

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300009

研究課題名(和文)断続的ダイナミクスを有する分散システムのエネルギー効率にすぐれた安定化手法の確立

研究課題名(英文)Energy-efficient stabilization of distributed systems with intermittent dynamics

研究代表者

増澤 利光(MASUZAWA, Toshimitsu)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50199692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、断続的に変化するネットワーク環境において、自己適応性・安定動作を実現するエネルギー効率のよい分散アルゴリズムの理論・技術の確立を目指した。具体的には、以下の研究テーマに取り組み、いくつかの成果を得た。

(1) 分散アルゴリズムの消費エネルギーのモデル化。(2) 断続的に変化するネットワーク環境における分散システムの安定性の定量指標の提案。(3) 分散システムの消費エネルギーと安定性とのトレードオフの解明。(4) 分散システムのエネルギー効率にすぐれた安定化手法の確立。

研究成果の概要(英文)：We aimed to establish the theory and the techniques of distributed algorithms for energy-efficient self-adaptability and stability in networks with intermittent dynamics. Specifically, we worked on the following subjects and obtained results.

(1) Modeling of the energy consumption of the distributed algorithms. (2) Measurements of the stability of the distributed systems in networks with intermittent dynamics. (3) The tradeoff between the energy consumption and the stability of the distributed systems. (4) Stabilization techniques for energy-efficient distributed systems.

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 ディペンダブル・コンピューティング 分散システム ネットワーク エネルギー効率化 無線ネットワーク モバイル・エージェント ビザンチン故障

### 1. 研究開始当初の背景

ペタスケールにも達する次世代ユビキタスネットワーク環境は、デバイスの移動、ユーザ要求の変化、低信頼デバイスの誤動作、ユーザの誤操作・攻撃などに起因する、断続的変動を伴う。このような断続的変動を伴うネットワーク環境上に構築される超大規模分散システムは、時々刻々変化するネットワーク環境に自律的に適応しながら安定動作するだけでなく、消費エネルギーを抑制することも必要である。しかし、ネットワーク環境の変化に対する迅速な応答(安定化)を実現する従来の分散アルゴリズムでは、環境やシステム状態を常時観測し、検出した環境変化に対して迅速に適応することを目標としており、目標達成のために膨大な消費エネルギーを要する。そのため、ネットワーク環境の断続的変化に対する自己適応性・安定動作をより少ない消費エネルギーで実現するために、新たなパラダイムに基づく分散アルゴリズム理論・工学の確立が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、断続的に変化するネットワーク環境において、自己適応性・安定動作を実現するエネルギー効率のよい分散アルゴリズムの理論・技術の確立を目指す。

センサネットワークなどの一部のネットワークモデルを除き、分散アルゴリズムの消費エネルギーに関する理論的研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、まず、理論的研究の枠組みの整備として、分散アルゴリズムの消費エネルギーのモデル化、および、断続的に変化するネットワーク環境における分散システムの安定性の定性的・定量的指標の整備を行う。次に、分散システムの消費エネルギーと安定性とのトレードオフについて解析し、分散システムのエネルギー効率にすぐれた安定化手法の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、具体的には、以下の4つの研究テーマに取り組む。

#### (1) 分散アルゴリズムの消費エネルギーのモデル化

本研究では、消費エネルギーの抑制と、ネットワーク環境の断続的変化に対する適応性・安定性を両立できる分散アルゴリズムの実現を目指す。しかし、センサネットワークなどの消費エネルギー抑制が重要な課題とされている一部のネットワークモデルを除き、分散アルゴリズムで消費エネルギーを対象とした理論的研究はほとんど行われていない。そこで、理論的研究の枠組みを整備するために、まず、分散アルゴリズムの消費エネルギーのモデル化を行う。ユビキタスネットワーク環境には多種多様な構成要素や通

信方式が混在するが、基本的には、通信にかかわる消費エネルギーが支配的である。そこで、主に通信量に着目して消費エネルギーの定式化を行う。

#### (2) 断続的に変化するネットワーク環境における分散システムの安定性の定性的・定量的指標の提案

ネットワーク環境の変化に対し、従来研究では「迅速に」安定状態に復帰することを目標とし、そのための分散アルゴリズムが検討されてきた。しかし、迅速な安定化を実現するためには、外乱発生 of 迅速な検出と、外乱に対する迅速な対応を必要とし、そのため消費エネルギーも増大する。一方、本研究では消費エネルギーを抑制するために、ゆっくりと安定状態への復帰、あるいは、準安定状態への復帰など、安定状態への「穏やかな」復帰を許容する。この安定化の「穏やかさ」を評価するために、安定性の定性的・定量的指標を定める。

