

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K18031

研究課題名（和文）大規模・複雑な環境下でモバイルエージェント協調動作を実現する移動制御アルゴリズム

研究課題名（英文）Movement-control algorithms of mobile agents for achieving their coordination in large-scale and complicated environments

研究代表者

柴田 将拡（SHIBATA, Masahiro）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：10806095

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ネットワーク中を自律的に移動する複数体のモバイルエージェント（以下、エージェント）が $g$ 体以上ずつのグループに分かれて集合するような自律的な移動を要求する $g$ -部分集合問題、エージェントが均等に配置することを要求する均一配置問題に主に着目し、エージェントが持つメモリ量や前提知識が少ない状況下や、通信リンクの接続状況が一時的に不安定になるような状況下でも、これらの問題を解決するアルゴリズムを設計することで、大規模・複雑な状況下でもエージェント間の協調動作を実現させるフレームワーク確立のために必要ないくつかの要素技術を完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の自律分散システムは大規模化・複雑化が進行しており、ネットワークの一時的な故障は避けられない。また、従来のエージェントは多くのメモリ情報を有した状態でネットワーク中を動作し、このことは消費電力の増加にもつながる。本研究課題で得られた、少ないエージェントメモリや移動コストで $g$ -部分集合問題や均一配置問題を解決するアルゴリズムの成果を適用すると、上記の問題を解決できることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, for mobile agents that move in the network autonomously, I mainly focused on the  $g$ -partial gathering problem and the uniform deployment problem. The  $g$ -partial gathering problem requires agents to reach a configuration such that at least  $g$  agents or no agent exists at each node, and the uniform deployment problem requires agents to spread uniformly in the network. I proposed algorithms to solve these problems under the assumption such that agents do not have enough memory space or global knowledge, or communication links are temporarily unstable. By these methods, I completed designing several elements necessary for the establishment of a framework for agents' coordination even in large-scale and complicated environments.

研究分野：自律分散アルゴリズム

キーワード：自律分散システム モバイルエージェント 集合問題  $g$ -部分集合問題 均一配置問題 動的ネットワーク 自律分散ロボット群

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年の分散システムは、様々な種類の IoT デバイスを含む多数のコンピュータがネットワークに接続されることにより、多様化・大規模化・複雑化が進行している。このような分散システムへの効率的な設計手段として、モバイルエージェント（以下、エージェント）が注目を浴び、研究されてきた。エージェントはネットワーク内を自律的に移動するソフトウェアを指し、複数体のエージェントが協調動作することにより、システムの効率的な監視・点検等が期待できる。これまでに、エージェントの探索問題・一点集合問題・ $g$ -部分集合問題・均一配置問題等の問題を解決する自律分散アルゴリズムの設計に関する研究が行われてきたが、大半の研究はアルゴリズム実行中にネットワークやエージェントに故障や動的な変化は発生しないという仮定が置かれていた。しかし、大規模化・複雑化が進行している分散システム上では、故障や動的な変化に柔軟に対応するエージェントアルゴリズムの設計が必須である。また、システムへの負担を減らすために、少ない移動コスト・エージェントメモリで動作するアルゴリズムを設計することも重要である。

## 2. 研究の目的

上述の背景を鑑みて、本研究では大規模で複雑な分散システム上でもエージェントの協調動作を効率的に実現するためのアルゴリズムを設計することを目的とする。特に、一点集合問題よりも少ない移動コストでの問題の解決が期待できる  $g$ -部分集合問題と、一点集合問題・ $g$ -部分集合問題は解決できない状況を含む幅広い状況からの問題解決が期待できる均一配置問題を中心に取り組み、これらの問題に対しシステム上に故障や動的な変化が発生する状況下でも正しく動作する自律分散アルゴリズムや、少ない移動コストやエージェントメモリで問題を解決する自律分散アルゴリズムの設計を行った。

## 3. 研究の方法

$g$ -部分集合問題は、ネットワーク中に分散しているエージェントが少なくとも  $g$  体以上ずつのグループに分かれて集合するための自律的な移動を要求する問題である。これまでに、エージェントが一意的な ID を持ちアルゴリズムが決定性の場合と、エージェントがエージェント総数の大域情報の前提知識を持っていてアルゴリズムが乱択の場合に、最適な(期待)移動コストで問題を解決するアルゴリズムが提案されていた。ID は集合ノードの決定に、エージェント総数の大域情報は例外処理のために使われていたが、ID の代わりに初期状況におけるエージェント間の距離情報を用いることで、また、大域情報を用いずとも仮想的なフェーズ番号を用いることで問題を解決できるのではないかという発想に至り、アルゴリズムの設計に取り組んだ。

