

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21650002

研究課題名（和文）テラ・スケール分散システムの設計と理解のための基礎理論

研究課題名（英文）A Foundation for Understanding and Design of
Tera-scale Distributed Systems

研究代表者

山下 雅史 (MASAFUMI YAMASHITA)

九州大学・大学院システム情報科学研究所・教授

研究者番号：00135419

研究成果の概要（和文）：分子計算からセンサーネットワークに至る様々な分散システムの抽象的モデルとして自律分散ロボットモデルを位置づけ、分散ロボットの幾何的パターン形成問題を主に検討した。この問題は、ロボットに自己組織性と自己安定性を付与する問題である。特に、ロボット間の同期の程度と形成可能なパターンの複雑さの関係を中心に検討し、「主な発表論文」欄に示す結果を得た。

研究成果の概要（英文）：We regard the autonomous mobile robot system as an abstract distributed system that can naturally model a variety of distributed systems from molecular computing to sensor networks, and investigate its geometric pattern formation problem. It is a problem of realizing self-organizing and self-stabilizing distributed systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	0	1,000,000
2010年度	1,000,000	0	1,000,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	330,000	3,430,000

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：分散計算モデル、分散ロボット、匿名性、無記憶性、自己組織化、自己安定性

1. 研究開始当初の背景

個々の分散システムの特殊性を離れて種々の分散システムが共通に持つ構造を通して分散システムを抽象的に検討するという立場は存在していなかった。

2. 研究の目的

背景に述べたように、個々の分散システムの特性を離れて、種々の分散システムが共通に持つ構造を通して分散システムを抽象的に検討すること。

3. 研究の方法
理論研究。

4. 研究成果

生体分子、分散ロボット、Cyber-Physical System、人間社会など様々な分散システムに係わる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着目することで、巨大分散システムを分散計算という観点から統一的に議論するための理論を構築することが本研究の主目的であった。対象とす

る巨大分散システムを巨大性(エージェント数が巨大である)、動的性(システム構成が変化する)、ランダム性(システム変化は確定的ではない)、低信頼性(システム要素は故障する)、匿名性(システム要素は固有の識別子を持たない)によって特徴付け、これらの特徴を有する巨大分散システムを制御するための分散計算論を構築することを目指した。特に、種々の分散システムが共通に持つ構造として、識別子、記憶、同期に着目し、これらの要因が自律分散ロボットシステムの幾何的パターン形成能力に与える影響を通して、抽象的分散システムの自己組織性と自己安定性の獲得可能性とこれらの要因との関係を考察した。

ロボットシステムは匿名な(相互に識別不能であり、同じアルゴリズムに従う)、無記憶性の(以前のロボットの配置は記録できない)ロボットから成る。各ロボットは1つのサイクルにおいて、他のロボットの配置を自身の座標系で観測し(Look)、アルゴリズムに従い目的地を計算し(Compute)、移動する(Move)。ロボット間のサイクルの同期の程度によって、完全同期システム、完全非同期システム、そして、その中間に当たる、準同期システムに分類される。これらのロボットが与えられた幾何的パターンを自律的に描く問題はパターン形成問題と呼ばれる基本的な問題である。本研究では、同期の程度と幾何的パターンの性質が、パターン形成問題の可解性に及ぼす影響を示した。我々はまず、完全同期システムにおいて形成可能なパターンの特徴づけを行い、続いて、準同期システム、完全非同期システムにおける形成可能なパターンが完全同期システムのものと同であることを示した。

完全同期システムにおいては、ロボットの初期配置 I の対称度と目的パターン F の対称度がパターン形成の可解性を特徴づける。2次元平面上に置かれた点の配置 P に対して、その対称度 $\rho(P)$ とは、点集合の最小包含円の中心を軸に、0 から 2π の間の角度で P を回転させて、 P と同じ配置になる角度の個数である。我々は、完全非同期システムでは、 $\rho(I)$ が $\rho(F)$ を割り切る時、かつその時に限り、パターン F を形成可能であり、準同期システムにおけるパターン形成可能の必要十分条件が同様であることを示した。

