

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007年度～2008年度

課題番号：19700058

研究課題名（和文） ランダム化を利用したスケーラブルかつロバストな分散計算

研究課題名（英文） Scalable and Robust Distributed Computation using Randomization

研究代表者

泉 泰介 (IZUMI TAISUKE)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20432461

研究成果の概要：大規模分散システムの効率的な実現において、スケーラビリティと頑健性の両立は重要な課題である。本研究では、ランダム化の手法を軸とし、この問題に取り組んだ。具体的な研究成果としては、(1)自律分散ロボットのロバストな協調アルゴリズム、(2)分散合意問題に対する確率的故障モデルの導入とその上でのアルゴリズム、(3)P2Pシステムにおけるランダム化を利用したスケーラブルな検索手法、の3課題を中心に研究を行い、成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計			

研究分野：分散アルゴリズム

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、高信頼性ネットワーク、情報基礎、確率論

## 1. 研究開始当初の背景

近年のネットワーク環境の大規模化、複雑化に伴い、分散アルゴリズムの設計におけるスケーラビリティの問題が重要性を増している。数万～数百万ノード規模の分散システムにおいては、従来の尺度においては比較的良好とされていたコスト(e.g.、計算時間がシステム規模に比例)を実現する程度の分散アルゴリズムは実用的には許容できない場合が少なくない。その一方で、情報ネットワークの社会

的役割が増大するにつれ、故障、敵対的な攻撃等に対して高い耐性(ロバスト性)を有する高信頼分散システムへの要求が年々高まりつつある。しかしながら、分散アルゴリズムの設計においてスケーラビリティとロバスト性を両立することは容易なことではない。本研究では、ランダム化の手法を用いることで、これら2つの特性を両立した分散アルゴリズムの設計を目指す。ランダム化は、アルゴリ

ズムの動作において確率的な選択を導入することで、本質的に困難な問題を確率的な性能保証の元で解く手法であり、逐次アルゴリズムの設計においては従来より利用されてきた有力な手法の一つである。同様の着想を分散アルゴリズムの設計に応用することで、従来では煩雑な処理を要求されるロバスト性の実現を、スケーラビリティを確保しつつ実現することができることが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、データ共有アルゴリズムを対象に、ランダム化を利用することでスケーラビリティとロバスト性の両立を達成することを目標とする。計画においては、具体的なテーマとして、以下の2課題を挙げた：

(1)大規模共有メモリ型マルチプロセッサシステムのための高速な共有オブジェクト：多数のプロセスが共有メモリを介して協調動作するマルチプロセッサシステムにおいては、複数プロセスがあるデータオブジェクトに対して同時競合的なアクセスを行うと、オブジェクトの状態破壊を招くことがある。複数の競合的なアクセスに対して安全な共有オブジェクトを実現するためには、現在では相互排除に基づく排他的なアクセスを利用することが一般的であるが、相互排除に基づく手法では、マルチプロセスの利点である並行実行性が犠牲となるという欠点が存在する。また、相互排除に基づくアルゴリズムでは、排他的アクセス権を有するプロセスの故障によりシステム全体が停止に追い込まれる可能性があるため、ロバスト性の点においても望ましくない。このような問題を回避するために、分散アルゴリズムの研究においては従来より、ロックフリーアルゴリズムと呼ばれる共有オブジェクトへの安全なアクセス法の研究が行われてきた。ロックフリーアルゴリズムは、競合的な複数のデータアクセスを(排他制御するこ

となく)並行に処理するアルゴリズムであり、従来の排他的アクセスに比べて高い並行実行性を有するとともに、故障耐性の点でも有利である。本研究では、ランダム化の手法を用いることで、平均的に高速動作するロックフリーアルゴリズムを実現することを目標とする。

