

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500039

研究課題名(和文)分散システムにおけるプロセス間相互作用と故障耐性の研究

研究課題名(英文)Process interaction and fault-tolerance in distributed computing systems

研究代表者

角川 裕次 (Kakugawa, Hirotsugu)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80253110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題においては、以下の3方面から研究を行った。(1)分散プロセス間の同期機構の統一枠組み：相互排除問題を従来研究よりもさらに一般化した枠組みを提案し、それら問題のクラスの構造を明らかにした。(2)微小分散ノードのための分散アルゴリズム設計手法：個体群プロトコルと呼ばれる分散システムにおいて、多数のノードの中から1つのノードを選び出すリーダー選択アルゴリズムを提案した。(3)モバイルエージェントの基礎理論：ネットワーク上を自律的に移動しながら複数のエージェントが複数箇所にわかれて集合する部分集合問題を提案し、その解法を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we carried out the research on process interaction in distributed systems from the following three aspects. (1) Unified framework of process synchronization: We proposed a new framework for process synchronization that is more general than mutual exclusion, and showed a structure of the class of process synchronization problems. (2) Distributed algorithm design methodology for tiny nodes: For distributed systems modeled by population protocol, we proposed the leader election algorithm which selects exactly one node in the system. (3) Fundamental theory of mobile agent systems: we proposed a new problem called partial gathering problem in which agents gathers several different positions in a network, and proposed an algorithm for the problem.

研究分野：分散アルゴリズム

キーワード：分散アルゴリズム 相互排除 クリティカルセクション モバイルエージェント 個体群プロトコル

1. 研究開始当初の背景

ネットワークで結ばれた多数のコンピュータ群(分散システム)上で動作する多数のプロセスが、自律的に相互作用を行うためのアルゴリズム(分散アルゴリズム)の設計手法を開発することは、IoTの普及やモバイルデバイス等の普及に必須である。プロセスが動作するにあたり、プロセスが互いに協調することにより分散システム全体で統一された目的を達成する場合だけでなく、プロセス間の動作の競合の解消を必要とする場合もある。本研究では分散システムを動作させるためのプロセス間の相互作用を、アルゴリズム論的立場より研究するものである。また、分散システムを構成するプロセスやネットワークに故障が生じる場合や、時々刻々変化する場合を想定したアルゴリズムの研究も重要課題である。

申請者は長年にわたり分散アルゴリズムを研究し、特に分散資源割り当てや分散相互排除、並びに一時故障やトポロジ変化への適応性を持った自己安定分散アルゴリズムを研究してきた。

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 2010. (一般化された分散資源割り当て問題をコーラムシステムと呼ばれる通信構造を用いて解決する分散アルゴリズムの提案)

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. (分散グループ相互排除問題と呼ばれる、分散相互排除を一般化した問題をコーラムを用いて解決する分散アルゴリズムの提案)

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. (連結支配集合を求める自己安定分散アルゴリズムで、ノードの一時故障やトポロジ変化への適応性を有する)

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), Luxor, Egypt, December 15-18, 2008. (連結支配集合を求める自己安定分散アルゴリズムで、ノードの一時故障やトポロジ変化への適応性を有する。動作を開始してすぐさま支配集合を構成し、支配集合であることを保ったまま、支配集合の連結性を達成する。)

本研究はこれらの成果を土台として、更に高度な成果を目指したものである。

2. 研究の目的

ネットワークで結ばれた多数のコンピュータ群(分散システム)上で動作する多数のプロセスが、自律的に相互作用を行うためのアルゴリズム(分散アルゴリズム)の設計手法を開発することが本研究の目的である。プロセスが動作するにあたり、プロセスが互いに協調することにより分散システム全体で統一された目的を達成する場合だけでなく、プロセス間の動作の競合の解消を必要とする場合もある。本研究では分散システムを動作させるためのプロセス間の相互作用を、アルゴリズム論的立場より研究するものである。また、分散システムを構成するプロセスやネットワークに故障が生じる場合や、時々刻々変化する場合を想定したアルゴリズムも研究する。

