

令和 6 年 9 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18697

研究課題名（和文）ちょうどいい知能：線虫群を規範とする低情報処理資源ロボット群の行動アルゴリズム

研究課題名（英文）Just the right intelligence: Low Computational Cost Action Selection Algorithm of a Robotic Swarm based on Nematodes

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、線虫*C. elegans*に着目し、これに基づいてロボット群の協調的かつ効率的な行動アルゴリズムを構築することを目的とする。線虫の化学走性行動を追跡観察可能なシステムを構築し、近傍の線虫密度と行動選択確率の関係について推定した。これに基づいて探索効率が高い集団の行動モデルを構築し、自律型移動ロボットへ実装可能なアルゴリズムを構築した。ベンチマーク関数を用いたシミュレーションにより、構築したアルゴリズムが探索効率向上に寄与していることを示した。これにより、効率的な自律型ロボットシステムの構成方法確立に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自律移動体が近傍状況に基づき自主的動作選択で協調的行動を可能にすることは、社会の隅々まで知能機械が用いられる近未来において、省通信資源・省計算エネルギーの面で重要である。本研究では、神経細胞を302個しか有しないが学習を含む適応的行動が可能な線虫*C. elegans*に着目し、これに基づいてロボット群の協調的かつ効率的な行動アルゴリズムを構築した。結果として、局所的な情報にのみ基づく行動でも協調行動の効率を向上させることができた。このことは、限られた計算・通信資源で行動様式を適応的に変容させる自律型ロボットシステムの構成方法解明に貢献するものだと考える。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to construct an algorithm for a robotic swarm that enables adaptive and efficient cooperative behavior. By focusing on the nematode *C. elegans*, we observed chemotactic behaviors and identified their dependency on the local density of animals. Despite having only 302 neural cells, *C. elegans* can modify their behaviors adaptively. We believe *C. elegans* serves as a relevant model for adaptive robotic swarms. Based on our observations, we formulated a probabilistic behavior selection model depending on the local density and verified it through simulations using benchmark potential functions. As a result, we found that the proposed algorithm improved search efficiency, relying solely on local information. We concluded that this study contributes to the development of a control system for autonomous robotic swarms that enables efficient behavior selection, by which communication or computation costs are reduced.

研究分野：制御工学

キーワード：生物規範システム 自律ロボット 線虫

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

それぞれが自立し自律的に行動する主体が複数集まり、自己組織的に協調して目的を達成する。このような人工システムは Swarm Intelligence あるいは Swarm Robotics と呼ばれ、古くから追及されてきた。

近年では、無線通信技術の発展により多数の無人飛行体(ドローン)を用いて空中に映像的表現を行うことなどが可能になってきた。これらのシステムでは、限られた行動空間の中で飛行体の情報管理は集中的に地上の制御システムとの通信で行われており、その管理・制御に用いられる電波資源・電力資源は決して小さくない。我々の社会の様々な要素が知能化されようとする近未来社会においては、これら情報処理に用いられる負荷を低減しながら機能を果たすシステムが必要となると申請者は考えた。

情報処理分野においては、クラウドサーバと通信する前に現場で情報処理を行うエッジコンピューティングシステムが研究されている。ロボットシステムにおいても、周囲環境の物理化学的特性や集団内協調を活用するアルゴリズム設計によって、情報処理資源を抑制しながら機能的行動を達成しうるロボットシステムの設計論が構築可能になる、と申請者らは仮説を持った。

生物は自立した自律エージェントの規範的存在である。そこで、神経細胞数が少ない、すなわち情報処理資源が少ないながら一定の機能性、例えば化学探索能力を有する生物をモデルに選び、これの行動決定アルゴリズムを推定しながら人工移動体の行動アルゴリズムを構築することで、目的行動に対して「ちょうどいい知能」が設計されることで、先述の問題解決に対する道筋が得られるものと期待できる。

### 2. 研究の目的

適用環境や作業内容に対して「ちょうどいい知能」はどのように設計されうるのか? 本研究は、極めて限られた情報処理資源(計算・通信・移動能力)しか有しない線虫 *C. elegans* に着目し、自律ロボット群の協調的かつ効率的な探索行動アルゴリズムを構築することを目的とする。

