

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007年度～2010年度

課題番号：19300017

研究課題名(和文) 連続的不安定なネットワーク環境において安定動作する分散システムの実現に関する研究

研究課題名(英文) Design methodology of stabilizing distributed systems in intermittently unstable network environments

研究代表者

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

研究成果の概要(和文)：

大規模ネットワーク環境は、計算機の故障、ネットワークトポロジの変化、外部からの攻撃などの外乱のために不安定で絶えず変動している。このようなネットワークにおいて、安定動作する自己適応型分散システム設計の基盤となる理論・技術について研究した。特に、高度な自己適応性を有する自己安定分散アルゴリズムの概念を、断続的な外乱に対応できるように拡張し、いくつかの自己安定分散アルゴリズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：

A large scale of network is intermittently unstable because of faults, topology changes and external attacks. We investigated fundamental theory and methods for designing self-adaptive distributed systems that can work stably in such network environments. Especially, we extended the concept of self-stabilization, which guarantees high self-adaptability, so that the extended concept can adapt to intermittently unstable network environments and we proposed several self-stabilizing distributed algorithms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	0	0	0
年度			
総計	11,200,000	3,360,000	14,560,000

研究分野：情報科学

科研費の分科・細目：情報学 計算機システム・ネットワーク

キーワード：アルゴリズム，ディペンダブル・コンピューティング，ネットワーク，分散システム，自己安定システム，モバイル・アドホック・ネットワーク，P2Pシステム

1. 研究開始当初の背景

ユビキタス情報社会の実現に向けて、大規模ネットワーク環境を利用した、安心して安全に利用できる分散システムの構築が必要である。

大規模ネットワーク環境は、計算機の故障、ネットワークトポロジの変化、外部からの攻

撃や利用者の誤操作などの外乱のために、不安定で絶えず変動している。そのため、ネットワーク環境の、断続的で不安定な振る舞いにかかわらず、安定動作できる自己適応型分散システムを開発することが必要である。

ネットワーク環境の変化に対する、高度な自己適応性を有する分散システムとして、自

自己安定分散システムが期待されている。自己安定分散システムとは、予期せぬ外乱によって、分散システムがどのような状況に陥っても、自動的に正しい状況に復帰できることを保証する分散システムである。

しかし、従来の自己安定分散システムが正しい状況に復帰できるためには、新たな外乱が生じない十分に長い期間が存在することが必要である。このため、不安定で絶えず変動しているネットワーク環境においては、従来の自己安定分散システムでは、正しい状況に復帰できることを保証できない。また、不安定で絶えず変動しているネットワークにおける自己適応型分散システムに関する理論的研究は皆無であり、自己適応型分散システムの設計開発のための理論基盤もまったく整備されていない。

2. 研究の目的

不断の外乱のために不安定で絶えず変動しているネットワーク環境において、安定して動作できる自己適応型分散システム設計の基盤となる理論、および、設計手法の確立を目指す。特に、高度な自己適応性を有する自己安定分散システムに着目し、断続的に変動するネットワーク環境に適用できるように、この概念を拡張することを目指す。

まず、不安定で断続的に変動しているネットワーク環境における、従来の自己安定分散システムの限界を明らかにする。次に、断続的に不安定なネットワーク環境において実現可能な自己安定性を特徴づける。そして、この自己安定性を有する分散システムを、従来の自己安定分散システムを拡張した新たな概念として確立し、その自己安定性を有する分散アルゴリズムの提案、および、設計手法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下の研究課題に取り組む。

(1) 連続的不安定なネットワークのモデル化、および、不安定なネットワーク環境で安定動作する分散システムの定式化：連続的に不安定なネットワーク環境で安定動作する分散システムに関する理論的研究は、以前には、ほとんど行われていない。そのため、理論的研究の枠組みを整備する必要があり、最初に、連続的不安定なネットワーク環境のモデル化を行う。さらに、このようなネットワーク環境では、自己安定分散システムが満たすべき要件（仕様）として従来型の要件を採用するには無理があると考えられるので、従来の自己安定分散システムの限界を明らかにする。さらに、自己安定分散システムが満たすべき要件を緩和するという方向で、断続的に不安定なネットワーク環境における自

