

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本－イスラエル共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「低機能ロボット群による環境外乱に頑健で継続的な自律的組織化システム構築手法」
2. 研究期間：平成 30 年 6 月～令和 4 年 3 月
3. 主な参加研究者名：
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	大下 福仁	准教授	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科	全WP、WP1、WP4、WP5の主担当
主たる共同研究者	和田 幸一	教授	法政大学・理工学部	全WP、WP1、WP3、WP5の主担当
主たる共同研究者	片山 喜章	教授	名古屋工業大学・大学院工学研究科	全WP、WP2、WP3、WP5の主担当
主たる共同研究者	亀井 清華	准教授	広島大学・大学院工学研究科	全WP、WP1、WP2、WP4の主担当
主たる共同研究者	山内 由紀子	准教授	九州大学・大学院システム情報科学研究院	全WP、WP2、WP3、WP4の主担当
研究期間中の全参加研究者数			9名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Shlomi Dolev	Professor	Department of Computer Science, Ben-Gurion University of the Negev	All WPs
研究期間中の全参加研究者数			2名	

4. 国際共同研究の概要

本研究では、多数の低機能ロボットを自律的に動作させることで、外乱の多い環境でも安定的にタスクを実行できるフレームワーク（ロボットの機能とアルゴリズム）の確立を目的とした。上記の目的を達成するために、以下の課題に取り組んだ。(1) 実環境で重要な要素を取り入れたロボットシステムの抽象モデルを構築し、タスクの実行に必要なロボットの機能とタスクを効率よく実行するアルゴリズムを明らかにする。(2) 抽象モデルにおけるロボットの機能を、実ロボットで効率よく実装する方法を明らかにする。

課題 (1) に対して、以下の 2 つのワークパッケージ(WP)に取り組んだ。WP1：低機能ロボット群モデルの実環境に向けた拡張、WP2：自然系に基づく低機能ロボット群モデルの構築。課題 (2) に対して、以下の 2 つの WP に取り組んだ。WP3：低機能ロボット群の抽象モデルに対する低コスト実現手法の創出。WP4：低機能ロボット群の抽象モデルに対

するレジリエントな実現手法の創出。さらに、課題（1）（2）で開発した手法を実機ロボットで実現するための基盤技術の開発と検証を目的として、以下の WP に取り組んだ。WP5：低機能ロボット群のプロトタイプシステムの開発。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

WP1: 低機能ロボット群を実環境で効率よく動作させるために、そのアルゴリズムの設計に有用な拡張 LCM モデルを多数提案した。同時に、低機能ロボット群を効率よく動作させるためのアルゴリズムを多数開発した。

WP2: 従来の LCM モデルに化学反応系や生物系に着想を得た機能を追加し、自然系が有する安定性を低機能ロボット群に実現するための要件の解明に取り組んだ。

WP3: LCM モデル及びその拡張モデル、自然系に着想を得た理論モデルを実環境において実装するための手法とその検証をそれらにかかるコストを評価することにより、低機能ロボット群に対する低コストの実現を行った。

WP4: 低機能ロボット群に対して故障耐性を持たせるために、自己安定化について検討し、複数の分散問題に対して自己安定アルゴリズムを提案した。

WP5: LCM モデル、座標系など理論モデル上で構築された低機能ロボット群による成果を実ロボットに適用可能とする基盤技術のひとつとして、理論的なロボット群のシミュレータや実ロボットによる共有離散座標系の実現法などを提案した。

