

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：22700017

研究課題名(和文) SINRモデルを用いた実用的アルゴリズムの設計と可解性の解明

研究課題名(英文) The study on the solvability and practical algorithms in the SINR model

研究代表者

泉 朋子 (Izumi, Tomoko)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号：70551505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、通信電波の強度減衰や干渉、外部環境からのノイズを考慮したSINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) 無線通信モデルに着目し、既存のグラフモデルとSINRモデルで可解性の差が生じる問題クラスの明確化することを目的とした。SINRに関する既存研究では時間最適な計算機間の通信スケジュールが提示されており、この知見から本研究では、1)与えられた通信スケジュールがプロトコルの出力に与える影響の解明、および2)通信スケジュールの適用によって生じる動的なネットワーク変化がプロトコルに与える影響を最小限にする手法の提案について研究を行った。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on the SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) communication model for wireless networks, which considers the intensity attenuation and interference of radio waves, and the noise caused by the external environment. In the previous works, they apply the graph model to represent the wireless network. The goal of this study is to reveal the difference of the classes of solvable problems in the graph model and the SINR model. The previous works about the SINR model proposed algorithms which output the time optimal communication schedule for given communication requests. So, this study focuses on the following two problems mainly: 1) to reveal the impact of the given communication schedule for outputs of distributed protocols, and 2) to minimize the effect of dynamic change of network for outputs of distributed protocols. The dynamic change of network is defined by the communication schedule.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：SINR無線通信モデル 基礎アルゴリズム設計 動的ネットワーク モバイルエージェント 集合問題
自己安定プロトコル 連結支配集合

1. 研究開始当初の背景

本研究では、通信電波の強度減衰や干渉、外部環境からのノイズを考慮した SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) 無線通信モデルに着目する。計算機間で無線通信を行うには電波を利用する。電波は、1) 電波の送信元から距離が離れるにつれ受信者での電波強度が弱くなる、2) 同時に複数の電波が発生した場合電波の干渉が生じる、3) 空間中にある障害物や外部ノイズの影響を受ける、などの特徴がある。しかし分散アルゴリズム分野における無線ネットワークに関する既存研究では、送信元から受信者が一定距離以内ならば通信電波を正確に受信するという通信モデル(グラフモデル)が用いられている。このモデルは簡潔さゆえにアルゴリズムの設計やその評価がしやすいため、多くの研究がグラフモデルに基づく設計と理論的、実験的な性能評価を行っている。しかし SINR モデルとは異なり非現実的なモデルであるため、実ネットワーク上での性能保証ができていないという重大な問題がある。

そこで本研究では、実ネットワークで生じる電波の強度減衰や干渉、外的ノイズを考慮した通信モデルを用い、無線ネットワークにおける基礎理論の構築を行う。電波の減衰や干渉を考慮したモデルとして、本研究では SINR モデルを採用する。SINR モデルは、同時刻に送信を行っている電波の干渉と外部環境からのノイズの影響に対する、受信位置での電波強度の割合によって通信の受信成功を定義している。SINR モデルは 2000 年に提唱され、グラフモデル上で考案されたいくつかのアルゴリズムが SINR モデル上では非効率的であることが 2006 年以降実験的、理論的に証明されている。

2. 研究の目的

本研究では、SINR モデルに基づく無線ネットワークにおけるアルゴリズム設計とその理論的、実験的評価を行い、グラフモデルと SINR モデルで可解性の差が生じる問題クラスの明確化することで、実ネットワークに適用する際に生じる既存手法の問題点を喚起することを目的とする。そこで、同時に複数の計算機が通信することが難しい SINR モデルにおいて、基本の重要課題である通信スケジューリング問題に焦点を絞り、通信要求のある 2 つの計算機が直接通信を行う場合の通信スケジューリング問題の解決と、複数の計算機を経由して通信を行うマルチホップ通信への拡張、および処理の分散化を目指す。また、通信スケジューリング問題とは性質の異なる基礎問題についても SINR モデル上で考察を行い、可解性や得られた手法のコストから既存のグラフモデルと SINR モデルの違いを明らかにする。

3. 研究の方法

既存のグラフモデル上での通信スケジューリング設計の方法論について調査し、それらの SINR モデルへの適用可能性について探り、既存手法を適用した場合に起こりうる問題点を整理した。その結果、既存の研究では与えられた通信要求に対し時間最適な通信スケジュールが提示されていることがわかった。この知見から、時間的観点で制御された通信スケジュール上でプロトコルを動作させる場合に、与えられた通信スケジュールがプロトコルの出力に与える影響を解明するべきであると考えた。また、通信スケジュールがプロトコルの出力に影響を与える場合、この影響を最小限に抑えるような通信スケジュールが必要である。そこで、上層のプロトコルへの影響を抑えるような、安定かつ安全な通信基盤を構築し続けることも重要である。

