

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820090

研究課題名(和文)スワームロボットシステムにおける適応的組織形成過程の解析とその展開

研究課題名(英文)Analysis of Emergent Processes of Adaptive Functions in Swarm Robotic Systems

研究代表者

保田 俊行 (Yasuda, Toshiyuki)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60435451

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)：社会性昆虫、魚や鳥の群れで観察される群知能をマルチロボットシステムへ応用することを目指す研究領域はスワームロボティクスと呼ばれる。これまでの研究の多くは群れ行動の生成に主眼を置いており、生物の群れがみせる振る舞いの再現のために生物学の知見に基づく行動規則を埋め込む形でロボット設計がしばしば行われている。本研究では、汎用性の高い設計である進化ロボティクスアプローチを採用し、群れ行動の高度化、およびそこに潜む協調メカニズムの解析を図った。進化ロボティクスのための分散計算環境の構築、動物行動学に基づく群れ行動解析、および実機ロボットでの検証実験を行った。

研究成果の概要(英文)：Swarm robotics (SR) is an application of swarm intelligence observed in insect colonies, fish schools, and bird flocks to multi-robot systems. Main research in SR focus on how to generate swarm behavior, and behavior rules based on the observation of biological swarms are often implemented. In this research, evolutionary robotics approach is adopted aiming for developing a principled design method and tackling more complicated tasks for robotic swarms. The following projects have been conducted: (1) Develop of parallel computing environments on GPU, (2) Ethological analysis of autonomous specialization process of robotic swarms, and (3) Verification in physical robot experiments.

研究分野：群知能システム

キーワード：スワームロボティクス 計算知能 進化ロボティクス 群れ行動 行動解析 進化型人工神経回路網

1. 研究開始当初の背景

アリは巣まで大きな餌を運んだり、大きな塚を作りその温度や湿度を一定のレベルに保つことができる。このように、自身の能力を超えたタスクを成し遂げるために各個が協調し合う社会性昆虫の生態、および魚や鳥の群れをつくる生態など、いわゆる動物行動学に動機付けられた知能システムに関する研究領域は群知能と呼ばれる。そして、この群知能のマルチロボットシステムへの応用がスワームロボティクス (Swarm Robotics, SR) である。SR の定義は以下のように定義されている：

多数の比較的単純かつ物理的に具現化されたロボット集団がロボット同士または環境との局所的相互作用から必要な集団的振る舞いをどのように創発させるかを議論する研究領域

ここで言う“多数”とは、問題の性質に依存するが、通常最低 10~20 の数を指す。また、“比較的単純”とは、与えられたタスクを一台では実行できないことである。ゆえに、SR では、全体を統括する機構を持たず (基本的に) 均質なロボット群による創発的な協調問題解決を狙っており、次の三つの特徴を持つとされる。

- 高い頑健性: ロボットが数台故障してもタスク達成が不可能になることはない
- 高い柔軟性: 問題がいくらか変更になっても達成が困難になることはない
- 高い拡張性: ロボットの集団サイズ変更に対応可能である

これらから明らかなように、SR に必要不可欠な機能は群の振る舞いを合目的に創発する行動調整機能であるといえる。一方、典型的な問題例は、アリが自分の体よりも非常に大きな餌をみんなで協力しあって運ぶ様子と似た挙動を生成する問題、すなわち、協調荷運び問題である。しかし、これまでの SR におけるこの問題の取り組みにおける成功例は、ほぼ、完全組み込み型のアドホックなアプローチであった。または、SR とはいえない数台程度の小さな規模のシステムで、“基本的行動を組み込んだ後、それらの出現頻度の調整”を行う程度で解ける集結問題、進化型人工神経回路網を制御器として搭載させて群れのフォーメーション形成や単一荷物の搬送が報告されている程度であるのが現状といえる。大局的にみれば、群知能から独立して SR が提唱されて数年になるが、今日に至るまで、SR の目的である上記の三つの特徴をともに十分に満たした研究例はないというのが実状であった。