*C. elegans* は体長 1mm 程度の小さな生物で、神経細胞を 302 個しか有しないが、学習を含む適応的行動が可能であることが分かっている。さらに、他個体との関係に基づく行動様式に多型性を有する。そこで本研究は、線虫群についてその行動様式を計測し、個体間相互作用を含むモデルを立式する。そのうえで、相互作用項の差異と採餌・繁殖等のための探索行動効率との状況依存的な関係を確率的・決定論的モデルの両面から解析する。これらを自律型ロボット群の制御アルゴリズムへと転換し、限られた情報処理資源と単純な相互作用による探索行動アルゴリズムを構築する。これによって、高度な情報処理資源に依存しない、効率的なロボット群システムの構成方法を明らかにする。

具体的には、*C. elegans* のフェロモンによる他個体認識に注目し、線虫集団の多峰性濃度場における化学探索性能について検討した。*C. elegans* は好みの化学物質を求めて移動する化学走性[1]を示すが、個体密度によって行動を変容させる[2]ことが知られている。線虫個体は高い化学探索能力を有すると考えられる[3]ことから、観察とモデル化によって線虫集団の行動変容を明らかにし、シミュレーションにより探索行動に対する有効性を検討する。

### 3. 研究の方法

本研究は、線虫の化学走性行動の観測系を構築し、行動変容モデルに基づく相互作用系の推定を行い、これらに基づいて自律分散ロボットのアルゴリズム構築および性能検証を行った。

*C. elegans* は古くからモデル生物として利用されており、その化学走性は大きく 2 つの動作から構成されることが分かっている[4](Fig. 1)。ひとつは風見鶏応答 (weathervane response) と呼ばれるもので、化学物質の濃度勾配方向に向けてゆるやかに進行方向を変える。他方はピルエット (pirouette turn) という急旋回で、濃度勾配が低下した状況で確率的に発現する。先行研究[4]より、サンプリング間隔  $\Delta T$ 、ステップ時間  $k$  における化学物質濃度を  $C(k)$  とするとき、ピルエット発現確率は式(1)で表される。ここで  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  は定数パラメタである。

$$p(C(k)) = \frac{\alpha}{\beta + \exp\left(\gamma \frac{C(k) - C(k-1)}{\Delta T}\right)} + \delta \quad (1)$$

本研究ではこの行動モデルを踏襲し、線虫集団の化学探索行動を考察する。具体的には、複数の局所解が存在する多峰性環境で効果的な探索を行うためのピルエット生起確率が、線虫の個体密度変化に対してどのような関係を有するのか検討し、その効果を検証した。

実験には、野生型 N2 株を用いた。飼育条件は先行研究[3]に倣い、NaCl に向けて走性を示すようにした。行動観測のために、直径 90mm のシャーレに厚さ 1.8mm の寒天プレートを作成し、探索フィールドとした。Fig. 2(i)に示すように、寒天プレート上の 4 か所に NaCl 溶液を滴下したが、1 か所のみ 0.5mol/l、他の 3 か所は 0.1mol/l と差を設け、濃度分布が最大値 1 か所、局大値 3 か所となるようにした。

線虫はバッファ溶液ごと複数個体をピペットで吸引し、Fig. 2(i)の印に示す位置へ滴下した。平均で 32 匹の線虫が滴下された。その後、Fig. 2(ii)に示す観測系にシャーレをセットし、2s 間隔で 2000s 間撮影を行った。撮影終了後、ノイズ除去等の前処理を行った後、Parallel Worm Tracker[5]により線虫の軌跡を抽出した。実験開始後 300s ~ 2000s の間を評価対象とした。

線虫個体同士は化学物質を媒介とした相互作用を有していると考えられているが、これをリアルタイムに直接計測することは非常に難しい。そこで、線虫の行動を観測し、一定距離以内に存在する線虫の数、すなわち線虫密度によって、ピルエット行動発現確率がどのような影響を受けるのかについて統計的に調査した。この結果を、最大値到達率が良好な群とそうでない群との比較を通してモデル化した。

