

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17104
研究種目：若手研究
研究期間：2021～2023
課題番号：21K17706
研究課題名（和文）接続が不安定な状況下でモバイルエージェント協調動作を実現するアルゴリズム設計

研究課題名（英文）Algorithm design for coordination of mobile agents in connection-unstable configurations

研究代表者
柴田 将拓（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） 3,600,000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、通信リンクの接続状況が不安定な環境下でも協調動作を実現するアルゴリズムの設計に取り組んだ。特に、 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 -部分集合問題と、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着目し、対象のネットワーク構造がリングやトーラスの時に g -部分集合問題を最適コストで解決するためのエージェント数に関する条件、対象のネットワークがリングやグリッドの時に均一配置問題を効率的に解決するために必要なエージェントの能力に関する仮定について解明した。

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やIoTシステムは大規模化が進行しており、システムの構築には大量の通信リンクが必要である。また、システムの柔軟かつ効率的な運用のためにノードがシステムへ一時的に参加・離脱するようなシナリオも考慮すると、接続状況が不安定になる事態は避けられない。その対策として、本研究課題で得られた、通信リンクの状態が不安定な状況下でも g -部分集合問題や均一配置アルゴリズムを適用することで、動的な変化がより激しくなることが予想される将来のシステムを安定して運用させることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, I designed several algorithms to achieve coordination of mobile agents such that move in the networks, in particular for the case when communication links are not stable. I mainly focused on the g -partial gathering problem and the uniform deployment problem, where 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. On the g -partial gathering problem, I clarified the necessary number of agents to solve the problem with an asymptotically optimal cost for ring and torus networks. On the uniform deployment problem, I clarified necessary conditions of agent capabilities to solve the problem efficiently for ring and grid networks.

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

複雑化が進行する自律分散システムや IoT システムへの効率的な設計手法として、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移動により蓄積した情報を用いつつ協調動作を行うことにより、システムの効率的な監視・点検等が期待できる。協調動作を実現するための基盤的な問題として、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。大半の研究はアルゴリズム実行中にネットワーク中の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が、システムの複雑化や大規模化に伴い大量の通信リンクが必要になってきていることや、システムの柔軟かつ効率的な運用のためにノードがシステムへ一時的に参加・離脱するようなシナリオも考慮すると、接続状況が不安定になる事態は避けられない。このような状況下でも正しくエージェントの協調動作を実現するアルゴリズムを設計することが急務となっている。

2. 研究の目的

上述の背景を鑑みて、本研究ではシステム内の通信リンクの接続状態が不安定な状況下でもエージェントの協調動作を実現するアルゴリズムを設計することを目的とする。特に、 g -部分集合問題と均一配置問題を中心に取り組み、接続の切断が発生しうるシステム上でも効率的な協調動作を実現するために必要なエージェント数やエージェントの能力に関する仮定を解明した。

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。エージェントが一意的な ID を所持していると仮定していた時の静的ネットワーク上の手法では、各フェーズでエージェントは移動により得られた比較的少数の ID と自身の ID を比較することで以降の行動を決定していたが、接続の切断が発生しうる場合、問題解決の核となる移動を行うエージェントが意思決定に必要な ID の観測ができず、問題解決ができない場合があった。そこで、視点を変え、各エージェントは移動コストが大きくなりすぎない範囲内で多くの ID を観測するための移動を行う。すると、接続の切断が発生しなかった場合は問題解決につながる ID 列を観測することができ、接続の切断が長期間発生した場合は、あるノード上に一定数以上のエージェントが存在することになり、これらのエージェントが情報交換・役割分担することで問題解決できるのではないかという着想から研究に取り組んだ。

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。静的ネットワークを仮定していた既存研究では、エージェントがネットワーク中を移動し、エージェント間の位置関係を表す距離列を獲得することで、各エージェントは自身の配置場所を決定していた。しかし、接続の切断が発生しうる場合、均一配置に必要な距離列を獲得できないエージェントが存在する可能性がある。対策として、 g -部分集合問題の時と同様に、エージェントは既存手法よりも長期間、ネットワーク中を移動し距離列を獲得しようとする。接続が発生しなかった場合は問題解決につながる距離列を観測することができ、接続の切断が長期間発生した場合は、あるノード上に全てのエージェントが存在することになり、これらのエージェントが情報交換しつつ自身の配置場所を決定することで問題解決できるのではないかという着想から研究に取り組んだ。

4. 研究成果

まず、対象トポロジを 1-interval connected ring という、各単位時間で高々 1 辺が消失しうるようなリングと想定した場合の g -部分集合問題、均一配置問題の結果をそれぞれ表 1, 2 に示す。 g -部分集合問題では、エージェント総数を k とした場合の、 k, g の値の関係性が可解性にどのような影響を与えるかについて解明した。結果として、 $k \geq 2g + 1$ の時は動的リング上でも g -部分集合問題は解決可能だと示し、特に $k \geq 3g - 1$ の時は漸近的に最適な移動数での問題解決が可能だと示した。

