

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330307

研究課題名(和文) ロボティックスワームにおける集合知の進化的構成に関する研究

研究課題名(英文) Evolutionary construction of swarm intelligence in a robotic swarm

研究代表者

大倉 和博(OHKURA, KAZUHIRO)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40252788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボティックスワームを構成する各自律ロボットの制御器である人工神経回路網を進化的に設計するために、必要な計算機環境に関して2方式を準備し、それぞれに研究を進めた。集合知の解析・評価方式の開発では、スワームロボティクス分野において、この未踏な領域へ最初の一步を踏み入れてきたが、さらにこれを前進させることができた。実機ロボティクスワームでは、処理の高速化により滑らかなロボティクスワームの群れ行動が生成できるようにした。また、計算機シミュレーションであられる群れ行動を実機ロボティクスワームで再現する実験を行い、集合知の進化的構成法の基礎を確立できた。

研究成果の概要(英文)：In order to design the robot controller in a robotic swarm by an evolutionary artificial neural network, two types of computational resources are provided for conducting simulated experiments. In this project, we have done the first step toward the areas of evaluation and analysis of swarm intelligence in evolutionary robotic swarms. We have also done the physical robotic swarm experiments with faster processing to develop expected swarm behavior. In addition, the results of the artificial evolution of robotic swarm have been transferred to the physical robotic swarm to develop the similar swarm behavior. We believe that this project contributed to find the basics of the methodology of swarm intelligence by artificial evolution.

研究分野：自律システム学

キーワード：ロボティックスワーム 群れ行動 進化型人工神経回路網 集合知

## 1. 研究開始当初の背景

近隣の公園や学内キャンパスなどを散策していると、アリが自身の体よりも何倍も大きな餌を群れをなして巣まで持ち運んでいる様子にしばしば出くわす。あるアリたちは餌を啜り上げながら引きずっているように見え、逆に仲間に引きずられているようにも見える。しかしながら、アリの群れ全体としては移動方向を地面の様子に適應させて調整しながら運んでいる。この状況は、どのアリがその群れの意思決定をリードしているのかわからないにもかかわらず、群れの大きな冗長性を効果的に使いながら全体の目的である餌運びをしている様子は、群ロボット学の視点からすると感嘆に値する。

## 2. 研究の目的

本研究では、アリの協調餌運び行動に見られるような社会性生物の群れ行動様式、すなわち、集合知をボトムアップ的に構成できる人工進化機構を搭載したロボティクススワームを開発する。この機構の実現により、従来の群ロボット学研究にあって重要(あるいは致命的)課題であったリーダーまたはフォロワーといった群れの中の役割分担や振る舞いを固定化せずに、時々刻々と変化する状況の中で適應的に生成させることが可能になり、群ロボット学の適用範囲を飛躍的に拡大することができる。

## 3. 研究の方法

本研究で狙うロボティクススワームは、アリの群れを模した多数の均質な自律ロボットからなる超冗長性を持つシステムである。各自律ロボットは比較的単純に構成し、量産しやすいものとする。このようなロボティクススワームを用い、タスクとして、例えば、一台では運べない重い荷物が複数個あり各ゴールまでそれぞれ押し運ぶ協調荷押し問題を与えるとする。このとき、ロボティクススワームが特定の荷物に集中することなく、大まかに適切に各荷物に分かれてサブスワームを構成するとともに、サブスワーム毎に適切な役割を担うチームプレーを生成することができる集合知が必要になる。これらから、本研究は、次の3段階、すなわち、  
(1)各自律ロボットの制御器のための人工進化機構の開発  
(2)集合知の解析・評価方式の開発  
(3)実機ロボティクススワームによる実証実験  
のそれぞれに焦点を当てて研究を進めた。

