

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14627

研究課題名(和文) ロボティックスワームの群れ行動解析に基づく運用支援システムの構築

研究課題名(英文) Developing an operations support system for swarm robotic systems based on their behavior analysis

研究代表者

保田 俊行 (Yasuda, Toshiyuki)

富山大学・学術研究部工学系・准教授

研究者番号：60435451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：社会性昆虫などの生物の集団に見られる群知能の応用に関する研究領域はスワームロボティクスと呼ばれる。全体を統括する機構を持たず冗長な台数で構成されるロボットの集団による創発的な協調問題解決を狙っており、システム全体としての頑健性・柔軟性・拡張性が期待される。本研究では、ロボティックスワームの適応的行動生成法、および群れ挙動解析法について探求した。具体的には、(i) ロボットに搭載する制御器の複雑性と群れとしてのタスク遂行能力の関係性の検証、(ii) ロボットの単純さを人間が介入するヒューマン・スワームインタラクションシステムを構築、(iii) ミニマリストアプローチに基づく実機実験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スワームロボティクスにおける群れの振る舞いを発現させる手法の主流は、タスクに必要であろう部分的な行動を事前に組み込む形式である。このようなアプローチでは、適用するタスクごとの設計が必要であり高難度なもの取り扱いが困難である。本研究での成果は、状況に応じた行動生成・調整をロボット群が自動的に行うものであり、不確実で変動する環境における持続可能な適応的システムのための方法論として期待される。工学的・社会的観点では、災害現場での活動、巨大インフラの点検、環境保全など幅広い応用につながる研究といえる。

研究成果の概要(英文)：Swarm robotics is an application of swarm intelligence observed in insect colonies, fish schools, and bird flocks to multi-robot systems. The main research in swarm robotics focus on how to generate swarm behavior, and behavior rules based on the observation of biological swarms are often implemented. In this research, automatic design approaches, such as Evolutionary Robotics, are adopted for developing more robust, flexible, and scalable swarm behavior. The following projects have been conducted: (1) behavior generation of robotics swarms that have simple neural controllers, (2) human-swarm interaction via a locally-informed teleoperated robot, and (3) verifications in physical robot experiments based on a minimalist approach.

研究分野：工学

キーワード：スワームロボティクス 群れ行動 進化ロボティクス 行動学習 ヒューマン・スワームインタラクション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スワームロボティクスにおける群れの振る舞いを発現させる手法の主流は、タスクに必要であろう部分的な行動を事前に組み込むアドホックアプローチである。このアプローチでは、決定論的・確率的な意思決定を通して群れ行動を生成可能であるが、集合問題など必ずしも協調を必要としないようなごく単純なタスクでの成果が報告されているのみである。すなわち、行動組み込み型のような可塑性を持たない行動生成規範に基づくアプローチは性能が限定的である。そのため、創発的協調行動の生成機構を特徴とするスワームロボティクスには可塑性を持つアプローチが望ましいといえ、人工神経回路網を用いた進化ロボティクスという汎用的な手法での創発的協調行動の生成に成功している試みがある。しかし、特定タスクでの行動獲得における性能が重視されることが多く、頑健性・柔軟性・拡張性を十分に満たすに至らないというのが実状と思われる。また、研究の主流は挙動生成や社会性生物の知見に基づくロボット設計であり、群れ行動の評価や解析手法については定石の手法が確立されておらず、タスクの達成度や群れの形状などを議論しているのみである。

2. 研究の目的

本研究では、申請者のこれまでの研究を基盤とし、スワームロボットシステムの群れ行動の生成・解析を行う。また、ロボットの集団としての性能を向上させるため人間が介入するヒューマン・スワームインタラクションシステムを設計する。また、実機群ロボットによる実験を通して、制御器の構成が群れとしての振る舞いに与える影響を調査する。

このように、不確実で未知な環境における行動生成とその運用支援のためのシステム構築を目指した。工学的・社会的観点では、災害現場での探索・救助活動、橋梁・トンネル・プラントといった巨大インフラの点検、森林・海洋の保全など幅広い応用への一助となることを見据えるものである。

