

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700056

研究課題名(和文)異種並列計算環境における低消費電力スケジューリングに関する研究

研究課題名(英文)Energy-efficient scheduling for heterogeneous parallel computing environments

研究代表者

大下 福仁(Ooshita, Fukuhito)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20362650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ハイパフォーマンスコンピューティングにおける消費電力の削減を目標とし、高速な計算と低消費電力を両立する手法の開発を目的とした。まず、高速な計算を実現するために、大規模計算グリッドを構築するための手法を開発した。次に、大規模計算グリッドを大規模分散システムとして捉え、大規模分散システムの消費エネルギーを削減する手法を開発した。また、大規模計算グリッドの制御を行う方法として、ネットワークを自由に移動するモバイルエージェントに注目し、通信量を抑えたモバイルエージェントの制御手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, to reduce energy consumption in high-performance computing, we aim to design methods that attain high-throughput computing and reduce energy consumption. First, to achieve high-performance computing, we develop methods to construct large-scale computing grids. Next, we regard large-scale computing grids as large-scale distributed systems, and develop methods to reduce energy consumption in large-scale distributed systems. In addition, we focus on mobile agents to manage large-scale computing grids, and develop methods to control mobile agents with low communication costs.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、計算機システム・ネットワーク

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

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初より、さまざまな研究分野において大きな計算能力が必要とされており、ハイパフォーマンスコンピューティングの需要が高まっている。そのため、並列計算環境の発展が進み計算速度は大きく向上を続けているが、その一方で消費電力も増加の一途を辿っている。例えば、米国では、2006年の時点で、データセンターで消費される電力が全米で消費される電力の約 1.5%に及んだという報告がある。この割合は 2011 年に約 3%に達すると予想されており、世界的な省エネルギー化を進めていくうえで、ハイパフォーマンスコンピューティングにおける消費電力の削減が無視できないものであることを意味している。そのため、高速な並列計算を実現しながら、消費電力を削減する手法の開発が求められていた。

2. 研究の目的

研究開始当初は、ハイパフォーマンスコンピューティングにおける消費電力の削減を目標とし、高速な計算と低消費電力を両立するスケジューリング技術を開発することを目的とした。とくに、特性の異なる複数の計算機を組み合わせた異種並列計算環境を利用することで、大幅な消費電力の削減を目指した。具体的には、異種並列計算環境の消費電力モデルの構築、異種並列計算環境における低電力スケジューリング手法の開発、アプリケーションに適した異種並列計算環境の構築手法の開発を目標とした。

3. 研究の方法

まず、高速な計算を実現するために、大規模計算グリッドを構築するためのアルゴリズム・システムの開発を行った。具体的には、計算機の所有者の利益を考慮したスケジューリング手法、Web ブラウザから簡単に参加できる P2P 型グリッドの試作を行った。

次に、大規模計算グリッドの消費エネルギーを削減する手法について検討した。大規模計算グリッドは、ネットワーク上の多数のプロセッサで構成されるため、集中制御は難しく大規模分散システムとしての運用が必要となる。そのため、研究開始当初は集中制御を前提としたスケジューリング手法によって消費エネルギーの削減を目標としていたが、分散制御によって消費エネルギーを削減する手法の検討を行った。

また、大規模分散システムである大規模計算グリッドの制御を行う方法として、ネットワークを自由に移動するソフトウェアであるモバイルエージェントに注目した。例えば、モバイルエージェントが大規模計算グリッドの情報を収集し、その情報をもとに、計算

タスクを割り当てるといった活用方法がある。本研究では、モバイルエージェントを効率的に利用するために、通信量を抑えたモバイルエージェントの制御手法を検討した。

4. 研究成果

(1) 大規模グリッドを構築するためのアルゴリズム・システムの開発

大規模グリッドを実現する方法のひとつとしてボランティアグリッドの構築が挙げられる。ボランティアグリッドとは、計算機の所有者がその計算能力をボランティアで提供し、ネットワークを介してその計算能力を共有して利用できるようにしたものである。本研究では、計算機の所有者がボランティアグリッドに参加しやすくなる手法を検討した。

