

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15938

研究課題名(和文)分散システムの自己最適化理論

研究課題名(英文)Theory for self-optimization of distributed systems

研究代表者

山内 由紀子(YAMAUCHI, Yukiko)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：10546518

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)：本研究では、分散システムが環境変化や故障に追従して自身の機能を最適に保つ、自己最適化能力を持つ分散システムを実現するための基礎理論の確立を目指す。研究期間中を通して分散環境での最適性に様々な側面から取り組み、特に、モバイル計算主体群の分散協調能力、自己組織化能力の限界について多数の結果を得た。さらに、各計算主体の利己的な自己最適化を考慮したゲーム理論における、局所性の影響を示した。本研究により、集中型システムで知られている性能限界や数理構造が、局所性・非同期性・並列性が不可避である分散環境へ適用でき、自己最適化能力の根拠となることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The goal of the project is to construct a theory for realizing a distributed system that is able to optimize its functionality by itself following environment changes and faults. We investigate the optimization ability of distributed systems from different aspects and obtained a variety of results showing the limit of distributed coordination and self-organization of mobile computing entities. Additionally, we consider game theoretic environment where each computing entity performs self-optimization, and we showed the effect of locality. Our results show that these limitations and mathematical structures, that are well-known in centralized systems, are applicable to distributed systems where locality, asynchrony, and parallelism are unavoidable.

研究分野：分散協調理論

キーワード：分散システム 自己最適化 モバイルロボット モバイルエージェント ゲーム理論 探索 形状形成

1. 研究開始当初の背景

相互に通信を行いながら協調動作する多数の計算主体から成るシステムを分散システムと呼ぶ。IoT に代表されるような巨大分散システムでは、集中型の制御は本質的に困難であり、個々のセンサー、無線通信機、計算機といった、システム規模に対して非常に小さな対象(計算主体)を制御することでシステム全体を効率的に運用できる分散協調型の制御が必要不可欠である。分散システムの特徴は、各計算主体が局所的、非同期的、並列的に動作していることであり、このような環境でも効率性や信頼性、時々刻々と変化する状況に対応する適応性が期待されている。本研究では、このような効率性、信頼性、適応性を備えた分散システム実現の基礎理論の開発に取り組む。特に、環境変化や計算機、通信ネットワークの故障などに追従して、分散システムが自身の状態を最適に保つ、自己最適化に着目する。メモリのソフトウェアなどの一時故障から分散システムが自動的に復旧する自己安定性 [Dijkstra, Comm. of the ACM, 1974] が既に知られており、自己安定性を援用した自己適応分散システムも多数提案されているが、本研究ではさらに分散システムの最適化能力、つまり性能や効率の限界に着目する。

2. 研究の目的

分散システムにおける最適化は、システム全体の大域的な最適化と、各計算主体における局所的な最適化の2種類に分けられる。状況は逐次型の局所探索法と似ており、一般的に、局所的な最適化によって大域的な最適化が得られるとは限らない。本研究では、(i) 分散システムが実現可能な大域的な最適化、つまり性能の限界やその実現方法と、(ii) 局所的な最適化が大域的な最適化を実現する可能性の解明に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では主に、逐次型システムでの性能限界や群論などの数理構造、局所的な自己最適化を考慮したゲーム理論の分散環境への適用可能性に取り組んだ。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な結果3点について概要を示す。

(1) 逐次型システムとの性能比較。モバイルエージェントによってグラフ中を移動する侵入者を発見するグラフ探索は、計算機ネットワークでのスナップショット、ロールバックリカバリなどの基本的な問題と関連が深く、逐次型、すなわち、設計者が個々のエージェントを移動する場合の必要十分な探索者数は古くから研究が行われていた。本研究では、各エージェントが自律的にネットワーク中を移動し、直接出会った他のエージェントとのみ情報交換を行う、分散型エージェン

トシステムにおける探索問題において、必要十分な探索者数が逐次型システムと一致することを示した。本成果は国際会議 SSS 2016 において最優秀学生賞を受賞しており[学会発表 8]、国際的にも高く評価されている。

(2) 対称性を用いた自己組織化能力の特徴づけ。グラフ、2次元空間、もしくは3次元空間中を移動するモバイル計算主体群の自己組織化能力を示す問題として、形状形成問題が様々なモバイル計算主体群モデルで議論されている。研究代表者は以前からモバイルロボット群モデルにおける形状形成問題に取り組んでおり、ロボット群の初期配置の回転対称性が形成可能な形状、つまり、自己組織化能力を決定することを示していた。既存研究で想定するロボットは、2次元空間もしくは3次元空間を移動する匿名な点であり、通信機能やメモリを持たず、GPS といった大域座標系の情報を持たない。本研究では、最も能力の弱いロボット群、即ち、局所座標系の掌性も一致しないロボット群を想定し、従来の回転対称性ととも鏡映対称性も考慮しなくてはならないことを示した[学会発表 3]。2次元空間、3次元空間の回転と鏡映による対称性は17種類の群を成し、その数理構造はよく知られている。さらに、対称性の議論は三角形グリッド上を移動するアメーバを模した Amoebot モデルの自己組織化能力にも本質的であることを示した[学会発表 2]。このモデルでは、モバイル計算主体は匿名であるが、通信能力、メモリなどを備えている。これらの結果は、モバイル計算主体群の自己組織化能力に対称性が本質的であることを示している。