5-2 国際共同研究による相乗効果

両国の研究者が低機能ロボット群に関する研究を進めているが、それぞれ異なる領域で先導的な研究を行っている。日本側研究者は、LCM モデルを基に、さまざまなタスクについて、その実現に最低限必要な機能とその実現のためのアルゴリズムを開発している。一方で、イスラエル側研究者は、LCM モデルやその拡張機能を効率よく実装する手法について研究を行っている。これらの研究者が協力して共同研究に取り組むことで、分散システムに対する有用な新たな概念である *neighborhood mutual remainder*、ロボット群に対する革新的な耐故障アルゴリズム設計アプローチである *Forgive-and-forget*、*location function* を提案することができた。また、共同研究の議論を通して、多くの研究課題を設定でき、当初計画以上の研究成果をあげることができた。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本国際共同研究では、国際論文誌と国際会議で計 66 件の発表を行なっている。これらのほとんどは、当該分野で評価の高い国際論文誌、国際会議であり、当該分野への波及効果が高いと考えられる。また、共同研究の相乗効果で得られた概念および設計アプローチの対象は限定されたものでないため、今後さまざまな問題に対して広く適用されていくと期待できる。人材育成の面でも、本共同研究の一部の課題を主導した 3 名の学生が博士を取得（うち 1 名は短期修了）し、研究参加者が昇進するなど、大きな成果が得られた。新たな課題に対する議論も進めており、今後も共同研究を継続して当該分野に貢献していく予定である。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
Japan – Israel Joint Research Program
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Realization of Sustainable Autonomous Self-Organizing Systems by Low-Functional Robots in Environmental Disaster Recovery」
2. Research period : June 2018 ~ March 2022
3. Main participants :
Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Fukuhito Ooshita	Associate Professor	Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology	All WPs (mainly WP1, WP4 and WP5)
Co-PI	Koichi Wada	Professor	Faculty of Science and Engineering, Hosei University	All WPs (mainly WP1, WP3 and WP5)
Co-PI	Yoshiaki Katayama	Professor	Graduate School of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology	All WPs (mainly WP2, WP3 and WP5)
Co-PI	Sayaka Kamei	Associate Professor	Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University	All WPs (mainly WP1, WP2 and WP4)
Co-PI	Yukiko Yamauchi	Associate Professor	Graduate School of ISEE, Kyushu University	All WPs (mainly WP2, WP3 and WP4)
Total number of participants throughout the research period:				9

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Shlomi Dolev	Professor	Department of Computer Science, Ben-Gurion University of the Negev	All WPs
Total number of participants throughout the research period:				2

4. Summary of the international joint research

This research project aims to develop a framework (functions of robots and algorithms) to operate a huge number of low-functional robots in a self-organizing and self-stabilizing manner. To achieve this goal, we have tackled the following researches. (1) We develop an abstract robot system model close to real environments, and clarify functions and algorithms of robots required to construct a designated system in real environments. (2) We develop efficient methods to implement functions of robots assumed in the abstract robot system model.

For research (1), we work on two work packages (WPs). WP1: Look-Compute-Move (LCM) model for real environments. WP2: Models based on natural systems. For research (2), we work on WPs. WP3: Algorithmic ways for efficient implementation. WP4: Algorithmic ways for resilient implementation. In addition, to develop and evaluate the proposed methods in real environments, we work on the following WP. WP5: Development of a prototype.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

WP1: We have developed abstract robot system models by extending the LCM model. These models are useful to develop algorithms to operate a swarm of low-functional robots in real environments. We have also proposed efficient algorithms for various basic tasks.

WP2: We have investigated how to incorporate functions inspired by chemical reactions and biological systems into the existing LCM model so that robots with very weak capabilities realize a system endowed with stability of natural systems.

WP3: We have examined the feasibility of natural system models, adaptability and fault tolerance of existing technologies to the environment, design of algorithms for model realization, computational performance limits, and verification of existing technologies for implementation using actual robots.

WP4: In order to provide fault tolerance for a group of low-function robots, we have developed implementation methods of self-stabilization. In addition, we have proposed self-stabilizing algorithms for several distributed problems.

WP5: We have developed a simulator for theoretical low-functional robots and a method to realize a common discrete coordinate system shared by all robots using real robots as one of the fundamental techniques to apply the results of low-functional robots developed on theoretical models to real robots.

5-2 Synergistic effects of the joint research

Both of Japanese and Israeli researchers conduct researches on low-functional robots, however they lead researches in different fields. Japanese researchers focus on theoretical researches to clarify the minimum functions of robots with abstract robot models. On the other hand, Israeli researchers focus on efficient implementation of robots that are used in theoretical researches. By cooperative research among these researchers, we have developed a new concept of distributed systems (neighborhood mutual remainder) and an innovative approach for Byzantine-tolerant robot systems (Forgive-and-forget and location functions). In addition, as a result of the cooperative discussion, we have obtained more research results than we planned originally.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

This research project has published 67 papers as international journal papers or international conference papers. Most papers are published in the high-ranked journals or conferences, and thus these results will spread to the research community. We have developed new concepts and approached such that their targets are not limited to some specific tasks, and hence these concepts and approaches will be applied to many other tasks or problems. We have also made good contributions in terms of personnel training: Three PhD candidates have obtained their degrees and some members have got promoted. We are planning to continue the cooperative research and contribute to the research field by the collaboration.