(2)敵対者が存在する環境における高信頼性データ共有：共有データの可用性、信頼性を高めるために、分散システム上の複数の計算機上に複製を配置する手法が存在する。複製を用いるアルゴリズムでは、データの内容が更新されたとき、すべての複製に対して一貫性を保つように更新を行う必要があるが、システムに対して敵対的なユーザによる悪意のある更新が、複製データ間の一貫性を破壊する可能性がある。一般に、敵対者の存在する環境において安全なデータ共有を実現するためには、複製数等に関してより多くの冗長性が必要になる場合がほとんどであり、このとき一回の更新にかかる通信量、更新時間は複製数に応じて必然的に大きくなる。本テーマではこの問題に対し、ランダム化の手法を用いることで、より少ない期待通信量、時間量で更新操作を完了できるアルゴリズムの実現を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究の遂行においては、主に前項で述べた2課題を核としつつも、具体的に取り組む課題は、分散アルゴリズム研究における周辺分野も含めた、より広い問題を対象として選定が行われ、遂行された。この過程において、実際に取り組む課題についての若干の追加・修正が生じているものの、スケーラビリティおよびロバスト性の追求は一貫した共通の問題として掲げられている。以下、研究過程において新たに生じた課題を含めた、本研究課題において遂行した研究内容の概要を示す。

(1) コンセンサスアルゴリズムに基づく高信頼性データ共有の実現：コンセンサス問題は分散システムにおける故障耐性の概念と深く関係しており、実際にコンセンサスアルゴリズムを用いることで、ロバストなデータ共有が実現できることが知られている。しかし、コンセンサスに基づく手法はコスト的には必ずしも効率の良いアルゴリズムではない。この問題を解決するために、研究代表者は、これまで、実用上高速なコンセンサスアルゴリズムの実現について研究を行い、いくつかの結果を得てきた。本研究では、既知の結果にランダム化の手法を取り入れることで、さらなる性能向上を目指す。

(2) 確率的クォーラムシステムを用いた高信頼データ共有：クォーラムシステムとは、ネットワーク上の計算機の集合族であり、その中に含まれる任意の2集合がかならずある計算機を共有するという条件を満たすものである。クォーラムシステムは分散管理されるデータの更新、探索への応用を持つ。クォーラムシステムを発展させたものとして、任意の2集合が“高い確率で”共通の要素をもつ確率的クォーラムシステムが提案されている。本研究では、敵対者の存在する環境下での高性能な確率的クォーラムシステムの設計、およびそのデータ共有アルゴリズムへの応用を研究していく。

上記2課題は研究計画においても取り上げられていた内容であるが、本研究はさらに、以下の内容を追加課題として研究対象とした。

(3) 自律分散ロボット群におけるスケーラブルかつロバストなアルゴリズム設計：近年、複数のロボットが何らかのコミュニケーションを行いつつ動作するシステム(自律分散ロボットシステム)が注目を集めており、そのよ

うなシステムのためのアルゴリズム設計手法が、分散アルゴリズム理論分野において盛んに研究されている。しかしながら、従来の自律分散ロボット群に対するアルゴリズム研究において、ロバスト性とスケーラビリティの両立は必ずしも本格化しているとは言えない状況にある。本研究は、自律分散ロボット群の基本問題である移動計画問題を題材として、その頑健なアルゴリズム設計に取り組む。

なお、研究目的の項において取り上げたテーマ(1) 大規模共有メモリ型マルチプロセッサシステムのための高速な共有オブジェクト、は、研究遂行過程において見通しが明らかとならず、研究対象としての優先度を下げることを選択した。しかしながら、研究期間において同テーマに対する一定量の知見を得ている。研究期間終了後も継続的に研究を行うことで、それらの知見を成果として公表することを今後の課題としたい。

#### 4. 研究成果

前節で述べた各研究課題について、本研究において得られた成果を述べる。

(1) コンセンサスアルゴリズムに基づく高信頼性データ共有の実現：本テーマでは、(現実的な意味で)より効率的なコンセンサスアルゴリズムの設計を目指し研究を行い。以下の結果を得た：

① 確率的故障モデル上でのコンセンサスアルゴリズムの性能解析：コンセンサス問題の性能評価では、故障が最悪の振る舞いをした場合の計算量(最悪時評価)によって評価されることが普通であったが、実際のシステムでそのような最悪時の振る舞いが起こることはまれであり、必ずしも現実的な評価ではない。本研究では、

確率的な故障振る舞いモデルを導入し、その上での効率的なアルゴリズムについて考察した。その結果、確率的な故障モデルの元では、故障の影響がコンセンサスアルゴリズムの実行時間にほとんど影響を及ぼさないことを理論的に示すことができた。

