

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25年 6月11日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21500041

研究課題名（和文） 高速・高信頼・高可用かつ低消費電力型の汎用自律分散処理システムの
実現研究課題名（英文） Implementation of a High-Performance, High-Reliable, High-Available
and General-purpose Autonomous Distributed Processing System

研究代表者

甲斐 宗徳 (KAI MUNENORI)

成蹊大学・理工学部・教授

研究者番号：40194659

研究成果の概要（和文）：本研究では、低レイテンシネットワークを用いたヘテロジニアスグリッド環境において、自律型分散処理システムを実現する要素技術の開発と評価を行った。開発したモバイルエージェントシステム AgentSphere は通常の Java 仮想マシン上で強マイグレーションを実現しており、エージェントで記述されたプログラムが自律的に移動し、ユーザの介入なしに自動で処理の高速化やシステム全体の消費電力を抑えた分散処理を実現するものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, the primary technologies for an autonomous distributed processing system based on strong-migration mobile agent has been developed and evaluated on a prototype of heterogeneous multi grid environment with low latency network. The strong-migration mobile agent system, called AgentSphere, has realized strong-migration of agent on the ordinary Java virtual machines (JVMs), and has possibilities that Java programs described as mobile agents can autonomically migrate among a computer network. Its users can construct any distributed processing system that automatically execute high-performance and low power consumption parallel or distributed processing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：ソフトウェア

キーワード：並列処理・分散処理

1. 研究開始当初の背景

近年、グリッドに代表されるように、コンピュータ群とネットワークを利用して並列・分散処理を可能にする高性能の計算資源の提供が行われている。しかし、それら計算資源の潜在能力を十分に引き出すことは容易ではない。ユーザは自身のアプリケーション

の構造はよく把握しているので、アプリケーションに内在する並列性および機能分散の構造を決定することはできる。一方、利用する計算資源にその並列性や機能分散の構造を効率よくマッピングするためには、計算資源を構成する処理要素の性能や通信ネットワーク能力に関する知識（静的な情報）に

加え、マルチユーザ利用環境によって動的に変化するシステムの状態を把握しなければならない。すべての構成要素が同じ能力とは限らず、すでに投入された他のアプリケーションによって、構成要素の処理能力が相対的に低下している状態にあるかも知れない。その状態を無視して常に同じ並列分散計画を行っても高い処理効率は得られにくい。計算資源の静的および動的な状態変化を把握してアプリケーションの分散方式を考えることは、ユーザにとって非常に難しい問題であると考えられる。

このような難しさを解消するには、システム自体に自身の状態を把握して負荷分散の効率化を図る能力、すなわち自律性が必要となる。本研究の構想は「グリッドやネットワーク結合された複数のコンピュータ群において、計算資源について詳しく知らないユーザでも、分散処理の恩恵、すなわち高い処理性能と高い信頼性、低消費電力化を同時に得られる自律型分散処理システムを構築すること」である。この構想に基づき、構成要素となるコンピュータやその OS に依存しないで並列分散処理を行うため、最もポピュラーになりつつある Java を利用するとともに、本研究では、モバイルエージェント技術を用いて高い処理能力・高信頼性を低コストで提供し、操作やコーディングが簡単で、専門知識の無いユーザでも手軽に安定した分散並列処理を行えるような自律型分散処理システム環境を提供する。

従来の自律型分散処理システムでは、計算資源がどんな状況の時にエージェントが移動するかといった制御が、アプリケーションとして動くエージェント自身を作成するユーザの手に委ねられている。従って本来のアプリケーションの処理以外に並列分散処理の制御のための記述を含む複雑なエージェントを作成しなければならなかった。本研究ではユーザをそのような状況から解放するシステムを目指す。