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

*原著論文 (相手側研究チームとの共著論文) 発表件数 : 計 6 件

・査読有り : 発表件数 : 計 6 件

1. S. Dolev, S. Kamei, Y. Katayama, F. Ooshita and K. Wada, "Brief Announcement: Neighborhood Mutual Remainder and its Self-Stabilizing Implementation of Look-Compute-Move Robots," Proc. of 33rd International Symposium on Distributed Computing, 2019, DOI: 10.4230/LIPIcs.DISC.2019.43
2. S. Dolev, S. Kamei, Y. Katayama, F. Ooshita and K. Wada, "Brief Announcement: Self-Stabilizing Implementation of LCM Robots," Proc. of 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2019, 127-132, DOI: 10.1007/978-3-030-34992-9_11
3. Y. Ashkenazi, S. Dolev, S. Kamei, F. Ooshita and K. Wada, "Brief announcement: Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots," Proc. of 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2019, 16-21, DOI: 10.1007/978-3-030-34992-9_2
4. Y. Ashkenazi, S. Dolev, S. Kamei, F. Ooshita and K. Wada, "Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots," Proc. of 11th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, 2019, 188-194, DOI: 10.1109/CANDARW.2019.00041
5. Y. Ashkenazi, S. Dolev, S. Kamei, F. Ooshita, and K. Wada, "Forgive & Forget: Self-stabilizing swarms in spite of Byzantine robots," Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2020, DOI: 10.1002/cpe.6123
6. Y. Ashkenazi, S. Dolev, S. Kamei, Y. Katayama, F. Ooshita, and K. Wada, "Location Functions for Self-Stabilizing Byzantine Tolerant Swarms," 23rd International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), 229-242, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-91081-5_15

・査読無し : 発表件数 : 計 0 件

該当なし

*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文) : 発表件数 : 計 61 件

・査読有り : 発表件数 : 計 61 件の内、23 件掲載

1. T. Okumura, K. Wada, Y. Katayama, "Rendezvous of Asynchronous Mobile Robots with Lights," LNCS Adventures Between Lower Bounds and Higher Altitudes Essays Dedicated to Juraj Hromkovic on the Occasion of His 60th Birthday, 2018, 11011, 434-448, DOI: 10.1007/978-3-319-98355-4.
2. T. Okumura, K. Wada, X. Defago "Optimal Rendezvous L-Algorithms for Asynchronous Mobile Robots with External-Lights," 22nd International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2018), 2018, LIPICS vol. 125, pp.24:1-24:16, DOI: 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2018.24.
3. S. Kamei and H. Kakugawa, "Asynchronous message-passing distributed algorithm for the global critical section problem," International Journal of Networking and Computing, 2019, 9(2), DOI:10.15803/ijnc.9.2_147.
4. S. Kamei and H. Kakugawa, "A self-stabilizing distributed algorithm for the local $(1,|Nil)$ -critical section problem," Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2019, DOI:10.1002/cpe.5628.
5. P. Flocchini, N. Santoro, and K. Wada, "On Memory, Communication, and Synchronous Schedulers When Moving and Computing," in Proc. 23rd International Conference 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2019.25 10.4230/LIPIcs.OPODIS.2019.25 on Principles of

- Distributed Systems, LIPICS vol. 153, 2019, 25:1-25:16, DOI: 10.4230/LIPICS.OPODIS.2019.25.
6. N. Aoyama, Y. Kim, Y. Katayama, "Virtualized Sensor System: an Access Unification and Software-defined Sensors," Proc. of The 4th International Conference on Universal Accessibility in the Internet of Things and Smart Environments, 2019, 14-19, ISSN: 2519-8378, ISBN: 978-1-61208-692-7.
 7. Y. Kim, M. Shibata, Y. Sudo, J. Nakamura, Y. Katayama, T. Masuzawa, "A Self-Stabilizing Algorithm for Constructing ST-Reachable Directed Acyclic Graph When $|S| \leq 2$ and $|T| \leq 2$," Proc. of 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems, 2019, 2228-2237, IEEE Catalog Number: CFP19040-ART, ISBN: 978-1-7281-2519-0, DOI: 10.1109/ICDCS.2019.00219.
 8. Y. Sudo, F. Ooshita, T. Izumi, H. Kakugawa, and T. Masuzawa, "Time-optimal leader election in population protocols," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(11), 2620-2632, DOI: 10.1109/TPDS.2020.2991771.
 9. M. Shibata, N. Kawata, Y. Sudo, F. Ooshita, H. Kakugawa, and T. Masuzawa, "Move-optimal partial gathering of mobile agents without identifiers or global knowledge in asynchronous unidirectional rings," Theoretical Computer Science, 2020, 822(24), 92-109, DOI: 10.1016/j.tcs.2020.04.002.
 10. Y. Kim, Y. Katayama, T. Masuzawa, "A self-stabilizing algorithm for constructing a maximal (σ, τ) -directed acyclic mixed graph," Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2020, 2020:e5812, DOI: 10.1002/cpe.5647.
 11. K. Buchin, P. Flocchini, I. Kostitsyna, T. Peters, N. Santoro, K. Wada, "Autonomous Mobile Robots: Refining the Computational Landscape," 23rd Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM 2021), 2021, 576-585, DOI: 10.1109/IPDPSW52791.2021.00091.
 12. T. Gotoh, Y. Sudo, F. Ooshita, H. Kakugawa, and T. Masuzawa, "Exploration of dynamic tori by multiple agents," Theoretical Computer Science, 2021, 850, 202-220, DOI: 10.1016/j.tcs.2020.11.004.
 13. H. Yasumi, F. Ooshita, M. Inoue, and S. Tixeuil, "Uniform Bipartition in the Population Protocol Model with Arbitrary Graphs," Theoretical Computer Science, 2021, 892, 187-207, DOI: 10.1016/j.tcs.2021.09.020.
 14. F. Ooshita and S. Tixeuil, "Ring exploration with myopic luminous robots," Information and Computation, 2021, DOI: 10.1016/j.ic.2021.104702.
 15. K. Doi, Y. Yamauchi, S. Kijima, and M. Yamashita, "Search by a Metamorphic Robotic System in a Finite 2D Square Grid," Information and Computation Journal, 2021, DOI: 10.1016/j.ic.2021.104695.
 16. Y. Kim, M. Shibata, Y. Sudo, J. Nakamura, Y. Katayama, T. Masuzawa, "A Self-Stabilizing Algorithm for Constructing a Minimal Reachable Directed Acyclic Graph with Two Senders and Two Targets," Theoretical Computer Science, 2021, 874(3), 1-14, DOI: 10.1016/j.tcs.2021.05.005.
 17. M. Shibata, M. Oyabu, Y. Sudo, J. Nakamura, Y. Kim, Y. Katayama, "Visibility-optimal gathering of seven autonomous mobile robots on triangular grids," 23rd Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models, 2021, 566-575, DOI: 10.1109/IPDPSW52791.2021.00090.
 18. J. Nakamura, S. Kamei and Y. Yamauchi, "Evacuation from a Finite 2D Square Grid Field by a Metamorphic Robotic System," Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, DOI:10.1002/cpe.6628.
 19. H. Kakugawa, S. Kamei and Y. Katayama, "A self-stabilizing token circulation with graceful handover on bidirectional ring networks," International Journal of Networking and Computing, 2022, 12(1), 103-130, DOI:10.15803/ijnc.12.1_103.
 20. R. Tang, Y. Yamauchi, S. Tixeuil, "Bridging Theory and Practice for Kilobots: The Case of Team Assembling," AROB-ISBC-SWARM 2022, 2022, <https://isarob.org/symposium/>.
 21. M. Shibata, M. Ohyabu, Y. Sudo, J. Nakamura, Y. Kim, Y. Katayama, "Visibility-optimal gathering of seven autonomous mobile robots on triangular grids," International Journal of Networking and Computing, 2022, 12(1), ISSN 2185-2847 (online).

22. K. Buchin, P. Flocchini, I. Kostitsyna, T. Peters, N. Santoro, K. Wada, "On the Computational Power of Energy-Constrained Mobile Robots: Algorithms and Cross-Model Analysis," to appear in SIROCCO 2022, 2022.
23. R. Yamada and Y. Yamauchi, "Search by a Metamorphic Robotic System in a Finite 3D Cubic Grid," 1st Symposium on Algorithmic Foundations of Dynamic Networks (SAND 2022), 2022.

・査読無し：発表件数：計 0 件
該当なし

*その他の著作物（相手側研究チームとの共著総説、書籍など）：発表件数：計 0 件
該当なし

*その他の著作物（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など）：発表件数：計 0 件
該当なし

2. 学会発表

*口頭発表（相手側研究チームとの連名発表）
発表件数：計 5 件（うち招待講演：0 件）

*口頭発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）
発表件数：計 84 件（うち招待講演：4 件）の内、4 件掲載

1. F. Ooshita, "Computational Power of Myopic Robots on Graphs," 2nd Workshop on Self-organization in Swarm of Robots, Tokyo, 2018, 招待講演.
2. K. Wada, "Rendezvous on asynchronous mobile robots with lights -Relationship between power of lights and synchrony," 2nd Workshop on Self-organization in Swarm of Robots in SSS 2018, Tokyo, 2018/11/4, 招待講演.
3. K. Wada, "Parallel Complexity for MapReduce computation," Lip6 Computer Science Seminar, Paris, 2019/2/26, 招待講演.
4. S. Kamei, "Autonomous Distributed Systems of Myopic Mobile Robots with Lights," International Conference on Distributed Computing and Networking, online, 2021, 招待講演.