3. 研究の方法

(1) 進化・学習によるロボット群の適応的行動生成

ロボットの可塑的な群れ行動を実現するための行動生成手法として、強化学習と進化計算アプローチを採用した。強化学習では、ディープニューラルネットワークによる行動価値関数の数近似を行う深層強化学習を適用し、ロボット群の経験共有の効果を調査した。進化計算では、人工神経回路網で表現される制御器において、信号の分解能が与える影響を探索した。

(2) ロボット間の役割分担における階層性の抽出

ロボット間の振る舞いにおける個体間の相互作用から階層性の抽出に基づく群れ行動解析手法を行った。各ロボットの速度・位置の相関に基づき、先導・追従関係を可視化した。

(3) 局所的情報に基づく遠隔操作ロボットの操作による群れの行動支援システム

遠隔操縦型のリーダーロボットによりロボティクスワームを目的地までまとまりを維持したまま移動させるというタスクを取り扱った。リーダーロボットに搭載したカメラなどのデバイスから得られる局所的な情報を基にオペレータは操縦を行った。

(4) 小型群ロボットの行動生成実験

ロボット実機を利用した実験では、センサ入力に応じて行動を切り替えるのみのミニマリストアプローチを採用して協調搬送行動の実現を行った。切り替えを行うセンサ値について、ロボット間で小さなばらつきを加えることによる効果を調べた。

4. 研究成果

(1) 集団を構成する個々のロボットが単純であることが柔軟性に繋がると考えられている。そこで、深層強化学習を適用するにあたり、ロボットは入出力データの収集を行い、外部のサーバにて学習を行うという実装形式を採用した。サーバと各ロボットは通信を行い、ロボット群の経験データを蓄積する。環境中の一部のロボットが故障などによって経験データの送信が不可能である状況を想定し、サーバと通信可能なロボットの台数や通信頻度を変化させ学習に与える影響を調査した。図1のような環境でロボット10台が左右のランドマーク間を往復する実験を

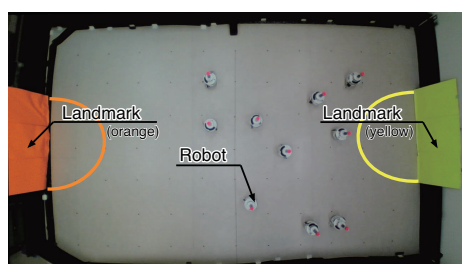


図1：実験風景（強化学習）

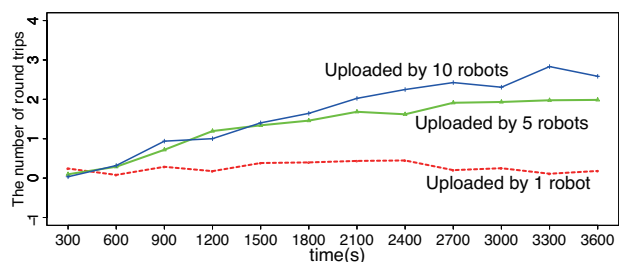


図2：実験結果（強化学習）

行った。図2に示すように、環境中の一部のロボットの経験データからでも目的とした行動学習が可能であることがわかった。

進化計算アプローチでは、同様にロボットの単純性の観点からの制御器構成についての考察を行った。タスクとして協調搬送を取り上げ、ロボットの構成が行動生成に与える影響を検証した。具体的には、ロボットの入出力、およびシナプス結合荷重値を離散値・連続値としたときの群れ行動について調べた。特に、行動獲得後に台数を増加させるなどといった環境変化を与えてロボット群が適応していく様子を分析した。実施した計算機実験では、ロボットの台数を増加させたとき、離散値を用いた場合により高い適応度を得られた。また、環境変化の度合いによっては、離散値で進化的に獲得した結合荷重値を連続値に変換した場合の方が安定な行動が観察された。このように、個体の高機能化が必ずしも群れとしての高機能化に繋がるわけではないという実験結果を得たことから、単純性をうまく取り入れることの重要性が再認識できた。