そこで本研究では、これらのそれぞれの研究テーマに対して以下の研究を行った。

(1) 通信スケジュールがプロトコルの出力に与える影響について：本テーマでは、分散システムの基本問題の一つである計算機間の情報共有において、通信スケジュールを適用したネットワーク上で情報共有の可解性を解明する。通信スケジュールが適用されると同時に通信可能な通信ペアは限られ、これらは時刻とともに変化する。このように通信スケジュールを適用すると断続的に計算機間の通信が途切れるため、これは上層のプロトコルにとってネットワークの動的変化としてとらえられる。そこで通信スケジュールの適用によって発生する動的なネットワークの変化が情報共有の可解性に与える影響を調べる。情報共有の方法として、動的な変化への適用性が高いモバイルエージェントを用いたエージェントの集合問題(ネットワークを巡回する複数のエージェントを 1 つの計算機に集め、そこで情報共有を行う)に対する手法を用いて解決する方法をとる。

(2) 動的なネットワークにおける安定な通信基盤の構築：(1) では動的なネットワークの変化がプロトコルの可解性に与える影響を解明するが、通信スケジュールがプロトコルの出力に影響を与える場合、この影響を最小限に抑えるような通信スケジュールが必要である。そこで上層のプロトコルにとって影響の少ない通信基盤を安定して提供し続ける手法を検討する。そこで、本テーマでは任意の動的変化や計算機の故障が生じたとしても安定して特定の通信基盤を提供し続ける手法を提案する。ここでは、通信基盤として代表的な一つである連結支配集合に着目し、これを構築する手法を提案する。

(3) 動的なネットワークにおける安全な通信基盤の構築：動的なネットワーク上で様々なプロトコルを提案したとしても、計算機間の 1 対 1 の通信が安全でなければ、システムとしてサービスを提供することができない。

そこで、既存のシステムで用いられている公開鍵暗号に基づく安全な通信の確立を、中央集権的なサーバが存在しない動的ネットワークで行うことを目指す。

最後に、本研究の成果のまとめと今後の研究の発展を目指し、得られた知見を当該研究分野の著名な研究者と意見交換を行う。

4. 研究成果

研究の方法で述べた各研究テーマに対する研究成果を述べる。

(1) 通信スケジュールがモバイルエージェントの情報共有問題に与える影響について：本テーマでは、動的なネットワーク上での処理に有用とされているモバイルエージェントに着目し、SINR モデル上で生じる無線通信の不安定さが、エージェントを用いた情報共有の可解性に与える影響の解明について研究を行った。具体的には、一般的に集合問題の解決が難しいとされているリングネットワークに着目し、動的リングネットワーク上での集合問題の可解性について考察した。ここで、リングネットワークの動的性は、通信スケジュールによって与えられる各時刻に通信可能な通信ペアで表現し、これを Evolving graph モデルを用いてモデル化した。Evolving graph に対してはこれまでランダムウォークに関する分析に留まっており、またエージェントの集合問題を動的なネットワーク上で解く試みもこれまでなかったことから、Evolving graph における集合問題の決定性アルゴリズムに関する研究という点でも本研究は新規性を有する。

この研究テーマについて本研究では次の研究成果を得た。

決定性アルゴリズムによって集合不可能なネットワーク変化のクラスを解明し、定義した。

いくつかの集合可能なネットワーク変化に対する決定性アルゴリズムを提案し、その処理にかかるメモリ量や時間の点でのコストについて評価を行った。コストはネットワークがどのように変化するか依存するため、既存の静的なネットワークを対象としたアルゴリズムで一般的に用いられるネットワークサイズや密度などのパラメータではなく、ネットワークの変化を表すパラメータを導入しコストを示した。

動的な変化を確率モデル表現したネットワーク上でのアルゴリズムを提案し、情報共有にかかる時間コストを評価した。上記の¹⁾では、各時刻に通信可能なペアは予め決められていると想定したが、ここでは通信可能なペアが確率的に決定されるとした。SINR モデルの通信スケジュールリングの問題においても確率的な手法が提案されており、そのような手法によって提案される通信スケジュールを想定していると言える。

これらの研究は、国際会議で2回発表を行った。現在は対象を任意のネットワークトポ

ロジに拡張し、研究を継続している。

(2) 動的なネットワークにおける安定な連結支配集合の構築：(1)の研究で、ネットワークの変化が問題の可解性、およびコストに影響を与えることを示した。そのため、無線ネットワークに動的な変化が起こったとしても、通信のバックボーンとなる通信基盤を構築し続けることで影響を最小限にできると考えた。

ネットワークの動的な変化は、通信リンクや計算機の故障と捕らえることもできる。このような任意の故障に対して耐性のある手法として、自己安定アルゴリズムが提案されている。自己安定アルゴリズムとは、任意の故障が発生したとしても、システムがいずれ望ましい状態に収束しその後安定する手法である。本研究では、この自己安定アルゴリズムを拡張した、安全自己安定アルゴリズムに着目した。自己安定アルゴリズムでは、故障が発生した状態から安定状態までの間、システムの状態に対し何も制約を置かないが、安全自己安定アルゴリズムとは、安定するまでの過程においてもシステム内で最低限満たすべき状態を保持したまま、望ましい状態へ安定する。

