

令和 6 年 4 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11828

研究課題名(和文) 動的ネットワークにおける動的タスクのための適応的な耐故障性を持つ分散アルゴリズム

研究課題名(英文) Adaptive fault-tolerant distributed algorithms for dynamic tasks in dynamic networks

研究代表者

亀井 清華 (Kamei, Sayaka)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：90434977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：動的タスクの一つである大局的(または局所的)危険区域問題(以下、CS問題)を取り上げ、検討を行った。CS問題とは、相互排除問題やk-相互排除問題、相互包括問題などを一般化した枠組みであり、各時間において、システム上の(または自身と隣接する計算機の)、少なくともl個、高々k個の計算機がCSにアクセスするように制御する。更に、動的ネットワークの計算機は、このような分散問題に費やす計算能力(電源、メモリ、など)に制限がある場合もあることから、計算能力の小さいロボットモデルにおける基本的な問題の計算可能性についての考察も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、トポロジが動的に変化するネットワークにおいても十分に実用に耐える、故障耐性を持つ分散アルゴリズムの設計を目的とした。動的なネットワークでは、リンクの切断やメッセージの損失、外乱によるメモリ内容の改変などの一時故障が起こりやすい。そういった故障や変化に対する耐性を持つ分散アルゴリズムとして、自己安定性を持つ分散アルゴリズムが有効である。本研究では特に、解状況が動的な問題について考え、その一つとして危険区域問題を扱ってきた。これは相互排除問題やk-相互排除問題、相互包括問題など、多くの応用が考えられる問題を一般化した枠組みである。

研究成果の概要(英文)：We discuss the global (or local) critical section problem (hereafter CS problem), a dynamic task, which is a generalized framework of mutual exclusion, k-mutual exclusion, and mutual inclusion problems, in which at each time, at least l and at most k processes in the system (or their neighbors) are allowed to access the CS. Furthermore, given that processes in a dynamic network may have limited computing power (power, memory, etc.) to spend on such distributed problems, we also consider the computability of the basic problem in robot models with less computing power.

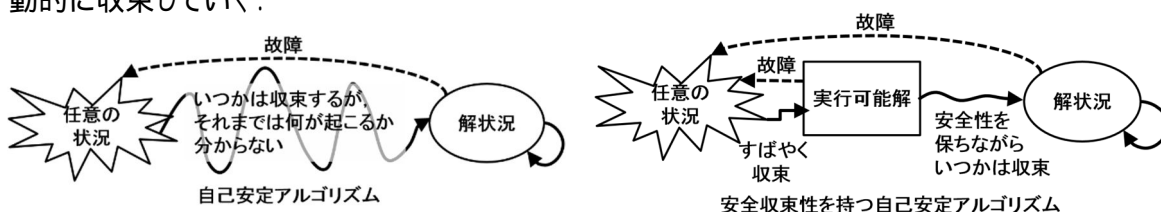
研究分野：分散アルゴリズム

キーワード：分散アルゴリズム 耐故障性 自己安定性

### 1. 研究開始当初の背景

無線通信の可用性が飛躍的に向上し、アドホックネットワークやセンサーネットワークなど新しいアプリケーションが確立される中、このようなネットワークでは、各デバイス(計算機)は、予期しない時にネットワークに参加、離脱、移動し、ネットワークのトポロジが時間と共に絶えず動的に変化し続ける。さらに、リンクの切断やメッセージの損失、外乱によるメモリ内容の改変などの一時故障が起こりやすい。そういった故障を含むダイナミクスやスケラビリティの検討は必要不可欠となるが、非常に困難な問題であるといえる。

そういった問題を解決するための方法として、一時故障に耐性を持つ分散アルゴリズムの理論的な枠組みの一つである自己安定という概念と、さらに応用に適した性質として安全収束性に着目した。自己安定アルゴリズムは、どのような一時故障が何度起きたとしても、それを引き金として、ネットワーク全体の状況を有限時間内に自動的に正常な状況に回復してくれる仕組みを持つ分散アルゴリズムである。安全収束性を持つ自己安定システムは、故障後の任意の状況から、その「安全性」を満たす実行可能な解状況までは可能な限りすばやく収束する。そして、その後はその性質やサービスを保ちながら最適な性質、サービスが提供できる状況に自動的に収束していく。



研究開始当初までに提案されてきた安全収束性を持つアルゴリズムは、収束後の解状況が静的なタスクに対するものだけであった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ネットワークを時間の経過と共に永遠に変化させるような「動的なタスク」のための自己安定アルゴリズムを安全に収束させることであった。これには、2つの主要な問題を解決する必要があった。(1) ユーザの視点から有用であり、計算能力の観点から解決可能な動的なタスクのための「安全性」を定義する。(2) この安全性のための安全収束性を満たす自己安定アルゴリズムを設計し、証明する。