#### (3) 分散システムの消費エネルギーと安定性とのトレードオフの解明

(2)で説明しているように、「穏やかな」安定化を許容すれば消費エネルギーが抑制されることが期待できる。そこで、(1)で定める消費エネルギーの定式化、および、(2)で定める安定性の定性的・定量的指標を用いて、分散システムの消費エネルギーと安定性とのトレードオフ関係の解明を目指す。

#### (4) 分散システムのエネルギー効率にすぐれた安定化手法の確立

エネルギー効率にすぐれた自律的安定性を実現する分散アルゴリズム、つまり、消費エネルギーの抑制と適度な安定性を両立させる分散アルゴリズム理論・手法の確立を目指す。

### 4. 研究成果

各研究テーマに関する研究成果を以下にまとめる。

#### (1) 分散アルゴリズムの消費エネルギーのモデル化

動的で大規模なネットワークの典型例が、無線センサネットワークである。無線センサネットワークはバッテリー駆動のセンサノードで構成されており、消費エネルギーの削減が重要な課題となっている。センサノードでは、メッセージ通信時のエネルギー消費量が大きく、通信を削減することがエネルギー効率化につながる。そこで、無線センサネットワークにおける分散アルゴリズムの消費エネルギーを定式化するために、通信効率という新たな概念と評価尺度を導入した。

#### (2) 断続的に変化するネットワーク環境における分散システムの安定性の定性的・定量的指標の提案

ネットワーク環境における断続的な変化をビザンチン故障としてモデル化し、ビザンチン故障に対する分散システムの安定性として、ビザンチン故障が分散システムに及ぼす影響を、空間的あるいは時間的に制限する、ビザンチン故障封じ込めの概念を提案した。さらに、ビザンチン故障封じ込めの効果を定量的に評価するための指標を、空間的及び時間的観点の両方から提案した。さらに、さまざまなモデルや問題に対して、ビザンチン故障封じ込めを実現する分散アルゴリズムの設計を行った。

(3) 分散システムの消費エネルギーと安定性とのトレードオフの解明

分散システムの消費エネルギー低減化を実現するには、モバイルエージェントを導入し、エージェント数制御により、分散システム全体の消費エネルギーを制御することが有用であると考えられる。そこで、モバイルエージェントシステムの消費エネルギー（主として、モバイルエージェントの移動数で評価される）とシステムの安定性の間のトレードオフについて考察し、いくつかの結果を得た。

時々刻々変化する無線ネットワークを対象に、高度な自律適応性を実現する自己最適化ルーティング・アルゴリズムを提案した。さらに、その消費エネルギーと安定性の間のトレードオフについて考察し、いくつかの結果を得た。

データ複製を利用した耐ビザンチン故障性の実現法について、故障耐性と消費エネルギー（主として、複製数と通信量で評価される）の間のトレードオフについて考察した。

(4) 分散システムのエネルギー効率にすぐれた安定化手法の確立

モバイルエージェントを利用した分散システム設計について、エネルギー効率化に有用なサブタスクをいくつか提案し、それらを実現する手法を提案した。

時々刻々変化する無線ネットワークを対象に、高度な安定性を実現する自己安定アルゴリズムの汎用的な設計法を提案した。さらに、その消費エネルギーと安定性の間のトレードオフについて考察し、いくつかの結果を得た。

大規模動的分散システムで、バックアップのためのチェックポイント記録法に関して、エネルギー効率化に優れた局所チェックポイント記録法を提案した。

本研究は、動的ネットワーク環境における超大规模分散システムを対象に、安定性と低消費エネルギーの同時実現にむけての理論基盤を構築するものである。安定性と低消費エネルギーについて新たな概念を提唱するなど、本分野の理論研究へのインパクトも大きい。

本研究では、無線センサネットワークなどの

いくつかのネットワークモデルを対象としたが、これら以外のネットワークモデルや問題に対し、本研究で提案した概念や方法論（あるいはそれらの拡張）を適用していくことが今後の課題である。

## 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 11 件)

Fukuhito Ooshita, Shinji Kawai, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Randomized gathering of mobile agents in anonymous unidirectional ring networks, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (to appear). 査読有。

DOI: 10.1109/TPDS.2013.259

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Analysis of distributed token circulation algorithm with faulty random number generator, Parallel Processing Letters, Vol.24, No.1 (1450002), 2014. 査読有。

DOI: 10.1142/S0129626414500029

Junya Nakamura, Tadashi Araragi, Shigeru Masuyama, Toshimitsu Masuzawa, Efficient randomized Byzantine fault-tolerant replication based on special valued coin tossing, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E97-D, No.2, pp.231-244, 2014. 査読有。

DOI: 10.1587/transinf.E97.D.231

Junya Nakamura, Tadashi Araragi, Toshimitsu Masuzawa, Shigeru Masuyama, A method of parallelizing consensus for accelerating Byzantine fault tolerance, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E97-D, No.1, pp.53-64, 2014. 査読有。

DOI: 10.1587/transinf.E97.D.53

Kim Yonghwan, Tadashi Araragi, Junya Nakamura, Toshimitsu Masuzawa, A concurrent partial snapshot algorithm for large-scale and dynamic distributed systems, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E97-D, No.1, pp.65-76, 2014. 査読有。

DOI: 10.1587/transinf.E97.D.65

Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Linear time and space gathering of

anonymous mobile agents in asynchronous trees, Theoretical Computer Science, Vol.478, pp.118-126, 2013. 査読有 .