均一配置問題は、ネットワーク中のエージェントが等間隔に配置するための自律的な移動を要求する問題である。ネットワークのノード数を  $n$  とすると、これまでに  $O(\log n)$  のエージェントメモリで問題を解決するアルゴリズムが提案されていた。 $O(\log n)$  は 2 ノード間の正確な距離を記録するために必要なメモリ量であるが、中国人剰余定理等を用いて対象区間を何度も移動し、任意の 2 ノード間同士の距離の比較を行うことで少ないエージェントメモリ量でも問題が解決できるのではないかという発想に至り、アルゴリズムの設計に取り組んだ。

また、接続不良等により通信リンクが一時的に使用不可能になることがネットワーク中の動的な変化の一種として考えられる。このような設定下で  $g$ -部分集合問題や均一配置問題を考えたとき、エージェントは自身の目的ノードへ到達できない場合がある。このとき、従来手法よりもアルゴリズムを長い間実行していると、目的ノードにたどり着けないエージェントが同一のノードに集まり、それらのエージェントが協調して動作することで問題を解決できるのではないかという発想に至り、アルゴリズムの設計に取り組んだ。

## 4. 研究成果

まず、対象トポロジを、アルゴリズム実行中に構造が変化しない静的リングとしたときの  $g$ -部分集合問題に関する成果を表 1 に示す。上述の手法に基づきアルゴリズムを設計することで、決定性アルゴリズムの場合は問題が解決可能な全ての初期状況から最適な移動コスト  $O(gn)$  で、乱択アルゴリズムの場合は任意の初期状況から最適な移動コスト  $O(gn)$  で問題を解決するアルゴリズムの設計に成功した。

次に、対象トポロジを静的リングとしたときの均一配置問題に関する成果を表 2 に示す。結果として、エージェント総数を  $k$  としたときに、同一ノード上に他のエージェントが存在するかどうかを検知する能力をエージェントが持っていない場合は  $O(k + \log n)$ 、検知する能力を持っている場合は  $O(\log k + \log \log k)$  のエージェントメモリで問題を解決するアルゴリズムの設計に成功した。

また、対象トポロジを 1-interval connected ring という、各単位時間内に高々 1 辺が消失しうるといったリング上での  $g$ -部分集合問題、均一配置問題にも取り組み、エージェント総数  $k$  と  $g$  の間との関係、およびエージェントが持つ大域情報の違いがアルゴリズムにどのような影響を

与えるのかについて明らかにした。

表 1: 静的リング上における  $g$ -部分集合問題に関する成果

	既存結果 1	既存結果 2	成果 1	成果 2
決定性/乱択	決定性	乱択	決定性	乱択
エージェント総数 $k$ の知識	あり	あり	なし	なし
解決不能な初期状況	あり	なし	あり	なし
初期状況が不可解と いうことを検知できるか	可能	-	不可能	-
移動コスト	$O(kn)$	$O(gn)$	$O(gn)$	$O(gn)$

表 2: 静的リング上における均一配置問題に関する成果

	既存結果	成果 1	成果 2
エージェント総数 $k$ の知識	あり	なし	なし
メッセージ通信	あり	なし	なし
エージェントの検知能力	あり	なし	あり
エージェントメモリ	$O(\log n)$	$O(k + \log n)$	$O(\log k + \log \log n)$
時間	$O(n \log k)$	$O(n \log k)$	$O(n^2 \log k)$
移動コスト	$O(kn)$	$O(kn \log k)$	$O(kn^2 \log k)$

表 3: 1-interval connected ring 上における  $g$ -部分集合問題に関する成果

	成果 1	成果 2
所持している大域情報	ノード数 $n$ とエージェント数 $k$	ノード数 $n$ とエージェント数 $k$
$k$ と $g$ との関係	$3g \leq k \leq 8g - 2$	$k \geq 8g - 3$
時間	$O(n)$	$O(n)$
移動コスト	$O(kn)$	$O(gn)$

表 4: 1-interval connected ring 上における均一配置問題に関する成果

	成果 1	成果 2
所持している大域情報	ノード数 $n$	エージェント数 $k$
エージェントメモリ	$O(k \log n)$	$O(k \log n)$
時間	$O(n \log k)$	$O(n^2)$
移動コスト	$O(kn)$	$O(n^2)$