パターン形成の本質的な困難さは、ロボット間で共通の座標系へ合意をとることにある。各ロボットは大域座標系を知らず、自身の局所座標系で観測、移動を行う。完全同期システム、準同期システムにおけるパターン形成の基本的な手法は、ロボットの配置だけから仮想的な座標系を決め、目的パターンがこの座標系上に置かれているものとして、各ロボットが移動することであった。完全同期

システム、準同期システムでは移動中のロボットが観測されることがないため、仮想的な座標系を定めることができた。しかし、完全非同期システムにおいては、各ロボットが移動中のロボットを観測する可能性があるため、仮想的な座標系に合意できない可能性がある。

では、パターンが各ロボットに局所座標系での表現で与えられていれば、形成可能であるか?このような問題を埋め込みパターン形成問題と呼び、我々は完全非同期システムにおいて $\rho(I)$ が $\rho(F)$ を割り切る時、かつその時に限り、埋め込みパターン形成問題が解けることを示した。さらに、埋め込みパターン形成問題をとアルゴリズムをもとに、完全非同期システムにおけるパターン形成アルゴリズムを提案した。完全非同期システムにおける従来のパターン形成問題については、 $\rho(I)=1$ の場合についてはいくつかの既存研究が発表されているのみであり、我々が示した任意の $\rho(I)$ に対する、 $\rho(I)$ が $\rho(F)$ を割り切るという必要十分条件はもっとも強力な成果である。

パターン形成問題のうち、すべてのロボットを1点に集める問題を1点集合問題と呼ぶ。準同期システムにおいて1点集合問題を解くアルゴリズムが存在しないことが知られているが、ロボットの座標系が一致していれば完全非同期システムにおいて1点集合問題が解けることは自明である。我々は、ロボット間の座標の偏向と1点集合の可解性の関連を示した。

以上のように、匿名な、無記憶性の、非同期なロボットで構成されるシステムの自己組織性をパターン形成問題に着目し、明らかにした。無記憶なロボットは一時故障に影響を受けずパターンを形成するため、上記の手法はいずれも自己安定性を持つ。以上のように、我々は本研究を通して自己組織性、自己安定性と分散システムの種々の要因との関係を明らかにした。

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5件)

- ① 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 of Computing, 41, pp.26-46, 2012, 査読有。

- ② Yoshiaki Nonaka, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, and Masafumi Yamashita, The hitting and cover times of Metropolis walks, *Theoretical Computer Science*, 411, 16–18, pp.1889–1894, 2010, 査読有.
- ③ Nao Fujinaga, Hiroataka Ono, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Pattern formation through optimum matching by CORDA oblivious robots, *Lecture Notes in Computer Science*, 6490, pp. 1–15, 2010, 査読有.
- ④ M. Yamashita and I. Suzuki, Characterizing Geometric Patterns Formable by Oblivious Anonymous Mobile Robots, *Theoretical Computer Science*, 411(26–28), pp.2433–2453, 2010, 査読有.
- ⑤ Ei Ando, Hiroataka Ono, Kunihiko Sadakane, Masafumi Yamashita, The Space Complexity of Leader Election in Anonymous Networks, *Int. J. Found. Comput. Sci.*, 21(3), pp. 427–440, 2010, 査読有.

[学会発表] (計 15 件)