2. 研究の目的

創発的協調行動の生成機構を一大特徴とする SR には、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、元来不向きなものであって、可塑性を持つアプローチが望ましい。本研究では、進

化型人工神経回路網によるアプローチを用いる。しかし、このアプローチのためには膨大な計算機資源が必要であるが、従来研究では限られた計算資源のもと可能な範囲で計算されているのみである。そして、そのため、当然ながら、人工進化で得られる適応レベルも限定的であり、集団的振る舞いも基本的なものから脱却しきれていない。さらには、実機ロボット群を用いたときに問題となる摩擦やノイズなどの不確定要素に十分に対処しうる手法が存在しておらず、計算機実験での議論が中心である。

ゆえに、本研究では、研究代表者らが開発してきた手法を基盤とし、その新展開として実機ロボット群の制御器である人工神経回路網を十分に適応進化させる。そして、それを通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

可塑的群知能システムの構築のための方法論を以下に示す三つの部分問題に分割して研究を実施した。

- (1) 進化型人工神経回路網の進化可能性の効率を更に飛躍的に向上させる理論・計算環境を構築する。
- (2) 実機プロトタイプを構築して、実機実験により検証する。
- (3) 発現した群挙動を解析し、その結果をシステム設計にフィードバックする。

これまで SR で取り扱われて来た代表的タスクは、(1)集合、(2)拡散、(3)餌拾い、(4)パターン形成、(5)連結された集団での群れ行動、(6)協調搬送などがある。本研究では、これらの中でも最も高難易度、すなわち最も複雑な役割分担が必要である(6)に(3)を組み合わせたタスクである協調採餌を対象とした。このタスクでは、一台では運べない重さの餌を巣まで複数台で協調して運ばなければならない。さらに、全ロボットが特定の荷物に集中すること無く、大まかに適切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いチームプレーをすることができる能力が必要になる。

4. 研究成果

- (1) 進化ロボティクスアプローチのための分散計算環境構築

並列・分散コンピューティングの一種である、GPU (Graphics Processing Unit) コンピューティングに注目した。これはグラフィック処理用デバイスである GPU を汎用計算に用いる手法である。進化計算における個体の独立性と、比較的単純な多数のロボットを用いるという SR の並列計算への親和性の高さに注目し、集団の並列化だけでなく個体単位での並列化を行うことにより GPU のアーキテクチャを考慮した実装手法を提案した。また、協調採餌問題

ではGPUが苦手とする条件分岐を数多く含んだ処理と、分岐が比較的少なく、かつ、ネストが浅い処理が混在している。よって、処理に応じてGPUでの計算とCPUでの計算を使い分けることで高速化を実現した。具体的には、条件分岐を多数含む複雑な処理はCPU、単純で独立性の高い処理はGPUでそれぞれ計算させた。

(2) 実機ロボティックスワームの製作と群れ行動生成実験

人工物の知能の実現には物理的身体と環境との相互作用が重要であるという身体性認知科学の観点から、embodiment と situatedness を有する実機ロボットによる検証は不可欠である。本研究では、研究目的にあった実験を効率的に行うため、市販ロボットではなく、改良や補修が自由に行える自作のロボットを用いるものとした。

製作した自律移動ロボットにBoidモデルに基づく制御器を搭載し、群れ行動の生成実験を行った。カモの行動特性やリーダーシップルールなどを適用することで、形状を変えつつもまとまりながら移動する実機ロボティックスワームを実現した。

