモンを提示する実験（感覚への遅れ）、カイコガの運動を一定時間経過した後に駆動系に伝達する実験（運動への遅れ）を行なった。遅れ時間はそれぞれ 600, 400, 200 ms と設定した。実験を行なった結果、運動への遅れを設定した場合は探索性能の低下が低かったが、感覚への遅れを設定した場合、遅れがない実験条件に比べて探索成功率が半分まで低下した。これは、カイコガには強力な感覚フィードバック系が備わっており、運動が多少遅れたとしても補正を行う制御器が内在していることが示唆された。一方、感覚入力に対する遅れが大きくなるにつれて入力を推定することが困難となることから、カイコガ内部のシステムに劣化が生じていると考えられる。匂い入力に対する行動変化を詳細に検討するために、匂い刺激前後の速度変化を解析した。その結果、感覚への遅れがある場合、運動への遅れがある場合に比べて、匂い刺激を受けた直後に回転運動を激しく行うことが明らかとなった。これは、感覚入力とのズレを補正しようと積極的な回転による探索行動に遷移している可能性が示唆された。

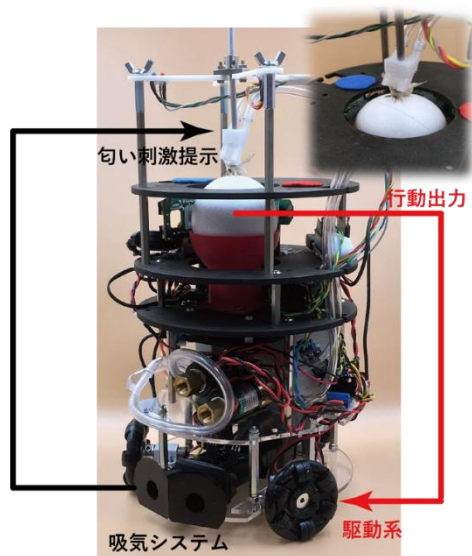


図 1: 構築した全方位型トレッドミル

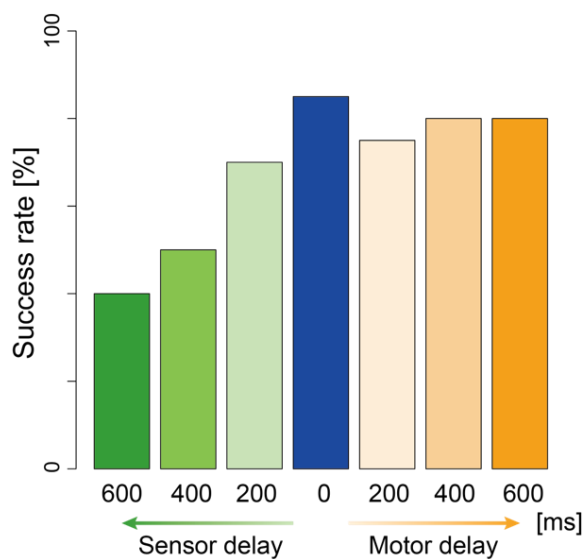


図 2: 感覚-運動介入時の探索成功率

<引用文献>

- ① Namiki, S., and Kanzaki, R. (2016). The neurobiological basis of orientation in insects: insights from the silkworm mating dance. *Current opinion in insect science*, 15, 16-26.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

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/LSSENS.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 Yanagisawa Ryota, Shigaki Shunsuke, Yasui Kotaro, Owaki Dai, Sugimoto Yasuhiro, Ishiguro Akio, Shimizu Masahiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Wearable Vibration Sensor for Measuring the Wing Flapping of Insects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 593~593
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21020593	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 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 15:629380
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 Yamada Naoki, Ohashi Hirono, Umedachi Takuya, Shimizu Masahiro, Hosoda Koh, Shigaki Shunsuke	4. 巻 33
2. 論文標題 Dynamic Model Identification for Insect Electroantennogram with Printed Electrode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 4173~4173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2021.3116	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 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 19-00340
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 M. Yamada, S. Shigaki, H. Ohashi, M. Shimizu, K. Hosoda, D. 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 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Okajima, S. Shunsuke, K. Sanada, D. Kurabayashi
2. 発表標題 Chemical Plume Tracing Model Learning from Insect Behavior
3. 学会等名 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunsuke Shigaki
2. 発表標題 Understanding insect search behavior through robot intervention
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千葉崇宏, 志垣俊介, 眞田一志, 倉林 大輔
2. 発表標題 昆虫の触角電位応答に基づく匂い弁別システムの設計
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 2020年

1. 発表者名 山田真由, 志垣俊介, 大橋ひろ乃, 清水正宏, 細田耕, 倉林大輔
2. 発表標題 バーチャルリアリティシステムを用いた昆虫の匂い源探索行動の計測と解析
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 2020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SI部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田直輝, 細田耕, 志垣俊介
2. 発表標題 昆虫触角の応答特性の変化についての解析
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会SI部門講演会
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視覚・風向情報の役割解析
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 N. Yamada, S. Shigaki, M. Shimizu, H. Ohashi, T. Umedachi, T. Ogura and K. Hosoda
2 . 発表標題 Electroantennography Measurement by Printed Electronics Electrode
3 . 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Okajima, S. Shunsuke, C. Hernandez Reyes, K. Sanada and D. 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 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

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

1 . 発表者名 S. Shigaki, K. Sanada, and D. Kurabayashi
2 . 発表標題 Development of Omnidirectional Mobile Treadmill for Neuroethology
3 . 学会等名 Living Machines 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Shigaki, K. Okajima, K. Sanada, and D. 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 (IROS) 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志垣俊介
2. 発表標題 構成的手法による昆虫嗅覚ナビゲーション戦略の理解
3. 学会等名 令和元年度第三回ブレインウェア工学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志垣俊介，清水正宏，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 N. Yamada, S. Shigaki, M. Shimizu, H. Ohashi, T. Umedachi, T. Ogura and K. hosoda
2. 発表標題 Experimental Verification of Printed Electrode for Electroantennogram
3. 学会等名 The 41th Annual Meeting Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okajima, S. Shigaki, T. Chiba, C. Hernandez Reyes, K. Sanada and D. 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 The 41th Annual Meeting Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry
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2019
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 Shunsuke Shigaki
2. 発表標題 Analysis of insect navigation behavior modulation mechanism using multimodal virtual reality
3. 学会等名 The 43th annual meeting of the Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Yamada, H. Ohashi, K. Hosoda, D. Kurabayashi, and S. 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 AROB-ISBC-SWARM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳澤亮太, 志垣 俊介, 清水正宏, 細田 耕
2. 発表標題 匂い源探索における昆虫の羽ばたき機能の構成的検証
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 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人ページ
<https://sshigaki.jimdofree.com/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------