本研究の特色をより詳しく述べると、アルゴリズムの観点から分散システム構築の手法を研究する点にある。すなわち、多くのネットワークソフトウェアの研究では、発見的な手法を考案してそれを単にシミュレーションで評価するだけである。一方、本研究では、アルゴリズムの正当性を形式的な手法を用いて証明を行い、実装に供する点に特徴がある。すなわち、システムの正しさや質を理論的に保証することを行う。

3. 研究の方法

研究期間は4年であり、前半では基礎となる分散アルゴリズムを理論的側面より研究し、後半ではその成果を受けてセンサーネットワークやPCクラスタ上にアルゴリズムを実装して評価を行いその有効性を検証した。具体的な内容は以下の通りである。

分散資源割り当て問題に対する分散アルゴリズムの設計:

従来検討されている資源割り当て制約を一般化した、より複雑な割り当て制約のもとで行う、分散プロセス間の相互作用の手法を考案する。これを実現するための新たなプロセス間通信構造の考案も含まれる。

動的なネットワーク変化に対して、しなやかに追従する故障耐性を有する自己安定分散

アルゴリズムの設計:

従来検討されている自己安定分散アルゴリズムでは動的なネットワークへの追従が不十分であった。そこでこの問題を解決する手法を考案する。

4. 研究成果

本研究の成果を大きくまとめると以下の2点である。

第1点は、分散プロセス間での資源割り当て問題という分散プロセス間の競合を、より一般的な枠組みでとらえて従来の結果を包括した点である。特に

第2点は、理論的な定式化が難しい動的に変化するネットワークを対象とした分散アルゴリズムを、故障耐性を持たせながら実現した点である。

本研究の成果の意義は、多様化するネットワークにおいて、アプリケーションにおけるプロセス間相互作用の仕組みを明らかにし、故障耐性を有する分散アルゴリズムの設計手法を示した点にある。

研究成果を具体的に述べると以下の通りである。

通信効率の良い自己安定アルゴリズム設計技法:

基本的な考え方は通信回数を減らすという点であるが、単純に通信回数を減らしただけでは障害発生時でのシステムの回復時間が低下する。そこで障害が発生した直後は通信回数を自律的に増加させて回復時間の短縮を行なう。そしてシステムが正常な状況に回復すると、自律的に通信頻度を下げて通信量を減らす。この手法により総通信量を削減することが可能となった。

Tomoya Takimoto, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Communication-Efficient Self-stabilization in Wireless Networks," Proceedings of the 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2012), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7596, ISBN 978-3-642-33535-8, pp. 1-15, Toronto, Canada, 1-4 October, 2012.

モバイルエージェントの基礎理論:

ネットワーク上を自律的に移動しながら複数のエージェントが協調してタスクを達成する手法を研究した。これまでは全エージェントが一家書に集合する問題が頻繁に研究されてきたが、本研究ではエージェントが複数箇所にわかれて集合する部分集合問題を提案し、その解法を考案した。成果の

うちの1つは分散コンピューティング分野で最高の国際会議 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC) に採択され、発表予定である。また、他の成果も、高水準の国際論文誌にも採録された。

Masahiro Shibata, Toshiya Mega, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Uniform deployment of mobile agents in asynchronous rings", ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), Chicago, Illinois, July 25-29, 2016 (to appear).

新たなプロセス間同期問題:

プロセス間同期問題の新たなものとして、相互包含問題を研究している。相互包含問題とは、従来良く研究されている相互排除問題と相補的な問題であり、少なくとも1つのプロセスが臨界領域に有ることを保証する問題である。本研究では相互包含問題のさらなる一般化を行ない、統一的な枠組を提案することで相互排除問題と相互包含問題との相補性の証明を行なった。一連の研究成果は高水準の国際論文誌に掲載された。

Hirotsugu Kakugawa, "On the family of critical section problems," Information Processing Letters (IPL), Vol. 115, Issue 1, pp 28 - 32, January 2015.

微小分散ノードのための分散アルゴリズム設計手法:

微小な2ノードが互いに接近した時にのみ相互に通信できる分散システムを想定した分散アルゴリズム設計手法の研究を進めた。特に、任意のグラフポロジを有する分散システムにて、多数のノードの中から1つのノードを選び出すリーダー選択アルゴリズムを提案した。一連の研究成果は、当分野で高水準の国際論文誌に掲載されたほか、水準の高い国際会議でも採択され、発表を行った。

Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Loosely-stabilizing Leader Election in Population Protocol Model," Theoretical Computer Science (TCS), Vol. 444, pp. 100-112, July 2012.