- ② ビザンチン合意問題に関する超高速アルゴリズム：敵対的なプロセスが存在する上でコンセンサスを実現する問題は、ビザンチン合意問題と呼ばれ、コンセンサスとその派生の中で最も難しい問題として知られている。本研究では、研究代表者が従来の故障モデル(計算機クラッシュ故障)上で得ていた超高速アルゴリズムの実現可能性に関する結果を拡張し、ビザンチン合意問題上における同様の結果を得た。

(2) 確率的クォーラムシステムを用いた高信頼データ共有：本研究課題に関しては、P2Pシステム上の情報探索問題を取り上げ、応用的な側面からの研究を行った。研究の成果として、以下に挙げる3つの結果を得ることができた。

- ① P2Pシステムにおける確率的なインデクス散布を利用したスケーラブルな情報探索：P2Pシステム上において、各計算機により分散管理されているリソースを低コストかつ高速に検索するアルゴリズムが強く求められている。検索を効率化するために、各計算機が自身の所有するリソースの一覧(インデクス情報)を周辺の計算機にあらかじめ散布する手法が存在するが、本研究では、ランダム化を用いた低通信コストのインデクス情報散布法、およびそれにもとづく探索アルゴリズムを提案した。提案した手法は計算機シミュレーションにより評価を行い、評同様

の従来手法に比べ良い性能を有することが確認された。

- ② 大規模P2Pシステム上の動的変化に対するインデクス情報のスケーラブルな更新手法：P2Pシステム上におけるインデクスに利用した情報検索では、ノードが動的に参加、離脱を繰り返す環境におけるインデクスのメンテナンスが重要な課題となる。本研究では、動的な環境変化に自動追従する、スケーラブルなインデクス情報散布法、およびその性能の確率的な解析を行った。

(3) 自律分散ロボット群におけるスケーラブルかつロバストなアルゴリズム設計：本研究では、主に故障を有する自律分散ロボット群のモデル化とそのアルゴリズムを中心に研究を行い、成果を得た。以下、個々の成果の詳細を述べる。

- ① センシング誤差に対して頑健なアルゴリズムの構成：自律分散ロボットの理論において、ロボット群を構成する各ロボットは、周囲を観測するためのセンシング能力を有し、センシング結果に基づき自己の振る舞いを決定する系としてモデル化される。一般に、実際のロボット群においては、センシングに対する物理的なノイズの影響等により、全ロボットで一貫した状況が観測できるとは限らない。本研究では、このような観測エラーに対してロバストな協調アルゴリズムに研究を進め、その実現可能性について成果を得た。

- ② ランダム化を用いた集合アルゴリズムの計算量解析：全ロボットを一カ所に集めるタスクは集合問題と呼ばれ、自律分散ロボット群の理論における基本問題である。本研究では、ランダム化の手法を用いることで、この問題が(期待時間の意

味で) 高速に解けることを示した。

- ③ モバイルエージェント群のスケラブルな協調アルゴリズム設計: 自律分散ロボット群のような、空間上での移動が生じるような計算機システムは、より一般的な枠組みとして、モバイルエージェントの一種と見なすことができる。本研究では、モバイルエージェント群に対するロバストかつ安定的な分散アルゴリズムの実現可能性について考察を行った。特に、自己安定リーダ選挙問題について、その可解性とメモリ計算量の関連を明らかにした。

## 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 11 件)

- ① Yu Wu, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, "A Message-Efficient Peer-to-Peer Search Protocol Based on Adaptive Index Dissemination", IEICE, Trans. on Information and Systems (査読有, 採録決定).
- ② Kenta Yamamoto, Taisuke Izumi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Koichi Wada, "Convergence of Mobile Robots with Uniformly-Inaccurate Sensors", Proc. of Intl. Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (査読有, 採録決定).
- ③ Shukai Cai, Taisuke Izumi, Koichi Wada, "Space-complexity of Self-stabilizing Leader Election in Passively-Mobile Anonymous Agents", Proc. of Information and Communication Complexity, (査読有, 採録決定).
- ④ Yusuke Takahashi, Taisuke Izumi, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, "An Efficient Index Dissemination in Unstructured Peer-to-Peer Networks", IEICE Trans. on Information and Systems, 91-D, No.7, 2008, pp1971-1981(査読有).
- ⑤ Nobuhiro Inuzuka, Yuichi Tomida, Taisuke Izumi, Yoshiaki Katayama, and Koichi Wada, "Gathering Problem of Two Asynchronous Mobile Robots with Semi-dynamic Compasses", Proc. of Information and C

ommunication Complexity, LNCS5048, 2008, pp. 5-19(査読有).