これら得られた結果を、自律分散型移動ロボットへ適用可能な形にアルゴリズム化し、ベンチマークポテンシャル関数に対する探索行動シミュレーションによりその性能を評価した。

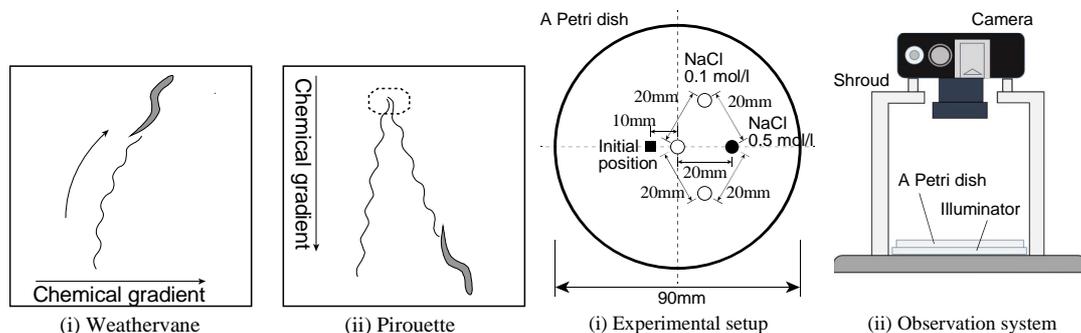


Fig. 1: Essential behaviors of *C. elegans*

Fig. 2: Experimental setup

#### 4. 研究成果

線虫の行動実験では、実験開始から一定時間経過後の線虫存在位置分布と、探索対象とした化学物質の濃度分布を比較し、その類似性で探索性能を評価した。具体的には、300s ~ 2000s の中央値である実験開始後 1150s での線虫分布を採用し、NaCl 濃度の拡散分布を文献[6]に基づき推定した値と KL ダイバージェンスにより比較した。KL ダイバージェンスが小さいほど、探索対象と線虫の分布が一致していると考え、良好であると判断した。

行動観察実験 20 回のうち、9 例は単体実験による KL ダイバージェンスの平均値より値が小さく、優秀集団として他の 11 例（以降、非優秀集団と呼称）と区別できた。これらについて、線虫密度と行動との関連を調べた。

具体的には、ある線虫個体を中心として半径 5mm の円内にいる個体数を密度と考え、式(1)におけるパラメタ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  をそれぞれフィッティングした。結果として Fig. 3 に示すように、優秀集団とそれ以外で生起確率が異なることが分かった。

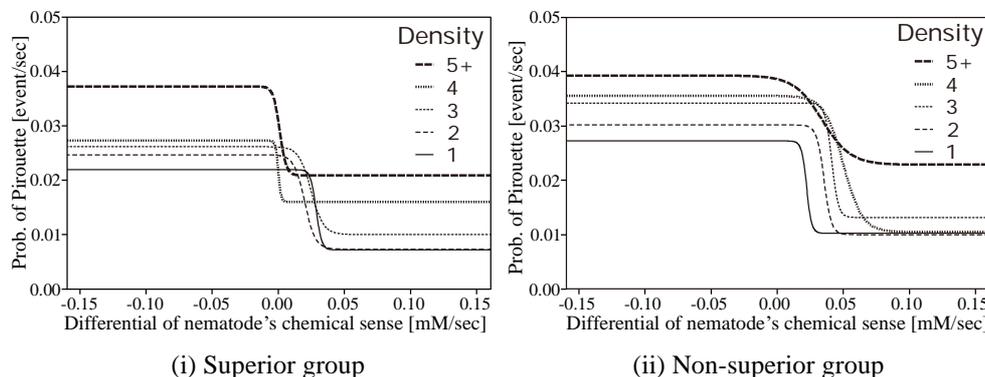


Fig. 3: Probability function for pirouette

上記の知見を先行研究[3]の線虫エージェントモデルに組み込み、シミュレーションにて探索性能の評価を行った。

時刻 $k$ ステップでの移動体位置を $x(k) = (x(k), y(k))^T$ とし、この位置で観測されたポテンシャル値が $C(k)$ であるとする．移動体は一定速度 $v$ で移動するものとし、 $\lambda$ を定数パラメタとして式(2)により移動体の Weathervane 行動を定めた．

$$x(k+1) = x(k) + v\Delta T \frac{z(k)}{\|z(k)\|} \quad (2)$$

$$z(k) := \lambda \frac{\nabla C(k)}{\|\nabla C(k)\|} + v\Delta T \frac{x(k) - x(k-1)}{\|x(k) - x(k-1)\|}$$