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 10 件)

Yuichi Sudo, Daisuke Bada, Junya Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, "A Single Agent Exploration in Unknown Undirected Graphs with Whiteboards," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E98-A, No. 10, pp. 2117-2118, Oct. 2015. (査読有)

Hirotsugu Kakugawa, "A self-stabilizing distributed algorithm for local mutual inclusion," Information Processing Letters (IPL), Vol. 115, Issue 6-8, pp. 562-569, June-August 2015 (DOI: 10.1016/j.ipl.2015.01.008). (査読有)

Hirotsugu Kakugawa, "Mutual inclusion in asynchronous message passing distributed systems," Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC), Vol. 77, pp. 95 - 104, March 2015 (DOI: 10.1016/j.jpdc.2015.01.003). (査読有)

Hirotsugu Kakugawa, "On the family of critical section problems," Information Processing Letters (IPL), Vol. 115, Issue 1, pp. 28 - 32, January 2015 (DOI: 10.1016/j.ipl.2014.08.012). (査読有)

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Analysis of Distributed Token Circulation Algorithm with Faulty Random Number Generator," Parallel Processing Letters (PPL), Vol. 24, No. 1, March 2014 (DOI: 10.1142/S0129626414500029). (査読有)

Fukuhito Ooshita, Shinji Kawai, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Randomized Gathering of Mobile Agents in Anonymous Unidirectional Ring Networks," IEEE Transactions on Parallel Distributed System (TPDS), Vol. 25, No. 5, pp. 1289 - 1296, January 2014. (査読有)

Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Linear time and space gathering of anonymous mobile agents in asynchronous trees," Theoretical Computer Science (TCS), Vol. 478, pp. 118-126, March 2013. (査読有)

Yuichi Sudo, Junya Nakamura, Yukiko Yamauchi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu

Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Loosely-stabilizing Leader Election in Population Protocol Model," Theoretical Computer Science (TCS), Vol. 444, pp. 100-112, July 2012 (DOI: 10.1016/j.tcs.2012.01.007). (査読有)

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 (TCS), Vol. 428, No. 13, pp. 80-90, April 2012 (DOI: 10.1016/j.tcs.2011.12.007). (査読有)

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

〔学会発表〕(計 26 件)

Masahiro Shibata, Toshiya Mega, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Uniform deployment of mobile agents in asynchronous rings", ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), Chicago, Illinois, July 25-29, 2016 (to appear). (査読有)

五島剛, 柴田将弘, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "メッセージ通信型分散アルゴリズムの移動エージェントによる耐故障シミュレーション", コンピューテーション研究会, 奈良先端科学技術大学院大学, 2016年4月. (査読無)

小林永樹, 角川裕次, 増澤利光, "辺数が少ない連結全域部分グラフを求める局所分散アルゴリズム", コンピューテーション研究会, 奈良先端科学技術大学院大学, 2016年4月. (査読無)

Rentaro Watanabe, Yonghwan Kim, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Realization of An Efficient Concurrent Partial Snapshot Algorithm for Large-scale and Dynamic Distributed Systems", In Proceedings of the 5th International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software (NCSS), Vol. 5, No. 1, pp. 49--58, Sapporo, Japan, 11 January 2016. (査読有)

柴田, 大下, 角川, 増澤, "非同期リングにおけるモバイルエージェント均一配置アルゴリズム", 第11回情報科学ワークショップ,

北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

難波, 大下, 角川, 増澤, "匿名単方向リングネットワークにおけるモバイルエージェント集合問題に対するトークンを用いた乱択アルゴリズム", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

小野, 大下, 角川, 増澤, "無線ビーブネットワークにおける極大マッチングアルゴリズム", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

安達, 大下, 角川, 増澤, "モバイルノードを利用したトリガ数え上げアルゴリズム", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

小森, 大下, 角川, 増澤, "Time-varying graphにおける1対1のkトークン転送アルゴリズム", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