### 3. 研究の方法

具体的には、動的タスクの一つである大局的(または局所的)危険区域問題(以下、CS 問題)を取り上げ、検討を行った。CS 問題とは、相互排除問題や k-相互排除問題、相互包括問題などを一般化した枠組みであり、各時間において、システム上の(または自身と隣接する計算機の)、少なくとも  $\ell$  個、高々  $k$  個の計算機が CS にアクセスするように制御する。

更に、動的ネットワークのノードは、このような分散問題に費やす計算能力(電源、メモリ、など)に制限があることから、計算能力の小さいロボットモデルにおける基本的な問題の計算可能性についての考察も行った。

### 4. 研究成果

本研究では、以下の成果を得ることができた。

(1) 局所的  $(1, |N_i|)$ -CS 問題に対する自己安定分散アルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。局所的  $(1, |N_i|)$ -CS 問題とは、自身と隣接する計算機の、少なくとも 1 個、高々  $|N_i| - 1$  個の計算機が CS にアクセスするように制御する問題である。また、この局所的  $(1, |N_i|)$ -CS 問題については、実行可能な解状況を支配集合が形成されている状況として定義し、安全収束性を持つ自己安定アルゴリズムの設計を行った。

(2) 大局的 CS 問題に対する(自己安定でない)分散アルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。また、車車間通信など動的なネットワークにおけるグループ相互排除問題についても、(自己安定でない)分散アルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。

これらのアルゴリズムに関しては、自己安定アルゴリズムではないので、その自己安定化と安全収束性についての検討が今後の課題として残っている。

(3) メッセージパッシング通信を用いた双方向リングネットワークにおけるトークンリングの自己安定アルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。既存の状態通信モデルにおけるトークンリングをそのままメッセージパッシングモデルに置き換えてしまうと、ネットワーク上にトークンが存在しない瞬間が生まれるという問題があった。そのため、その問題を解決し、いつでもトークンを持ったプロセスが存在することがモデルの変更を行った際にも保証されるように改良を行った。

(4) マイナス支配集合問題を拡張したマイナス(L,K,Z)支配集合問題に対する自己安定アルゴリズムの設計を行い、その正しさを証明した。分散支配集合問題とは、各プロセスが0(被支配点)または1(支配点)の状態を持つとすると、各0状態のプロセスは少なくとも一つの1状態のプロセスに隣接するような状況を構築する問題である。マイナス支配集合問題は、-1, 0, 1の3状態を各プロセスに割り当て、閉隣接集合内の状態の合計が1以上になるような状況を構築する。マイナス(L,K,Z)支配集合問題とは、状態が整数 $L \leq -1$ から $K \geq 1$ のいずれかを取り、閉隣接集合内の状態の和が $Z \geq 1$ 以上になるような状況を構築する問題である。

(5) 2 極小支配集合問題に対する自己安定アルゴリズムの設計を行い、その正しさを証明した。2-極小支配集合問題とは、極小支配集合から2つの要素を他の1つと入れ替えても極小支配集合であるような要素が含まれないような極小支配集合を求める問題である。局所的(1, |N<sub>i</sub>|-CS)問題においては、CSにアクセスするプロセス集合も、それ以外のプロセスの集合もいずれもが極小支配集合になっており、支配集合とCS問題は非常に深い関係にあるものと考えている。

(6) 低機能ロボットモデルについての研究も進めており、これは計算や記憶能力の少ないセンサーネットワークにも応用可能であると考えられる。低機能ロボットモデルでは、通信機能はなく、定数色のライトを照射することのみが許されるものとした。各ロボットは、他のロボットの位置とライトの色をセンサで検知し、それらの情報だけを頼りに、移動する。各ロボットはグラフ上のノード間をリンクを通過して移動する。このようなモデルの下で、リングネットワーク上の一点集合問題と、グリッドネットワーク上の最大独立点集合問題に対する分散アルゴリズムの設計をそれぞれ行い、それらの正しさを証明した。

(7) 低機能ロボットモデルにおいて、ライトもメモリも持たないモデルにおいて、トラスネットワーク上での一点集合問題に対する分散アルゴリズムの設計を行った。メモリを持たないことから、過去に自身が行った計算や通信についての情報を持つておくことができない。ライトもないので、他のロボットの位置のみを頼りに問題を解くものとなっている。