一方、pirouette は式(3)とした．ここで $R(\cdot)$ は平面回転行列、 $\omega_p$ は転向角である．転向角は $140^\circ$ から $220^\circ$ の間の一様乱数とした．

$$x(k+1) = x(k) + v\Delta T \frac{r_p}{\|r_p\|} \quad (3)$$

$$r_p := R(\omega_p)(x(k) - x(k-1))$$

シミュレーションにおいては、(a) 優秀集団、(b) 非優秀集団、(c) 単独行動（別途ピルエット発現確率を推定）について、化学物質の推定濃度分布との KL ダイバージェンスの分布を検定した．検定には 2 標本コルモゴロフ = スミノルフ検定を用いた．

Fig. 2(i)に示した、線虫行動実験と同様の環境を模したシミュレーションの結果を Fig. 4 に示す．各条件 300 回ずつ実施している．

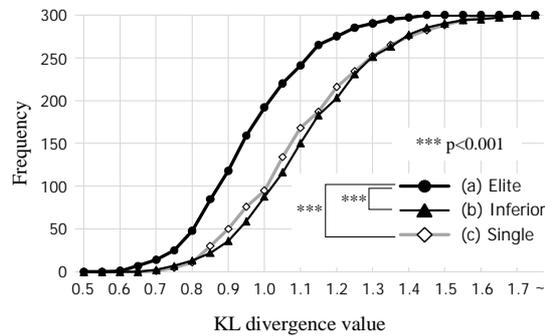


Fig. 4: Cumulative distribution of KL divergence values in simulated environment

その結果、(b)と(c)とは有意差がない一方で、(a)はその双方どちらに対しても有意に KL ダイバージェンスが小さかった．また、最も高い濃度の NaCl と仮定した地点との距離が 5mm 以内まで接近したエージェントの割合を到達率としたとき、(a) 49%、(b) 39%、(c) 41%と、優秀集団が最も大きい結果となった．

続いて、探索問題のベンチマークとされるポテンシャル関数から性状の異なる 4 つを選び (Fig. 5)、同様にシミュレーションを行った．Fig. 5 ではポテンシャルの等高線を示しており、印が最適解の位置を示している．これらシミュレーションでは各条件あたり 100 回ずつ実施し、結果を比較した．比較結果を Fig. 6 に示す．

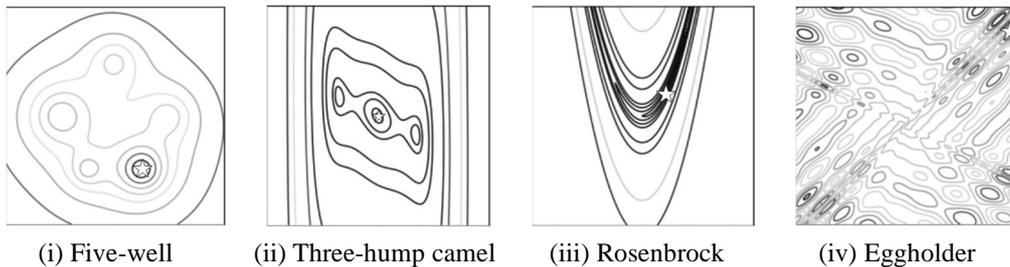


Fig. 5: Four potential functions for evaluation

結果として、関数(i)、(ii)および(iii)では、(a)が有意差をもって(b)および(c)よりも KL ダイバージェンスの値が小さくなった．一方、関数(iv)では(a)、(b)、(c)の間で優位な差は観測

