

機関番号：14603  
 研究種目：研究活動スタート支援  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21800031  
 研究課題名（和文）  
 動的ネットワークにおける自律適応的分散アルゴリズムの計算コストの削減に関する研究  
 研究課題名（英文）  
 Research on Complexity of Self-adaptive Distributed Algorithms in Dynamic Networks  
 研究代表者  
 山内 由紀子 (YAMAUCHI YUKIKO)  
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
 研究者番号：10546518

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、自律適応性と安定性を同時に保証する分散アルゴリズムの設計手法を確立することを目指した。特に、分散アルゴリズムの一種であり、すぐれた自律適応性をもつ、自己安定アルゴリズムに着目した。本研究では、システム状況の変化後に自己安定アルゴリズムの行う再計算を抑制することで、安定性の高い分散システムを実現できることを示した。研究期間中に、計算量の削減限界の解明、また、継続的に状況変化が起こる環境下でも安定性と自律適応性をもつ分散アルゴリズムの提案を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

This research aims to propose a framework for designing distributed algorithms that promises both self-adaptability and stability under dynamic networks. Specifically, we focus on self-stabilizing distributed algorithms that guarantee self-adaptability. We showed that stability is achieved by reducing the recomputation after dynamic changes in environments. Additionally, we showed the lower bound for necessary amount of information during stabilization (i.e., recomputation), and proposed self-adaptive and stable distributed algorithms for dynamic networks.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,080,000 | 324,000 | 1,404,000 |
| 2010年度 | 980,000   | 294,000 | 1,274,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,060,000 | 618,000 | 2,678,000 |

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：分散アルゴリズム，計算機ネットワーク，自律適応性，高信頼性，安定性，自己安定

## 1. 研究開始当初の背景

近年、インターネットや携帯電話網、車車間ネットワークといった、大規模かつ、動的な計算機ネットワークが急速に普及している。これらのネットワークは相互に連携し、今後重要な社会インフラとなることが予想

される。本研究ではこのような大規模かつ動的な計算機ネットワークを安定的に運用する手法の確立を目指す。

動的かつ大規模なネットワークの運用には、中央集権的な制御ではなく、分散的な制御が好ましい。大規模な計算機ネットワーク

では、人間の介入なく運用できるような、自律適応的な制御手法が必要である。他方で、ネットワーク状況の変化に対しても、安定したサービスを提供できるような、安定性や信頼性も必要である。

分散アルゴリズムの一種である、自己安定アルゴリズムはどのような状況から実行を開始しても、やがて目的の振る舞いを行うことを保証する。この性質は、大規模な動的ネットワークで特に有用である。たとえば、一斉の初期化(実行開始)が困難である環境や、個々の故障計算機に個別に対処することが困難な環境でも、柔軟にシステムを設計することができる。

しかし、自己安定アルゴリズムは小規模な変動(計算機故障やネットワーク形状の変化など)に対しても、大域的な再計算を行う。また、再計算中はアルゴリズムの出力に対して何ら保証をしないため、システムの可用性や安定性が低い。

以上をふまえ、本研究では、自律適応性と安定性を同時に保証する分散システムの設計手法を確立することを目標とした。特に、自己安定アルゴリズムがシステム状況の変化後に行う再計算を抑制し、安定性を改善することを主要な目的としている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、動的な大規模計算機ネットワークの効率の良い運用手法を確立するために、自律適応性と安定性を同時に保証する分散アルゴリズムの設計手法を確立することである。自己安定アルゴリズムは高度な自律適応性を有する一方で、少数の計算機故障に対しても大規模な再計算を行う。本研究では、自己安定アルゴリズムの自律適応性に着目し、ネットワークの状況変化後の再計算の抑制を行うことで、自己安定アルゴリズムに安定性を付加することを目指す。

特に、(1)不要な再計算の抑制 (2) アルゴリズムの出力の質の緩和による再計算の抑制を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究ではまず、無線センサネットワークやモバイルアドホックネットワークの運用に必要な不可欠な基本的な分散問題(効率の良い情報収集のために用いられる全域木作成問題、大規模ネットワークの階層的な管理に用いられるクラスタリング問題、仮想的な代表計算機を選出し、集中制御を行うためのリーダー選挙問題、など)について、安定性をもつ自己安定アルゴリズムを構成し、その性能評価、正当性の確認を行った。

