

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330084

研究課題名(和文) 様々な計算環境の統合利用を実現するモバイルエージェントシステムの研究

研究課題名(英文) A study on mobile agent systems to integrate various computing environments

研究代表者

大下 福仁(Ooshita, Fukuhito)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20362650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、インターネット上に存在する様々な計算環境を統合的に利用可能とするモバイルエージェントシステムの開発を目標とし、その基盤となるさまざまなアルゴリズムの開発を行なった。まず、エージェント間でタスクの収集・割り当てを実現するために、部分集合アルゴリズムと均一配置アルゴリズムを提案した。次に、システムの規模の大きさに対応するために、エージェントの移動コストを削減するためのアルゴリズムを提案した。さらに、エージェントの故障率の高さに対応するために、エージェントシステムの信頼性を高めるためのアルゴリズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed algorithms to realize a mobile agent system that integrates various computing environments on the Internet. First, to collect and distribute tasks by mobile agents, we proposed partial gathering and uniform deployment algorithms. Second, since agents move around on the Internet, we proposed algorithms to reduce the moving costs. Third, since agents can become faulty during the long-distance movement, we proposed algorithms to improve reliability of mobile agent systems.

研究分野：情報科学

キーワード：モバイルエージェント 分散システム アルゴリズム 自己安定システム

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、多数の組織・個人が、インターネットを通して様々な計算環境を提供している状態にあった。例えば、グリッド・クラウドコンピューティングとして研究機関・企業が科学計算用・商用に計算環境を提供したり、ボランティアグリッドとして一般のインターネット利用者が計算機の余剰計算能力を提供したりしていた。このような計算環境は、計算能力、使用コスト、機密性など様々な点で特徴が異なる。そのため、利用者は、実行したいタスクの特徴・予算に合わせて計算環境を選択し、計算環境に合わせてプログラムを作成しなければならず、計算環境を利用するための負担が大きかった。

## 2. 研究の目的

上記の問題を解決するために、本研究では、様々な計算環境をモバイルエージェントによって統合的に利用可能とするシステムの実現を目指した。モバイルエージェント(以下、エージェント)とは、計算機ネットワーク上を自律的に移動しながら様々な処理を行なうソフトウェアである。すなわち、本研究では、利用者がタスクの情報をエージェントに与えるだけで、エージェントが自律的に移動しながら、適切な計算環境でタスクを実行するシステムの実現を目指した。

## 3. 研究の方法

上記のシステムの実現に向けて、本研究ではその基盤となるエージェントアルゴリズムの開発を行なった。

(1) エージェント間でタスクの収集・割り当てを行なうための基盤アルゴリズムとして、部分集合アルゴリズムと均一配置アルゴリズムについて検討した。

(2) エージェントは世界各地に散らばっている計算環境を移動する必要があり、その移動コストは従来のエージェントシステムより大きい。そのため、システムの効率化のためには、エージェントシステムの移動コストの削減が必要である。上記の部分集合、均一配置に加え、エージェントシステムで頻繁に利用される探索アルゴリズムについても、その移動コストの削減を検討した。

(3) 上記のシステムでは、エージェントが移動する距離が長いことから、エージェントがネットワークの障害等の影響を受けやすく、従来のエージェントシステムよりエージェントの故障率が高い。そのため、エージェントシステムの信頼性を高めるためのアルゴリズムについても検討した。

## 4. 研究成果

(1) タスクの収集・割り当てのための基盤アルゴリズムの開発

リングネットワーク、木ネットワークにおけるエージェント部分集合アルゴリズム

ネットワーク内に複数のエージェントが存在するとき、指定されたパラメータ  $g$  に対して、 $g$  体以上のエージェントでグループを作り、グループで1ノードに集合するアルゴリズム(部分集合アルゴリズム)を提案した。これにより、グループごとにタスクを共有して割り当てを行なうなど、エージェントシステムの効率化が期待できる。

$n$  ノードのリングネットワーク、木ネットワークにおいて、提案アルゴリズムは移動数  $O(gn)$  で部分集合を実現する。多く研究されている集合アルゴリズム(1ノードに全エージェントが集合)では、エージェント数  $k$  に対して  $(kn)$  の移動数が必要であることが知られており、部分集合ではパラメータ  $g$  に応じて移動数を削減可能であることを明らかにした。また、部分集合の実現には  $(gn)$  の移動数が必要であることも示し、提案アルゴリズムが漸近的に最適な移動数を実現していることを明らかにした。