1-interval connected ring 上の均一配置問題では、エージェントが持つ大域的な情報の種類と可解性やアルゴリズムの性能との間の関係を解明した。結果として、エージェントはノード数 n かエージェント数 k のどちらかの前提知識を持っていれば動的リング上でも均一配置は可能だと示し、さらに、 n の知識を持っている場合の方が k の知識を持っている場合よりも効率的に問題を解決することが可能だと示した。

また、各行・列が 1-interval connected ring リングで表現されるような $n \times n$ 動的トーラス上でも g -部分集合問題の考察も行い、エージェント数とアルゴリズム性能との間の関係を解明した (表 3)。結果として、エージェント数がおおよそ $2gn + 6n$ よりも大きい場合は漸近的に最適な移動数で問題が解決可能であることを示した。

さらに、各単位時間で高々1 辺が消失するような $n \times n$ グリッド上の $k \times k$ 箇所への均等な配置を要求する問題も考察し、用いるエージェント数と問題の可解性やアルゴリズム性能との間の関係を解明した。結果として、エージェント数が $k \times k$ の時は $k \times k - 1$ 箇所への配置を漸近的に最適な時間で実現するアルゴリズムを示し、エージェント数が $k \times k + 1$ の時は $k \times k$ 箇所への配置を実現するアルゴリズムを示した。

表 1: 1-interval connected ring 上における g -部分集合問題に関する成果
(n : ノード数、 k : エージェント数)

	成果 1	成果 2	成果 3	成果 4
k と g との関係	$k \leq 2g$	$2g + 1 \leq k \leq 3g - 2$	$3g - 1 \leq k \leq 8g - 2$	$k \geq 8g - 3$
可解性	解決不能	解決可能	解決可能	解決可能
時間	-	$O(n \log g)$	$O(n)$	$O(n)$
移動コスト	-	$O(gn \log g)$	$O(kn) (= \Theta(gn))$	$\Theta(gn)$

表 2: 1-interval connected ring 上における均一配置問題に関する成果
(n : ノード数、 k : エージェント数)

	成果 1	成果 2
所持している大域情報	n	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	$O(kn)$	$O(n^2)$

表 3: $n \times n$ 動的トーラス上における g -部分集合問題に関する成果(k : エージェント数)

	成果 1	成果 2	成果 3
k と g との関係	$k = o(gn)$	$k \geq 2gn + 2n - 1$ and $k \leq 2gn + 6n + 16g - 12$	$k \geq 2gn + 6n + 16g - 11$
可解性	解決不能	解決可能	解決可能
時間	-	$O(n^2)$	$O(n^2)$
移動コスト	-	$O(gn^3)$	$\Theta(gn^2)$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2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 Masahiro Shibata, Masaki Ohyabu, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yonghwan Kim, Yoshiaki Katayama	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 Yonghwan Kim, Masahiro Shibata, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yoshiaki Katayama, Toshimitsu Masuzawa	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 Yuichi Sudo, Masahiro Shibata, Junya Nakamura, Yonghwan Kim, Toshimitsu Masuzawa	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Sanjukta Khwairakpam, Masahiro Shibata, Masato Tsuru
2. 発表標題 Vehicle Routing for Collaboratively Collecting Disaster Area Information
3. 学会等名 Proceedings of the 12th International Conference on Networks, Communication and Computing (ICNCC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sanjukta Khwairakpam, Masahiro Shibata, Masato Tsuru
2. 発表標題 Resiliency of the area-segmentation in vehicle routing for collecting the disaster information
3. 学会等名 Proceedings of the 18-th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Shibata, Naoki Kitamura, Ryota Eguchi, Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yonghwan Kim
2. 発表標題 Partial Gathering of Mobile Agents in Dynamic Tori
3. 学会等名 Proceedings of the 2nd Symposium on Algorithmic Foundations of Dynamic Networks (SAND) (国際学会)
4. 発表年 2023年

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 (OPODIS) (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 ϵ -ell-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 Yuga Maki, Wenju Mu, Masahiro Shibata, and Masato Tsuru
2. 発表標題 Vehicle routing for incremental collection of disaster information along streets
3. 学会等名 Proceedings of the 18th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (EAI MobiQuitous) (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 柴田 将拡, 北村 直輝, 江口 僚太, 首藤 裕一, 中村 純哉, 金 鎔煥, 片山 喜章, 増澤 利光, セバスチャン テイクソイ
2. 発表標題 完全二部グラフにおけるモバイルロボッ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 (COMP2023-14)
4. 発表年 2023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			
フランス	ソルボンヌ大学			