(3) ゲーム理論への局所性の導入。従来のゲーム理論では、各計算主体(意思決定主体)が他のすべての計算主体の戦略をもとに、自身の戦略を更新する状況が想定されていた。しかし、巨大分散システムでは大域情報をすべて、即時に入手することは一般的に困難である。本研究では、各計算主体が自身の近傍の計算主体の戦略のみをもとに、自身の戦略を更新する、視界が限られたゲーム環境を想定し、計算主体群が通信リンクを売り買いすることで自律的にネットワークを構成する、ネットワーク構成ゲームに着目した。このゲームでは、各計算主体のコストは通信コストとリンクの買い上げコストから成り、各計算主体はコストを最小化するために利己的に戦略を変更する。本研究では、各計算主体が自身に接続するリンク先を変更できるのみの場合、従来の視界が限定されていない場合に比べて、均衡状態での Price of Anarchy が大きく悪化することを示した[学会発表 1]。

研究期間中には、この他にも、視界が限られたモバイルロボットの位置同定問題と計算可能性の関係や、オンラインデータ構造の

リグレット解析など、数理構造や逐次型システムの手法を動的な環境に適応し、多数の結果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Zhiqiang Liu, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Team Assembling Problem for Asynchronous Heterogeneous Mobile Robots, *Theoretical Computer Science*, Vol.721, pp.27--41, 2018.

doi:10.1016/j.tcs.2018.01.009

Hiroshi Nishiyama, Yusuke Kobayashi, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, The parity Hamiltonian cycle problem, *Discrete Mathematics*, Vol.341, Issue 3, pp.606--626, March 2018.

doi:10.1016/j.disc.2017.10.025

Takeharu Shiraga, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Total variation discrepancy of deterministic random walks for ergodic Markov chains, *Theoretical Computer Science*, Vol.699, pp.63--74, 2017.

doi:10.1016/j.tcs.2016.11.017

Colin Cooper, Anissa Lamani, Giovanni Viglietta, Masafumi Yamashita, and Yukiko Yamauchi, Constructing self-stabilizing oscillators in population protocols, *Information and Computation*, Vol.255, Part 3, pp.336--351, 2017.

doi:10.1016/j.ic.2016.12.002

Sayaka Kamei, Tomoko Izumi, and Yukiko Yamauchi, An asynchronous self-stabilizing approximation for the minimum CDS with safe convergence in UDGs, *Theoretical Computer Science*, vol.615, pp.102--119, 2016.

doi:10.1016/j.tcs.2015.12.001

〔学会発表〕(計 10 件)

吉村正太郎, 山内由紀子, 視界の限られた悲観的なプレイヤーによる辺交換ゲーム, 火の国情報シンポジウム 2018, 2018年3月1-2日.

Giuseppe A. Di Luna, Paola Flocchini, Nicola Santoro, Giovanni Viglietta, and Yukiko Yamauchi, Shape Formation by Programmable Particles, *Proceedings of the 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPDIS 2017) (LIPIcs 95)*, pp.31:1--31:16, Dec. 18-20, 2017.

doi:10.4230/LIPIcs.OPDIS.2017.31

Yusaku Tomita, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima and Masafumi Yamashita, Plane formation by synchronous mobile robots without chirality, *Proceedings of the 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPDIS 2017) (LIPIcs 95)*, pp.13:1--13:17, Dec. 18-20, 2017.

doi:10.4230/LIPIcs.OPDIS.2017.13

Akihiro Monde, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Self-stabilizing localization of the middle point of a line segment by an oblivious robot with limited visibility, *Proceedings of the 19th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2017) (Springer 2017, LNCS 10616)*, pp.172--186, Nov. 5-8, 2017.

doi:10.1007/978-3-319-69084-1_12

山内由紀子, ロボット群の分散協調と対称性, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 数理計画研究部会 RAMP2017, 2017年10月12-13日.(招待講演)

Yukiko Yamauchi, Symmetricity and Pattern Formation in 2D and 3D, *The Research Meeting and School on Distributed Computing by Mobile Robots*, June 5-9, 2017.(招待講演)

玉谷賢一, 山内由紀子, 来嶋秀治, 山下雅史, 出会いのないトークンによる長周期ローターウォーク, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017年春季研究発表会, 2017年3月15日-17日.

Takahiro Yakami, Yukiko Yamauchi, Shuji Kijima, and Masafumi Yamashita, Searching for an Evader in an Unknown Graph by an Optimal Number of Searchers, *Proceedings of the 18th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2016) (Springer 2016, LNCS 10083)*, pp.399--414, Nov. 7-10, 2016.

doi:10.1007/978-3-319-49259-9_31

Colin Cooper, Anissa Lamani, Giovanni Viglietta, Masafumi Yamashita, and Yukiko Yamauchi, Constructing Self-Stabilizing Oscillators in Population Protocols, *Proceedings of the 17th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2015) (Springer 2015, LNCS9212)*, pp.187--200, Aug.18-21, 2015.

doi:10.1007/978-3-319-21741-3_13

松川 理拓, 山内由紀子, 来嶋 秀治, 山下 雅史, オンライン二分探索木の遅延更新に対するリグレット解析, 第 153

回アルゴリズム研究会，2015年6月12
日-13日．

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://tcs1ab.csce.kyushu-u.ac.jp/~yamauchi/>

6．研究組織

(1)研究代表者

山内 由紀子 (YAMAUCHI, Yukiko)
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：10546518

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

該当なし