*ポスター発表（相手側研究チームとの連名発表）
発表件数：計 0 件

*ポスター発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）
発表件数：計 0 件

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. 2nd Workshop on Self-organization in Swarm of Robots, 山内由紀子（九州大学・准教授），東京工業大学田町キャンパス（日本，東京），2018年11月4日，参加人数40名程度
2. Workshop on Distributed Algorithms for Low-Functional Robots, 大下福仁（奈良先端科学技術大学院大学・准教授），和田幸一（法政大学・教授），片山喜章（名古屋工業大

学・教授), 山内由紀子 (九州大学・准教授), 亀井清華 (広島大学・准教授), 長崎市民会館 (日本, 長崎), 2019 年 11 月 26 日, 参加人数 30 名程度

3. 2nd Workshop on Distributed Algorithms for Low-Functional Robots, 大下福仁 (奈良先端科学技術大学院大学・准教授), 亀井清華 (広島大学・准教授), オンライン開催, 2021 年 1 月 8 日, 参加人数 30 名程度

4. 研究交流の実績 (主要な実績)

1. 共同研究の遂行・国際ワークショップの開催 2018 年 11 月 4 日～11 月 7 日
東京工業大学田町キャンパスで 2nd Workshop on Self-organization in Swarm of Robots を開催し、Shlomi Dolev (ネゲヴ・ベン＝グリオン大学・教授)、大下福仁 (奈良先端科学技術大学院大学・准教授)、和田幸一 (法政大学・教授) が、研究状況について講演を行なった。また、期間中に議論を行ない、共同研究を遂行した。
2. 共同研究の遂行
大下福仁 (奈良先端科学技術大学院大学・准教授) 2019 年 3 月 1 日～3 月 17 日
亀井清華 (広島大学・准教授) 2019 年 3 月 1 日～3 月 17 日
和田幸一 (法政大学・教授) 2019 年 3 月 2 日～3 月 15 日
日本側から 3 名がネゲヴ・ベン＝グリオン大学を訪問し、共同研究を遂行した。
3. 共同研究の遂行・国際ワークショップの開催 2019 年 11 月 26 日～11 月 29 日
長崎市民会館で Workshop on Distributed Algorithms for Low-Functional Robots を開催し、Shlomi Dolev (ネゲヴ・ベン＝グリオン大学・教授) が来日し、期間中に議論を行ない、共同研究を遂行した。
4. Zoom によるオンラインディスカッション
全研究期間を通して、1～3 週に 1 回程度の頻度で Zoom によるオンラインディスカッションを行ない、共同研究を遂行した。

5. 特許出願

研究期間累積出願件数 : 0 件

6. 受賞・新聞報道等

1. Best paper award at SSS 2018, 土居圭介, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, 2018 年 11 月 6 日
2. 情報処理学会 マイクロソフト情報学研究賞, 山内由紀子, 2019 年 3 月 15 日
3. 平成 31 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 山内由紀子, 2019 年 4 月 17 日
4. 令和元年度 九州大学若手女性研究者優秀賞, 山内由紀子, 2019 年 10 月 19 日
5. Best student paper award at SSS 2019, 長濱将太, 大下福仁, 井上美智子, 2019 年 10 月 23 日
6. 第 16 回情報科学ワークショップ優秀研究賞, 安見嘉人, 大下福仁, 井上美智子, 2020 年 9 月 30 日
7. CANDAR Outstanding Papers, 中村純哉, 亀井清華, 山内由紀子, 2020 年 11 月 27 日
8. APDCM Best Paper Award, K. Buchin, P. Flocchini, I. Kostitsyna, T. Peters, N. Santoro, K. Wada, 2021 年 5 月 17 日
9. 第 17 回情報科学ワークショップ優秀研究賞, 中井陸雄, 首藤裕一, 和田幸一, 2021 年 9 月 13 日
10. 第 17 回情報科学ワークショップ優秀研究賞, 成瀬隆昌, 泉泰介, 金鎔煥, 片山喜章,

2021年9月13日

11. 第17回情報科学ワークショップ優秀研究賞, 廣瀬慈恩, 中村純哉, 大下福仁, 井上美智子, 2021年9月13日

7. その他

該当なし