

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500175

研究課題名（和文）

スワームロボティクスに基づく可塑的群知能システムの構築に関する研究

研究課題名（英文）

Developing plastic swarm intelligent systems based on swarm robotics

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

研究成果の概要（和文）：

近年、スワームロボティクス(SR)と呼ばれる群ロボットの行動制御に関する研究が大きな注目を浴びるようになってきている。しかし、SRの自己組織化原理に基づく行動制御方式では、「定点に集合する」「互いに離れる」などの非常に限定的な単純タスクしか達成できないのが現状である。本研究では、これを打破すべく、研究代表者が提案している構造進化型人工神経回路網 MBEANN にベースとして可塑的群知能システムを構築するための新理論を開発し、従来法では不可能であった高難易度タスクを達成することに挑戦して SR の新段階を切り開く。

研究成果の概要（英文）：

Recently, the research on behavior control of groups of robots called Swarm Robotics (SR) has come to take a great deal of attention. However, the conventional approach to the swarm behavior control based on self-organizing principle can solve only simple tasks such as "to be set to fixed-point" or "away from each other". In order to overcome this limitation and solve more complex tasks to expand new application fields, a new theory of building a plastic swarm intelligent system is built based on MBEANN, which is a kind of Topology and Weight Evolving Artificial Neural Network developed by our research group.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：自律システム工学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：スワームロボティクス，自己組織化，構造進化型人工神経回路網

## 1. 研究開始当初の背景

群知能(Swarm Intelligence, SI)は 1990 年代前半のころから主に Dorigo らを中心とする分散人工知能コミュニティにより提唱

されてきた。主に、SI はエージェント単体では困難なタスクをエージェントの群れ全体に現れる自己組織化作用を利用することによりタスク達成を目指すアプローチと解釈されてきた。そのため、これには、Dorigo が

提唱した蟻コロニー最適化 (Ant Colony Optimization, ACO) の他に Kennedy と Eberhart による粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization, PSO) などが含まれるようになってさらに急速に発展し、現在に至っている。

また、2004 年頃から、SI がカバーする領域のうち、エージェントに自律ロボットを用いることに重点を置いた分野をスワームロボティクス (Swarm Robotics, SR) と呼ぶようになってきた。主に、2001 年から 2005 年に渡って行われた Dorigo が率いたプロジェクト研究 Swarm-Bots が主たる発信源であると推測される。SR では、全体を統括する機構を持たず主として均質なエージェント群の局所的相互作用に基づく自己組織化による協調問題解決を狙っており、(1) 高い頑健性、(2) 高い柔軟性、(3) 高い拡張性の三つの特徴を持つとされている。

これら SR の目標は、群知能の問題解決器としてまさに理想的性質である。しかし、現状の SR で生成できる群挙動は、「集合する」「離れる」「定点に近づく」「定点から離れる」といった極めて単純な群挙動の例がほとんどである。ゆえに、これ以上の高度な群知能を持たせることは、従来型 SR アプローチでは、ほぼ不可能であろうと推察できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、エージェントの行動制御器に人工神経回路網を用いて構成するとともに人工進化によって適切な協調行動を創発的に獲得できる可塑性を付与することに挑戦する。人工神経回路網は高い潜在学習能力を持つ構造進化型として、シナプス結合荷重だけでなく位相構造も進化的に獲得させることを狙う。この方法は、90 年代前半から様々な方法が提唱されてはいるものの、実際には、簡単なベンチマークを解く程度にしか実現できていなかった。それゆえ、これまで SR に進化型人工神経回路網を適用する研究例では、ほとんどが単純な二層または三層 FF 型の固定構造が取られてきた。

そこで、本研究では、研究代表者が 2008 年度まで受けていた科研費「構造進化型人工神経回路網による進化ロボティクスのための人工脳の構築に関する研究 (基盤 C)」によって得られた成果の主要部である構造進化型人工神経回路網 MBEANN を基盤とし、この新展開として可塑的群知能システムを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、次のような SR システムの構築をはかる。