己安定分散システムの定式化を行う。

(2) 外乱の影響を空間的に封じ込める手法の開発：不断の外乱が生じるネットワーク環境において安定動作する自己安定分散システムを実現するためのひとつの手法は、外乱の影響を空間的に封じ込めることである。つまり、外乱が生じた部分に近接するプロセスのみで分散システムの動作が乱れることを許し、その他の部分に対しては外乱の影響を遮断し、外乱の影響を受けることなく安定動作することを保証することである。

このアプローチに基づいた自己安定分散システムの定式化を行い、具体的な問題に対して自己安定分散アルゴリズムを設計し、その設計法を確立する。さらに、このアプローチの適用可能性の限界を解明する。

(3) 外乱の影響を時間的に封じ込める手法の開発：ネットワーク環境の局所の変化が分散システムの安定状況（解状況）の大域的構造に影響する問題に対しては、(2)の空間的封じ込めを実現することは不可能である。そこで、空間的封じ込めの相補的アプローチとして、外乱の影響が分散システム全体に及ぶことを許容するが、その影響を時間的に封じ込めることを目指す。つまり、外乱が断続的に継続する場合でも、その外乱のために分散システムの動作が乱れる期間を制限（外乱の影響の時間的封じ込め）し、その期間以降に対しては外乱の影響を遮断し、外乱の影響を受けることなく安定動作することを保証することを目指す。

このアプローチに基づいた自己安定分散システムの定式化を行い、具体的な問題に対して自己安定分散アルゴリズムを設計し、その設計法を確立する。さらに、このアプローチの適用可能性の限界を解明する。

(4) 外乱の影響の空間・時間的封じ込め度をパラメータとする設計法の開発とオーバーヘッドの解析：外乱の影響に対する、(2)の空間的封じ込めと(3)の時間的封じ込めを組み合わせることにより、要求に応じた適切な封じ込めを実現するための手法を検討する。

このアプローチに基づいた自己安定分散システムの定式化を行い、具体的な問題に対して自己安定分散アルゴリズムを設計し、その設計法を確立する。また、空間・時間的封じ込めを実現するためのオーバーヘッドの解析を行い、本アプローチの有効性を確認する。

(5) 分散システムに許容された「ゆらぎ」を利用した外乱の影響緩和法の開発：従来のランダムネスを利用した自己安定分散システムは、安定状況（解状況）への到達を可能にするために、あるいは、安定状況への到達を高速にするためにランダムネスを利用している。また、安定状態到達後に関しては、安定性を保証するために、ランダムネスを排除

している。

自己安定分散システムにおける、ランダムネスの新たな利用法として、安定状況到達後でもランダムネスによる「ゆらぎ」を許容することにより、安定状況で発生する外乱の影響を緩和するという手法について検討する。安定状況到達後でもランダムネスによる「ゆらぎ」を許容することは、分散システムの安定性に対する要件を緩和することを意味している。安定性要求を緩和することにより、安定状況到達後の「ゆらぎ」を緩衝材のように利用することによって、外乱の影響を緩和できる可能性がある。このアプローチの可能性を解明し、自己安定分散システムの新たな概念を確立する。

4. 研究成果

(1) 連続的不安定なネットワークのモデル化、および、不安定なネットワーク環境で安定動作する分散システムの定式化：絶えず不安定なネットワーク環境で安定動作する分散システムの理論的研究の枠組みを整備するために、構成要素やトポロジが不断に変化するネットワークのモデル化を行った。

例えば、不断の外乱を永久ビザンチン故障としてモデル化し、永久ビザンチン故障が存在するネットワーク環境における、分散システムの自己安定性について検討した。また、計算機の移動、参加や離脱などにより、トポロジ変化が断続的に生じるネットワークのモデル化を行い、このようなネットワーク環境における、分散システムの自己安定性について検討した。

断続的に不安定なネットワーク環境においては、従来の自己安定性を実現することが不可能であることを示し、実現可能な自己安定性として、強安定性、緩安定性、安全安定性など、従来の自己安定分散システムを緩和した新たな概念を定式化した。

(2) 外乱の影響を空間的に封じ込める手法の開発：外乱の生じた部分に近接するプロセスのみで分散システムの動作が乱れることを許し、その他の部分に対しては外乱の影響を遮断する（外乱の影響を空間的に封じ込める）ための手法を検討し、いくつかの成果を得た。