計算機の所有者の利益を考慮したスケジューリングアルゴリズムの開発

本研究では、複数のユーザが計算機とタスクを提供することで構成される計算グリッドを想定した。このとき、あるユーザが計算グリッドに参加することで参加しない場合より自身のタスクの計算が大幅に遅れるなら、そのユーザは計算グリッドに参加するメリットがない。そこで、各ユーザのタスクの実行を大幅に遅らせることなく、全タスクを効率的に実行するスケジューリングアルゴリズムを提案した。

Web ブラウザ上で動作する P2P 型グリッドの試作

多くのボランティアグリッドでは、グリッドに参加するために専用のソフトウェアをインストールする必要がある。本研究では、ユーザが容易にグリッドに参加できるように、ウェブブラウザにアクセスするだけでグリッドに参加できるシステムを試作した。試作システムでは、計算を実行したいユーザがマスター計算機にタスクを登録する。以降は、グリッドに参加したいユーザがマスター計算機にウェブブラウザでアクセスするだけで、ユーザ間で P2P 型の計算グリッドを構築し、登録されたタスクを実行する。これにより、ユーザは容易にボランティアグリッドに参加することができ、計算グリッドの規模の拡大に貢献できる。

(2) エネルギー消費を抑えた分散システムの構築手法の開発

分散システムでは、他のノードと通信を繰り返しながら、タスクの実行・システムの管理などを実行する。とくに無線通信を用いた分散システムでは、通信に大きなエネルギーが必要となるため、通信回数を削減すること

でシステム全体のエネルギー消費を抑えることができる。一方で、通信回数を削減することで、必要な情報の通信が遅れてシステム全体の効率が悪化する可能性がある。本研究では、システムの効率の悪化を抑えながら、通信回数を削減してエネルギー消費を削減する手法を検討した。

通信効率のよい無線ネットワーク向け自己安定分散アルゴリズム

自己安定分散アルゴリズムとは、任意の初期状況から開始してもやがて正常な状況に遷移するアルゴリズムである。そのため、一時故障によりメモリの状態等が書き換わったとしても、故障後の状況を任意の初期状況のうちの一つと考えることで、自動的に正常な状況に遷移することができる。自己安定アルゴリズムを実現するためには、故障の発生を検知するために、正常な状況に遷移したあと他のノードと通信を続ける必要がある。本研究では、このときの通信を削減することで、システム全体のエネルギー消費を削減する手法を提案した。正常な状況に遷移したあとの通信を削減することで、故障が発生した際にその検知と対応が遅れる可能性がある。しかし、提案手法では、この対応時間を短く抑えることが可能である。

仮想グリッドネットワークにおける最短経路構築アルゴリズム

領域をセル状に分割し、各セルから1つずつの代表ノードを選出することで、仮想グリッドネットワークを構築することができる。代表ノード以外をスリープ状態にすることで、システム全体の消費エネルギーを削減することができる。代表ノードに故障が発生したとしても、セル内の別のノードを代表ノードにすることで容易に対応することができる。

本研究では、仮想グリッドネットワークのうえで最短経路を構築するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムでは、送信側から受信側に任意の長さの経路が与えられたとき、局所的な経路の変更を繰り返すことでその経路を最短経路に変更する。通信時の経路長を最小にすることで、通信時のエネルギー消費を削減することができる。

仮想グリッドネットワークにおけるブロードキャスト木の最適化アルゴリズム

上記と同様の仮想グリッドネットワークを対象とし、ブロードキャスト木の高さを最小化するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムでは、任意のブロードキャスト木が与えられたとき、局所的な木の変更を繰り返すことで、その高さを最小化する。これにより、ブロードキャストに要する時間を最小化することができる。また、ブロードキャスト時にデータを中継するノード数を最小化することで、ブロードキャストに要する消費エ

ネルギーの削減も実現している。

(3) 通信量を抑えたモバイルエージェントの制御手法の開発

大規模計算グリッドを効率的に管理するためには、リアルタイムに各計算ノードの情報を収集し、それに対応してタスクの割当等を行うことが重要である。本研究では、これを実現するために、計算機ネットワーク中を自律的に移動するモバイルエージェント(以下、エージェント)に注目し、エージェントを効率的に制御するさまざまなアルゴリズムを提案した。具体的には、以下の通りである。

非同期リングネットワークにおける乱択集合アルゴリズム

本研究では、非同期匿名単方向リングネットワークにおけるエージェントの集合問題について考察した。集合問題とは、初期状況でネットワークに散らばっているエージェントを1か所に集合させる問題であり、これによりエージェント間の情報交換や同期を実現することができる。

本研究では、初期状況でエージェントがノード数もエージェント数も知らない場合に対し、確率的可解性と終了判定の関係を明らかにした。具体的には、以下の成果を得た。まず、任意の(小さな)定数 p ($0 < p < 1$) について、終了判定を課す集合問題を確率 p で解く乱択アルゴリズムは存在しないことを示した。次に、終了判定を課さない集合問題を確率 p ($0 < p < 1$) で解く乱択アルゴリズムを提案した。さらに、終了判定を課さない集合問題を確率 1 で解く乱択アルゴリズムは存在しないことを示した。

非同期木ネットワークにおける集合アルゴリズム

本研究では、非同期匿名木ネットワークにおけるエージェントの集合問題について、エージェントの空間計算量と時間計算量の関係に着目して考察した。従来の研究で、空間計算量が漸近的に最適なアルゴリズムが提案されているが、その時間計算量はとても大きい。そこで、本研究では、時間計算量が漸近的に最適、すなわち、 $O(n)$ (n はノード数) であるようなアルゴリズムに注目した。その結果、時間計算量が $O(n)$ であるようなアルゴリズムは、 $\Omega(n)$ の空間計算量が必要であることを示した。さらに、時間計算量と空間計算量がともに $O(n)$ であるようなアルゴリズムも提案した。すなわち、このアルゴリズムは、時間計算量が漸近的に最適であるという条件のもとで、空間計算量も漸近的に最適なアルゴリズムである。

非同期リングネットワークにおける部分集合アルゴリズム

本研究では、部分集合問題を初めて定義し、非同期リングネットワークにおけるエージェントの部分集合問題について考察した。部分集合問題とは、集合すべきエージェント数 g が与えられたとき、すべてのエージェントがサイズ(エージェント数) g 以上のグループに分かれて集合する問題である。

まず、エージェントに ID がある場合について、 $O(gn)$ (n はノード数) の総移動数で部分集合問題を解く決定性アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、総移動数の観点で漸近的に最適である。また、エージェントに ID がない場合について、 $O(gn+n \log k)$ (k はエージェント数) の総移動数で部分集合問題を解く乱択アルゴリズムを提案した。従来の集合問題は $\Omega(kn)$ の総移動数が必要であると示されており、上記の2つのアルゴリズムは、部分集合問題が従来の集合問題より少ない総移動数で解けることを示している。

同期リングネットワークにおける均一配置アルゴリズム

本研究では、同期リングネットワークにおける均一配置問題について考察した。均一配置問題とは、エージェントをリング状に等間隔に配置させる問題である。エージェントを等間隔に配置させることで、ノード故障の発生時に素早くエージェントをノードへ向かわせることができる。

本研究では、エージェントがリング上にトークンと呼ばれる1ビットの情報を残せる場合について、均一配置を実現する総移動量が漸近的に最適なアルゴリズムを2つ提案した。手法1は時間計算量が $O(n)$ で最適であり、エージェントメモリ量が $O(k \log n)$ (k はエージェント数、 n はノード数) である。手法2はエージェントメモリ量が $O(\log n)$ で最適であり、時間計算量が $O(n \log k)$ 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7件)

Fukuhito Ooshita, Shinji Kawai, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Randomized gathering of mobile agents in anonymous unidirectional ring networks, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 査読有, vol. 25, issue 5, 2014, pp. 1289-1296, DOI: 10.1109/TPDS.2013.259

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Analysis of distributed token circulation algorithm with faulty random number generator,

Parallel Processing Letters, 査読有, vol. 24, issue 1, 2014,

DOI: 10.1142/S0129626414500029

Tomoko Izumi, Taisuke Izumi, Sayaka Kamei, and Fukuhito Ooshita, Time-optimal gathering algorithm of mobile robots with local weak multiplicity detection in rings, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E96-A, no. 630, 2013, pp.1072-1080.

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-a_6_1072

Susumu Matsumae and Fukuhito Ooshita, Hierarchical low power consumption technique with local information for sensor networks, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 査読有, vol. 4, no. 4, 2013, pp. 69-74,

DOI: 10.14569/IJACSA.2013.040412

Taisuke Izumi, Tomoko Izumi, Sayaka Kamei, and Fukuhito Ooshita, Feasibility of polynomial-time randomized gathering for oblivious mobile robots, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 査読有, vol. 24, no. 4, 2013, pp. 716-723, DOI: 10.1109/TPDS.2012.212.

Daisuke Baba, Tomoko Izumi, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Linear time and space gathering of anonymous mobile agents in asynchronous trees, Theoretical Computer Science, 査読有, vol. 478, 2013, pp. 118-126,

DOI: 10.1016/j.tcs.2013.01.022.

Fukuhito Ooshita, Tomoko Izumi, and Taisuke Izumi, The price of multi-organization constraint in unrelated parallel machine scheduling, Parallel Processing Letters, 査読有, vol. 22, issue 2, 2012,

DOI: 10.1142/S0129626412500065.

[学会発表](計15件)

伊藤瑠美, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 弦付リング構成のための空間計算量に優れた自己安定アルゴリズム, 電子情報通信学会技術研究報告, 2014年4月24日, 宮城県仙台市.

中川路克之, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, ウェブブラウザ上で動作する Peer-to-peer 型 MapReduce フレームワーク, 電子情報通信学会 2014年総合大会, 2014年3月18日~2014年3月21日, 新潟県新潟市.

高津周佑, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 仮想グリッドネットワークにおけ

る葉が多い BFS 木の安全自己構成法, 電子情報通信学会技術研究報告, 2014 年 3 月 10 日, 東京都千代田区.

Shusuke Takatsu, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Zigzag: Local-information-based self-optimizing routing in virtual grid networks, Proceedings of the 33rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2013 年 7 月 8 日 ~ 2013 年 7 月 11 日, USA.

Masahiro Shibata, Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Algorithms for partial gathering of mobile agents in asynchronous rings, Proceedings of the 16th International Conference on Principles of Distributed Systems, 2012 年 12 月 17 日 ~ 2012 年 12 月 20 日, Italy.

Fukuhito Ooshita and Sebastien Tixeuil, On the self-stabilization of mobile oblivious robots in uniform rings, Proceedings of the 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2012 年 10 月 1 日 ~ 2012 年 10 月 4 日, Canada.

Tomoya Takimoto, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Communication-efficient self-stabilization in wireless networks, Proceedings of the 14th International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 2012 年 10 月 1 日 ~ 2012 年 10 月 4 日, Canada.

Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, and Sebastien Tixeuil, Gathering an even number of robots in an odd ring without global multiplicity detection, Proceedings of the 37th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science, 2012 年 8 月 27 日 ~ 2012 年 8 月 31 日, Slovakia.

瀧元友也, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 無線ネットワークにおける通信効率のよい自己安定プロトコルの提案, 2012 年夏の LA シンポジウム, 2012 年 7 月 17 日 ~ 2012 年 7 月 19 日, 京都府宮津市.

高津周佑, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 格子ネットワークで局所情報による自己最適化に適するのはジグザグ経路だ, 2012 年夏の LA シンポジウム, 2012 年 7 月 17 日 ~ 2012 年 7 月 19 日, 京都府宮津市.

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu

Masuzawa, "Randomized rendezvous of mobile agents in anonymous unidirectional ring networks", Proceedings of the 19th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2012 年 6 月 30 日 ~ 2012 年 7 月 2 日, Iceland.

柴田将拡, 川合慎治, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 非同期リングにおけるモバイルエージェント部分集合アルゴリズム, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012 年 5 月 14 日, 愛媛県松山市.

妻鹿敏也, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光, 同期リングにおけるモバイルエージェント均一配置アルゴリズム, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012 年 5 月 14 日, 愛媛県松山市.

Shinji Kawai, Fukuhito Ooshita, Hirotsugu Kakugawa, and Toshimitsu Masuzawa, Randomized rendezvous of multiple mobile agents in anonymous unidirectional ring networks, 電子情報通信学会技術研究報告, 2012 年 3 月 16 日, 東京都文京区.

Sayaka Kamei, Anissa Lamani, Fukuhito Ooshita, and Sebastien Tixeuil, Asynchronous mobile robot gathering from symmetric configurations without global multiplicity detection, Proceedings of the 18th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity, 2011 年 6 月 27 日, Poland.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大下 福仁 (OOSHITA, Fukuhito)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号: 20362650