- ① Shantanu Das, Paola Flocchini, Giuseppe Prencipe, Nicola Santoro, and Masafumi Yamashita, The power of lights: Synchronizing asynchronous robots using visible bits, *The 32nd International Conference on Distributed Computing Systems*, 2012 年 6 月 20 日, Venetian Macao-Resort Hotel, China.
- ② 木場孝輔, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, 変化するグラフ上でのメトロポリスウォークの到達時間と全訪問時間, 第 139 回アルゴリズム研究会, 2012 年 3 月 14 日, 信州大学
- ③ 穂坂祐輔, 山内由紀子, 来嶋秀治, 小野廣隆, 山下雅史, ランダムグラフ上の多重ランダムウォークの全訪問時間, 2011 年度冬の LA シンポジウム, 2012 年 2 月 1 日, 京都大学数理解析研究所.
- ④ 藤永直, 非同期分散ロボットによるパターン形成問題について, 2011 年度冬の LA シンポジウム, 2012 年 2 月 1 日, 京都大学数理解析研究所.
- ⑤ 緒方正虎, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, ストリーム中の頻出アイテム発見に対する $O(\log \log N)$ 領域乱択アルゴリズム, 2011 年度冬の LA シンポジウム, 2012 年 1 月 30 日, 京都大学数理解析研究所.
- ⑥ 穂坂祐輔, 来嶋秀治, 小野廣隆, 山下雅史, 多種ランダムウォークの全訪問時間の上下界, 第 138 回アルゴリズム研究会, 2012 年 1 月 28 日, 流通科学大学.
- ⑦ Masafumi Yamashita, Probabilistic self-stabilization and random walks, *The 2nd International Conference on Networking and Computing*, 2011 年 12 月 1 日, 大阪大学.
- ⑧ 来嶋秀治, 非同期ロボットによる最適マッチングを用いたパターン形成アルゴリズム, 第 135 回アルゴリズム研究会, 2011 年 5 月 16 日, 秋田大学.
- ⑨ 山田陽介, 来嶋秀治, 山下雅史, 不完全情報重大ゲームの近似的ナッシュ遷移の収束性, FIT2010 第 9 回情報科学技術フォーラム, 2010 年 9 月 9 日, 九州大学.
- ⑩ 馬場雅大, 小野廣隆, 定兼邦彦, 山下雅史, 接尾辞木に対する二分木化と簡潔データ構造による圧縮, FIT2010 第 9 回情報科学技術フォーラム, 2010 年 9 月 8 日, 九州大学.
- ⑪ 田中洋輔, 小野廣隆, 定兼邦彦, 山下雅史, 圧縮された接尾辞配列を用いた近似文字列照合, FIT2010 第 9 回情報科学技術フォーラム, 2010 年 9 月 8 日, 九州大学.
- ⑫ 野中良哲, 小野廣隆, 来嶋秀治, 山下雅史, 木上のランダムウォーク高速化の可能性, 2010 年度 夏の LA シンポジウム, 2010 年 7 月 21 日, 九段浜温泉ひみのはな(氷見市).
- ⑬ 穂坂祐輔, 来嶋秀治, 山下雅史, 多種 β -ランダムウォークの全訪問時間について, 2010 年度 夏の LA シンポジウム, 2010 年 7 月 21 日, 九段浜温泉ひみのはな(氷見市).
- ⑭ 山田陽介, 小野廣隆, 来嶋秀治, 山下雅史, ある種の不完全情報渋滞ゲームの近似的ナッシュ遷移の収束性, 2010 年度 夏の LA シンポジウム, 2010 年 7 月 20 日, 九段浜温泉ひみのはな(氷見市).

- ⑮ Nao Fujinaga, Hiroataka Ono and Masafumi Yamashita, Pattern Formation by Asynchronous Anonymous Oblivious Mobile Robots, AAAC 2010, 2010年4月17日, 浦項科学技術大学(韓国).

[図書] (計1件)

- ① Adrian Kosowski, and Masafumi Yamashita, Structural Information and Communication Complexity - 18th International Colloquium, SIROCCO 2011, Gdansk, Poland, June 26-29, 2011. Proceedings Springer 2011, pp.328, 2011年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

来嶋 秀治 (SHUJI KIJIMA)
九州大学・大学院システム情報学研究所
准教授
研究者番号：70452307
山内 由紀子 (YUKIKO YAMAUCHI)
九州大学・大学院システム情報学研究所
助教
研究者番号：10546518
小野 廣隆 (HIROTAKA ONO)
九州大学・大学院経済学研究所・准教授
研究者番号：00346826