

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26330015

研究課題名(和文) 動的ネットワークにおける適応的な故障耐性をもつ分散近似アルゴリズムの研究

研究課題名(英文) Research on distributed approximation algorithms with adaptive fault tolerance properties in dynamic networks

研究代表者

亀井 清華 (Kamei, Sayaka)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90434977

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トポロジー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近似アルゴリズムの設計を行った。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、安全収束性を持つ自己安定分散アルゴリズムの設計を行う。解状況におけるサービスの質を保証するためには、最適な状況に対する近似率を保証する必要がある。安全収束性とは、最低限のサービスが保証できる性質を持つ状況にすばやく収束し、その性質を保持しながら近似率の良い解状況へと収束する性質である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では動的ネットワークに適した分散アルゴリズムの構築を行った。これにより、モバイルアドホックネットワークやセンサーネットワークなどの動的ネットワークにおける通信経路の計算やクラスタリングに大きく貢献することが期待される。自己安定分散アルゴリズムの設計は一般的に容易ではない。しかし、自己安定分散アルゴリズムの有用性は大きく、ネットワーク上の基本的な問題であるクラスタリングや経路探索にその性質を適応させることは重要な問題であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we designed fault-tolerant distributed approximation algorithms. They are sufficiently practical for networks with dynamically changing topology. In dynamic networks, transient failures such as disconnection of links, loss of messages, and alteration of memory contents due to disturbances occur frequently. We designed self-stabilized distributed algorithms with safety convergence properties. They are resistant to such failures and changes. In order to guarantee the quality of service in the legitimate configuration, it is necessary to guarantee the approximation rate for the optimal legitimate configuration. Safe convergence property is a property that converges quickly to a feasible configuration in which the minimum service can be guaranteed, and converges to a n optimal configuration with a good approximation rate while maintaining that safety property.

研究分野：分散アルゴリズム

キーワード：自己安定アルゴリズム 安全収束性 分散アルゴリズム 支配集合問題 相互排除問題 耐故障性 動的ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク上で考えられる分散問題の中には、グラフ上の NP 困難な最適化問題としてモデル化できるものが多く存在し、それらを分散最適化問題と呼ぶ。NP 困難問題は多項式時間で解くことが難しいため、実用上、最適解ではなく、それに近い解を求めるアルゴリズムである近似アルゴリズムの設計を行う。近似アルゴリズムとは、最悪の場合のアルゴリズムの解と最適解との相対誤差である " 近似比 " を保証するようなアルゴリズムをいう。

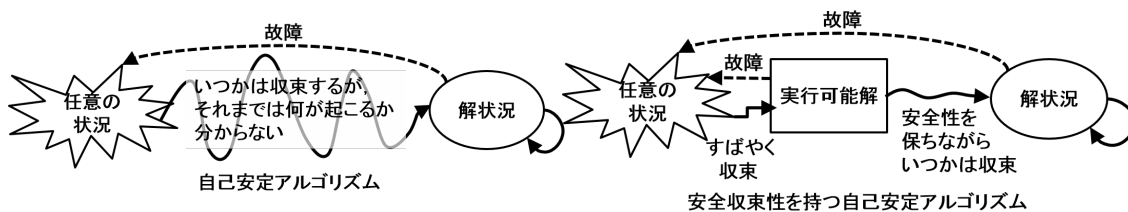
この近似比を保証することを分散アルゴリズムとして実現したものを分散近似アルゴリズムと呼び、これまでも多くの問題に対してその設計が行われてきた。一般に、その計算時間やメッセージ数をかけずに近似比を小さくすることは大変難しいが、このことは動的ネットワークにおいては特に問題であるといえる。

動的ネットワークにおいては、一時故障やトポロジーの変化に対する耐性を持つ分散アルゴリズムを考える必要がある。そのような耐性を持つ分散アルゴリズムの理論的な枠組みの一つに安全収束性を持つ自己安定アルゴリズムがある。自己安定アルゴリズムは、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、その最低限の性質やサービスが提供できる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。

変化が頻繁に起こる動的ネットワークでは、通常の自己安定アルゴリズムではサービスを提供できぬまま収束しない場合がある。よって、安全収束性をもつ自己安定分散アルゴリズムが適している。

2. 研究の目的

本研究では、動的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。そのために、安全収束性を持つ自己安定分散アルゴリズムの設計を行った。



3. 研究の方法

通常の自己安定分散アルゴリズムでは収束するまでに故障やトポロジーの変化が起こってしまうと、そこから新たに計算を始めることになる。つまり、頻繁に起こる変化には対応し切れる保証がない。そこで、故障が起こった後の任意の状況から短時間で解の質を問わない最低限のサービスが行える安全な状況に遷移させ、そこからは安全性（最低限のサービス）を崩さずに最適な解（最適なサービスの行える状況）に収束させるという安全な収束をするアルゴリズムの設計を行った。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) 分散システムにとって重要な問題の一つといえる相互排除問題を一般化した危険区域問題に対して、その大域的問題に対するアルゴリズムと局所的問題に対するアルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。相互排除問題は危険区域に入る計算機の数に常に高々1つに抑える問題であるが、危険区域問題はこの数を高々 k 、少なくとも1に保つ問題である。大域的問題とは、ネットワーク上の全体で高々 k 、少なくとも1に保つ問題となり、局所的問題とは、各計算機自身とそれに隣接する計算機集合の中で高々 k 、少なくとも1に保つ問題となる。提案したこれらのアルゴリズムは、自己安定アルゴリズムではないので、これらについて自己安定化、および安全収束性を持たせることを今後の課題として考えている。