本テーマでは連結支配集合によるバックボーンの構築を対象に、動的変化が生じても非常に短時間で最低限の連結支配集合を構築し、その後支配集合に含まれる計算機数を最小化することでバックボーンの構造を最適化し、安定する手法を提案した。ネットワークの変化が起こったとしても短時間で連結支配集合が存在する状態に復旧でき、上層のプロトコルは連結支配集合が存在するネットワークを想定して動作することができる。

この研究は、国際会議で1件発表を行い、現在学術論文誌での発表に向けて執筆中である。

(3) 動的なネットワークにおける安全な通信基盤の構築：本テーマでは、中央集権的な計算機が存在しない動的ネットワークにおいて、公開鍵暗号方式による安全な通信を行う手法と、それにかかるコストについて研究を行った。その結果、ネットワークの次数がコストに与える影響を解明した。この成果は国内の学会発表を2回、国際会議での発表を1回を行い、学術論文誌については1件条件付き採録を受け現在最終手続き中である。

(4) 成果のまとめと今後の発展について：本研究の成果のまとめ、および今後の発展を目指し、2014年2月に分散アルゴリズムの研究分野で非常に著名な研究者であるカナダ・オタワにある Carleton 大学の Nicola Santoro 教授を訪ね共同研究を行った。共同研究では、本研究テーマに対する意見交換と、今後の具体的な展望について議論した。その

結果、計算機能力の非常に低い(と思われていた)モデルで定式化される無線ネットワーク上で、ある程度計算能力の高い無線ネットワークを想定したプロトコルをシミュレートできることを示した。この成果は今後国際会議での発表を行い専門家との意見交換を経て、学術論文誌でも発表を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

著者名：Tomoko Izumi, Taisuke Izumi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, 論文表題：Time-optimal Gathering Algorithm of Mobile Robots with Local Weak Multiplicity Detection in Rings, 雑誌名：IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences (Special Issue of Discrete Mathematics and Its Applications), 査読：有, 巻：E96-A(6), 発行年：2013, ページ：1072-1080

著者名：Taisuke Izumi, Tomoko Izumi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, 論文表題：Feasibility of Polynomial-time Randomized Gathering for Oblivious Mobile Robots, 雑誌名：IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 査読：有, 巻：24(4), 発行年：2013, ページ：716-723

著者名：Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, 論文表題：Linear time and space gathering of anonymous mobile agents in asynchronous trees, 雑誌名：Theoretical Computer Science, 査読：有, 巻：478(25), 発行年：2013, ページ：118-126

著者名：Fukuhito Ooshita, Tomoko Izumi, Taisuke Izumi, 論文表題：The Price of Multi-organization Constraint in Unrelated Parallel Machine Scheduling, 雑誌名：Parallel Processing Letters, 査読：有, 巻：22(2), 発行年：2012, ページ：なし

[学会発表](計 6 件)

発表者名：Sayaka Kamei, 発表表題：An Asynchronous Self-Stabilizing 6-Approximation for the Minimum Connected Dominating Set with Safe Convergence, 学会等名：The 15th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS2013, LNCS 8255), 発表年月日：2013年11月6日, 発表場所：大阪大学コンベンションセンター(大阪府)

発表者名：Yukiko Yamauchi, 発表表題：

Mobile Agent Rendezvous on a Probabilistic Edge Evolving Ring, 学会等名：The 3rd International Conference on Networking and Computing (ICNC2012), 発表年月日：2012年12月5日, 発表場所：沖縄県男女共同参画センター(沖縄県)

発表者名：Tomoko Izumi, 発表表題：Brief Announcement: Mobile Agent Rendezvous on Edge Evolving Rings, 学会等名：The 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS2012, LNCS 7596), 発表年月日：2012年10月2日, 発表場所：トロント(カナダ)

発表者名：Taisuke Izumi, 発表表題：Minimum Certificate Dispersal with Tree Structures, 学会等名：The 9th annual conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC2012, LNCS 7287), 発表年月日：2012年5月17日, 発表場所：北京(中華人民共和国)

発表者：泉泰介, 発表表題：木ネットワークにおける証明書分散問題の近似可能性について, 学会等名：情報処理学会第74回全国大会, 発表年月日：2012年3月6日, 発表場所：名古屋工業大学(愛知県)

発表者名：Tomoko Izumi, 発表表題：Complexity of Minimum Certificate Dispersal Problem with Tree Structure, 学会等名：情報処理学会第136回アルゴリズム研究会, 発表年月日：2011年9月6日, 発表場所：函館市中央図書館(北海道)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

泉 朋子(IZUMI TOMOKO)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号：70551505