まず、外乱の影響の空間的封じ込めの概念の定式化を行い、いくつかの問題に対し、外乱の影響の空間的封じ込めを実現する自己安定分散アルゴリズムを開発した。例えば、分散システムのスケジューリングに利用される彩色問題に対して、外乱の影響の空間的封じ込めを実現する自己安定アルゴリズムを開発した。さらに、この自己安定アルゴリズムは、外乱の影響を受ける範囲に関して最適（最小）であることを示した。

また、空間的封じ込めの実現不可能性につ

いても検討し、このアプローチの限界を明らかにした。

さらに、複雑なタスクに対する分散システムの設計手法として、タスクをいくつかの部分タスクに分割し、部分タスクに対する分散アルゴリズムを設計し、それらを合成するという分割統治に基づく手法がよく用いられる。そこで、外乱の空間的故障封じ込めを実現している、複数の自己安定アルゴリズムが与えられたときに、空間的故障封じ込めの特性を保持しながら、これらの自己安定アルゴリズムを合成する手法をいくつか開発した。

(3) 外乱の影響を時間的に封じ込める手法の開発：外乱の影響の空間的封じ込めが不可能な問題や外乱パターンに対して、外乱の影響が分散システム全体に拡散することを許容するが、その影響を時間的に封じ込めるための手法について検討し、いくつかの成果を得た。

まず、外乱の影響の時間的封じ込めの概念を定式化し、全域木構成などのいくつかの問題に対し、時間的封じ込めを実現する自己安定分散アルゴリズムを開発した。自己安定分散アルゴリズムの研究領域では、これまで、永続的な外乱の影響を時間的に封じ込めるというアプローチはまったく行われておらず、これらの分散アルゴリズムを開発できたことは、本アプローチの実現可能性を実証するものでもある。

また、時間的封じ込めの実現不可能性についても検討し、このアプローチの限界を明らかにした。

(4) 外乱の影響の空間・時間的封じ込め度をパラメタとする設計法の開発とオーバーヘッドの解析：外乱の影響の空間的封じ込め、および、時間的封じ込めを組み合わせた概念の定式化を行った。さらに、空間的封じ込めと時間的封じ込めの適切な組み合わせを実現するための手法について検討した。

(5) 分散システムに許容された「ゆらぎ」を利用した外乱の影響緩和法の開発：ランダムネスを利用した自己安定分散システムにおいて、安定状態到達後でもランダムネスによる「ゆらぎ」を許容する（安定性を犠牲にする）ことにより、外乱の影響を効果的に緩和するための手法について検討した。

まず、連続的不安定なネットワーク環境での自己安定性の新たな拡張として、緩自己安定性の定式化を行った。さらに、リーダ選出問題という基本問題に対して、緩自己安定アルゴリズムを開発した。

安定状況到達後の「ゆらぎ」を許容することは、安定性の緩和（犠牲）を意味しており、従来の自己安定分散アルゴリズムの研究領域では、一切、考慮されていなかった。この成果は、安定状況到達後の「ゆらぎ」を緩衝材のように利用することによって、外乱の影

響を緩和するという、斬新なアプローチを提唱するものであり、当該分野の研究者からも高く評価されている。

(6) 通信に関して効率的な自己安定分散システムの開発：上記の(2)～(5)の課題の成果として開発した自己安定分散アルゴリズムは、当初の研究目的を達するものであるが、断続的な外乱に適応するために、不断のプロセス間通信を必要とし、ネットワークに対する高い負荷を生じる。そのため、センサーネットワークなどの資源制約の厳しいネットワーク環境においては、実用性の高い手法とは言えない。

そこで、これらの自己安定分散アルゴリズムの実用性を高めるために、当初計画の課題に加えて、断続的な外乱に適応でき、なおかつ、通信に関して効率的な自己安定分散システムを定式化し、いくつかの基本的で重要な問題に対して、通信効率に優れた自己安定分散アルゴリズムを提案した。

上記の(2)～(6)で開発した自己安定分散アルゴリズムについては、理論的な性能解析に加えて、シミュレーション実験、および、センサー実機による評価実験を行い、実用性の実証も行った。

上記の(1)～(6)の研究成果は、これまで未開拓であった、断続的に不安定なネットワーク環境における自己安定分散システムに関する理論的研究の先駆けとなるものである。安心して安全に利用できる大規模分散システムの設計開発の基盤技術に関する研究成果として、当該分野への貢献が大きいと考えている。

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 19 件)

1. Doina Bein, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Self-stabilizing protocols on oriented chains with joins and leaves,” International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems (採録決定) 査読有。
2. Yukiko Yamauchi, Sayaka Kamei, Fukuhito Ooshita, Yoshiaki Katayama, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Timer based composition of fault-containing self-stabilizing protocols,” Information Sciences, Vol.180, pp.1802-1816 (2010.5) 査読有。
3. Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil: “Quiescence of self-stabilizing

gossiping among mobile agents in graphs,” Theoretical Computer Science, Vol.411, pp.1567-1582 (2010.3) 査読有。

4. Daisuke Kadono, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “An ant colony optimization routing for ad hoc networks with GPSs,” Ad Hoc Networks, Vol. 8, Issue 1, pp.63-76 (2010.1) 査読有。
 5. Yukiko Yamauchi, Doina Bein, Toshimitsu Masuzawa: “Preserving the fault containment of ring protocols executed on trees,” The Computer Journal, Vol.52, No.4, pp.483-498 (2009.7) 査読有。
 6. Toshimitsu Masuzawa: “Self-stabilization in dynamic networks,” IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E92-D, pp.108-115 (2009.2) 査読有。
 7. Hirotsugu Kakugawa, Sayaka Kamei, Toshimitsu Masuzawa: “A token-based distributed group mutual exclusion algorithm with quorums,” IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 19, No. 9, pp.1153-1166 (2008.9) 査読有。
 8. Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Move-optimal gossiping among mobile agents,” Theoretical Computer Science, Vol. 393, No. 1-3, pp.90-101 (2008.3) 査読有。
 9. 西川元, 山内由紀子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光: “モバイルアドホックネットワークにおける公平性の高い自己安定相互排除プロトコル,” 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol. J91-A, pp.279-284 (2008.2) 査読有。
 10. Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil: “Stabilizing link-coloration of arbitrary networks with unbounded Byzantine faults,” International Journal of Principles and Applications of Information Science and Technology, Vol.1, pp.1-13 (2007.12) 査読有。
- [学会発表] (計 36 件)
1. Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil: “Stabilizing locally maximizable tasks in unidirectional networks is hard,” the 30th International Conference on Distributed Computing Systems, Genoa, Italy (2010.6.24).
 2. Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Space-optimal rendezvous of mobile agents in asynchronous trees,” the 17th International Colloquium on

Structural Information and Communication Complexity, Sirince, Turkey(2010.6.8).

3. Hirotsugu Kakugawa, Yukiko Yamauchi, Sayaka Kamei, Toshimitsu Masuzawa: “Cached sensor network transformation of non-silent self-stabilizing algorithms with unreliable links,” the 11th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, Lyon, France (2009.11.5).

4. Stephane Devismes, Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil: “Communication efficiency in self-stabilizing silent protocols,” the 29th International Conference on Distributed Computing Systems, Montreal, Canada (2009.6.24).

5. Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Loosely stabilizing leader election in population protocol model.” the 16th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, Piran, Slovenia (2009.5.26).

6. Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa: “Convergence time analysis of self-stabilizing algorithms in wireless sensor networks with unreliable links,” the 10th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, Detroit, USA (2008.11.22).

7. Yukiko Yamauchi, Doina Bein, Toshimitsu Masuzawa, Linda Morales, Ivan Hal Sudborough: “Calibrating an embedded protocol on an asynchronous system,” the 2nd International Symposium on Intelligent Distributed Computing, Catania, Italy (2008.9.19).

8. Shay Kutten, Toshimitsu Masuzawa: “Output stability versus time till output,” the 21st International Symposium on Distributed Computing, Lemesos, Cyprus (2007.9.26).

[図書] (計1件)

1. 山下雅史, 増澤利光: “適応的分散アルゴリズム,” 共立出版, pp. 71-102, pp. 165-262 (2010.6).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

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