

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24650008

研究課題名(和文) 自律的分散計算論の構築

研究課題名(英文) Constructing a Theory of Autonomous Distributed Computing

研究代表者

山下 雅史 (Yamashita, Masafumi)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・教授)

研究者番号：00135419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：巨大分散システムを分散計算構造の観点から統一的に理解することを目標に、巨大分散システムに自律性をもたらす要因の解明に取り組み、以下の結果を得た：(1)Population Protocolモデルの振動現象：状態が振動するPopulation Protocolが存在する条件、設計方法を明らかにした。(2)2次元空間上を移動する自律分散ロボットの自己組織化：ロボットの同期性、記憶の有無、ランダム性が自己組織化能力に与える影響を解明した。(3)延長申請を行った最終年度では、3次元空間上を移動する自律分散ロボットの研究を行い、回転群と群が作用する点集合が、自己組織化能力に本質的であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We investigated how a large-scale distributed systems realize autonomy. Our aim is to understand large-scale distributed systems in terms of the structure of distributed computing. We mainly obtained the following three results: (1) Oscillation in population protocol model: We show a condition for a population protocol model to have oscillation and how to design such an oscillatory population protocol model. (2) Self-organization of autonomous mobile robots in the two-dimensional space: We show the effect of synchrony, obliviousness, and randomness of the robots on their self-organization ability. (3) We considered mobile robots in the three-dimensional space and showed that a rotation group and its action on the positions of the robots determine their self-organization ability.

研究分野：分散アルゴリズム

キーワード：分散システム 自律性 Population protocol 自律分散ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を提案するに至った背景および準備状況を整理する。申請者は、(1)巨大計算機ネットワーク、(2)自律分散ロボットシステム、(3)分子計算、(4)一般分散計算論の各分野で科研費の補助を受けて研究を行い、(1)-(3)の分野が互いに密接に関連することを明らかにするとともに、それらを統一的に理解するために(4)の研究を立ち上げていた。これらの研究の中で、特に内外の研究者の評価が高いのは、申請者達が創始した(2)であった。(現在では、代表的な論文の引用回数が 570 回と 471 回(Google Scholar)に達している。)

## 2. 研究の目的

生体分子の機能発現、分散ロボットの相互位置制御、LAN の資源管理など、多くの異なる領域の問題から領域固有の事由を捨象し、内在する分散計算構造に着目すると、分散問題である合意形成問題が共通して出現する。この事実に着目し、巨大分散システムを分散計算構造の観点から統一的に理解することが、この研究を含め、私が行っている研究全体の構想である。本申請の研究対象は自律性であり、研究目的は自律的分散計算論の構築であった。(分子のような)記憶や識別子を持たない構成要素から構成され、(自然界のような)不安定なゆらぎの下で働く(生物のような)分散システムに自律性が豊富に見出されるにも係わらず、はるかに有利な条件の下で設計される人工分散システムへの自律性の付与が困難である理由を理解することが研究目的であった。

多様な巨大分散システムの分散計算構造を対象することで、巨大分散システムに自律性をもたらす要因を明らかにしようとする所が、世界に類を見ない独創的な構想であり、本研究の最大の特色であった。本研究には、自律的分散計算論の構築という意義があった。

## 3. 研究の方法

基本的には理論研究であった。

## 4. 研究成果

従来の自律分散ロボットの研究では、2次元空間内を移動するロボットを研究していたが、昨年度に至って、3次元空間内を移動するロボットの研究が軌道に乗ることが見込めるようになったので、1年間の延長をお願いし、許可を頂いた。最終年度以前の研究成果は以下のように要約できる。

(1)Population Protocol モデルにおける振動現象の研究:Population Protocol では、従来は、初期状態と十分に時間が経過した後で安定する状態との間の関係を関数として捕ら

