

平成 22 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006 年度～2009 年度  
 課題番号：18300004  
 研究課題名（和文）テラ時代の分散アルゴリズム工学

研究課題名（英文）Distributed Algorithm Engineering for the Era of Tera

研究代表者  
 山下 雅史（YAMASHITA MASAFUMI）  
 九州大学・大学院システム情報科学研究院・教授  
 研究者番号：00135419

研究成果の概要（和文）：巨大分散システムを対象とする分散アルゴリズム設計論を構築することが本研究の目的であった。巨大システムの安定性の保証という立場から、確率的分散アルゴリズムと自己安定アルゴリズムの研究を中心として行い、主な発表論文欄に示す結果を得た。また、「適用的分散アルゴリズム」と題する、日本で初めての安定な分散アルゴリズムの設計理論の教科書を著述した。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this project is to construct a design theory of distributed algorithms for huge distributed systems. From the view of guaranteeing the stability of such distributed systems, we have investigated probabilistic distributed algorithms and self-stabilizing algorithms and obtained results, a part of which are listed in Section 5. I also wrote a textbook entitled 'Adaptive Distributed Algorithms' co-authored with Prof. Masuzawa, which is the first textbook in this field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2007 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
総計	10,300,000	3,090,000	13,390,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：巨大分散システム，安定性，分子計算，複雑ネットワーク，センサ・ネットワーク

#### 1. 研究開始当初の背景

巨大分散システムを対象とする分散アルゴリズム設計論を構築することが本研究の目的である。ここで、WWW のような通常の分散システムばかりでなく、群ロボットや分子計算も含めて検討している所が本研究の

特徴である。本研究では、特に巨大システムの安定性の保証という立場から研究を進めており、確率的分散アルゴリズムと自己安定アルゴリズムの研究を中心的な課題として研究を進めてきた。研究開始時点から、群ロボットや分子計算が分散システムであ

るという認識をこの分野の研究者は持っていたが、異なる分野に属するこれらのシステムを共通に扱う研究者はいなかった。また、これらを計算機ネットワークシステムやセンサーネットワークと同じ枠組みで扱うことの意義についての理解、特に、群ロボットや分子計算の研究が通常の(計算機)分散システムのアルゴリズムの設計論にもたらず知見については否定的というよりも無関心であった。申請者は世界で初めてこのような視点からの分散計算の研究を開始していた。研究開始時点では、この視点はいくつかのグループに注目されるようになっていたが、先に述べたように支持は限定的であった。

## 2. 研究の目的

計算機科学、ロボット工学、ナノ技術はおおよそ独立した研究集団が独立に研究を進めている。しかし、申請者達は自律分散ロボットシステムを申請者達が構築した識別子を持たない計算機ネットワークの理論を用いて解析したことが契機となり、研究をさらに進める中で、分散計算、ロボットシステム、分子ロボティクスが互いに深く関係することを深く実感し、これらの分野を含む広範な領域に生息する多様な巨大分散システムを対象とする汎用分散計算論の研究を着想するに至った。そこで、汎用分散計算論の出発点となる汎用分散計算モデルの模索と、その上での分散計算構造の研究を開始する。具体的にはつぎの二つの事実(1)と(2)に注目する。

(1)(計算機)分散システムでは自己組織性、自己安定性、自己改善性といった自律性の獲得が重要かつ困難な研究課題であるのに対して、(生体)分散システムは自然現象の持つランダム性--ゆらぎ--に耐えて自律性を内在することに成功している。

(2)しかし、(プロセスなど)前者の構成要素は決定的、有名(識別子を持つ)、有記憶であるのに対して、(生体分子など)後者の構成要素は確率的、匿名(識別子を持たない)、無記憶であり、圧倒的に能力の高い構成要素から構成されているのは前者である。

## 3. 研究の方法

分散システムのモデルの設計と共に、本研究の研究対象が持つ性質である、ランダム性、匿名性、無記憶性、巨大性(局所性)のそれぞれの観点から研究を行った。特に、ランダム性と無記憶性は重要な研究課題であったので、詳しく説明する。