できなかった．関数 (iv) はスーパーマーケットで鶏卵を販売する際に鶏卵を保持するパッケージに似ていることから Eggholder と呼ばれる関数で，領域のいたるところに局所解が存在する形状をしている．このような形状の場合は，移動体が局所解からの離脱を何度も繰り返さなくては全域的に移動できないため，局所的な情報のみによって行動する自律エージェントにとってはアルゴリズムによらず困難な問題となっていたことが，その理由と考えられる．

本研究では線虫の探索行動に注目し，個体密度に応じた行動発現確率の変化と探索性能の関係を調べた．探索性能が優れていた優秀集団について解析したところ，ピルエット発現確率が他の例と異なっていることが分かり，これを組み込んだシミュレーションによる検証では同様に有意差のある探索性能を持つことがわかった．これに基づくロボット行動アルゴリズムは，自身周囲に存在する他個体の数のみの観測によって行動変容を生じさせるもので，通信資源や計算資源をほとんど必要としない．このことから，研究目的としてきた，限られた情報処理資源のみによって協調行動が可能な自律分散型ロボットへの行動アルゴリズム実装が可能になったと判断した．

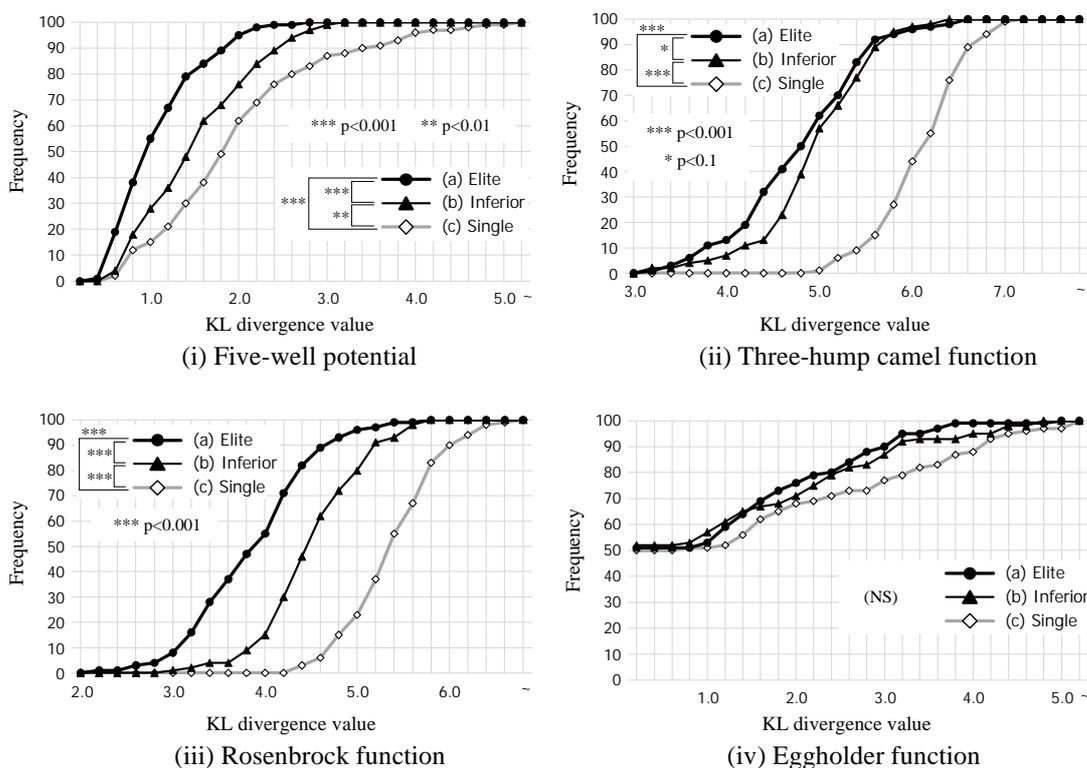


Fig. 6: Cumulative distributions of KL divergence values for benchmark potential functions