実機実験では、協調採餌問題を扱うに



図1：製作したロボティックスワーム

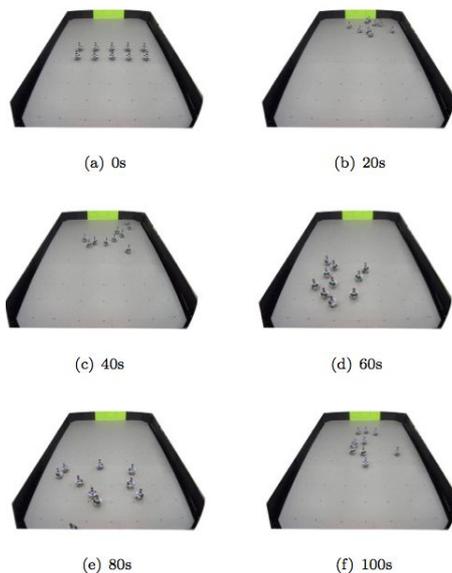


図2：自己組織的に生成された群れ挙動の例

至らなかった。また、人工進化により得た制御器を移植することも十分に行えていない。これらが課題として残った。

(3) 動物行動学に基づく群れ行動解析

SRでは群れ行動の生成に注目が集まることが多いが、群れ挙動の評価や解析方法に解する定石的な手法はない。これは、ロボティックスワームが超冗長システムであることに起因すると考える。この問題に取り組むにあたり、SRの必須の条件である、スワームの群れ行動は各ロボットの局所的相互作用から必ず創発的に生成されるという点に着目する。ロボットのセンサやコミュニケーション能力には限界があり、この局所的なロボット間の情報の繋がりが協調行動に密接に関連していると考えられることから、ロボット群を情報の繋がりを利用したネットワークとして捉えて複雑ネットワークに基づくクラスタリングを行ってきた。

本研究では、そのクラスタリング結果に基づいてロボット群はどのように協調しているのかについての理解を助けるような情報の獲得を目指し、SRの起源である群知能は実生物に着想を得ていることから、動物行動学でとられている統計的解析手法を適用する。特に、サブグループ間の役割分担の様子を抽出するため、行動連鎖を解析する手法を開発した。それにより、ランダムな振る舞いが人工進化を通して徐々に調整されていく過程などが確認できた。また、別の実験では、タスク達成に直接寄与する行動を強化するのではなく、不要な行動を避けることに重点を置いているうちにタスクを達成していることや、このような行動の方が環境変化に適用しやすいことがわかった。

以上のように、概ね計画通りに研究を実施することができた。

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21件)

1. 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(日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.26, No.5, pp.855-865, 2014, 査読有 DOI: 10.3156/jsoft.26.855
2. 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
DOI:10.1541/ieejieiss.134.1355
3. Toshiyuki Yasuda, Akitoshi Adachi, and Kazuhiro Ohkura, Self-Organized Flocking of a Mobile Robot Swarm by Topological Distance-Based Interactions, Proc. of 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.106-111, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/SII.2014.7028020
 4. 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) Proc., pp.129-134, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/RIISS.2014.7009182
 5. Toshiyuki Yasuda, Akitoshi Adachi, and Kazuhiro Ohkura, Self-organized Flocking in Mobile Robots Based on Frontal Interaction and a Leadership Rules, Proc. of Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.594-599, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044820
 6. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Masaki Kadota, and Yoshiyuki Matsumura, An Extended SHADE and its Evaluations, Proc. of 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (IES 2014), Vol.2, pp.493-504, 2014, 査読有
DOI: 10.1007/978-3-319-13356-0_39
 7. Toshiyuki Yasuda, Koki Kage, and Kazuhiro Ohkura, Response Threshold-Based Task Allocation in a Reinforcement Learning Robotic Swarm, Proc. of IEEE 7th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCI 2014), pp.189-194, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/IWCI.2014.6988104
 8. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, Yoshiyuki Matsumura, and Masaki Kadota, GPU Implementation of Food-Foraging Problem for Evolutionary Swarm Robotics Systems, Proc. of 9th International Conference on Swarm Intelligence (ANTS 2014), LNCS8667, pp.238-245, 2014, 査読有
DOI: 10.1007/978-3-319-09952-1_22
 9. Yu Tian, Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Yoshiyuki Matsumura, and Masanori Goka, Apply Incremental Evolution with CMA-NeuroES Controller for a Robust Swarm Robotics System, Proc. of Proc. of the SICE Annual Conference 2014, pp.295-300, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/SICE.2014.6935195
 10. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, A Levy Flight-Based Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Numerical Optimization Problems, Proc. of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.2656-2663, 2014, 査読有
DOI: 10.1109/CEC.2014.6900501
 11. 大倉和博, 保田俊行, 多点探索型機械学習の新展開:進化型スワームロボットシステムの群挙動生成と役割分担の分析法, システム制御情報学会誌, Vol.57, No.10, pp.427-432, 2013, 査読有
 12. 保田俊行, 大倉和博, 連続空間における強化学習によるマルチロボットシステムの協調行動獲得, 計測と制御 (リレー解説・強化学習の最近の展開), Vol.52, No.7, pp.648-655, 2013, 査読有
 13. 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
 14. 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
 15. Yoshiyuki Matsumura, Kiyotaka Sugiyama, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, A (μ , λ) Evolutionary and Particle Swarm Hybrid Algorithm Over Cloud Computing, with an Application to Dinosaur Gait Optimization, Proc. of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 802-807, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/SII.2013.6776759
 16. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, Nanami Wada, and Yoshiyuki Matsumura, Behavior Sequence Analysis of Incrementally Evolving Robotic Swarms in a Foraging Task, Proc. of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration,