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Masahiro Shibata, Sebastien Tixeuil	4. 巻 -
2. 論文標題 Semi uniform deployment of mobile robots in perfect binary trees	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 e7432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/cpe.7432	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 該当する
1. 著者名 Masahiro, Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yonghwan Kim	4. 巻 289
2. 論文標題 Almost uniform deployment of mobile agents in dynamic rings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 104949 ~ 104949
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ic.2022.104949	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 Shibata Masahiro, Ohyabu Masaki, Sudo Yuichi, Nakamura Junya, Kim Yonghwan, Katayama Yoshiaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Visibility-optimal gathering of seven autonomous mobile robots on triangular grids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 2 ~ 25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15803/ijnc.12.1_2	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 Kim Yonghwan, Shibata Masahiro, Sudo Yuichi, Nakamura Junya, Katayama Yoshiaki, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 874
2. 論文標題 A self-stabilizing algorithm for constructing a minimal reachable directed acyclic graph with two senders and two targets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tcs.2021.05.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sudo Yuichi, Shibata Masahiro, Nakamura Junya, Kim Yonghwan, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 32
2. 論文標題 Self-Stabilizing Population Protocols With Global Knowledge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 3011 ~ 3023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPDS.2021.3076769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shibata Masahiro, Kawata Norikazu, Sudo Yuichi, Ooshita Fukuhito, Kakugawa Hirotsugu, Masuzawa Toshimitsu	4. 巻 822
2. 論文標題 Move-optimal partial gathering of mobile agents without identifiers or global knowledge in asynchronous unidirectional rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 92 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.04.002	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 Masahiro Shibata, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 809
2. 論文標題 Space-efficient uniform deployment of mobile agents in asynchronous unidirectional rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 357-371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.12.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masahiro Shibata, Toshiya Mega, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 119
2. 論文標題 Uniform deployment of mobile agents in asynchronous rings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Parallel and Distributed Computing	6. 最初と最後の頁 92-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpdc.2018.03.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masahiro Shibata, Daisuke Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa	4. 巻 E102-D
2. 論文標題 Partial Gathering of Mobile Agents in Arbitrary Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 444-453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018FCP0008	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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Yonghwan Kim, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yoshiaki Katayama, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Gathering of Mobile Robots with Defected Views
3. 学会等名 Proceedings of the 26th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPDIS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sanjukta Khwairakpam, Masahiro Shibata, Masato Tsuru
2. 発表標題 Vehicle routing in whole and segmented areas to incrementally collect the disaster information
3. 学会等名 Proceedings of the 17-th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yonghwan Kim, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yoshiaki Katayama, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Brief Announcement: Gathering Despite Defected View
3. 学会等名 Proceedings of the 36th International Symposium on Distributed Computing (DISC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Shibata and Sebastien Tixeuil
2. 発表標題 Semi-Uniform Deployment of Mobile Robots in Perfect $\mathbb{R}^2$ -ary Trees
3. 学会等名 Proceedings of the 9th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, and Yonghwan Kim
2. 発表標題 Partial gathering of mobile agents in dynamic rings
3. 学会等名 Proceedings of the 22nd International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Masaki Ohyhabu, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yonghwan Kim, and Yoshiaki Katayama
2. 発表標題 Gathering of seven autonomous mobile robots on triangular grids
3. 学会等名 Proceedings of the 23rd Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Shibata and Sebastien Tixeuil
2. 発表標題 Partial Gathering of Mobile Robots from Multiplicity-Allowed Configurations in Rings
3. 学会等名 Proceedings of the 22nd International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, and Yonghwan Kim
2. 発表標題 Uniform Deployment of Mobile Agents in Dynamic Rings
3. 学会等名 Proceedings of the 22nd International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junya Nakamura, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Yonghwan Kim,
2. 発表標題 Self-Stabilizing Construction of a Minimal Weakly ST-Reachable Directed Acyclic Graph
3. 学会等名 Proceedings of the 39-th International Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Sudo, Masahiro Shibata, Junya Nakamura, Yonghwan Kim, Toshimitsu Masuzawa,
2. 発表標題 The Power of Global Knowledge on Self-stabilizing Population Protocols
3. 学会等名 Proceedings of the 27th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 将拡, 首藤 裕一, 中村 純哉, 金 裕煥,
2. 発表標題 動的リングにおけるモバイルエージェント均一配置アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告 (COMP2019-45)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Yonghwan Kim, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yoshiaki Katayama, and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Improved-Zigzag: An improved local-information based self-optimizing routing algorithm in virtual grid networks
3. 学会等名 Proceedings of the 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junya Nakamura, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, and Yonghwan Kim
2. 発表標題 Brief Announcement: Self-Stabilizing Construction of a Minimal Weakly ST-Reachable Directed Acyclic Graph
3. 学会等名 Proceedings of the 21st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yonghwan Kim, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yoshiaki Katayama and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 A Self-Stabilizing Algorithm for Constructing an ST-Reachable Directed Acyclic Graph When $ S  \leq 2$ and $ T  \leq 2$
3. 学会等名 Proceedings of the 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Norikazu Kawata, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Partial gathering of mobile agents without identifiers or global knowledge in asynchronous unidirectional rings
3. 学会等名 Proceedings of the 26th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata
2. 発表標題 Partial gathering and uniform deployment of mobile agents
3. 学会等名 Workshop on Distributed Algorithms for Low-Functional Robots (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 Space-Efficient Uniform Deployment of Mobile Agents in Asynchronous Unidirectional Rings
3. 学会等名 International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河田倫和, 柴田将拡, 首藤裕一, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光
2. 発表標題 匿名単方向リングにおける部分集合問題に対する移動数最適な匿名エージェント乱択アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------