## 参考文献

- [1] C.I. Bargmann (2006) Chemosensation in *C. elegans*. *WormBook*. DOI: 10.1895/wormbook.1.123.1
- [2] M. Bono and C.I. Bargmann (1998) Natural Variation in a Neuropeptide Y Receptor Homolog Modifies Social Behavior and Food Response in *C. elegans*. *Cell* 94:679-689. DOI: 10.1016/S0092-8674(00)81609-8
- [3] T. Yanagisawa, et al. (2021) Searching Algorithm for Autonomous Distributed Agents based on Chemotactic Behavior of *C. elegans*. *IEEE ICMA2021*, 1431-1436. DOI: 10.1109/ICMA52036.2021.9512637.
- [4] Y. Iino and K. Yoshida (2009) Parallel Use of Two Behavioral Mechanisms for Chemotaxis in *Caenorhabditis elegans*. *J. Neurosci.* 29 (17), 5370-5380. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3633-08.2009
- [5] D. Ramot, et al. (2008) The Parallel Worm Tracker: A Platform for Measuring Average Speed and Drug-Induced Paralysis in Nematodes. *PLOS ONE* 3(5): e2208. DOI: 10.1371/journal.pone.0002208
- [6] Z. Soh, et al. (2015) Computer simulation of chemotaxis in *Caenorhabditis elegans* in consideration of whole-body movements. *SAI Intel. Sys. Conf.*, 651-656. DOI: 10.1109/IntelliSys.2015.7361209.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Nomoto Seiya, Hattori Yuya, Kurabayashi Daisuke  | 4. 巻<br>35              |
| 2. 論文標題<br>Swarm Search Algorithm Based on Chemotactic Behaviors of Caenorhabditis elegans Nematodes | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Robotics and Mechatronics   | 6. 最初と最後の頁<br>911 ~ 917 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.20965/jrm.2023.p0911  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Origane Y., Hattori Y., Kurabayashi D.                                 | 4. 巻<br>27      |
| 2. 論文標題<br>Frequency response of swarm deformation with control barrier function | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>Artificial Life and Robotics   | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s10015-022-00745-y                           | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>越中博己, 折金悠生, 檀隼人, 倉林大輔  |
| 2. 発表標題<br>群ロボットでの制御バリア関数を用いた衝突回避導入時におけるParticle Swarm Optimization の探索性能改善 |
| 3. 学会等名<br>第24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<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>倉林大輔, 柳澤拓人, 服部佑哉             |
| 2. 発表標題<br>線虫の行動観察に基づく多峰ポテンシャル場における探索行動 |
| 3. 学会等名<br>計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2023   |
| 4. 発表年<br>2023年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>越中博己, 折金悠生, 倉林大輔  |
| 2. 発表標題<br>群ロボットでのParticle Swarm Optimizationへの制御バリア関数導入による探索性能の変容評価 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2023                             |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tai Ka Chun, Yuki Origane, Daisuke Kurabayashi  |
| 2. 発表標題<br>Distributed Relative Position Recognition in a Robotic Swarm based on Local Observations by Individual Agents |
| 3. 学会等名<br>The 6th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics (国際学会)                            |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>野本聖也, 服部佑哉, 倉林大輔               |
| 2. 発表標題<br>線虫の集団化学走性に基づく群探索アルゴリズム         |
| 3. 学会等名<br>第23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<br>2022年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>越中博己, 折金悠生, 倉林大輔                 |
| 2. 発表標題<br>群れロボットにおける非対称分散化制御バリア関数による衝突回避設計 |
| 3. 学会等名<br>計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2022       |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Etchu, Yuki Origane, Daisuke Kurabayashi   |
| 2. 発表標題<br>Collision Avoidance Design with Asymmetric Decentralized Control Barrier Function for Robotic Swarm |
| 3. 学会等名<br>The Twenty-Seventh International Symposium on Artificial Life and Robotics 2022 (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>折金悠生, 倉林大輔             |
| 2. 発表標題<br>振動的相互作用による大域群れ構造の分散的推定 |
| 3. 学会等名<br>第39回日本ロボット学会学術講演会      |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|               | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                         | 備考 |
|---------------|---|---|----|
| 研究<br>分担<br>者 | 服部 佑哉<br><br>(Hattori Yuya)<br><br>(30709803) | 呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・准教授<br><br><br><br>(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 |
|---------|---------|