## 4. 研究成果

各段階に対し、次のような詠歌が得られた。  
(1)ロボティクススワームを構成する各自

律ロボットの制御器である人工神経回路網を進化的に設計するために、次のように2種類の計算機環境を設定して、それぞれに研究を推進した。(A)クラウドコンピューティング環境:オープンソースの物理エンジンが使用可能なため、物体とロボットまたはロボットどうしの衝突判定を大量に含む課題を取り扱うことができるので、協調採餌問題や追跡問題のような自律タスク割り当て問題を含んだような高度に協調分散的な群れ行動生成を試みた。(B)GPUコンピューティング環境では、計算アルゴリズムに条件分岐の少ないように衝突判定が不必要な掃除問題など取り扱い、GPUへの効果的実装を検討した。

(2)集合知の解析・評価方式の開発では、スワームロボティクス分野において、この未踏な領域へ最初の一步を踏み入れてきたが、さらにこれを前進させることができた。特に、サブグループの同定や推移の取り扱い手法に一定の指針を出すことができた。

(3)実機ロボットに搭載していたミニPCの性能が4倍となったアップデート版が入手可能になったので、これを導入して各ロボットの動作サイクルタイムを高速化して、より滑らかなロボティクススワームの群れ行動が生成できるようにした。また、進化ロボティクスのサセックス・アプローチを採用し、計算機シミュレーションであられる群れ行動を実機ロボティクススワームで再現する実験を行い、集合知の進化的構成法の基礎を確立できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計29件)

1. Tian Yu, Toshiyuki Yasuda, Yoshiyuki Matsumura, Masanori Goka, and Kazuhiro Ohkura "Robust Swarm Robotics System using CMA-NeuroES with Incremental Evolution", International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol. 4, Issue. 11, pp. 217--226 (11, 2015), 査読有
2. 門田真樹, 保田俊行, 松村嘉之, 大倉和博, "適応DEにおける確率的なパラメータ調整法とその評価", 電気学会 電子・情報・システム部門誌(論文誌C), Vol.135, No.9, pp.1142--1148 (2015), 査読有
3. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "An Improved Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Real Parameter Optimization Problems", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 4, Issue. 5, pp. 628-635, (2015), 査読有

4. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "A Self Adaptive Hybrid Enhanced Artificial Bee Colony Algorithm for Continuous Optimization Problems", *BioSystems*, Vol.132-133, pp.43--53 (2015) , 査読有
5. Toshiyuki Yasuda, Shigehito Nakatani, Akitoshi Adachi, Kazuhiro Ohkura, "Generating Flocking Behavior of a Real Robotic Swarm that Travels between Two Landmarks", *Proceedings of the First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, 28-30 October 2015, Kyoto, pp.239--242 (2015) , 査読有
6. Yufei Wei, Tatsuya Morikawa, Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Yoshiyuki Matsumura and Masaharu Munetomo "A Parallel Computing Implementation of Evolutionary Swarm Robotics Approach", *The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, 28-30 October 2015, Kyoto, pp.235--238 (2015) , 査読有
7. Yu Tian, Ohkura Kazuhiro, Yasuda Toshiyuki, "Understanding Autonomous Task Allocation by Clustering a Swarm Robotics System", *Proceedings of the First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, 28-30 October 2015, Kyoto, pp.192--193 (2015) , 査読有
8. Masaki Kadota, Toshiyuki Yasuda, Yoshiyuki Matsumura, Kazuhiro Ohkura, "A Predator-Prey Artificial World That Yields Swarm Behavior", *Proceedings of the First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics*, 28-30 October 2015, Kyoto, pp.190--191 (2015) , 査読有
9. Tian Yu, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "A duration based behavior analyze approach for swarm robotics system", *Proceedings of SICE Annual Conference 2015*, 28-30 July 2015, Hangzhou pp.276--281 (2015) , 査読有
10. Zhiwen Wang, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "An Evolutionary Approach to Sudoku Puzzles with Filtered Mutations", *Proceedings of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 25-28 May 2015, Sendai, pp.1732--1737 (2015) , 査読有
11. 大倉和博, 保田俊行, 和田七海, 松村嘉之, "スワームロボットシステムにおける群れ挙動の一解析法 動物行動学に基づくアプローチ ", *知能と情報 (日本知能情報フuzzy学会誌)*, Vol.26, No.5, pp.855--865 (2014) , 査読有
12. 島谷直規, 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, "進化型スワームロボティクスにおける協調採餌問題のGPUへの実装", *電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌)*, Vol.134, No.9, pp.1355--1364 (2014) , 査読有
13. Toshiyuki Yasuda, Akitoshi Adachi, and Kazuhiro Ohkura, "Self-Organized Flocking of a Mobile Robot Swarm by Topological Distance-Based Interactions", *Proceedings of 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 13-15 December 2014, Tokyo, pp.106--111 (2014) , 査読有
14. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Tosei Nomura and Yoshiyuki Matsumura, "Evolutionary Swarm Robotics Approach to a Pursuit Problem", *2014 IEEE Symposium on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space (RiSS) Proceedings*, 9-12 December 2014, Orlando, FL, pp.129--134 (2014) , 査読有
15. Toshiyuki Yasuda, Akitoshi Adachi, and Kazuhiro Ohkura, "Self-organized Flocking in Mobile Robots Based on Frontal Interaction and a Leadership Rules", *Proceedings of Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, 3-6 December 2014, Kitakyushu, pp.594--599 (2014) , 査読有
16. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Masaki Kadota, and Yoshiyuki Matsumura, "An Extended SHADE and its Evaluations", *Proceedings of 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (IES 2014)*, Vol.2, 10-12 November 2014, Singapore, pp.493--504 (2014) , 査読有
17. Toshiyuki Yasuda, Koki Kage, and Kazuhiro Ohkura, "Response Threshold-Based Task Allocation in a Reinforcement Learning Robotic Swarm", *Proceedings of IEEE 7th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCI 2014)*, 7-8 November 2014, Hiroshima, pp.189--194 (2014) , 査読有
18. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Yoshiyuki Matsumura, and Masaki Kadota, "GPU Implementation of Food-Foraging Problem for Evolutionary Swarm Robotics Systems", *Proceedings of 9th International Conference on Swarm Intelligence (ANTS 2014)*, 10-12 September 2014, Brussels, LNCS8667, pp.238--245 (2014) , 査読有
19. Yu Tian, Toshiyuki Yasuda,