(2) 動的な2つの互いに素な支配集合を構築するためのアルゴリズムを設計し、その正しさを証明した。提案アルゴリズムは、2つの互いに素な支配集合を動的に構築し、管理するためのアルゴリズムとなっている。各計算機は支配集合から出たり入ったりするが、ネットワーク上には常に2つの互いに素な支配集合が構築されている状態を保つ。このような問題は $k=|N_i|$, $l=1$ とした危険区域問題として定式化できる。つまり、各計算機について自身と隣接

する計算機集合の中で少なくとも1つ, 高々次数分の計算機が危険区域に入れるという状況を保つ問題である. これについて, 自己安定アルゴリズムの設計を行った. このアルゴリズムでは安全収束性がないので, これについて解決することを今後の課題として考えている.

(3) 静的な2つの互いに素な支配集合を構築するためのアルゴリズムを設計し, その正しさを証明した. 提案したアルゴリズムは, 安全収束性を持つ. 先に1つ目の支配集合を構築した後, それが支配集合であることを保ちながら2つ目の支配集合を構築し, やがて2つの互いに素な極小支配集合を構築するものである.

(4) ユニットディスクグラフ上で最小連結支配集合問題について近似比6を保証する安全収束性を持つ非同期自己安定分散近似アルゴリズムの設計をし, その正しさを証明した. 既存のアルゴリズムでは, 同期システムを仮定しており, 非同期で安全収束性を持つ自己安定分散近似アルゴリズムは存在していなかった. 近似比を保証する戦略は既存手法と同じであるが, 非同期システムを仮定することにより, より実装を考慮したアルゴリズムとなっている.

(5) 各ロボットがメモリを持たない低機能ロボットモデルにおける一点集合問題についての研究を進めており, 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, 各ロボットは記憶領域を持たないので, 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. また, 通信機能はなく, 他のロボットの位置をセンサで検知し, その情報だけを頼りに, 移動する. 本研究では, 各ロボットがリンググラフのノード上に配置しており, 1つのノードに集合する問題において, 各ロボットの視野が限られている場合のアルゴリズムを設計した. 条件を様々に変えた場合の計算可能性についての議論で未解決な場合が存在するので今後の課題としている.

(6) 各ロボットがメモリを持たないロボットモデルで, 平面上に配置された点の集合を同平面上のロボットで被覆する問題に対して, 近似解を求めるアルゴリズムの設計を行い, 正しさを証明した.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

1. Sayaka Kamei, Hirotsugu Kakugawa, "An Asynchronous Message-Passing Distributed Algorithm for the Generalized Local Critical Section Problem", Algorithms, 2017年, 10巻2号, 38頁, DOI: <https://doi.org/10.3390/a10020038>, 査読有
2. Sayaka Kamei, Tomoko Izumi, Yukiko Yamauchi, "An asynchronous self-stabilizing approximation for the minimum CDS with safe convergence in UDGs", Theoretical Computer Science, 615巻, 102-119頁, 2016年, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2015.12.001>, 査読有

[学会発表](計 8 件)

1. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "'Self-stabilizing algorithm for dynamically maintaining two disjoint dominating sets,'" The 10th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, in conjunction with CANDAR, 2018年11月29日, 高山市.
2. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "'A self-stabilizing algorithm for two disjoint minimal dominating sets with safe convergence,'" The 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2018年12月13日, シンガポール.
3. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "'An asynchronous message-passing distributed algorithm for the global critical section problem,'" The 9th International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms and Applications, in conjunction with CANDAR, 2017年11月21日, 青森.
4. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "An asynchronous message-passing distributed algorithm for the generalized local critical section problem", The Fifth International Conference on Network, Communication and Computing (ICNCC), Proceedings: ISBN:978-1-4503-4793-8, 2016年12月19日, 京都.
5. Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, "Ring Gathering by Robots with Limited Vision", The 8th Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC2015), 18頁, 2015年5月, 広島.
6. Tomoko Izumi, Sayaka Kamei, Yukiko Yamauchi, "Set Cover Formation Algorithms by Mobile Robots", The 8th Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC2015), 13頁, 2015年5月, 広島.
7. Tomoko Izumi, Sayaka Kamei, Yukiko Yamauchi, "Approximation Algorithms for the Set Cover Formation by Oblivious Mobile Robots", The 18th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS2014), LNCS 8878, 233-247頁, 2014年12

月 16-19 日, イタリア, コルティナダンペッツォ.

8. Sayaka Kamei, Anissa Lamani and Fukuhito Ooshita, "Asynchronous Ring Gathering by Oblivious Robots with Limited Vision", Workshop on Self-organization in Swarm of Robots: from Molecular Robots to Mobile Agents, In Proceedings of the Workshop on Self-organization in Swarm of Robots: from Molecular Robots to Mobile Agents (WSSR), 2014 年 10 月, 奈良.