(1)ランダム性：自然現象にはある種のランダム性が存在し、「ゆらぎ」等の形で認識されている。決定論的なシステムにとってランダム性はエラーの主要因である。しかし、生体分子システムはランダム性を活かして自己安定性を獲得しているように見える。少なくとも「制御されたランダム性」は自己安定性の獲得に重要な役割りを果たしているように見える。そこで、ランダム性が分散システムに果たす正負両面の役割を理解することが重要な研究テーマとなる。確率的システムの動作は乱歩によって表現できる。生体分子システムなどの自然の分散システムの振舞いは、大域的ポテンシャル関数によって定義される Gibbs 分布を用いて確率的システムとしてモデル化できることが多い。一方、局所的ポテンシャル関数によって定義される Gibbs 分布に由来する遷移確率行列に従う乱歩が良い性質を持つことが理解されつつある。ポテンシャル関数の局所性は構成要素間の通信や影響の局所性(したがって、システムの巨大性)と対応する。このような理由から、局所的なポテンシャル関数に由来する乱歩の能力と限界、Gibbs 分布に由来する乱歩の性質、自己安定性との関係などを研究した。

(2)無記憶性：NSF と呼ばれるネットワークファイルシステムでは無状態プロトコルが用いられることがある。無状態とする最大の理由は故障からの復帰の容易さである。申請者達は匿名無記憶分散ロボットの幾何的パターン形成問題を検討し、その中で、パターン形成アルゴリズムは自己安定性を持つことを指摘した。このように、無記憶性は耐故障性に寄与している。しかし、無記憶性を持つ構成要素から構成される分散システムは非常に低い計算能力しか持たないのではないかと想像される。計算理論では、記憶複雑度に関する階層性がよく知られていて、この想像は正しい。しかし、申請者達の最近の研究の結果、パターン形成問題に関しては、無記憶と有記憶システムの差はほとんどないことが分った。パターン形成問題は合意問題と深い関連がある。合意問題は最も基本的な分散問題であり、多くの分散問題が合意問題に帰着される。したがって、少なくとも分散問題に関する限りは、無記憶と有記憶の差はそんなに大きくないのではないかとという予想も成立する。分子がその構造によって「記憶する」ように、ロボットもその位置によって記憶できると思われるからである。無記憶システムの能力と限界、特に、自己安定性の獲得との関係を検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 教科書の執筆：安定な巨大分散システムを構築するための分散アルゴリズム設計論が本研究の主題であった。この話題は重要であるにも関わらず、教科書は存在していなかった。本教科書は適応型分散アルゴリズム、すなわち、故障を含む様々な環境の変化に耐えて安定に初期の目的を達成するアルゴリズムの最初の教科書であり、本研究の成果が盛り込まれている。

(2) 招待講演および新しい会議の創設：本研究の申請時には、その新規性故に申請者の研究の立場がよく理解されていなかったことを述べた。学会発表の8,9は、申請者の行った申請者の立場を紹介する招待講演であり、研究が認められてきたことの証拠になっている。また、Meeting and School on Distributed Computing by Mobile Robots と称する会議が今年度に発足するが、その名が示す通り、主要な対象は分散計算と自律分散ロボットであり、申請者も主要な講演者として招待されている。このことも、申請者の研究が正しい方向を向いて進んだことの証拠であり、重要な研究成果と考えている。

(3) ランダム性の研究：雑誌論文の1,3,5, 学会発表の1,2,3,9が対応する。すでに述べたように、局所的ポテンシャル関数によって定義される Gibbs 分布に由来する遷移確率行列に従う乱歩が良い性質を持つことを証明した。実は、この種の乱歩は MCMC のサンプリングアルゴリズムなど、これまでは関係が薄いと思っていた分野でも重要な役割を果たしていることが分かり、分散アルゴリズムを越える新たな研究分野ができてきた。最大の成果を非形式的に説明する：どのように大きなグラフ上の乱歩であっても、(最悪の)平均ヒッティング時間の向上に真に寄与するのは隣接次数情報である。このよい性質を持つ乱歩は Gibbs 分布に由来する。