(8) 低機能ロボットモデルにおいて、ビザンチン故障ロボットが存在する場合の配置形成のための自己安定アルゴリズムの設計を行い、その正しさを証明した。

(9) 低機能ロボットモデルにおいて、各ロボットは観察、計算、移動を繰り返すものと仮定されることが多いが、その移動時に他のロボットから観察されないようにするようなモデルを実装するため、新たな概念として Neighborhood Mutual Remainder という制御問題を設定し、そのための自己安定アルゴリズムの設計を行った。これは危険区域問題の一つの拡張である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita, and Koichi Wada	4. 巻 954
2. 論文標題 Location Functions for Self-Stabilizing Byzantine Tolerant Swarms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 113755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tcs.2023.113755	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 Sayaka Kamei and Sebastien Tixeuil	4. 巻 -
2. 論文標題 An Asynchronous Maximum Independent Set Algorithm by Myopic Luminous Robots on Grids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Computer Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/comjnl/bxac158	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 該当する
1. 著者名 Hirotsugu Kakugawa, Sayaka Kamei and Yoshiaki Katayama	4. 巻 12
2. 論文標題 A self-stabilizing token circulation with graceful handover on bidirectional ring networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 103-130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15803/ijnc.12.1_103	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 Junya Nakamura, Sayaka Kamei and Yukiko Yamauchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Evacuation from a Finite 2D Square Grid Field by a Metamorphic Robotic System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/cpe.6628	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 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada	4. 巻 35
2. 論文標題 FORGIVE & FORGET: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.6123	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 Sayaka Kamei, Hirotsugu Kakugawa	4. 巻 e5628
2. 論文標題 A self-stabilizing distributed algorithm for the local $(1, Ni )$ -critical section problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 e5628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cpe.5628	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 Sayaka Kamei, Hirotsugu Kakugawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Asynchronous message-passing distributed algorithm for the global critical section problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 147-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15803/ijnc.9.2_147	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15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Hirotsugu Kakugawa and Sayaka Kamei
2. 発表標題 A linear-time self-stabilizing distributed algorithm for the minimal minus $(L,K,Z)$ -domination problem under the distance-2 model
3. 学会等名 International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Syohei Maruyama, Yuichi Sudo, Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa
2. 発表標題 A self-stabilizing 2-minimal dominating set algorithm based on loop composition in networks of girth at least 7
3. 学会等名 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sayaka Kamei and Sebastien Tixeuil
2. 発表標題 An Asynchronous Maximum Independent Set Algorithm by Myopic Luminous Robots on Grids
3. 学会等名 Research Meeting and School on Distributed Computing by Mobile Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotsugu Kakugawa and Sayaka Kamei
2. 発表標題 A self-stabilizing token circulation with graceful handover on bidirectional ring networks
3. 学会等名 23rd Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita and Koichi Wada
2. 発表標題 Location Functions for Self-Stabilizing Byzantine Tolerant Swarms
3. 学会等名 23st International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotsugu Kakugawa and Sayaka Kamei
2. 発表標題 A Distributed Multi-group Mutual Exclusion Algorithm for Intersection Traffic Control
3. 学会等名 4th Sustainable Computing Systems Workshop ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, Sebastien Tixeuil and Koichi Wada
2. 発表標題 Asynchronous Gathering in a Torus
3. 学会等名 International Conference on Principles of Distributed Systems ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junya Nakamura, Sayaka Kamei, Yukiko Yamauchi
2. 発表標題 Evacuation from a Finite 2D Square Grid Field by a Metamorphic Robotic System
3. 学会等名 Eighth International Symposium on Computing and Networking ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sayaka Kamei
2. 発表標題 Autonomous Distributed Systems of Myopic Mobile Robots with Lights
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Distributed Computing & Networking (ICDCN 2021) ( 招待講演 )
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, Sebastien Tixeuil and Koichi Wada
2 . 発表標題 Gathering on Rings for Myopic Asynchronous Robots with Lights
3 . 学会等名 International Conference on Principles of Distributed Systems ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita and Koichi Wada
2 . 発表標題 Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots
3 . 学会等名 International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yotam Ashkenazi, Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita and Koichi Wada
2 . 発表標題 Brief announcement: Forgive & Forget: Self-Stabilizing Swarms in Spite of Byzantine Robots
3 . 学会等名 International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada
2 . 発表標題 Brief Announcement: Self-Stabilizing Implementation of LCM Robots
3 . 学会等名 International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年



1. 発表者名 Shlomi Dolev, Sayaka Kamei, Yoshiaki Katayama, Fukuhito Ooshita, Koichi Wada
2. 発表標題 Brief Announcement: Neighborhood Mutual Remainder and its Self-Stabilizing Implementation of Look-Compute-Move Robots
3. 学会等名 International Symposium on Distributed Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa
2. 発表標題 A self-stabilizing algorithm for the local $(1,  N_i )$ -critical section problem with safe convergence
3. 学会等名 Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (国際学会)
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
研究協力者	角川 裕次  (Kakugawa Hirotsugu)  (80253110)	龍谷大学・先端理工学部・教授    (34316)	

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			
イスラエル	ネゲヴ・ベン＝グリオン大学			