- pp.790-795, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/SII.2013.6776737
17. Hai Shan, Toshiyuki Yasuda, and Kazuhiro Ohkura, A Self Adaptive Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Solving CEC 2013 Real-Parameter Optimization Problems, Proc. of 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.706-711, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/SII.2013.6776717
 18. Kazuhiro Ohkura, Toshiyuki Yasuda, and Yoshiyuki Matsumura, Coordinating the collective behavior of swarm robotics systems based on incremental evolution, Proc. of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.4024-4029, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/SMC.2013.687
 19. Toshiyuki Yasuda, Kazuhiro Ohkura, and Kazuaki Yamada, Multi-Robot Cooperation Based on Continuous Reinforcement Learning with Two State Space Representations, Proc. of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.4470-4475, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/SMC.2013.760
 20. Yoshiyuki Matsumura, Ayumu Kobayashi, Kiyotaka Sugiyama, Todd Pataky, Bill Sellers, Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura, A (μ, λ) Evolutionary and Particle Swarm Hybrid Algorithm, with an Application to Dinosaur Gait Optimization, 2013 IEEE 6th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA) Proc., pp. 89-93, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/IWCIA.2013.6624791
 21. 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) Proc., pp.148-155, 2013, 査読有
DOI: 10.1109/ADPRL.2013.6615001
- [学会発表](計33件)
1. 大倉和博, Evolutionary Approach to Sudoku Puzzles with Sophisticated Operations, 第27回自律分散システムシンポジウム, 東京理科大学森戸記念館(東京都新宿区), 2015年1月22日
 2. 森川達矢, クラウドコンピューティングを用いた進化計算環境の構築, 第14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, 東京ビッグサイト(東京都江東区), 2014年12月15日
 3. Zhiwen Wang, Solving sudoku puzzles based on genetic algorithms with filtrated mutations, 第23回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 福山大学宮地茂記念館(広島県福山市), 2014年11月29日
 4. 大倉和博, 群れ行動を理解する, 第24回インテリジェント・システム・シンポジウム, 北見工業大学(北海道北見市), 2014年9月19日
 5. 吉岡佑磨, 国際サービス市場での事業支援システムの提案 -中国上海市某クリーニング企業のケーススタディ-, 第24回インテリジェント・システム・シンポジウム, 北見工業大学(北海道北見市), 2014年9月18日
 6. 門田真樹, SHADEの一拡張法の提案とその評価, 第24回インテリジェント・システム・シンポジウム, 北見工業大学(北海道北見市), 2014年9月18日
 7. 保田俊行, 位相距離に依存した相互作用によるロボティクスワームの群れ行動生成, 第24回インテリジェント・システム・シンポジウム, 北見工業大学(北海道北見市), 2014年9月18日
 8. 保田俊行, 反応閾値モデルに基づく強化学習ロボティクスワームの群れ行動獲得, 2014 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 広島市立大学(広島市), 2014年7月19日
 9. 森川達矢, 漸進進化を用いた協調採餌タスクにおけるロボティクスワームの群れ行動生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館(富山市), 2014年5月27日
 10. 安達明俊, 実機ロボティクスワームによる群れ行動生成実験, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館(富山市), 2014年5月27日
 11. 野村冬星, 進化型スワームロボティクスシステムの追跡問題への適用, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都テルサ(京都市), 2014年5月22日