リングネットワークにおけるエージェント均一配置アルゴリズム

リングネットワーク内に存在する複数のエージェントを、均一に配置するアルゴリズムを開発した。複数のエージェントで協調してタスクを割り当てる方法として、ネットワークを複数のサブネットワークに分割し、各サブネットワークをエージェントに担当範囲として割り当てる方法が考えられる。本アルゴリズムでエージェントをシステム内に均一に配置させることで、各エージェントにその近くのノードを担当範囲として割り当てることができる。

具体的には、エージェント数  $k$  またはノード数  $n$  が既知の場合に対して、 $O(k \log n)$  メモリ、 $O(n)$  時間、 $O(kn)$  移動数で解くアルゴリズムと、 $O(\log n)$  メモリ、 $O(n \log k)$  時間、 $O(kn)$  移動数で解くアルゴリズムを提案した。さらに、エージェント数  $k$ 、ノード数  $n$  が未知の場合に対して、初期配置の対象度が  $l$  のとき、 $O(k/l \log(n/l))$  メモリ、 $O(n/l)$  時間、 $O(kn/l)$  移動数で解くアルゴリズムを提案した。均一配置問題はエージェントの配置の対称度を最大化する問題であると考えることができ、最後のアルゴリズムは初期配置の対象度が大きい場合に効率よく均一配置を実現できることを明らかにした。また、提案アルゴリズムは全ての初期配置から均一配置を実現することができ、均一配置が全ての初期配置から実現可能であることを明らかにした。対称度が1のとき、均一配置の実現には  $(kn)$  の移動数が必要であることを示し、

上記の3つのアルゴリズムが漸近的に最適な移動数を実現していることも明らかにした。

### (2) エージェントシステムの移動コストを削減するためのアルゴリズムの開発

白板を用いたエージェントの探索アルゴリズム

ネットワーク中の全ノードを少ない移動数で訪問する探索アルゴリズムを開発した。これにより、ネットワーク中に分散する情報の収集、全ノードのアップデートなどを低コストで行なうことができる。提案アルゴリズムは、ノード数  $n$ 、リンク数  $m$  のときに、 $m+3n$  の移動数で探索を実現する PP アルゴリズムを基盤としている。PP アルゴリズムではエージェントが全情報を記憶しておく必要があり、エージェントが多く情報を持ち運ぶ必要があった。一方、提案アルゴリズムでは、その情報を全ノードの白板（エージェントが情報を書き込むことができるメモリ）に分散させることで、エージェントが記憶する情報量を大きく削減しながら、PP アルゴリズムと同じ移動数で探索を実現できることを明らかにした。

動的トラスに対するエージェント探索アルゴリズム

ネットワークの接続状況が動的に変化するトラスに対して、エージェントが少ない移動数で全ノードを訪問するアルゴリズムを提案した。無線通信端末が含まれるネットワークでは、リンクの切断などのネットワークポロジ変化が頻繁に発生する。提案アルゴリズムは、そのような状況でも効率的に全ノードを探索することができる。

具体的には、 $n \times m$  トラス ( $3 \leq n \leq m$ ) について、各行、各列を構成するリンクが各時刻にたかだか1つずつ消失する状況を想定して、アルゴリズムを検討した。その結果、 $n+1$  体のエージェントで  $O(nm^2)$  時間、 $n+2$  体のエージェントで  $O(m^2)$  時間で全ノードを訪問できるアルゴリズムを開発した。さらに、 $n=m$  の場合に対して、 $n+1$  体のエージェントで  $O(n^2)$  時間で全ノードを訪問するアルゴリズムを提案し、このアルゴリズムがエージェント数、必要時間ともに最適であることを示した。

### (3) エージェントシステムの信頼性を高めるためのアルゴリズムの開発

ビザンチン故障に耐性をもつ認証機能付き白板を用いたエージェント集合アルゴリズム

ネットワーク内に複数のエージェントが存在するとき、その一部のエージェントがビザンチン故障を起こしたとしても、認証機能付き白板を用いることで正常エージェントを1ノードに集合させるアルゴリズムを提案した。ビザンチン故障とはプログラムのバグ

やウイルスによる異常動作をモデル化したもので、ビザンチン故障を起こしたエージェントは、アルゴリズムとは異なる任意の動作を行うことができる。認証機能付き白板とは、エージェントが書き込むことができるノードのメモリのことであり、認証機能によってエージェントごとに書き込み可能な領域が制限されたものである。アルゴリズムにビザンチン故障に対する耐性を持たせることで、一部のエージェントが異常動作を起こしてもシステム全体で正常な動作を続けることができ、システムの信頼性を高めることができる。

本アルゴリズムでは、エージェントが同期して動作している場合に、ビザンチン故障を起こすエージェント数の最大値  $f$  と、ネットワークのリンク数  $m$  に対して、認証機能付き白板を用いて  $O(fm)$  時間で集合を実現できることを示した。認証機能付き白板を用いない場合は、ノード数  $n$ 、エージェント ID 長  $l$  に対して、 $O(n^l)$  時間のアルゴリズムが知られており、認証機能付き白板を用いることで必要時間を大きく削減できることを明らかにした。また、いくつかの仮定を追加することで、エージェントが非同期で動作する場合にも認証機能付き白板を用いて集合を実現できることを明らかにした。

エージェントの自己安定集合アルゴリズム

集合問題に対して、自己安定アルゴリズム、すなわち、エージェントの初期状態（メモリの内容）が任意であっても集合を実現するアルゴリズムを提案した。この性質により、エージェントがアルゴリズムの実行中に一時故障（メモリ内容の予期せぬ改変など）を起こしたとしても、集合を実現することができる。システムの信頼性を高めることができる。

具体的には、まず、任意のネットワークに対する自己安定集合アルゴリズムを開発し、任意のネットワークに対する自己安定集合アルゴリズムが存在することを明らかにした。しかし、この提案アルゴリズムでは集合に要する時間に上限を保証することができない。そこで、木ネットワーク、リングネットワークについて、ノード数、エージェント ID に対して多項式時間で集合を実現する自己安定集合アルゴリズムを開発した。

メッセージパッシングアルゴリズムの耐故障シミュレーション

従来の分散システムで用いられているメッセージパッシングアルゴリズムを、エージェントを用いて効率的にシミュレートする手法を開発した。これまでに多くのメッセージパッシングアルゴリズムが研究されてきており、提案手法を用いることで、効率的なメッセージパッシングアルゴリズムを、その効率を保ったままエージェントシステムで実行することができる。さらに、提案手法は、

一部のエージェントが停止故障を起こしても、メッセージパッシングアルゴリズムを正しく実行することができる。具体的には、最大  $f$  個のエージェントが停止故障を起こすとき、メッセージパッシングアルゴリズムでの 1 メッセージあたり  $O(f)$  回の移動で正しくアルゴリズムをシミュレートすることができる。これにより、エージェントシステムの効率と信頼性を向上させることができる。

#### 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 7 件)

Masahiro Shibata, Toshiya Mega, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Uniform deployment of mobile agents in asynchronous rings", Journal of Parallel and Distributed Computing, 査読有, to appear.  
DOI: 10.1016/j.jpdc.2018.03.008

Masashi Tsuchida, Fukuhito Ooshita, and Michiko Inoue, "Byzantine-tolerant gathering of mobile agents in arbitrary networks with authenticated whiteboards", IEICE Transactions on Information and Systems, vol. E101-D, no. 3, pp. 602-610, 査読有, Mar. 2018.  
DOI: 10.1587/transinf.2017FCP0008

Masahiro Shibata, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Move-optimal partial gathering of mobile agents in asynchronous trees", Theoretical Computer Science, vol. 705, pp. 9-30, 査読有, Jan. 2018.  
DOI: 10.1016/j.tcs.2017.09.016

Masahiro Shibata, Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Partial gathering of mobile agents in asynchronous unidirectional rings", Theoretical Computer Science, vol. 617, pp. 1-11, 査読有, Feb. 2016.  
DOI: 10.1016/j.tcs.2015.09.012

Yuma Asada, Fukuhito Ooshita, and Michiko Inoue, "An efficient silent self-stabilizing 1-maximal matching algorithm in anonymous networks", Journal of Graph Algorithms and Applications, vol. 20, no. 1, pp. 59-78, 査読有, Feb. 2016.  
DOI: 10.7155/jgaa.00384

Yuichi Sudo, Daisuke Baba, Junya

Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "A single agent exploration in unknown undirected graphs with whiteboards", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E98-A, no. 10, pp. 2117-2128, 査読有, Oct. 2015.  
DOI: 10.1587/transfun.E98.A.2117

Fukuhito Ooshita and Sebastien Tixeuil, "On the self-stabilization of mobile oblivious robots in uniform rings", Theoretical Computer Science, vol. 568, pp. 84-96, 査読有, Feb. 2015.  
DOI: 10.1016/j.tcs.2014.12.008

[学会発表](計 32 件)

Tsuyoshi Gotoh, Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Group exploration of dynamic tori", The 38th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), July 2018.

Hiroto Yasumi, Naoki Kitamura, Fukuhito Ooshita, Taisuke Izumi, and Michiko Inoue, "A population protocol for uniform k-partition under global fairness", The 20th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM), May 2018.

Masashi Tsuchida, Fukuhito Ooshita, and Michiko Inoue, "Gathering of mobile agents in asynchronous Byzantine environments with authenticated whiteboards", The 6th Edition of the International Conference on Networked Systems (NETYS), May 2018.

Hiroto Yasumi, Fukuhito Ooshita, Ken'ichi Yamaguchi, and Michiko Inoue, "Constant-space population protocols for uniform bipartition", The 21st International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), Dec. 2017.

Fukuhito Ooshita, Ajoy K. Datta and Toshimitsu Masuzawa, "Self-stabilizing rendezvous of synchronous mobile agents in graphs", The 19th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), Nov. 2017.

Michiko Inoue, Fukuhito Ooshita and Sebastien Tixeuil, "An efficient silent self-stabilizing 1-maximal matching algorithm under distributed daemon for

arbitrary networks", The 19th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), Nov. 2017.

Tsuyoshi Gotoh, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa and Toshimitsu Masuzawa, "How to simulate message-passing algorithms in mobile agent systems with faults", The 19th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), Nov. 2017.

Michiko Inoue, Fukuhito Ooshita, and Sebastien Tixeuil, "Brief announcement: Efficient self-stabilizing 1-maximal matching algorithm for arbitrary networks", The 36th ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), July 2017

Masashi Tsuchida, Fukuhito Ooshita, and Michiko Inoue, "Byzantine gathering in networks with authenticated whiteboards", The 11th International Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM), Mar. 2017.

Fukuhito Ooshita, "Partial gathering of mobile agents in rings and trees", Workshop on Advanced Distributed Algorithms (WADA), Nov. 2016.

Michiko Inoue, Fukuhito Ooshita, and Sebastien Tixeuil, "An efficient silent self-stabilizing 1-maximal matching algorithm under distributed daemon without global identifiers", The 18th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS), Nov. 2016.

Masahiro Shibata, Toshiya Mega, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Uniform deployment of mobile agents in asynchronous rings", The 35th ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), pp. 415-424, July 2016.

Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Loosely-stabilizing leader election on arbitrary graphs in population protocols without identifiers nor random numbers", The 19th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), Dec. 2015.

Masahiro Shibata, Daisuke Nakamura, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "An algorithm for partial gathering of mobile agents in arbitrary networks", The Workshop on Distributed Robotic Swarms (WDRS), Oct. 2015 (Work-in-progress).

Sayaka Kamei, Anissa Lamani, and Fukuhito Ooshita, "Ring gathering by robots with limited vision", The 8th Annual Meeting of Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC), May 2015.

Yuichi Sudo, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Loosely-stabilizing leader election on arbitrary graphs in population protocols", The 18th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS), pp.339-354, Dec. 2014.

Sayaka Kamei, Anissa Lamani, and Fukuhito Ooshita, "Asynchronous ring gathering by oblivious robots with limited vision", The Workshop on Self-organization in Swarm of Robots: from Molecular Robots to Mobile Agents (WSSR), Oct. 2014 (Work-in-progress).

Masahiro Shibata, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, "Move-optimal partial gathering of mobile agents in asynchronous trees", The 21st International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO), pp. 327-342, July 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大下 福仁 (OOSHITA, Fukuhito)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授  
研究者番号：20362650

### (2) 研究分担者

増澤 利光 (MASUZAWA, Toshimitsu)  
大阪大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号：50199692

角川 裕次 (KAKUGAWA, Hirotsugu)  
大阪大学・情報科学研究科・准教授  
研究者番号：80253110