え、実現可能な関数の族が検討対象であった。我々は、Population Protocol を、たとえば、化学反応のモデルと捕らえて、その時間発展に興味を持って検討した。特に、状態が振動する現象に注目し(振動の発生は自律性の発現という視点から興味がある)、環境の変化に従って振幅や周波数が変化するような Population Protocol が存在するための条件、およびそのような Population Protocol を設計する方法を Fourier 変換を参考にして明らかにした。前年度の段階では、分子ロボットの具体的な実現はまだまだ先のことであった。Population Protocol は抽象的なモデルとその上での提案に留まっていたが、Population Protocol モデルが自然なモデル化である分子ロボットの実現に目処がたち、この分野の急速な発展が望まれるようになった。

(2)2次元空間上を移動する自律分散ロボットの自己組織化問題の研究:視野が無限の場合について、以下の3つの事実が理解できた。(a)自律分散ロボットのパターン形成能力に、記憶の量も同期の程度も影響がない。(b)匿名で無記憶なパターン形成アルゴリズムは自己安定アルゴリズムである。(c)ランダムパターン形成アルゴリズムを用いると、任意の初期パターンから目標パターンを形成できる。すなわち、視野が無限の場合については、(分子のような)記憶や識別子を持たない構成要素から構成され、(自然界のような)不安定なゆらぎの下で働く(生物のような)分散システムに自律性が豊富に見出される理由が理解できた。

最終年度では、3次元空間上を移動する自律分散ロボットのパターン形成問題を検討した。3次元空間を移動するロボットの平面合意問題では、回転群の形、特に、群と群が作用する点集合が、合意問題の可解性に本質的であることが分かった。合意問題を解決するためには対称性の破壊が必要であり、群こそが対称性を扱う数学的ツールであるから、上記の結論は自然であった。事実、パターン形成問題の可解性を群の言葉で特徴づけることができ、しかも、この結果は、2次元の場合の自然な拡張になっていることが分かった。すなわち、3次元空間上を移動する自律分散ロボットのパターン形成問題を検討することで、2次元空間上を移動する自律分散ロボットのパターン形成問題をより深く理解できたことになる。

## 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 6件)

Shantanu Das, Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, Autonomous mobile robots with lights,

Theoretical Computer Science, 609, pp.171--184 (2016).  
DOI:10.1016/j.tcs.2015.09.018  
Shantanu Das, Paola Flocchini, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, Forming sequences of geometric patterns with oblivious mobile robots, Distributed Computing, 28(2), pp.131--145 (2015).  
DOI: 10.1007/s00446-014-0220-9  
Stephane Devismes, Sebastien Tixeuil, and Masafumi Yamashita, Weak vs. Self vs. Probabilistic Stabilization, International Journal of Foundations of Computer Science, 26(3), pp.293--320 (2015).  
DOI:http://dx.doi.org/10.1142/S0129054115500173  
Nao Fujinaga, Yukiko Yamauchi, Hirotaka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Pattern Formation by Oblivious Asynchronous Mobile Robots, SIAM Journal on Computing, 44(3), pp.740--785 (2015).  
DOI:10.1137/140958682  
Ryu Mizoguchi, Hirotaka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, On space complexity of self-stabilizing leader election in mediated population protocol, Distributed Computing, 25(6), pp.451--460 (2012).  
DOI: 10.1007/s00446-012-0173-9  
Masafumi Yamashita, Probabilistic Self-Stabilization and Biased Random Walks on Dynamic Graphs, International Journal of Networking and Computing, 2(2), pp.147--159 (2012).  
URL:http://www.ijnc.org/index.php/ijnc/article/view/40

[学会発表](16件)

Yukiko Yamauchi, Taichi Uehara, and Masafumi Yamashita, Formation problems for synchronous mobile robots in the three dimensional Euclidean space, 第155回アルゴリズム研究会, 指宿市民会館(鹿児島県指宿市), 2015年11月20日-21日(11月21日).  
八神貴裕, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, 複数のエージェントによるオンライン木探索アルゴリズム, 第155回アルゴリズム研究会, 指宿市民会館(鹿児島県指宿市), 2015年11月20日-21日(11月21日).  
Yukiko Yamauchi, Taichi Uehara, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Plane Formation by Synchronous Mobile

Robots in the Three Dimensional Euclidean Space, The 29th International Symposium on Distributed Computing (DISC2015) (Springer 2015, LNCS 9363), pp.92--106, Tokyo, Japan, Oct.7-9 (Oct.7), 2015.  
Taichi Uehara, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Forming a plane by semi-synchronous autonomous mobile robots, Workshop on Distributed Robotic Swarms, アルカディア市ヶ谷(東京都, 千代田区), 2015年10月5日.  
Colin Cooper, Anissa Lamani, Giovanni Viglietta, Masafumi Yamashita, and Yukiko Yamauchi, Constructing Self-Stabilizing Oscillators in Population Protocols, The 17th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2015) (Springer 2015, LNCS9212), pp.187--200, Edmonton, Canada, Aug.18-21 (Aug.19), 2015.  
上原太一, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, 3次元空間中の自律分散ロボットによる平面合意問題, 火の国情報シンポジウム2015, 佐賀大学, 2015年3月5日-6日(3月6日).  
八神貴裕, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, "オンライン木探索アルゴリズム," 火の国情報シンポジウム2015, 佐賀大学, 2015年3月5日-6日(3月6日).  
Yukiko Yamauchi and Masafumi Yamashita, Randomized Pattern Formation Algorithm for Asynchronous Oblivious Mobile Robots, Proceedings of the 28th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2014) (Springer 2014, LNCS8784), pp.137--151, Austin, U.S.A., Oct.12-15 (Oct.13), 2014.  
Toru Sasaki, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Mobile Byzantine Agreement on Arbitrary Network, Proceedings of the 17th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPDIS 2013) (Springer 2013, LNCS 8304), pp.236--250, Nice, France, Dec.16-18 (Dec.16), 2013.  
Xiaoguang Xu, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima and Masafumi Yamashita, On space complexity of self-stabilizing leader election in population protocol based on k-interaction, Proceedings of the 15th International Symposium on Stabilization, Safety,

and Security of Distributed Systems (SSS 2013) (Springer 2013, LNCS 8255), pp.86--97, Osaka, Japan, Nov. 13-16 (Nov.16), 2013.

Arnaud Casteigts, Paola Flocchini, Emmanuel Godard, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, Expressivity of Time-Varying Graphs. Proceedings of the 19th International Symposium on Fundamentals of Computation Theory (FCT 2013) (Springer 2013, LNCS 8070), pp.95-106, Liverpool, UK, Aug.19-21 (Aug.20), 2013.

Paola Flocchini, Nicola Santoro, Giovanni Viglietta, and Masafumi Yamashita, Rendezvous of Two Robots with Constant Memory. Proceedings of the 20th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2013) (Springer 2013, LNCS 8179), pp.189-200, Ischia, Italy, July 1-3 (July 2), 2013.

Yukiko Yamauchi and Masafumi Yamashita, Pattern formation by mobile robots with limited visibility, Proceedings of the 20th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO 2013) (Springer 2013, LNCS 8179), pp.201--212, Ischia, Italy, July 1-3 (July 2), 2013.

Xiaoguang Xu, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, On Space Complexity of Self-Stabilizing Leader Election in Population Protocol Based on Three-interaction, 第143回アルゴリズム研究会, (2013年3月1日) 飯坂温泉伊勢谷.

Nao Fujinaga, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Asynchronous pattern formation by anonymous oblivious mobile robots, Proceedings of the 26th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2012) (Springer 2012, LNCS 7611), pp.312--325, Salvador, Brazil, Oct. 16-18 (Oct.18), 2012.

Shantanu Das, Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, The Power of Lights: Synchronizing Asynchronous Robots Using Visible Bits. Proceedings of the IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2012), pp.506-515, Macau, China, June 18--21, 2012.

〔図書〕(計 0件)

〔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 0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  
該当なし

(3) 連携研究者  
該当なし