また、得られた結果をもとに、安定性と自律適応性を備える分散アルゴリズムの設計手法を検討した。

## 4. 研究成果

研究期間を通し、自己安定アルゴリズムの再計算量と通信量の関係性を示し、また、自己安定アルゴリズムの再計算の抑制手法についていくつかの結果を得た。

以後、主要な研究成果について概要を説明する。

### (1) 動的な計算機ネットワーク下での自己安定アルゴリズムの安定性:

モバイルアドホックネットワーク等の動的にネットワーク状況が時々刻々と変化する計算機ネットワーク上で運用するシステムには、システムが状況変化に追従することが必要である。たとえば、モバイルアドホックネットワークでの経路構成問題では、各移動端末の接続関係の変化を反映した経路を出力することが必要である。一方で、継続的な状況変動の下でも安定したサービス(アルゴリズムの出力)を提供することが必要である。

[業績 3, 5, 8]ではモバイルアドホックネットワークにおいて、安定したクラスタ構造を構成するアルゴリズムを提案した。この手法では、各移動端末の移動特性を予測しながらクラスタリングを行うことにより、長期間存続する安定なクラスタを構成する。

[業績 1]では、無線センサネットワークにおけるデータ収集手法を示した。この手法は任意の規模の一時故障に対して自己安定性を保証するとともに、小規模な停止故障に対して消失なく観測データを収集できることを保証する。センサノードは電池駆動であるため、電池を消耗すれば停止する。提案手法では、転送途中の観測データを消失なく収集するために、過去一定期間ぶんの観測データをパッキングして転送することで、通信回数を増やすことなくデータの消失を防ぐ。この手法は報告者の[論文 1]の成果を参考としている。また、データ転送の負荷分散と転送経路の確保のためにネットワーク中に仮想的にDAGを構成し、このDAG上でデータ転送を行っている。

以上より、対象とするネットワークの特徴をとらえた問題設定、安定化手法を得ることができた。

### (2) 単調収束な自己安定アルゴリズムの再計算量:

分散アルゴリズムの出力は各計算機に分散しており、各計算機の出力すべての内容がシステムの出力を構成する。自己安定アルゴリズムは計算途中に何度も出力が変化する。出力の変化はそれを参照している外部のシステムや利用者に影響を与えるため、可能な限り削減することが

望ましい。[業績 4, 7]では、出力の変化を再計算途中にただ1度に抑えるために、各計算機が必要とする情報量を解析し、多くの問題で大域的な情報が必要であることを示した。この結果は、任意の故障状況から再計算を開始した場合、本質的にネットワーク全体の情報（つまり、情報収集実現のための通信量）が必要であることを示している。

(3) 小規模故障からの局所的な再計算：

(2) では任意の故障状況からの再計算を想定したが、大規模な計算機ネットワークでは、多数の計算機が故障するような壊滅的な状況、少数の計算機のみが故障する状況、いずれもが発生する可能性がある。本研究では、システム運用中に発生した小規模故障への対処法を示した。

[業績 9, 業績 10]では、小変動後の最小全域木の再構成手法を提案した。この手法では、変動前の最小全域木の部分木がにシステム中に多数存在し、この全域森を接続することで効率よく最小全域木を再構成する。

[業績 2, 業績 6]では、リーダー選挙問題を対象に、任意の振る舞いを行う故障計算機の影響を局所的に封じ込める手法を提案した。計算機故障は一時故障や停止故障といった故障モデルに分類される。その一種であるビザンチン故障は任意の振る舞いを永久に行う計算機のモデルであり、もっとも強力な故障モデルである。耐ビザンチン故障アルゴリズムは、計算機の故障だけでなく、なりすましなどの悪意あるユーザのモデルでもあるため、ビザンチン故障耐性は実用的にも重要である。しかし、永久に故障動作を行う計算機はネットワーク管理者が排除する、電池を消耗するなどが考えられるため、時間限定的なビザンチン故障のみを考慮すればよいと考えられる。また、多くの自己安定アルゴリズムではビザンチン故障の影響が大域的であることが既に示されている。[業績 2, 6]では、故障の振る舞いを行う回数が限定されている有限時間ビザンチン故障に対象を限定し、その影響を故障計算機の状態変化回数に依存した規模に抑えながら、リーダー選挙を行えることを示した。