- Kazuhiro Ohkura, Yoshiyuki Matsumura, and Masanori Goka, "Apply Incremental Evolution with CMA-NeuroES Controller for a Robust Swarm Robotics System", Proceedings of Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, 9-12 September 2014, Sapporo, pp.295--300 (2014) , 査読有
20. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "A Levy Flight-Based Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Numerical Optimization Problems", Proceedings of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 6-11 July 2014, Beijing, pp.2656--2663 (2014) , 査読有
21. Tian Yu, Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Yoshiyuki Matsumura and Masanori Goka, "Cooperative Transport by a Swarm Robotic System Based on CMA-NeuroES Approach", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.17 No.6, pp.932--942 (2013) , 査読有
22. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, and Yoshiyuki Matsumura, "Generating Cooperative Collective Behavior in Swarm Robotic Systems", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.17 No.5, pp.699--706 (2013) , 査読有
23. Yoshiyuki Matsumura, Kiyotaka Sugiyama, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "A ( $\mu$ , ) Evolutionary and Particle Swarm Hybrid Algorithm Over Cloud Computing, with an Application to Dinosaur Gait Optimization", Proceedings of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 15-17 December 2013, Kobe, pp. 802--807 (2013) , 査読有
24. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Nanami Wada, and Yoshiyuki Matsumura, "Behavior Sequence Analysis of Incrementally Evolving Robotic Swarms in a Foraging Task", Proceedings of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 15-17 December 2013, Kobe, pp.790--795 (2013) , 査読有
25. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "A Self Adaptive Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Solving CEC 2013 Real-Parameter Optimization Problems", Proceedings of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 15-17 December, Kobe, pp.706--711 (2013) , 査読有
26. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, and Yoshiyuki Matsumura, "Coordinating the collective behavior of swarm robotics systems based on incremental evolution", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 13-16 October 2013, Manchester, pp.4024--4029 (2013) , 査読有
27. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, and Kazuaki Yamada, "Multi-Robot Cooperation Based on Continuous Reinforcement Learning with Two State Space Representations", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 13-16 October 2013, Manchester, pp.4470--4475 (2013) , 査読有
28. Yoshiyuki Matsumura, Ayumu Kobayashi, Kiyotaka Sugiyama, Todd Pataky, Bill Sellers, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "A ( $\mu$ , ) Evolutionary and Particle Swarm Hybrid Algorithm, with an Application to Dinosaur Gait Optimization", 2013 IEEE 6th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA) Proceedings, 13-13 July 2013, Hiroshima pp. 89--93 (2013) , 査読有
29. Toshiyuki Yasuda, Nanami Wada, Kazuhiro Ohkura and Yoshiyuki Matsumura, "Analyzing Collective Behavior in Evolutionary Swarm Robotic Systems Based on an Ethological Approach", 2013 Symposium on Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning (ADPRL) Proceedings, 16-19 April 2013, Singapore, pp.148--155 (2013) , 査読有
- [学会発表](計46件)
1. 門田真樹, 保田俊行, 松村嘉之, 大倉和博, "Predator-prey シミュレーションにおける群れ行動と生存性に関する一考察", 第28回自律分散システムシンポジウム, 広島, 2016.1.21
  2. 中島潤樹, 安保雅基, 保田俊行, 大倉和博, "Deep Reinforcement Learning によるロボティックスワームの集合行動の獲得", 第28回自律分散システムシンポジウム, 広島, 2016.1.21
  3. 安達明俊, 保田俊行, 大倉和博, "ロボティックスワームの群れ行動における入出力構成の設計に関する一考察", 第16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, 名古屋, 2015.12.14
  4. 森川達矢, 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, 棟朝雅晴, "クラウドコンピューティングを用いた進化型ロボティックスワームの群れ行動生成", 第16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，名古屋，2015.12.14
5. 安保雅基，保田俊行，大倉和博，"実機ロボティクスワームの群れ行動に入出力構成が及ぼす影響"，計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 2015 講演論文集，pp.1146--1150，4 pages (11，2015)
  6. 萩森格，門田真樹，保田俊行，大倉和博，松村嘉之，"16x16 数独のための GA の一拡張法"，計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015，函館，2015.11.18
  7. 内倉慶介，保田俊行，大倉和博，"ロボティクスワームにおける適応的機能創発過程の解析"，計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015，函館，2015.11.18
  8. 門田真樹，保田俊行，大倉和博，松村嘉之，"群れ行動を創発する Predator-prey シミュレーション"，計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015，函館，2015.11.18
  9. 内倉慶介，保田俊行，大倉和博，"スワームロボティクスシステムにおける適応的機能創発過程の解析"，2015 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会，広島，2015.7.18
  10. 萩森格，王志文，門田真樹，保田俊行，大倉和博，"GPU を用いた GA による数独の並列高速解法"，第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，大阪，2015.5.20
  11. 中島潤樹，門田真樹，保田俊行，大倉和博，"DE による Deep Neural Network の学習 GPU への実装"，第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，大阪，2015.5.20
  12. 中谷繁仁，安達明俊，安保雅基，保田俊行，大倉和博，"実機ロボティクスワームの二点間往復タスクにおける群れ行動生成"，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，京都，2015.5.17
  13. 安保雅基，安達明俊，中谷繁仁，保田俊行，大倉和博，"実機ロボティクスワームの群れ行動生成における入出力構成の及ぼす影響"，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，京都，2015.5.17

他 33 件

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
大倉 和博 (OHKURA KAZUHIRO)  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：40252788
- (2) 研究分担者  
保田 俊行 (YASUDA TOSHIYUKI)