

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20300012

研究課題名（和文）

動的ネットワークにおける Self-\*分散アルゴリズム設計手法の研究

研究課題名（英文）

Research on self-\* distributed algorithms in dynamic networks

研究代表者

角川 裕次 (HIROTSUGU KAKUGAWA)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80253110

研究成果の概要（和文）：本研究では、膨大な数のコンピュータがネットワークで相互接続された分散システムを構築するためのソフトウェア設計手法の研究を行うものである。特に、コンピュータがネットワークに参加離脱、あるいはネットワーク形状が動的に変化する分散システムを対象としている。本研究の成果として、ネットワークの動的な変化に強靱な適応性を有する分散アルゴリズムの設計を行い、その有効性をシミュレーション及びセンサーネットワークで実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aim at studying the methodology of software development for distributed systems in which huge number of computers are interconnected by networks. Specifically, the target distributed system is the one in which computers dynamically join and leave or network topology changes. Our contribution is mainly twofold. First, we designed distributed algorithms that are strongly adaptive to dynamic change of networks. Next, we showed effectiveness of the algorithm by computer simulations and implementations on sensor networks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総計	7,800,000	2,340,000	10,140,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：アルゴリズム工学

## 1. 研究開始当初の背景

各種センサーと無線通信デバイスを有する超小型CPUボード（以下、センサーノード）を多数配置して、環境・監視、動植物モ

ニタリングなどを行うセンサーネットワークが注目されていた。各センサーノードの能力が低い、多数のセンサーノードが協力することで様々な目的を達成する可能性が考

えられていた。また、携帯端末の普及により、モバイルアドホックネットワークの研究も活発になされつつあった。モバイルアドホックネットワークは、移動ノード間で相互にメッセージを配送することで、固定基地局を用いずにネットワークを構築するものである。さらに、PC とインターネットを使った Peer-to-Peer 型のオーバーレイネットワークの研究も盛んになりつつあった。これらネットワークを実現するには、ノード間の高度な協調動作（自己組織化・自己最適化・自己修復能力）が必要であった。これらのネットワークは互いに異なるように見え、個別に研究されていたのが研究開始当時の現状であった。

## 2. 研究の目的

本研究テーマでは、動的に多数のノードが参加離脱およびトポロジが変化するセンサーネットワーク、モバイルアドホックネットワーク、Peer-to-Peer ネットワークを、動的ネットワークと統一的にとらえて、動的ネットワーク上の分散システム構築のための分散アルゴリズム設計手法の確立を、理論的な側面からの研究で目指したものである。特に本研究の中心テーマは、Self-\* と呼ばれているものであり、自己組織化 (Self-organization)、自己最適化 (Self-optimization)、自己保護 (self-protection)、自己修復 (Self-repairing) などといった、分散システムが外部からの制御なしで自律的に健全に動作させる機構の研究である。

従来の分散システム構築の枠組みでは動的な変化については十分な考慮がされておらず、従来の枠組みでは不十分であり、この点が本研究の目的に意義がある点である。また、単に各種の問題それぞれに対して発見的な手法で考えて、シミュレーションで有効性を確認する研究手法ではなく、フォーマルな立場、すなわち、アルゴリズムの設計と正当性の証明を研究の基盤に据える点に大きな意義がある。この方針により、分散システムの正しさや質を保証した分散システム構築の基盤となりうるという大きな特徴がある。

## 3. 研究の方法

本研究は大別して以下の3つで構成し、計画を行った。

### (1) センサーネットワーク向け Self-\* 分散アルゴリズムの設計

このテーマでは、理論的側面から分散アルゴリズムを設計・解析することが目的である。このテーマにより、分散アル

ゴリズム設計手法の検討を行うものである。

### (2) Self-\* 分散アルゴリズムのシミュレーションによる評価・検討

このテーマでは、上記(1)で設計した分散アルゴリズムをコンピュータシミュレーションにより評価することで、実際のネットワークでのパフォーマンスを調べる。また、理論的解析との差異を明らかにして、理論的解析手法にフィードバックすることも目的とする。

### (3) センサーネットワーク実機への実装実験

このテーマでは、上記(1)で設計した分散アルゴリズムをセンサーネットワーク実機に実装してその性能を評価するものである。また、シミュレーションだけではわからない実装上のテクニックや、細かな振る舞いを考慮したプログラム開発を検討することを目的とする。

## 4. 研究成果

### (1) センサーネットワーク向け Self-\* 分散アルゴリズムの設計

計画に従って、各種分散アルゴリズムの設計をおこなってきた。特に、センサーネットワークでのデータ収集で重要な役割を果たす、連結支配集合 (Connected Dominating Set) アルゴリズムを中心に研究を進めてきた。ノードの参加や離脱が発生しても、すぐさま支配集合を求め、支配集合であることを保ちつつ連結支配集合に到達するという、トポロジ変化へ適応している最中での安全性を保障したアルゴリズムを提案した。連結支配集合をデータ集約に使う際には、支配集合のメンバとして選ばれたノードが非支配集合のノードからデータを受け取り、支配集合ノード間でデータの転送を行う子。このため、支配集合のサイズは小さいほうが好ましい。このため、連結支配集合問題を求める問題を組み合わせ最適化問題とみなすことができる。本研究テーマでは、分散制御のもとで、近似比を保証した解を得る、分散近似アルゴリズムを提案した。