以上の研究成果をふまえ、今後は以下の事項を明らかにすることを目指す。

まず、(1), (2) をふまえ、耐有限時間ビザンチン故障アルゴリズムの再計算量の下限を示すことが挙げられる。本研究期間中に有限時間ビザンチン故障の影響の局所化手法を示したが([業績 2, 6]), この手法は再計算を行う計算機の数は少ないが、再計算中の

通信複雑度は大きい。有限時間ビザンチン故障に対して、必要な通信複雑度の解明を行うことが必要である。

また、[業績 2, 6]の故障影響の局所化手法はリーダー選挙問題のみを対象としているが、任意の分散問題に対して耐有限時間ビザンチン故障耐性を保証できる手法に拡張することを目指す。

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 1 件)

[論文 1] Yukiko Yamauchi, Doina Bein, and Toshimitsu Masuzawa, "Reliable communication on emulated channels resilient to transient faults", International Journal of Foundations of Computer Science (World Scientific Publishing), (accepted).

[学会発表] (計 11 件)

[業績 1] 坂口隼, 勝間亮, 山内由紀子, 安本慶一, 伊藤実, "無線センサネットワークでのノードの停止・追加を考慮した省電力データ収集手法", 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-MPS-82, No. 7, pp. 1--6, (2011 年 3 月 7 日) 宮崎.

[業績 2] 山内由紀子, 増澤利光, Doina Bein, "時間限定ビザンチン故障に対する故障封じ込めリーダー選挙プロトコル", 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-AL-128, No. 3, pp. 1--8, (2011 年 3 月 7 日) 沖縄.

[業績 3] Junpei Kuroiwa, Yukiko Yamauchi, Weihua Sun, and Minoru Ito, "A self-stabilizing algorithm for stable clustering in mobile-adhoc networks", Proceedings of the 4th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS 2011), Paris, France, Feb. 10<sup>th</sup>, 2011.

[業績 4] Yukiko Yamauchi, and Sebastien Tixeuil, "Monotonic Stabilization", Proceedings of the 14th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2010), pp. 475--490 (Springer 2010, LNCS 6490), Tozeur, Tunisia, Dec. 16<sup>th</sup>, 2010.

[業績 5] 黒岩潤平, 山内由紀子, 孫為華, 伊藤実, "MANETでのグループモビリティを考慮した安定なクラスタリング", 第 18 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ

プ (DPS Workshop 2010), pp.7--12, (2010年10月27日), 宮崎. (学生奨励賞)

[業績 6] Yukiko Yamauchi, Toshimitsu Masuzawa, and Doina Bein, "Adaptive containment of time-bounded Byzantine faults", Proceedings of the 12th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2010), pp. 126--140 (Springer 2010, LNCS 6366), New York, USA, Sep. 20<sup>th</sup>, 2010.

[業績 7] Yukiko Yamauchi, Sebastien Tixeuil, "Brief announcement: Monotonic stabilization", Proceedings of the 29th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC 2010), pp.406--407, Zurich, Switzerland, July 28<sup>th</sup>, 2010

[業績 8] 黒岩潤平, 山内由紀子, 孫為華, 伊藤実, "MANET環境におけるノードの移動特性を考慮した自己安定クラスタリング手法", 情報処理学会研究報告, Vol.2010-MPS-77, No.37, pp.1--8 (2010年3月5日), 静岡.

[業績 9] 高田篤史, 山内由紀子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "トポロジ変化に対して出力の変化数を最小化する全域木構成分散アルゴリズム", 情報処理学会研究報告, Vol.2010-AL-128, No.3, pp.1--8, (2010年1月26日), 福岡.

[業績 10] Atsushi Takada, Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "A distributed algorithm to update spanning trees minimizing the number of output changes", Proceedings of the 2nd International Workshop on Reliability, Availability, and Security (WRAS 2009) (Poster), Hiroshima, Japan, Dec. 11<sup>th</sup>, 2009.

[業績 11] Doina Bein, Toshimitsu Masuzawa, and Yukiko Yamauchi, "Reliable communication on emulated channels resilient to transient faults", Proceedings of the 2nd International Workshop on Reliability, Availability, and Security (WRAS 2009), pp.366--371, Hiroshima, Japan, Dec. 11<sup>th</sup>, 2009.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○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

山内由紀子 (YAMAUCHI Yukiko)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号 : 10546518

(2) 研究分担者  
該当なし

(3) 連携研究者  
該当なし