 12. 内倉慶介, 行動連鎖の概念に基づく追跡問題におけるロボティクスワームの群れ行動解析, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都テルサ(京都市), 2014年5月21日
 13. 保田俊行, 追跡問題への進化型スワームロボティクスアプローチ, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京大学(東京都文京区), 2014年3月18日
 14. 松村嘉之, スワームロボティクスのための進化計算用グリッドサービスの構築, 第14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,神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013年12月19日
15. 和田七海, 行動連鎖の概念に基づくロボティクスワームの群れ行動解析, 第14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,神戸国際会議場(兵庫県神戸市), 2013年12月19日
 16. 和田七海, 行動連鎖に基づくロボティクスワームの群れ挙動解析, 動物行動学会 第32回大会, 広島大学(広島県東広島市) 2013年11月30日
 17. 島谷直規, 進化型スワームロボティクスシステムにおける群挙動生成のマルチGPUによる高速化, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013, ピアザ淡海(滋賀県大津市), 2013年11月18日
 18. 笹谷俊貴, 視覚的に推測した進行方向情報に基づくロボティクスワームの群れ行動生成, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013, ピアザ淡海(滋賀県大津市), 2013年11月18日
 19. 杉山聖貴, クラウド環境での進化計算用グリッドシステムの構築, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013, ピアザ淡海(滋賀県大津市), 2013年11月18日
 20. 門田真樹, 適応DEにおける適応パラメータ調整に関する一考察, 第23回インテリジェント・システム・シンポジウム, 九州大学医学部百年講堂(福岡市), 平成25年9月26日
 21. 島谷直規, 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, 第23回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp.98--103 (9, 2013), 九州大学医学部百年講堂(福岡市), 平成25年9月26日
 22. 竹中貴治, 進化型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非同期処理に関する一考察, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市) 2013年9月12日
 23. 松村嘉之, アパレル業界におけるネットワーク分析の特徴量について, 2013年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市) 2013年9月12日
 24. 保田俊行, 追跡問題における進化型ロボティクスワームの群れ挙動生成, 第29回ファジィシステムシンポジウム, 大阪国際大学(大阪府枚方市), 2013年9月10日
 25. 八木優志, 進化ロボティクスワームの協調採餌問題における凸凹度に基づく適応度景観解析, 2013 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, pp.125--128 (7, 2013), 広島市立大学(広島市), 2013年7月13日
 26. 和田七海, 協調採餌問題におけるロボティクスワームの動物行動学に基づく群れ行動解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場(茨城県つくば市), 2013年5月24日
 27. 鹿毛浩輝, アンサンブル強化学習ロボティクスワームの協調群れ行動の生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場(茨城県つくば市), 2013年5月24日
 28. 八木優志, 進化ロボティクスワームによる協調採餌問題の適応度景観の解析に関する一検討, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月17日
 29. 杉山聖貴, CloudStackを用いたクラウド環境での進化計算用グリッドサービス, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月16日
 30. 竹中貴治, 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協調群れ行動の生成, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月16日
 31. 野村冬星, 構造進化保護機構を持つ拡張MBEANNによる進化ロボットスワームの群挙動生成, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月16日
 32. 内倉慶介, 有向ネットワークのクラスタリングに基づくロボティクスワームの群挙動解析, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月16日
 33. 笹谷俊貴, カモの群れ行動特性とリーダーシップに基づく自律移動ロボット群による群れ行動の生成, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市), 2013年5月16日
- 〔その他〕
ホームページ
<http://www.ohk.hiroshima-u.ac.jp/~yasuda/index.html>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
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