中川, 大下, 角川, 増澤, "Proof-Labelingスキームに基づく故障封じ込め自己安定アルゴリズムの提案", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

團孝, 大下, 角川, 増澤, "不安定な仮想グリッド環境下におけるzigzagプロトコル適用手法とシミュレーション", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

清洲, 首藤, 大下, 角川, 増澤, "個体群プロトコルモデルにおける緩自己安定リーダー選挙のシミュレーション評価", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

渡部, 金, 大下, 角川, 増澤, "大規模分散システムにおける部分スナップショットアルゴリズムの効率的な並行実行の実現", 第11回情報科学ワークショップ, 北名古屋市, 2015年9月. (査読無)

柴田将弘, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "非同期リングにおけるモバイルエージェント均一配置アルゴリズム", コンピューテーション研究会, 定山溪ビューホテル, COMP2015-11, pp. 107-114, 2015年6月. (査読無)

Masahiro Shibata, Daisuke Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "An algorithm for partial gathering of mobile agents in arbitrary networks", In Proceedings of the Workshop on Distributed Robotic Swarms

(WDRS), Work-in-progress, Tokyo, Japan, 5 October 2015. (査読有)

Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Loosely-Stabilizing Leader Election on Arbitrary Graphs in Population Protocols," Proceedings of the 18th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8878, pp. 339-354, Cortina d'Ampezzo, Italy, December 16 - 19, 2014. (査読有)

李絢, 柴田将弘, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "モバイルエージェントの効率的なグループゴシップアルゴリズム", コンピューテーション研究会, 豊橋技術科学大学, COMP2014-24, pp. 61-68, 2014年9月. (査読無)

Masahiro Shibata, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Move-optimal partial gathering of mobile agents in asynchronous trees," the 21th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8576, ISBN 978-3-319-09619-3, pp 295-310, Hida Takayama, Japan, July 23 - 25, 2014. (査読有)

伊藤瑠美, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "弦付リング構成のための空間計算量に優れた自己安定アルゴリズム", コンピューテーション研究会, 東北大学, COMP2014-3, pp. 13-20, 2014年4月. (査読無)

Shusuke Takatsu, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Zigzag: Local-Information-Based Self-Optimizing Routing in Virtual Grid Networks", Proceedings of the IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), pp. 357 - 368, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8-11 July, 2013. (査読有)

高津周佑, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "仮想グリッドネットワークにおける葉が多いBFS木の安全自己構成法", コンピューテーション研究会, 明治大学, COMP2013-70, pp. 69-76, 2014年3月. (査読無)

Masahiro Shibata, Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Algorithms for partial gathering of mobile agents in

asynchronous rings," Proceedings of the 16th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), pp. 254 - 268, Rome, Italy, 17-21 December, 2012. (査読有)

Tomoya Takimoto, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "Communication-Efficient Self-stabilization in Wireless Networks," Proceedings of the 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2012), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7596, ISBN 978-3-642-33535-8, pp. 1-15, Toronto, Canada, 1-4 October, 2012. (査読有)

妻鹿敏也, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "同期リングにおけるモバイルエージェント均一配置アルゴリズム," コンピューテーション研究会, 愛媛大学, COMP2012-8, pp. 9-16, 2012年5月. (査読無)

柴田将拡, 川合慎治, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, "非同期リングにおけるモバイルエージェント部分集合アルゴリズム," コンピューテーション研究会, 愛媛大学, COMP2012-8, pp. 17-24, 2012年5月. (査読無)

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, "Randomized Rendezvous of Mobile Agents in Anonymous Unidirectional Ring Network," Proceedings of the 19th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2012), Lecture Notes in Computer Science Vol. 7355, ISBN 978-3-642-31103-1, pp. 303-314, Reykjavik, Iceland, June 30-July 2, 2012. (査読有)

〔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
角川裕次 (KAKUGAWA, Hirotsugu)
大阪大学情報科学研究科
研究者番号: 80253110

(2)研究分担者
増澤利光 (MASUZAWA, Toshimitsu)
大阪大学情報科学研究科
研究者番号: 50199692

(3)研究分担者
大下福仁 (OOSHITA, Fukuhito)
奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 准教授
研究者番号: 20362650