また、センサーネットワークでのアルゴリズム設計を容易にする分散共有メモリを無線パケット通信で実装した場合の動作時間（収束時間）に対して確率的な解析を行った。これら一連の成果は Theoretical Computer Science 誌および国際会議 SSS にて発表を行った。

### (2) Self-\* 分散アルゴリズムのシミュレーションによる評価・検討

上記(1)で述べた安全性を有する連結

支配集合アルゴリズムに対して、コンピュータシミュレーションを行って、その性能を評価した。また、これまでに提案されている自己安定分散アルゴリズムを、無線通信を行うセンサーネットワークの通信モデルでシミュレーションを行い、理論的解析結果との比較を行った。その結果、理論的解析結果とシミュレーション結果が良く合致することを示すことができた。この成果は国内学会にて口頭発表を行った。

- (3) センサーネットワーク実機への実装実験  
自己安定分散アルゴリズムを、Freescale Semiconductor 社の MC13193-EVK および SunMicrosystems 社 SunSPOT に実装し、評価実験を行った。前者については、自己安定性を有する小規模なオペレーティングシステムの開発も行った。評価を行った対象は、独立点アルゴリズム、連結支配集合アルゴリズムなどである。おおむねシミュレーション結果と一致する結果を得たが、一部のアルゴリズムは想定している計算モデルの関係からシミュレーション結果と若干異なる興味深い結果を得た。一連の実験を通じて、実装向きの計算モデルと、実装には若干不向きで効率的な実行に工夫を要する計算モデルがあることを示すことができた。この結果は国際会議 SN において発表を行った。

## 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 12 件)

1. Sayaka Kamei, Hirotsugu Kakugawa, "A Self-Stabilizing 6-Approximation for the Minimum Connected Dominating Set with Safe Convergence in Unit Disk Graph," *Theoretical Computer Science*, Vol. 428, No. 13, pp. 80-90, April 2012. (査読あり)
2. Sayaka Kamei, Hirotsugu Kakugawa, Stephane Devismes, Sebastien Tixeuil, "A Self-Stabilizing 3-Approximation for the Maximum Leaf Spanning Tree Problem in Arbitrary Networks", *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 21, No. 1, January 2011. (査読あり)
3. Y. Sudo, J. Nakamura, Y. Yamauchi, F. Ooshita, H. Kakugawa, and T. Masuzawa, "Loosely-stabilizing Leader Election in Population Protocol Model," *Theoretical*

*Computer Science*, to appear. (査読あり)

4. Hirotsugu Kakugawa, Yukiko Yamauchi, Sayaka Kamei, Toshimitsu Masuzawa, "Observations on non-silent self-stabilizing algorithms in sensor networks with probabilistically intermittent link failures," *Theoretical Computer Science*, Vol. 412, Issue 33, pp. 4336-4349, July 2011. (査読あり)

5. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "A Self-stabilizing Distributed Approximation Algorithm for the Minimum Connected Dominating Set," *International Journal of Foundation of Computer Science*, Volume No.21, Issue No. 3, pp. 459-476, June 2010. (査読あり)

6. Daisuke Kadono, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "An Ant Colony Optimization Routing based on Robustness for Ad Hoc Networks with GPSs", *Ad Hoc Networks*, Volume 8, Issue 1, pp. 63-76, January 2010. (査読あり)

7. Hirotsugu Kakugawa, Sayaka Kamei and Toshimitsu Masuzawa, "A Token-Based Distributed Group Mutual Exclusion Algorithm with Quorums", *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 1153 - 1166, September, 2008. (査読あり)

[学会発表] (計 18 件)

1. Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Randomized Rendezvous of Mobile Agents in Anonymous Unidirectional Ring Networks," *Proceedings of the 19th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2012)*, Reykjavik, Iceland, June 30 - July 2, 2012 (to appear).
2. Hirotsugu Kakugawa and Sayaka Kamei, "A Token-based Distributed Algorithm for the Generalized Resource Allocation Problem," *Proceedings of the 14th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS)*, Tozeur, Tunisia, December 14-17, 2010.
3. Yuichi Sudo, Daisuke Baba, Junya Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu

Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "An Agent Exploration in Unknown Undirected Graphs with Whiteboards", Proceedings of the 3rd Workshop on Reliability, Availability, and Security (WRAS), Zurich, Switzerland, July 29, 2010.

4. Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Space-Optimal Rendezvous of Mobile Agents in Asynchronous Trees", Proceedings of the 17th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2010), Şirince, Turkey, June 7-11, 2010.

5. Sayaka Kamei and Hirotsugu Kakugawa, "A Self-Stabilizing Approximation for the Minimum Connected Dominating Set with Safe Convergence", 12th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), pp. 496-511, Luxor, Egypt, December 15-18, 2008.

6. Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Convergence Time Analysis of Self-Stabilizing Algorithms in Wireless Sensor Networks with Unreliable Links", 10th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), pp. 173-187, Detroit, USA, Nov 21-23, 2008.

7. Kazuyuki Yoshida, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Observation on Lightweight Implementation of Self-Stabilizing Node Clustering Algorithms in Sensor Networks," IASTED International Conference on Sensor Networks (SN), Crete, Greece, September 29 - October 2, 2008.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

角川 裕次 (KAKUGAWA HIROTSUGU)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号：80253110

### (2) 研究分担者

増澤 利光 (MASUZAWA TOSHIMITSU)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：50199692

大下 福仁 (OOSHITA FUKUHITO)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：20362650

### (3) 連携研究者

亀井清華 (KAMEI SAYAKA)

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90434977