DOI: 10.1016/j.tcs.2013.01.022

Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Loosely-stabilizing leader election in population protocol model, Theoretical Computer Science, Vol. 444, pp.100-112, 2012. 査読有 .

DOI: 10.1016/j.tcs.2012.01.007

Doina Bein, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Self-stabilizing protocols on oriented chains with joins and leaves, International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems, Vol.5, No.2, pp. 178-199, 2012. 査読有 .

DOI: 10.1504/IJAACS.2012.046284

Swan Dubois, Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil, Bounding the impact of unbounded attacks in stabilization, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol.23, No.3, pp460-466, 2012. 査読有 .

DOI: 10.1109/TPDS.2011.158

Yukiko Yamauchi, Doina Bein, Toshimitsu Masuzawa, Reliable communication on emulated channels resilient to transient faults, International Journal of Foundations of Computer Science, Vol.22, No.5, pp.1099-1122, 2011. 査読有 .

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, 2011. 査読有 .

DOI: 10.1016/j.tcs.2010.11.013

[学会発表](計 22 件)

Shusuke Takatsu, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Zigzag: Local-information-based self-optimizing routing in virtual grid networks, the 33rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2013.7.8-11, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Karim Bessaoud, Alain Bui, Toshimitsu Masuzawa, Laurence Pilard, Transitive approach for topology control in wireless sensor networks, the 9th International

Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2013.7.1-5, Cagliari, Sardinia - Italy.

Masahiro Shibata, Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Algorithms for partial gathering of mobile agents in asynchronous rings, the 16th International Conference on Principles of Distributed Systems, 2012.12.18-20, Rome, Italy.

Tomoya Takimoto, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Communication-efficient self-stabilization in wireless networks, the 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2012.10.1-4, Toronto, Canada.

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Randomized rendezvous of mobile agents in anonymous unidirectional ring networks, the 19th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2012.6.30-7.2, Reykjavik, Iceland.

Yonghwan Kim, Tadashi Araragi, Junya Nakamura, Toshimitsu Masuzawa, Brief Announcement: A concurrent partial snapshot algorithm for large-scale and dynamic distributed systems. the 13th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2011.10.10-12, Grenoble, France.

Toshimitsu Masuzawa, Silence is golden: Self-stabilizing protocols communication-efficient after convergence (Invited talk), the 13th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2011.10.10-12, Grenoble, France.

Swan Dubois, Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil, Maximum metric spanning tree made Byzantine tolerant, the 25th International Symposium on Distributed Computing, 2011.9.20-22, Rome, Italy.

Amos Korman, Shay Kutten, Toshimitsu Masuzawa, Fast and compact self stabilizing verification, computation, and fault detection of an MST, the 30th annual ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing, 2011.6.6-8, San Jose, California, USA.  
Gen Motoyoshi, Yuichi Sudo, Tsutomu

Murase, Toshimitsu Masuzawa, Advantages of optimal longcut route for wireless mobile users, IEEE International Conference on Communications, 2011.6.5-9, Kyoto, Japan.

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, Evaluation of self-stabilizing token circulation algorithm with faulty random number generators, the Workshop on Dependability of Network Software Applications, 2010.11.18, Higashi Hiroshima, Japan.

Swan Dubois, Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil, On Byzantine containment properties of the min+1 protocol, the 12th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2010.9.20-22, New York City, New York, USA.

Yukiko Yamauchi, Toshimitsu Masuzawa, Doina Bein, Adaptive containment of time-bounded Byzantine faults, the 12th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2010.9.20-22, New York City, New York, USA.

Swan Dubois, Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil, The impact of topology on Byzantine containment in stabilization, the 24th International Symposium on Distributed Computing, 2010.9.13-15, Cambridge, Massachusetts, USA.

Yuichi Sudo, Daisuke Baba, Junya Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, An agent exploration in unknown undirected graphs with whiteboards, the 3rd Workshop on Reliability, Availability, and Security, 2010.7.29, Zurich, Switzerland.

Toshimitsu Masuzawa, Sebastien Tixeuil, Stabilizing locally maximizable tasks in unidirectional networks is hard, the 30th International Conference on Distributed Computing Systems, 2010.6.21-26, Genoa, Italy.

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, 2010.6.7-11, Sirince, Turkey.

〔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〕  
なし

## 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

### (3) 連携研究者

大下 福仁 (OOSHITA, Fukuhito)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 20362650