(4) 無記憶性の研究：雑誌論文の2,4,6, 学会発表の4,5,6,7,9が対応する。無記憶性と自己安定性の関係を考察したのは申請者の独創であって、様々な研究成果を得てきている。無記憶なシステムは計算状況が単純であるから耐故障性アルゴリズムを設計しやすいという知見自身は、NSF と呼ばれるネットワークファイルシステムで無状態プロトコルが用いられるように、既知であった。しかし、問題は、無記憶故に単純な問題しか解決できないのではないかという疑問である。申請者は、様々な問題が無記憶で解決できることを、特に分散ロボットを対象

として示してきた。最大の成果を非形式的に説明する：自己組織化問題は重要な問題であり、分散ロボットシステムでは、幾何的パターン形成問題が対応する。準同期ロボットシステムでは、2台のロボットの点集合問題を除くと、十分に記憶を持つロボットが解決できるパターン形成問題は無記憶でも解決できることを証明した。この結果は、パターン系列を順番に形成する問題やマーチングを行う問題などに適用されている。

#### 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11件)

Yoshiaki Nonaka, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita: The hitting and cover times of Metropolis walks. Theor. Comput. Sci. 411(16-18): 1889-1894 (2010)

Masafumi Yamashita, Ichiro Suzuki: Characterizing geometric patterns formable by oblivious anonymous mobile robots. Theor. Comput. Sci. 411(26-28): 2433-2453 (2010)

Ei Ando, Toshio Nakata, Masafumi Yamashita: Approximating the longest path length of a stochastic DAG by a normal distribution in linear time. J. Discrete Algorithms 7(4): 420-438 (2009)

Samia Souissi, Xavier Défago, Masafumi Yamashita: Using eventually consistent compasses to gather memory-less mobile robots with limited visibility. TAAS 4(1): (2009)

Satoshi Ikeda, Izumi Kubo, Masafumi Yamashita: The hitting and cover times of random walks on finite graphs using local degree information. Theor. Comput. Sci. 410(1): 94-100 (2009)

片山喜章, 山下雅史: ハウ・ツー・ランデブー(招待解説論文) 計測と制御, 46, 11, 853-859 (2007)

Yuichi Asahiro, Takashi Horiyama, Kazuhisa Makino, Hiroataka Ono, Toshinori Sakuma, Masafumi Yamashita: How to collect balls moving in the Euclidean plane. Discrete Applied Mathematics 154(16): 2247-2262 (2006)

〔学会発表〕(計18件)

Yoshiaki Nonaka, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita: How to Design a Linear Cover Time Random Walk on a Finite Graph. SAGA 2009: 104-116

Ei Ando, Hiroataka Ono, Masafumi Yamashita: A Generic Algorithm for Approximately Solving Stochastic Graph Optimization Problems. SAGA 2009: 89-103

Ei Ando, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita: Computing the Exact Distribution Function of the Stochastic Longest Path Length in a DAG. TAMC 2009: 98-107

Suguru Kawashimo, Yen Kaow Ng, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita: Speeding Up Local-Search Type Algorithms for Designing DNA Sequences under Thermodynamical Constraints. DNA 2008: 168-178

Stéphane Devismes, Sébastien Tixeuil, Masafumi Yamashita: Weak vs. Self vs. Probabilistic Stabilization. ICDCS 2008: 681-688

Ei Ando, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita: The space complexity of the leader election in anonymous networks. IPDPS 2008: 1-8

Yuichi Asahiro, Satoshi Fujita, Ichiro Suzuki, Masafumi Yamashita: A Self-stabilizing Marching Algorithm for a Group of Oblivious Robots. OPODIS 2008: 125-144

Masafumi Yamashita: Designing good random walks on finite graphs. IWCCA 2008, 2008 (Invited Talk).

Masafumi Yamashita: Robots and Molecules. SSS 2007, 2008 (Invited Talk).

〔図書〕(計1件)

増澤利光, 山下雅史: 共立出版, 適応的分散アルゴリズム, 2010, 308

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:

種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 雅史 (YAMASHITA MASAFUMI)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・教授  
研究者番号: 00135419

### (2) 研究分担者

定兼 邦彦 (SADAKANE KUNIHICO)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・准教授  
研究者番号: 20323090  
(H19 H20: 連携研究者)

小野 廣隆 (ONO HIROTAKA)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・助教  
研究者番号: 00346826  
(H19 H20: 連携研究者)

### (3) 連携研究者