### 【概要】

構築する SR システムは、多数の均質な自律ロボットからなる冗長性の高いシステムである。この自律ロボットは比較的単純に構成されており、量産しやすい均質なものであるとする。各ロボット間または環境との局所的な作用からロボットは自身の行動を決定する。全体を統括管理するような機構を持たず、完全な創発的群行動生成方式をとる。

### 【目標とするタスク】

ロボット一台では運ぶことの出来ない重い荷物を複数台協調してゴールへ出来るだけたくさん数多く運ぶ「協調荷運び問題」を取り扱う。このとき、全エージェントが特定の荷物に集中すること無く、適応的に各荷物に分かれてサブグループを構成するとともに、サブグループ内で適切な役割を担うチームプレーをすることができる能力が必要になる。すなわち、各ロボットには、自らの可塑性に基づいて状況に応じた機能を生成しながら適宜自身に割り当てることを行う能力が必要になる。研究代表者は、この振る舞いを自律的機能分化と呼んでいる。

## 4. 研究成果

本研究は、(1) MBEAN 拡張理論の構築、(2) SR システムの実機実験、(3) SR 用物理シミュレータの構築、の三つの課題に分けて取り組んできた。それぞれに各年度毎に以下のようにとめる。

(2010 年度)

(1) SR に必要なより大規模な人工神経回路網を効率よく進化的に獲得させる新しいエンコーディング手法を開発した。(2) 実機 SR システムによる実験：自律移動ロボットの基本設計を行い、3 台製作した。(3) GPU を用いて基本的な進化ロボティクス環境を構築した。

(2011 年度)

(1) SR に必要な人工神経回路網を効率よく進化的に獲得させるための改良手法を開発するとともに、その群挙動を適切に観測するため新手法を考案した。(2) 自律移動ロボットの詳細設計および改良を行い、総計 6 台製作した。(3) GPU コンピューティング環境に島モデル型遺伝的アルゴリズムの実装方式を開発し、大幅な高速化を実現することに成功した。

(2012 年度)

(1) MBEANN において適応度変化の全く無い新しい突然変異方式を導入することに成功した。また、SR の群れ挙動を効率的に評価するため手法を改良し、より適切な役割分担の観測を行った。(2) これまでの経験を踏まえて、自律移動ロボットを新たに再設計・製作を行い、合計 10 台からなるスワームロボット

システムを構築し、実機による基礎的実験を行った。(3) GPUコンピューティング環境への島モデル型遺伝的アルゴリズムの実装方式の効率性をより高め、SRシミュレータとして高速化性能と最適化性能が両立して得られることを実験的に確認した。

#### 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 40 件)

1. Toshiyuki Yasuda, Soichiro Nomura and Kazuhiro Ohkura, "Self-Organized Task Allocation between Reinforcement Learning Robots and a Human Partner", International Journal of Advancements in Computing Technology, Vol. 4, No. 22, pp. 230-238 (2012), 査読有
2. 大倉和博, 保田俊行, 松村嘉之, 森下力, "クラスタリングに基づくスワームロボットシステムにおける群協調行動分析のための一手法", 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 794, pp. 3529-3540 (2012), 査読有
3. 山田和明, 大倉和博, "ニューラルネットワークを用いた強化学習のためのネットワークパラメータ設定法", 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 792, pp. 2950-2961 (2012), 査読有
4. 大磯正嗣, 松村嘉之, 保田俊行, 大倉和博, "グリッドタスクスケジューリングアルゴリズム R3Q の不均一な中粒度タスクへの適用", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 790, pp. 2144-2154 (2012), 査読有
5. Takaaki Kadota, Toshiyuki Yasuda, Yoshiyuki Matsumura and Kazuhiro Ohkura, "An Incremental Approach to an Evolutionary Robotic Swarm", Proceedings of 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 458-463 (2012), 査読有
6. Soichiro Nomura, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "Validation of Robustness of Reinforcement Learning Robots Cooperating with a Human", Proceeding of the 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp. 158-163 (2012), 査読有
7. Tian Yu, Tsuguo Fujita, Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Yoshiyuki Matsumura and Masanori Goka, "Cooperative Transport by a Swarm Robotic System Based on CMA-NeuroES Approach", Proceeding of the 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp. 1-7 (2012), 査読有
8. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda and Yoshiyuki Matsumura, "Extracting Functional Subgroups from an Evolutionary Robotic Swarm by Identifying the Community Structure", Proceedings of the 2012 Fourth World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), pp. 112-117 (2012), 査読有
9. Toshiyuki Yasuda, Koki Kage and Kazuhiro Ohkura, "Robust Reinforcement Learning Technique with Bigeminal Representation of Continuous State Space for Multi-Robot Systems", Proceedings of the SICE Annual Conference 2012, pp. 1552-1557 (2012), 査読有
10. Masashi Oiso, Yoshiyuki Matsumura, Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, "Implementing Genetic Algorithms to CUDA Environment Using Data Parallelization", Technical Gazette, Vol. 18 No. 4, pp. 511-517 (2011), 査読有
11. Junki Sakanoue, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "Preservation and Application of Acquired Knowledge Using Instance-Based Reinforcement Learning for Multi-Robot Systems", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 15, No. 8, pp. 1109-1115 (2011), 査読有
12. Toshiyuki Yasuda, Kousuke Araki, Kazuhiro Ohkura, "Improving the Robustness of Instance-Based Reinforcement Learning Robots by Metalearning", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 15, No. 8, pp. 1065-1072 (2011), 査読有
13. 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, "部分的初期化によるParticle Swarm Optimizationの拡張 (第2報, マルチロボ

- ットシステム問題における検証)”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 777, pp. 2084-2095 (2011), 査読有
14. 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, “部分的初期化によるParticle Swarm Optimizationの拡張 (第1報, 標準テスト関数における検証)”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 777, pp. 2071-2083 (2011), 査読有
  15. 大倉和博, 保田俊行, 松村嘉之, “構造進化型人工神経回路網によるSwarm Roboticsのための適応的協調行動の生成”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 775, pp. 966-979 (2011), 査読有
  16. 大磯正嗣, 松村嘉之, 保田俊行, 大倉和博, “CUDA 環境におけるデータ並列化を用いた遺伝的アルゴリズムの実装手法”, 知能と情報 (日本知能情報フレンジイ学会誌), Vol. 23, No. 1, pp. 18-28 (2011), 査読有
  17. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Chikara Morishita and Yoshiyuki Matsumura, “Cluster Analysis of Collective Behavior for a Robotic Swarm”, Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, F3D-S. 3, 9 pages (2012), 査読有
  18. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Tomonori Sakamoto and Yoshiyuki Matsumura, “Evolving Robot Controllers for a Homogeneous Robotic Swarm”, Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 708-713 (2011), 査読有
  19. Toshiyuki Yasuda, Soichiro Nomura and Kazuhiro Ohkura, “Self-Organized Task Allocation in Reinforcement Learning Robots and a Human Partner”, Proceeding of the 15th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp. 152-159 (2011), 査読有
  20. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, and Yoshiyuki Matsumura, “Analyzing macroscopic behavior in a swarm robotic system based on clustering”, Proceedings of the SICE Annual Conference 2011, pp. 356-361 (2011), 査読有
  21. Toshiyuki Yasuda, Motohiro Wada, and Kazuhiro Ohkura, “Instance-Based Reinforcement Learning Technique with a Meta-Learning Mechanism for Robust Multi-Robot Systems”, Proceedings of the 12th Conference Towards Autonomous Robotic Systems, pp. 161-172 (2011), 査読有
  22. Masashi Oiso, Yoshiyuki Matsumura, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, “Accelerating Steady-State Genetic Algorithms based on CUDA Architecture”, Proceedings of 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CD-ROM, 6 pages (2011), 査読有
  23. Masanori Goka, Yoshiyuki Matsumura and Kazuhiro Ohkura, “Analysis of Behavior Strategy on Evolutionary Robotics Using Self-Organizing Maps”, Proceedings of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 10th International Symposium on advanced Intelligent Systems, pp. 722-727 (2010), 査読有
  24. Toshiyuki Yasuda, Kousuke Araki, and Kazuhiro Ohkura, “Improving the Robustness of Instance-Based Reinforcement Learning Robots by Metalearning”, Proceedings of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 10th International Symposium on advanced Intelligent Systems, pp. 704-709 (2010), 査読有
  25. Junki Sakanoue, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, “Preservation and Application of Acquired Knowledge Using Instance-Based Reinforcement Learning”, Proceedings of Joint 5th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 10th International Symposium on advanced Intelligent Systems, pp. 576-581 (2010), 査読有
  26. Yoshiyuki Matsumura, Eisuke Nakahara, Masanori Goka, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, “Hybrid Evolutionary Algorithm Based on  $(\mu, \lambda)$  Evolution Strategies and Particle Swarm Optimization Applies to a Car Racing Problem”, Proceedings of the 14th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp. 250-257 (2010), 査読有

27. Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "The Analysis of Autonomous Specialization Process in Reinforcement Learning Arm-Type Robots Cooperating with a Human Partner", Proceedings of the 14th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp.199-205 (2010) , 査読有
28. Masashi Oiso, Yoshiyuki Matsumura, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, "Implementation Method of Genetic Algorithms to CUDA Environment using Data Parallelization", Proceedings of the 14th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, pp.51-60 (2010) , 査読有
29. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura and Yoshiyuki Matsumura, "Extended Particle Swarm Optimization with Partial Randomization for a Multi-Robot System", Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics 2010, pp.37-42 (2010) , 査読有
30. Masaki Kadota, Yoshiyuki Matsumura, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, "Parallelization of Genetic Algorithms over GPU using CUDA", Proceedings of the 2010 International Symposium on Intelligent Systems, 567, 3 pages (2010) , 査読有
31. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura and Yoshiyuki Matsumura, "Extended PSO with Partial Randomization for Large Scale Multimodal Problems", World Automation Congress WAC 2010 CD-ROM Proceedings, IFMIP181, 6 pages (2010) , 査読有
32. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Chikara Morishita, and Yoshiyuki Matsumura, "Collective Behavior Analysis Based on Clustering for Swarm Robotic Systems", Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2010, pp.440-444 (2010) , 査読有
33. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Yukihiro Kotani, and Yoshiyuki Matsumura, "A Swarm Robotics Approach to Cooperative Package-Pushing Problems with Evolving Recurrent Neural Networks", Proceedings of SICE Annual Conference 2010, pp.706-711 (2010) , 査読有
34. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda and Yoshiyuki Matsumura, "Coordinating the Adaptive Behavior for Swarm Robotic Systems by Using Topology and Weight Evolving Artificial Neural Networks", Proceedings of WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC 2010), pp.1788-1795 (2010) , 査読有
- 他 6 件
- [学会発表] (計 79 件)
1. 大倉和博, 保田俊行, 門田貴章, 和田七海, 松村嘉之, "動物行動学に基づく漸進進化型ロボティックスワームの進化過程に関する一考察", 2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.287-288 (2013.3.15, 東京)
  2. 中元聡志, 保田俊行, 大倉和博, "遺伝的多様性を利用したHeterogeneous Swarmモデルの挙動に関する一考察", 第13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, pp.285-286 (2012.12.18, 福岡)
  3. 竹中貴治, 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, 棟朝雅晴, "スワームロボットシステムにおける大規模並列計算環境を用いた分散型CMA-ESの実装", 進化計算シンポジウム, pp.14-17 (2012.12.15, 軽井沢)
  4. 島谷直規, 門田貴章, 保田俊行, 大倉和博, "Evolutionary Swarm Roboticsにおける島モデルGAのGPUへの実装", 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2012講演論文集, pp.298-303 (2012.11.22, 名古屋)
  5. 和田基宏, 笹谷俊貴, 保田俊行, 大倉和博, "自律移動ロボット群による他個体の進行方向を利用しない群れ行動の生成", 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2012講演論文集, pp.269-274 (2012.11.22, 名古屋)
  6. 和田七海, 保田俊行, 大倉和博, "スワームロボットシステムの群挙動の解析 -動物行動学に基づくアプローチ-", 第28回

フレンジシステムシンポジウム講演論文集, pp. 1117-1122 (2012. 9. 14, 名古屋)

7. 門田貴章, 保田俊行, 大倉和博, 松村嘉之, “スワームロボットシステムにおける協調群行動生成に関する一考察”, 第22回インテリジェント・システム・シンポジウム講演原稿集, 1C2-2, 6 pages (2012. 8. 30, 浦添)最優秀論文賞受賞
8. 竹中貴治, 門田貴章, 保田俊行, 大倉和博, “SMPクラスタへのMPIとOpenMPを用いた進化型ロボットスワーム協調行動生成問題の実装”, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 527-528 (2012. 5. 23, 京都)
9. 森下力, 保田俊行, 大倉和博, “スワームロボットシステムにおける群挙動のクラスタ分析に関する一考察”, 第12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, pp. 457-460 (2011. 12. 23, 京都)優秀講演賞受賞
10. 保田俊行, 大倉和博, “強化学習ロボット群のための人工神経回路網の設定法 — 状態遷移予測器としての利用”, 第21回インテリジェント・システム・シンポジウム, 4 pages (2011. 9. 2, 神戸)
11. 坂本智紀, 保田俊行, 大倉和博, “スワームロボットシステムのクラスタ分析に基づく群挙動解析”, 第55回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 385-386 (2011. 5. 19, 吹田)
12. 大倉和博, 保田俊行, 森下力, “スワームロボットシステムにおける協調群れ行動生成の一手法”, 第11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論文集, pp. 2072-2075 (2010. 12. 25, 仙台)
13. 小谷幸彦, 保田俊行, 大倉和博, “協調箱押し問題における進化型人工神経回路網の隠れ層構造に関する一考察”, 第12回公益法人 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2010 講演論文集, 3B1-1 (2010. 11. 26, 京都)
14. 宗近公紀, 保田俊行, 大倉和博, “BRL を用いた移動ロボット群の協調箱押しタスクにおける段階的な行動獲得”, ロボティクス・メカトロニクス講演会2010 講演論文集, 2P1-G09 (2010. 6. 16, 旭川)

他 6 5 件

[図書] (計 5 件)

1. 大倉和博 (分担執筆), “進化技術ハンドブック 第 II 巻: 応用編: 情報・通信システム”, 社団法人電気学会 進化技術応用調査専門委員会 編, 近代科学社, 528pages (11, 2011)
2. Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura (Eds.), “Multi-Robot Systems, Trends and Development”, InTech, 586 pages, ISBN 978-953-307-425-2 (1, 2011)
3. Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, “A Reinforcement Learning Technique with an Adaptive Action Generator for a Multi-Robot System”, Multi-Robot Systems, Trends and Development, InTech pp. 473-488 (1, 2011)
4. Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, “Improving Search Efficiency in the Action Space of an Instance-Based Reinforcement Learning Technique for Multi-Robot Systems”, Multi-Robot Systems, Trends and Development, InTech, pp. 457-472 (1, 2011)
5. Jan Kudlacek, Branimir Barisic, Xavier Velay, and Kazuhiro Ohkura (Eds.), “Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2010”, InTech, 637pages (9, 2010)

[その他]

ホームページ等

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)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 60435451
- (3) 連携研究者  
( )

研究者番号: