

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32687

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330118

研究課題名(和文) 省電力化を考慮した高信頼・高可用 P2P システムの研究

研究課題名(英文) Energy-Efficient Server Selection Algorithms for Redundantly Performing Application Processes in Peer-to-Peer (P2P) Systems

研究代表者

榎戸 智也 (ENOKIDO, TOMOYA)

立正大学・経営学部・教授

研究者番号：10360158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、はじめにハードウェア構成の異なるコンピュータ(ピア)上で応用プログラムを実行した場合の計算特性と電力消費特性を測定した。次に、測定した結果からピア上で複数の応用プログラムを同時実行した場合の計算モデルおよび消費電力モデルを定式化した。また、定義した計算モデルと電力消費モデルを用いて、Peer-to-Peer (P2P) システム内で応用プログラムを多重実行する場合に P2P システム全体の電力消費量を低減し、かつ応用プログラムの要求するサービス品質(QoS)を満足するピアグループの選定アルゴリズムと多重化制御方式を提案した。

研究成果の概要(英文)：In peer-to-peer (P2P) systems, application processes have to be reliably performed in presence of server faults. One way to make an application service fault-tolerant is that multiple replicas of each application process are performed on multiple peers. On the other hand, a larger amount of electric energy is consumed since multiple replicas of each application process are performed on multiple peers to make application services fault-tolerant. It is critical to discuss how to realize not only fault-tolerant but also energy-efficient P2P systems to provide application services. In this study, the computation model and power consumption models of a peer to perform computation processes are defined. Based on the models, the energy-efficient server selection algorithms to select multiple servers for redundantly performing replicas of each computation process are proposed.

研究分野：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：情報システム 省エネルギー 分散アルゴリズム 情報通信工学 グリーン・コンピューティング

1. 研究開始当初の背景

現在の情報システムは、移動体通信技術の発展、常時接続型のブロードバンド環境の普及にとともに、サービスの高度化・多様化、利用者数の増大、利用データの大容量化が進んでいる。従来の多くの情報システムは、クライアント・サーバ (CS) システムで構築されてきているが、CS システムでは、サービスの多様化・高度化に対して、システムの拡張性を提供しきれないといった問題がある。一方で、Peer-to-Peer (P2P) システムは大規模分散型のシステムであり、各ピアがサーバ機能を分散して維持するため高い拡張性がある。さらに、数十～数百万以上のピアが相互接続される大規模性とシステムの構成が動的に変化するという特徴がある。P2P システムに関する研究成果を用いたファイル共有等のアプリケーションが開発されており、国内外の企業でも P2P システムを用いたサービス提供が事業化されている。

一方で、システムの大規模化、利用者数の増大にともなう電力消費量の増大が重要な問題となっており、情報システムの省電力化が課題となっている。CPU に代表されるハードウェアの省電力化は、インテル等のベンダ各社で研究・開発が進み、省電力化されたハードウェア製品が提供されている。また、クラウド・システムに代表される CS システムでは、トラフィックに対して動作させるサーバ数を決定し、不要なサーバを停止することでシステム全体の省電力化を行う制御方式が提案されている。しかし、P2P システムでは、その自律性、大規模性およびシステム構成の動的変化という特徴から CS システムで提案された省電力化手法を適用できない。また、集中管理が困難であり、電力特性の異なるハードウェアを使用した不特定多数のピアがシステムに参入、離脱するため、P2P システム全体の消費電力制御を行う新たな構成論、制御方式、管理方式が必要となる。さらに、P2P システムで実現されるような大規模サービスでは、サービス停止にともなう社会的影響が大きくなるため、データの多重化や応用プログラムの多重実行等を用いてシステムの信頼性、可用性を向上する必要がある。しかし、多重化を用いたシステムの信頼性、可用性の向上は、さらなるシステムの電力消費量の増大をもたらしてしまう。以上のことから、P2P システムにおいて、多重化によりシステムの信頼性、可用性を向上し、かつシステム全体の電力消費量を低減できる新たなピアのグループ選択方式と多重化制御方式が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、応用プログラムが計算特性および電力特性の異なる複数のピア上で多重実行される場合にピアの計算モデルと電力消費モデルをもとに P2P システム全体の消費電力を低減するためのピアの選定アルゴリズムと多重化制御方式を提案することを目的とする。

このために以下の(1)、(2)、(3)を実施する。

(1) ピアの計算・電力消費モデルの定式化

ハードウェア構成の異なるピア上で応用プログラムを実行した場合の計算特性と電力消費特性を測定し、ピアの計算モデルおよび消費電力モデルを定式化する。

(2) ピアのグループ選定アルゴリズムの提案

(1)で定式化したピアの計算モデルと消費電力消費モデルをもとにピア上で応用プログラムを実行した場合の応答時間と電力消費量を推定するアルゴリズムを設計する。また、推定した電力消費と応答時間の結果から、消費電力を低減でき、かつ応用プログラムの要求を満たすピアのグループを選定するアルゴリズムを提案する。

(3) 多重化制御方式の提案

ピアの障害発生状況や応用プログラムの特性によっては、応用プログラムの多重実行による消費電力の浪費が発生する。よって、ピアの障害状況と応用プログラムの特性をもとに不要な応用プログラムの多重実行を制御する方式を提案する。

3. 研究の方法

(1) ピアの計算・電力消費モデルの定式化

P2P システム内の各ピアの全ハードウェア構成を確認し、各ピアの消費電力特性を把握することは困難である。よって、ピアの電力消費に大きく影響を与える項目として CPU のコア数と冷却装置 (ファン) の制御方式を用いて分類した。本研究では、各ピア上で実行される応用プログラムは、計算資源 (CPU) を主に使用するプログラム (計算プロセス) とした。はじめに、分類したピア上で計算プロセスを単体で実行した場合にピアの計算資源がどのように使用されるか、また応答時間にどのような差があるかを測定した。次に、分類した各ピア上で計算プロセスを複数同時実行させ、計算資源の使用率変化と応答時間の変化を測定した。この結果から、分類したピア毎にピア上で計算プロセスを同時実行する場合の計算モデルを定式化した。

分類した各ピアの計算モデルの定式化を行うための測定と同時にピアの電力消費量の測定も実施した。はじめに、分類されたピア毎に同時実行される計算プロセス数の増減に対して、電力消費量がどのように変化するかを測定した。例えば、CPU ファンの回転数は、CPU の使用率や温度によって動的に変化する。CPU 使用率や温度は、同時実行される計算プロセス数に依存して動的に変化するため、これに依存して CPU ファンの回転数とピアの電力消費量が動的に変化する。よって、分類したピア毎に同時実行される計算プロセス数をもとにしたピアの電力消費モデルを定式化した。

(2) ピアのグループ選定アルゴリズムの提案

本研究では、N 台のピアがシステム内で同時に停止障害すると仮定する。よって、各ピア（クライアント・ピア）は、自身が必要とするサービスを提供することができる N+1 台以上のピア（サーバ・ピア）のグループを選定して要求を送信する必要がある。ここで、各クライアント・ピアは、はじめに必要とする計算資源を保有するサーバ・ピアを発見し、該当するサーバ・ピアの計算モデル、電力消費モデル、負荷状況（同時実行されている計算プロセス数）を取得する必要がある。研究代表者は、現実世界における情報収集が知人間の信頼関係をもとに実現されることに着目し、「ピア間の信頼関係を基にした P2P システムのための効率的な情報資源の検索方式」を提案している。必要とする計算資源を保有するサーバ・ピアの発見とピアの計算モデル、電力消費モデル、負荷状況の取得は、当該研究成果を用いて実現する。よって、本研究では、必要とする計算資源を保有するサーバ・ピアを発見したクライアント・ピアが各サーバ・ピアの計算モデル、電力消費モデル、負荷状況をもとに各サーバ・ピアで新たに要求された計算プロセスを実行した場合の電力消費量と応答時間を推定するアルゴリズムを考案した。このアルゴリズムを用いて推定した各サーバ・ピアの電力消費量および要求する計算プロセスの応答時間をもとにシステム全体の電力消費量を低減でき、かつクライアント・ピアの要求するサービスの品質 (QoS) を満たす N+1 台のサーバ・ピアを選定するアルゴリズムを考案した。

(3) 多重化制御方式の提案

(2) で考案したアルゴリズムを使用することでシステムの信頼性および可用性を向上し、かつ、システム全体の電力消費量を低減することが可能となる。一方で、障害の発生状況や応用プログラムの特性によっては、不必要な応用プログラムの実行による電力の浪費が発生する。例えば、計算モデルの異なる 2 台のピアで計算プロセスが多重実行される場合を考える。要求を送信したクライアント・ピアが 2 台のサーバ・ピアのうち 1 台から応答を受信し、その処理を終了したとする。この時、もう一方のサーバ・ピア上で実行されている計算プロセスは、不要な計算資源と電力を浪費する。よって、このような不要な計算プロセスの実行を止めることでさらなる省電力化が可能となる。本研究では、障害状況と応用プログラムの特性をもとに計算プロセスの実行を停止する多重化制御方式を考案した。

(4) 提案手法の実装、評価、および改良

(2) および (3) で提案したサーバ・ピア・グループの選定アルゴリズムおよび不要な計算プロセスの実行を停止する多重化制御方式の実装を行った。また、提案したサーバ・ピア・グループの選定アルゴリズムおよび多重化制御方式を評価するためのシミュレーション環

境を構築した。構築したシミュレーション環境を用いて、システム内のピア数、通信遅延時間、同時障害ピア数、要求計算プロセス数等のシステム・パラメータを変化させて提案手法の有効性を評価した。

提案したサーバ・ピア・グループの選定アルゴリズムでは、アルゴリズムを開始する前にクライアント・ピアが対象となるサーバ・ピア上の計算プロセスの実行状態を取得する必要がある。シミュレーション環境にて提案アルゴリズムの評価を行った結果、サーバ・ピア上で実行されている計算プロセスの実行状態を取得するための通信中に発生した計算プロセスの状態変化がサーバ・ピアの電力消費量と計算プロセスの応答時間の推定に大きく影響を及ぼすことが分かった。特に、サーバ・ピアとクライアント・ピア間の通信遅延時間に対して、計算プロセスの実行時間が短い場合、この影響が大きくなる。実環境を考慮した場合、この推定誤差の影響がシステム全体の電力消費量に大きく影響することから、クライアント・ピアとサーバ・ピア間で計算プロセスの状態を取得するための通信をすること無く、サーバ・ピアの電力消費量と計算プロセスの応答時間を推定できるようにサーバ・ピア・グループの選定アルゴリズムを改良した。また、シミュレーション環境を用いて、改良したサーバ・ピア・グループの選定アルゴリズムの有効性を評価した。

4. 研究成果

本研究では、計算プロセスが計算および電力消費特性の異なる複数のピア上で多重実行される場合に定式化したピアの計算モデルと電力消費モデルをもとに P2P システム全体の消費電力を低減するためのサーバ・ピアの選定アルゴリズムと多重化制御方式を提案した。

(1) ピアの計算・電力消費モデルの定式化

3(1) の実験結果から、計算プロセスを実行する場合のピアの計算モデルとして、simple computation (SC) を定義した。SC モデルは、計算プロセスを実行しているピア上において、時刻 τ で各計算プロセスに割当てられる計算レートを算出できるモデルである。時刻 τ でピア上の各計算プロセスに割当てられる計算レートは、ピアの保有するコア数と同時実行される計算プロセス数に依存する。すなわち、同時実行される計算プロセス数がピアの保有するコア数以下であれば、各計算プロセスはピアが提供できる最大計算レートで実行される。一方、同時実行される計算プロセス数がピアの保有するコア数を超える場合、各計算プロセスはピアが提供できる最大計算レートを同時実行される計算プロセス数で案分した計算レートで実行される。

さらに、3(1) の実験結果から、計算プロセスを実行する場合のピアの電力消費モデルとして、simple power consumption (SPC) モデルと extended simple power consumption

(ESPC) モデルを定義した. SPC モデルは, ピアに装着されたファンの回転数が常に一定である場合に適用できるモデルである. SPC モデルでは, 時刻 τ で少なくとも1つの計算プロセスが実行されていれば, ピアの電力[W]が最大値となる. さもなければ, ピアの電力が最小値(待機電力)となる. 一方で, ESCP モデルは, ピアに装着されたファンの回転数が同時実行される計算プロセス数の増減に依存して動的に変化する場合に適用できるモデルである. ESCP モデルでは, 時刻 τ で同時実行されている計算プロセス数が各ピア固有の値である M_t 個以上であれば, ピアの電力[W]が最大値となる. すなわち, ファンが最大回転数で動作している時の電力となる. 時刻 τ で同時実行されている計算プロセス数が1以上 M_t 未満の場合, ピアの電力は計算プロセス数に依存して線形増加する.

(2) ピアのグループ選定アルゴリズムの提案

4(1)で定義したピアの計算モデルと電力消費モデルをもとにシステム全体の電力消費量を低減でき, かつクライアント・ピアの要求するサービスの品質(QoS)を満たす $N+1$ 台のサーバ・ピアを選定するアルゴリズムとして, Redundant Power Consumption Laxity Based (RPCLB) アルゴリズムの設計と実装を行った. RPCLB アルゴリズムでは, SC モデルをもとに新たな計算プロセスをピアに配置した場合にピア上の全ての計算プロセスが完了するまでの総実行時間を推定することができる. さらに, 総実行時間のピアの電力[W]は, ピアの電力消費モデル (SPC または ESPC モデル) をもとに推定できる. 例えば, あるピアの電力消費モデルが SPC モデルであったとする. このとき, ピア上の全ての計算プロセスが完了するまでの総実行時間の間は, 少なくとも1つの計算プロセスがピア上で実行される. よって, 新たな計算プロセスをこのピアに配置した場合の総電力消費量[Ws]は, ピアの最大電力[W] \times 総実行時間[sec]となる. ここで, RPCLB アルゴリズムは, 選択可能なサーバ・ピアの集合の中から総消費電力量が最少となる $N+1$ 台のサーバ・ピアを選定する. 評価では, 実装したシミュレーション環境を用いて, ハードウェア構成の異なる9台のピアに対して, 計算量の異なる400個の計算プロセスを多重実行した場合に9台のピアで消費された総電力消費量[KWs]と総実行時間の増加率を測定した. また, ラウンド・ロビン(RR)アルゴリズムを用いて同一の計算プロセスをピアに配置した場合の測定結果と比較した. 図1は, 計算プロセスの多重度 $rd = N+1$ を1から9まで変化させた場合の総電力消費量を示す. 図中の RPCLB(rd) および RR(rd) は, それぞれ RPCLB および RR アルゴリズムでサーバ・ピアを選定した場合の総電力消費量[KWs]を示す. シミュレーションの結果から, 多重度が5以下の場合, RPCLB アルゴリズムが RR アルゴリズムに比べて総電力消費量を削減できることが分か

った. 一方で, 多重度が6以上の場合, 総電力消費量が RR アルゴリズムとほぼ同一となることが分かった.

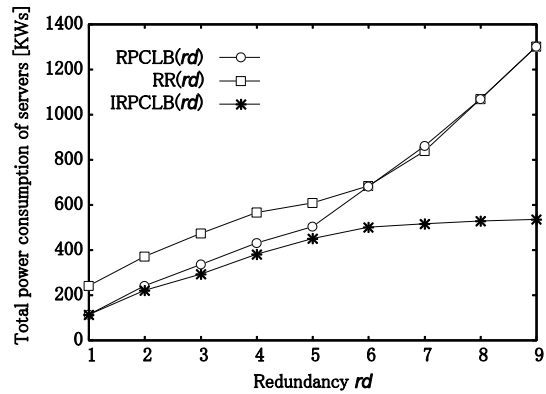


図1 総電力消費量[KWs]

図2は, 計算プロセスの多重度 rd を1から9まで変化させた場合の総実行時間の増加率を示す. 図中の RPCLB(rd) および RR(rd) は, それぞれ RPCLB および RR アルゴリズムでサーバ・ピアを選定した場合の総実行時間の増加率を示す. シミュレーションの結果から, RPCLB アルゴリズムが RR アルゴリズムに比べて総実行時間の増加率を削減できることが分かった. 以上の結果から, RPCLB アルゴリズムが RR アルゴリズムに比べて有効であることが分かった.

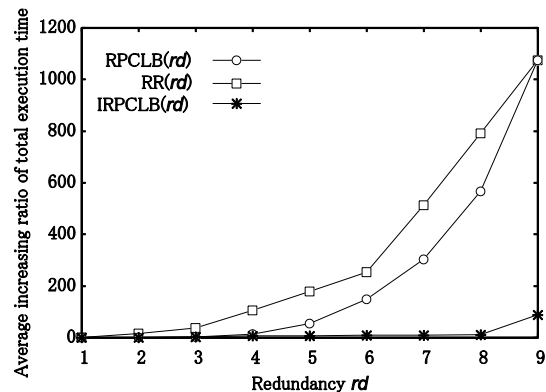


図2 総実行時間の増加率

(3) 多重化制御方式の提案

RPCLB アルゴリズムでは, 3(3)節で示したように障害の発生状況や応用プログラムの特性によっては, 不必要な応用プログラムの実行による電力の浪費が発生する. よって, 不要な計算プロセスの実行を止めることでさらなる省電力化が可能となる Improved Redundant Power Consumption Laxity Based (IRPCLB) アルゴリズムの設計と実装を行った. IRPCLB アルゴリズムでは, 計算プロセスを配置するサーバ・ピアの選定アルゴリズムとして RPCLB アルゴリズムを使用する. 一方で, サーバ・ピア上で計算プロセスが完了した時に同一の計

算プロセスを多重実行している他のサーバ・ピアに完了通知を送信する機能を追加する。この機能を追加することにより、各サーバ・ピアは、既に他のサーバ・ピア上で実行が完了している計算プロセスの実行を停止することが可能となる。さらに、不要な計算プロセスの実行に使用していた計算資源を他の計算プロセスに割当てることが可能となる。評価では、実装したシミュレーション環境を用いて、ハードウェア構成の異なる9台のピアに対して、計算量の異なる400個の計算プロセスを多重実行した場合に9台のピアで消費された総電力消費量[KWs]と総実行時間の増加率を測定した。また、この結果をRPCLBおよびRRアルゴリズムを用いて同一の計算プロセスをピアに配置した場合の測定結果と比較した。図1および図2のIRPCLB(rd)は、IRPCLBアルゴリズムでサーバ・ピアを選定した場合の総電力消費量および総実行時間の増加率を示す。シミュレーションの結果から、IRPCLBアルゴリズムがRPCLBおよびRRアルゴリズムに比べて総電力消費量および総実行時間の増加率を削減できることが分かった。以上の結果から、IRPCLBアルゴリズムがRPCLBおよびRRアルゴリズムに比べて有効であることが分かった。

(4) ピアグループ選定アルゴリズムの改良

4(2)および4(3)節で提案したRPCLBおよびIRPCLBアルゴリズムでは、アルゴリズムを開始する前にクライアント・ピアが対象となるサーバ・ピア上の計算プロセスの実行状態を取得する必要がある。IRPCLBおよびRPCLBアルゴリズムの評価を行った結果、サーバ・ピアとクライアント・ピア間の通信遅延時間に対して、計算プロセスの実行時間が短い場合にサーバ・ピアの電力消費量と計算プロセスの応答時間の推定誤差が大きくなることが分かった。これは、クライアント・ピアがサーバ・ピア上で実行されている計算プロセスの実行状態を取得するための通信を行っている間にサーバ・ピア上の計算プロセスの状態が大きく変化するためであることが分かった。実環境でIRPCLBおよびRPCLBアルゴリズムを使用した場合、この推定誤差の影響がシステム全体の電力消費量に大きく影響する。よって、クライアント・ピアとサーバ・ピア間で計算プロセスの状態を取得するための通信を行わずにサーバ・ピアの電力消費量と計算プロセスの応答時間を推定できるRedundant Delay Time Based (RDTB)アルゴリズムの設計と実装を行った。RDTBアルゴリズムでは、ピア間の通信遅延時間に対して、計算プロセスの実行時間は非常に短く無視できることを前提としている。ここで、サーバ・ピアが高負荷状態でなければ、クライアント・ピアはサーバ・ピアからの応答を想定したラウンド・トリップ時間内に受信することが可能である。一方で、サーバ・ピアが高負荷状態であれば、応答時間が想定したラウンド・トリップ時間

よりも長くなる。よって、RDTBアルゴリズムでは、応答時間が想定したラウンド・トリップ時間よりも長くなっているサーバ・ピアを高負荷状態のサーバ・ピアであると判定する。また、応答時間から想定したラウンド・トリップ時間を引いた時間を対象とするサーバ・ピア上で全ての計算プロセスを完了するために必要な総実行時間であるとする。よって、新たな計算プロセスをこのサーバ・ピアに配置した場合の総電力消費量[Ws]は、ラウンド・トリップ時間をもとに算出された総実行時間とサーバ・ピアの電力消費モデルから計算する。RDTBアルゴリズムは、選択可能なサーバ・ピアの集合の中から総消費電力量が最少となる $N+1$ 台のサーバ・ピアを選定する。評価では、実装したシミュレーション環境を用いて、ハードウェア構成の異なる9台のピアに対して、計算量の異なる60,000個の計算プロセスを多重実行した場合に9台のピアで消費された総電力消費量[KWs]、計算プロセスの平均応答時間およびシステム内で交換されたメッセージ数を測定した。また、この結果をRPCLBおよびRRアルゴリズムを用いて同一の計算プロセスをピアに配置した場合の測定結果と比較した。ここで、RPCLBアルゴリズムについては、通信遅延時間の影響によるサーバ・ピアの電力消費量の推定誤差が無い場合の結果を用いた。図3は、計算プロセスの多重度 rd を1から9まで変化させた場合の総電力消費量を示す。図4は、計算プロセスの平均応答時間を示す。図5は、システム内で交換されたメッセージ数を示す。評価結果から、RDTBアルゴリズムの総消費電力は、RRアルゴリズムよりも削減されるが、RPCLBよりも高くなることが分かった。計算プロセスの平均応答時間は、RDTB、RPCLB、RRアルゴリズムで同一となることが分かった。一方で、システム内で交換されるメッセージ数は、RPCLBアルゴリズムがRDTBおよびRRアルゴリズムの約3倍となることが分かった。以上の結果から、通信遅延時間の影響によるサーバ・ピアの電力消費量の推定誤差を考慮した場合、RDTBアルゴリズムがRPCLBおよびRRアルゴリズムよりも有効であることが分かった。

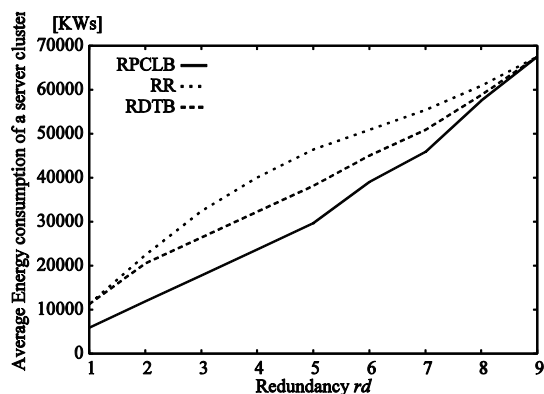


図3 総電力消費量[KWs]

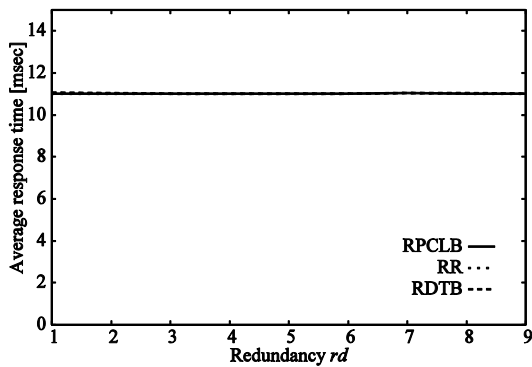


図4 プロセスの平均応答時間[msec]

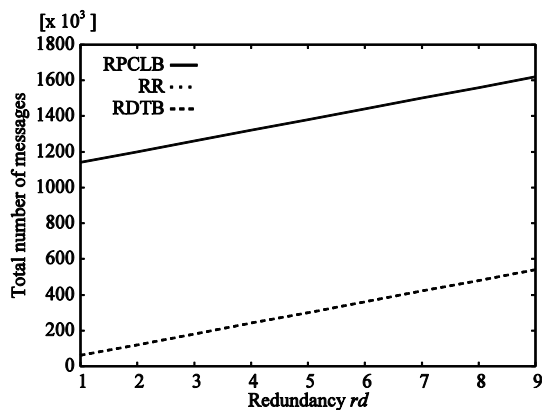


図5 メッセージ数

本研究では、計算プロセスを複数のピア上で多重実行する場合にピアの計算モデルと電力消費モデルをもとに P2P システム全体の消費電力を低減するためのピアの選定アルゴリズムと多重化制御方式を提案した。

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) Tomoya Enokido, Dilawaer Duolikun, and Makoto Takizawa, The Delay Time-Based Server Selection Algorithm for Energy-Efficient Redundant Execution of Processes, International Journal of Communication Networks and Distributed Systems (IJCND), 査読有, Vol. 15, No. 4, 2015, pp. 366-385.
- (2) Tomoya Enokido, Dilawaer Duolikun, and Makoto Takizawa, An Extended Improved Redundant Power Consumption Laxity-Based (EIRPCLB) Algorithm for Energy Efficient Server Cluster Systems. World Wide Web, 査読有, Vol. 18, No. 6, 2015, pp. 1603-1629.
- (3) Tomoya Enokido, Ailixier Aikebaier,

and Makoto Takizawa, Energy-Efficient Redundant Execution of Processes in a Fault-Tolerant Cluster of Servers, International Journal of Parallel Programming (IJPP), 査読有, Vol. 42, No. 5, 2014, pp. 798-819.

- (4) Tomoya Enokido, Ailixier Aikebaier, and Makoto Takizawa, An Extended Simple Power Consumption Model for Selecting a Server to Perform Computation Type Processes in Digital Ecosystems. IEEE Transactions on Industrial Informatics (IEEE TII), 査読有, Vol. 10, No. 2, 2014, pp. 1627-1636.
- (5) Tomoya Enokido, Ailixier Aikebaier, and Makoto Takizawa, Energy-Efficient Server Clusters to Perform Communication Type Application Processes, The Journal of Supercomputing, 査読有, Vol. 69, No. 3, 2014, pp. 1087-1102.

[学会発表] (計 15 件)

- (1) Tomoya Enokido and Makoto Takizawa, An Energy-Efficient Load Balancing Algorithm for Virtual Machine Environments to Perform Communication Type Application Processes, The 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2016), March 23-25, 2016, Crans-Montana, Switzerland.
- (2) Tomoya Enokido and Makoto Takizawa, Power Consumption Model of a Server to Perform Communication Type Application Processes on Virtual Machines, The 10th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2015), November 4-6, 2015, Krakow, Poland.

[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]

<http://ktr01.ris.ac.jp/~eno/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
榎戸 智也 (ENOKIDO TOMOYA)
立正大学・経営学部・教授
研究者番号: 10360158