- ⑥ Shukai Cai, 泉 泰介, 和田 幸一, "On Solvability of Self-Stabilizing Leader Election without Oracle in Population Protocols", 情報処理学会研究報告, 2008-AL-124, 2008, pp25-32 (査読無).
- ⑦ Tomoko Suzuki, Taisuke Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa, "Move-Optimal Gossiping among Mobile Agents", Theoretical Computer Science, Vol.393, 2008, pp90-101 (査読有).
- ⑧ Taisuke Izumi and Koichi Wada, "On the Probabilistic Omission Adversary", Proc. of 9th Intl. Symposium, on Stabilization, Safety, and Security in Distributed Systems, LNCS4838, 2007, pp357-371(査読有).
- ⑨ Taisuke Izumi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Koichi Wada, "Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses: An Optimal Result", Proc. of Intl. Symposium on Distributed Computing, LNCS4731, 2007, 298-312(査読有).
- ⑩ 高橋 佑輔, 泉 泰介, 角川 裕次, 増澤 利光, "P2P システムにおけるブルームフィルタを利用したオーバレイネットワークの構築", 情報処理学会研究報告, 2008-DPS-134, 2008, pp19-24 (査読無)
- ⑪ 泉 泰介, 片山 喜章, 角川 裕次, 増澤 利光, "A Difference-Optimal Algorithm for Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses", COMP2007-27, 2007, pp71-78(査読無)
- [学会発表] (計 12 件)
- ① Taisuke Izumi, "Probabilistic Gathering of Mobile Robots with Weak Multiplicity-Detection Capabilities", The 2nd Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation, 2009年4月11-12日, 杭州, 中国.
- ② Samia Souissi, "Crash-Tolerant Flocking of Mobile Robots with Eventually Perfect Failure Detectors", The 2nd Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation, 2009年4月11-12日, 杭州, 中国.
- ③ Kotaro Haba, "On Gathering Problem in a Ring for 2n Autonomous Mobile Robots", 10th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2009年11月21-23日, デトロイト, 米国.
- ④ Shukai Cai, "On Solvability of Self-Stabilizing Leader Election without Oracl

e in Population Protocols”, 情報処理学会アルゴリズム研究会, 2008年11月7日, 大阪, 日本

⑤Taisuke Izumi, ” Construction of Loosely Structured Overlay using Bloom Filter”, ラスベガス, 米国

⑥ Nobuhiro Inuzuka, “Gathering Problem of Two Asynchronous Mobile Robots with Semi-dynamic Compasses”, 15th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2008年6月17-20日, ヴィラージュ, スイス

⑦Kenta Yamamoto, “Convergence of Mobile Robots with Uniformly-Inaccurate Sensors”, The 1st Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation, 2008年4月26-27日, 香港, 中国,

⑧高橋佑輔, “P2Pシステムにおけるブルームフィルタを利用したオーバーレイネットワークの構築”, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 2008年3月6日, 京都, 日本.

⑨高橋佑輔, “The Deterministic Decay Bloom Filter”, The 7th International Conference on Applications and Principles of Information Science, 2008年1月28日, オークランド, ニュージーランド.

⑩Taisuke Izumi, “On the Probabilistic Omission Adversary”, 9th Intl. Symposium on Safety, Security and Stabilization, 2007年11月14日, パリ, フランス

⑪Taisuke Izumi, “Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses: An Optimal Result”, 22th Intl. Symposium on Distributed Computing, 2007年9月25日, リマソール, キプロス.

⑫Taisuke Izumi, “A Difference-Optimal Algorithm for Gathering Autonomous Mobile Robots with Dynamic Compasses”, 電子情報通信学会コンピューテーション研究会, 2007年6月29日, 札幌, 日本

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

泉 泰介 (IZUMI TAISUKE)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 20432461

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし