

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22300004

研究課題名(和文) テラ・スケール分散計算論－自律性について

研究課題名(英文) A Theory of Tera-scale Distributed Computing -- On Autonomy

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) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：生体分子からの機能発現，自律分散ロボットの相互位置制御，データベースシステムの一貫性制御，人間社会の選挙，といった多くの問題から領域固有の問題を捨象し，内包する分散計算構造に注目すると，典型的な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理解し制御するための汎用分散計算論を構築することが申請者が描く研究の全体構想である．

その中で，本研究では，(分子のような)記憶や識別子を持たない要素から構成される(生物のような)巨大分散システムが，高度な自律性を獲得できる理由を分散計算論の立場から理解し，自律性を有する(人工の)巨大分散システム的设计論を構築した．

研究成果の概要(英文)：A typical distributed problem known as the agreement problem commonly arises from many problems in many different areas, when we look into the distributed computation structure of a problem, ignoring proper aspects and restrictions of each area. Examples are understanding how functionalities emerges in biomolecule systems, controlling positions of autonomous mobile robots, consistency control in database systems, and election in human society. In the light of this fact, we have introduced and studied the problem of constructing a generic theory of distributed computing for understanding and controlling huge distributed systems. In this project, we focused on autonomy, and investigated why natural distributed systems consisting of primitive elements that even do not have identifiers or memory, can have rich autonomous properties from the view of distributed computing, and constructed a method to implement these autonomous properties to huge distributed systems.

研究分野：分散計算論

キーワード：分散計算論 分散計算構造 自律性 合意形成 巨大分散システム

1. 研究開始当初の背景

本研究が関連する領域を大きく3つの分野に分けて、それぞれの分野の研究開始当初の背景をごく簡単に説明する。

巨大計算機ネットワーク分: 統計力学を援用して WWW など進化を続ける巨大ネットワークの振る舞いが活発に研究されていた。申請者にとっての驚きは、本来は設計者にとって既知であるべき(人工物である)巨大ネットワークの振る舞いに関する論文が、1990年の初頭から、Science 誌や Nature 誌に認知されたことであった。

自律分散ロボットシステム分野: 自動制御分野の主要な話題の一つがロボット制御に移りつつあった。協調ロボット制御のアルゴリズム論的研究は、ユービキタス社会の到来を見据えて1990年初頭に申請者達の創始した分野であるが、この分野は順調に成長していた。

分子ロボティクス分野: 2000年初頭にDNAを用いた計算であるDNA計算、DNA計算機概念が出現し、特定領域研究「分子プログラミング」が日本ではその研究を牽引してきた。申請者もこのプロジェクトに参加したが、際立ったのは、初期の目論見ではなく、DNA計算による計算困難問題の解決ではなく、ナノ技術との融合であった。生体分子に由来するナノ技術は、生体分子を自律分散ロボットに擬し、それらを自由に操る技術であるという認識から分子ロボティクスと呼ばれ始めていた。

2. 研究の目的

つぎの二つの事実 **F1** と **F2** に注目する。

(F1) (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。

(F2) 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。

本研究の目的は、明らかな矛盾とも見えるこの二つの事実の間に潜む関係を正しく理解し、得られた理解を自律性を持った人工分散システムの設計に適用することである。

より具体的には、匿名性と無記憶性を持つ構成要素から構成される巨大な分散システムの自己組織性、自己安定性、自己改善性を汎用分散計算モデルを用いて検討し、匿名性、無記憶性およびランダム性がこれらの自律性の獲得に果たす役割を理解するとともに、得られた理解を用いて自律性を持った分散計算機ネットワークや自律分散ロボットシステムの設計論を構築する。

3. 研究の方法

研究は理論研究であり、研究方法としては、研究対象を形式的に記述し、そこから論理的に導出できる性質を発見することに尽きる。

4. 研究成果

研究目的を再掲する。

(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。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。明らかな矛盾とも見えるこの二つの事実の間に潜む関係を正しく理解し、得られた理解を自律性を持った人工分散システムの設計に適用することが研究目的であった。本研究では、特に、自己組織性を取り上げ、この矛盾が実は矛盾ではないことを説明すること、すなわち、自己組織性を獲得するために、なぜ確率的、匿名、無記憶でなければならないのかを説明することに成功した。以下では、その説明の概略を説明する。

理論研究を開始するには、モデルを定義し、問題を定式化することから始める必要がある。本研究で検討する分散ロボットモデルは、自然分散システムの特徴を際立たせたものであり、以下のように定義される。本研究では、分散システムとして自律分散ロボットから構成されるシステムを考える。ここでは、ロボットと称しているが、計算機、プロセス、エージェントなど、分散システムの計算主体は分野によって様々な呼び方をされる。各ロボットは2次元空間上の点であり、視覚と移動だけがコミュニケーション手段である。従って、通常のメッセージ通信のような通信デバイスは持っていない。さらに、各ロボットは(互いに異なるかもしれない)局所座標系を持ち、局所座標系に従って他のロボットを識別する。各ロボットは識別子を持たず、同じアルゴリズムに従って動作する。また、局所記憶も持たない。すなわち、各ロボットが行えることは、まず、他のロボットの位置を観測し、局所座標系を用いて、座標の列として認識し、次に、アルゴリズム(これは座標の列から座標への関数である)を用いて移動すべき位置を計算し、最後に、その位置に移動しようとする。ロボットには同期の程度によって3種類のロボットがある。FSYNC(完全同期)、SSYNC(部分同期)、ASYNC(完全非同期)である。本稿で説明する余裕がないが、FSYNC、SSYNC、ASYNCと順番に問題を解決するのが困難になり、ASYNCでは上に述べたロボットの動作は完全に非同期に行われ、想定された場所への移動も中断される可能性がある。

検討する自己組織化問題は以下のように

定義される .ある 2 次元上の点集合 F (パターンと呼ぶ) が与えられたとき, 任意の初期コンフィグレーションから出発し, 有限時間内に F と相似なコンフィグレーションに到達させるようなアルゴリズムを設計する問題を自己組織化問題と呼ぶ. 任意の初期コンフィグレーションから出発して F を形成できるのだから, F と相似なコンフィグレーションが何かの理由で壊れても, 自律的に F と相似なコンフィグレーションに戻るという意味で, 自己安定的な解が求められている. よく知られているように, 自然の分散システムにはこのような自己組織化能力に富んでいるが, 人工分散システムに自己組織化能力を与えるのは至難である.

我々の直接の目的は自己組織化問題が解決できる初期コンフィグレーションとパターン F の関係を明らかにすることであり, 以下の 2 つの事実が証明できた.

(1) FSYNC, 有記憶, 匿名分散システムが形成可能なパターン F は ASYNC, 無記憶, 匿名分散システムで形成できる.

(2) ASYNC, 無記憶, 匿名, 確率的分散システムでは, その初期コンフィグレーションを任意のパターン F を形成可能なものに確率 1 で変更できる.

(1) と (2) を組み合わせると ASYNC, 無記憶, 匿名, 確率的分散システムと任意のパターン F に対して, 自己組織化問題を解くアルゴリズムが構成できる. (1) について重要なことは, 無記憶, 匿名分散システムでは組織化アルゴリズムが自動的に自己安定アルゴリズムになるという事実である. (有名あるいは有記憶アルゴリズムにはこの性質がない.) 自然分散システムが, それ自身重要な自律性である自己安定性を持つのは, システムが無記憶, 匿名だからである. しかし, 匿名システムには, 匿名であることによって発生する対称性から, 合意問題が困難になるという欠点があり, 実際に, 匿名, 無記憶システムでは, 任意の初期コンフィグレーションから任意のパターン F を形成できないという欠点がある. しかし, 確率的システムでは, 匿名性から発生する対称性を確率 1 で解消することができる. これが, 無記憶, 匿名, 確率的, かつ非同期な自然の分散システムにおいて柔軟な自己組織化が可能となっている事実の説明である.

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 5 件)

Nao Fujinaga, Yukiko Yamauchi, Hirotaka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Pattern formation by oblivious asynchronous mobile robots, *SIAM Journal on Computing*, 査読有, 採録決定.

Shantanu Das, Paola Flocchini, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, Forming sequences of geometric patterns with oblivious mobile robots. *Distributed Computing*, 査読有, 28(2), pp.131-145 (2015).

DOI: 10.1007/s00446-014-0220-9

Taisuke Izumi, Samia Souissi, Yoshiaki Katayama, Nobuhiro Inuzuka, Xavier Defago, Koichi Wada, and Masafumi Yamashita, The gathering problem for two oblivious robots with unreliable compasses. *SIAM Journal on Computing*, 査読有, 41(1), pp.26-46 (2012).

DOI: 10.1137/100797916

Masafumi Yamashita, Probabilistic self-stabilization and biased random walks on dynamic graphs. *International Journal of Networking and Computing*, 査読有, 2(2), pp.147-159 (2012).

<http://www.ijnc.org/index.php/ijnc/article/view/40>

Masafumi Yamashita and Ichiro Suzuki, Characterizing geometric patterns formable by oblivious anonymous mobile robots. *Theoretical Computer Science*, 査読有, 411(26-28), pp.2433-2453, (2010).

DOI: 10.1016/j.tcs.2010.01.037

[学会発表] (計 13 件)

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, LNCS 8784), pp.137--151, 2014年10月13日, Austin, U.S.A.

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, 2013年12月16日, Nice, France.

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, 2013年8月20日, Liverpool,

UK.
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, 2013年7月2日, Ischia, Italy.
Yusuke Hosaka, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Fast random walk and its stationary distribution, The 36th Australasian Conference on Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing (36 ACCMCC), 2012年12月10日, Sydney, Australia.
Kosuke Koba, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima and Masafumi Yamashita, Hitting time and cover time on dynamic graphs, The 36th Australasian Conference on Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing (36 ACCMCC), 2012年12月10日, Sydney, Australia.
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, 2012年10月18日 Salvador, Brazil.
Yukiko Yamauchi, Sebastien Tixeuil, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Brief announcement: Probabilistic stabilization under probabilistic schedulers, Proceedings of the 26th International Symposium on Distributed Computing (DISC 2012) (Springer 2012, LNCS 7611), pp.413--414, 2012年10月16日, Salvador, Brazil.
Shantanu Das, Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, The power of lights: Synchronizing asynchronous robots using visible bits, Proceedings of the 32nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2012), pp.506-515, 2012年6月18日, Macau, China.
Yoshiaki Nonaka, Hirotaka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, How slow, or fast, are standard random walks? - Analyses of hitting and cover times on tree. Proceedings of the

17th Computing: The Australasian Theory Symposium (CATS 2011), pp.63-68, 2011年1月19日, Perth, Australia.

Masafumi Yamashita, Probabilistic Self-stabilization and random walks. Proceedings of the 2nd International Conference on Networking and Computing (ICNC 2011), pp. 1-7, 2011年12月1日, 大阪府吹田市.

Masatora Ogata, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, A randomized algorithm for finding frequent elements in streams using $O(\log \log N)$ space. Proceedings of the 22nd International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2011) (Springer 2011, LNCS 7074), pp.514-523, 2011年12月8日, 神奈川県横浜市.

Nao Fujinaga, Hirotaka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Pattern formation through optimum matching by oblivious CORDA robots. Proceedings of the 14th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPDIS 2010) (Springer 2010, LNCS 6490), pp.1-15, 2010年12月16日, Tozeur, Tunisia,

〔図書〕(計0件)
該当なし

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
該当なし

取得状況(計0件)
該当なし

〔その他〕

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