(2) 鳥類や魚類、昆虫の集団に見られるようなまとまりを維持しながら移動するタスクにおいて、ロボット群のタスク達成能力を個体間の階層性の観点から検証した。各ロボットの行動規則はBoidモデルを基に実装し、ロボット間の進行方向に関する時間的な相関関係から動きの模倣、すなわちリーダー・フォロワの階層的關係を検証した。進行方向を決定する際に、目標地点へ接近する規則の重みが高い先導規則、近傍個体へ接近する規則の重みが高い追従規則を用意し、群れの先導・追従を固定した場合と動的に変更した場合のタスクの達成に与える影響を調べた。その結果、図3に示すように複数の規則から動的に切り替えるロボット群が高い評価値を得るとともに、その群れ行動には複数層の階層があることを確認できた。

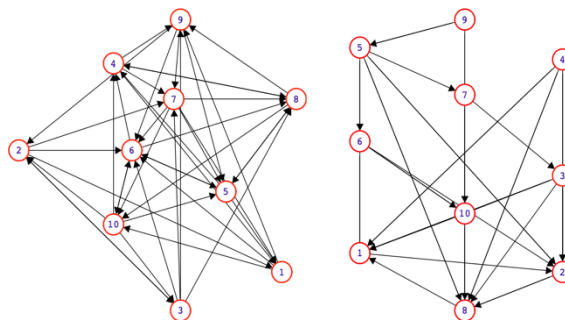


図3：相互作用の可視化（左・低評価時、右・高評価時）

(3) 遠隔操縦型のリーダーロボットによりロボティックスワームを目的地までまとまりを維持したまま移動させるというタスクを取り扱った。図4のように、オペレータはリーダーロボットに搭載したレーザレンジファインダやカメラから得られる情報を基にリーダーロボットの操縦を行う。Boidに基づく群れ行動モデルを実装したロボティックスワームに、目標地への移動を促すことに成功した。また、上記の研究と同様に複数規則から動的に切り替えるロボット群を導入することで、移動時のパフォーマンス向上を実現できた。

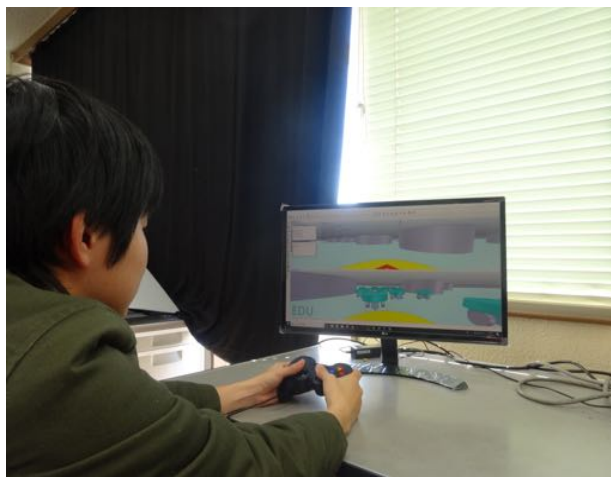


図4：ヒューマン・スワームインタラクション

(4) 個体レベルの単純さは、小型化との親和性が高いことから、ナノロボットはスワームロボティクスの将来的な応用領域とみなされている。一般的に、ナノロボットは高性能のデバイスが搭載できないため、機能的な制約が大きい中での動作が求められる。そこで、ミニマリストアプローチの観点から、算術計算を用いることなく行動を切り替える実機実験を図5に示すロボットを用いて行った。その結果、行動パターンに含む行動の種類や数の違いによる影響がみられた。

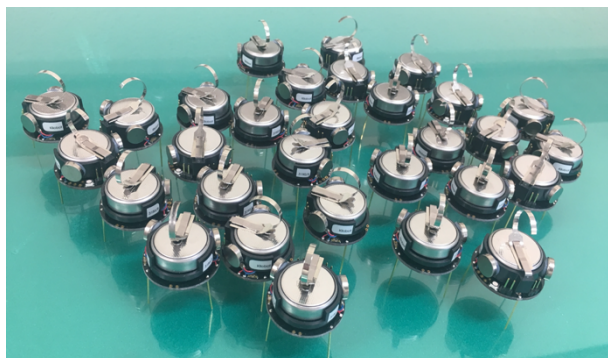


図5：小型実機ロボット群

また、社会性生物における分業についてのモデルの一つである反応閾値モデルに基づく行動ルールをロボットシステムに組み込み、群れとしてのタスク遂行能力に関する影響を検討した。小型ロボット群による協調搬送実験の結果、閾値の組み合わせによって搬送距離の最大値が異なり、また、すべて同じ閾値のロボット群で協調搬送を行うよりも、異なる閾値をロボット群内に含ませた場合に搬送物をより遠くまで搬送することが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 YAMADA Kazuaki, YASUDA Toshiyuki, OHKURA Kazuhiro	4. 巻 84
2. 論文標題 Reinforcement learning based on a mechanism of selecting state space representations in multi-robot systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 17-00288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00288	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 Hiraga Motoaki, Yasuda Toshiyuki, Ohkura Kazuhiro, Graduate School of Engineering, Hiroshima University 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan, Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan	4. 巻 22
2. 論文標題 Evolutionary Acquisition of Autonomous Specialization in a Path-Formation Task of a Robotic Swarm	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics	6. 最初と最後の頁 621 ~ 628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jaciii.2018.p0621	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 Hiraga Motoaki, Wei Yufei, Yasuda Toshiyuki, Ohkura Kazuhiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Evolving autonomous specialization in congested path formation task of robotic swarms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 547 ~ 554
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-018-0483-5	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 Yasuda Toshiyuki, Ohkura Kazuhiro	4. 巻 23
2. 論文標題 Generating and analyzing hierarchical interaction in a flock of robotic swarms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 481 ~ 488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-018-0485-3	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 Yasuda Toshiyuki、Ohkura Kazuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Sharing Experience for Behavior Generation of Real Swarm Robot Systems Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 520 ~ 525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2019.p0520	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9件(うち招待講演 2件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Toshiyuki Yasuda, Shunsuke Ota and Mitsuru Jindai
2. 発表標題 How Robot Specifications Affect Cooperative Behavior Generation Process in Evolutionary Robotic Swarms
3. 学会等名 14th International Conference on Industrial Management (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Yasuda, Shunsuke Ota and Mitsuru Jindai
2. 発表標題 Leading a Swarm of Mobile Robots via a Locally Informed Teleoperated Robot
3. 学会等名 22nd Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Motoaki Hiraga, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura
2. 発表標題 Evolutionary Acquisition of Congestion Management of a Robotic Swarm in a Path Formation Task
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura
2. 発表標題 Hierarchical Interaction Based Flocking in Swarm Robotic Systems
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yufei Wei, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura
2. 発表標題 Collective Cognition: A Case Study of Evolutionary Swarm Robotics in the Collective Foraging Problem with Poison
3. 学会等名 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura
2. 発表標題 Collective Behavior Acquisition of Real Robotic Swarms using Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 保田俊行
2. 発表標題 ロボットの群れの挙動形成のための進化・学習アプローチ
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門 (C部門) 制御研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Yasuda, Mitsuru Jindai, and Shunsuke Ota
2. 発表標題 On the scalability of evolutionary swarm robotic systems from the viewpoint of the individual simplicity
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保田俊行
2. 発表標題 スワームロボティクス：ロボットシステムの冗長化がもたらす益
3. 学会等名 第25回創発システム・シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

富山大学 保田俊行 http://www3.u-toyama.ac.jp/yasuda/
--

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