自律型分散処理システムの構築に利用できるモバイルエージェントシステムとしては、3種類のモビリティを利用したものがそれぞれ存在する。1つ目の遠隔実行は JavaApplet のような単純なものである。2つ目は弱マイグレーションであり、AgentSpace や Aglet 等の Java ベースのモバイルエージェントシステムが採用している。これらは Java に予め備わっている機能（ヒープ領域内のデータの直列化）を使って移動を実現している。しかし、移動後にエージェントの処理を開始するコールバックメソッドが決まっているため、移動後の処理を自由に変更することが出来ない。3つ目は強マイグレーションであり、Java ベースで強マイグレーションを実現しているものには MOBA[等がある。た

だし Java 仮想マシン（以下 JVM）に手を加えて専用化しているため、色々な種類の計算資源で利用することができない。本研究では Java 仮想マシンはそのまま強マイグレーションを実現することを目指している。本研究が成功することにより、現状の Java を利用可能な様々な計算資源を含めた自律型分散処理システムを構成することが可能となる。

2. 研究の目的

まず自律型分散処理システムをサポートするために必要なモバイルエージェントを明らかにする。これは、従来型の自律型分散処理システムを構成するときに作成された高機能で大規模なエージェント、いわば万能なエージェントに代わって、様々な単純で専門的な機能のみを持つ多数のモバイルエージェントによって柔軟な自律型分散処理をサポートするための方法を確認することである。人間社会が様々な専門職を持つ多数の人々によって支えられてうまく調和を保っているように、どんなエージェントの存在が高効率・高性能・高信頼性を維持した自律型分散処理システムに必要であるかを明らかにする。

さらに個々のエージェントは高い信頼性を持ち、少なくともネットワークや計算資源の局所的な不測の事態によって停止した場合でも自己復旧できる能力が必要となる。その復旧能力と真の意味でのエージェントの計算資源間の移動を実現するために、強マイグレーション方式を確認しなければならない。本研究では JVM の変更をしないで済む Java ベースの強マイグレーションの実現方法を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 強マイグレーションに基づくモバイルエージェントの実現

ネットワーク内のコンピュータ間においてモバイルエージェントを必要に応じて出入りさせるため、コンピュータ自身にエージェントの活動をサポートする環境を準備する。この環境とエージェント自体は、様々なコンピュータを利用するヘテロジニアスな環境をターゲットするため、Java を用いて開発する。

モバイルエージェントのモビリティには、自律型分散処理システムに利用するという目的を満たすため、強マイグレーションを実現しなければならない。しかし Java は本来弱マイグレーションしか可能としていない。そこで弱マイグレーションである Java において強マイグレーションするように記述されてエージェントを実行するしくみが必要となる。具体的には Java の直列化機能を用

いてエージェントに強マイグレーション動作させるため、プログラムコードの実行位置と実行途中の記憶領域をすべて移動させる必要がある。これを実現するため、強マイグレーション記述されたエージェントのプログラムコードを、弱マイグレーション環境で強マイグレーション可能なソースコードに自動変換する方法を構築する。

(2) ヘテロジニアスグリッド環境の構築

想定以上の資源要求が発生するふくそう状態においてもモバイルエージェントが計算資源とネットワーク資源の両方を同時に利用継続できることがサービス提供の上で重要となる。このため、ふくそう状態においても計算資源とネットワーク資源の両方を同時に利用継続し、かつ資源効率を高めるふくそう時資源割当て機能を検討し、新たな機能として加える。

また、複数のモバイルエージェントで同じ計算資源ならびにネットワーク資源を共用する場合、モバイルエージェント間の公平性を確保する必要がある。各モバイルエージェントに計算資源とネットワーク資源の両方を同時に割り当てることを前提に、公平な資源割当て機能を検討し、新たな機能として加える。

(3) マルチグリッド環境における自律型分散処理システム用プラットフォームの構築

①モバイルエージェントがマルチグリッド環境で他のコンピュータに移動する時、エージェントのクラスファイルが移動先のJava環境で動的に認識されなければならない。しかしJavaではJVMの起動時に静的なクラスパスにあるクラスしか認識できないという制限があるため、新しい未知のクラスを動的に認識して実行できるようにする仕組みを構築する。

②並列分散処理における負荷分散や通信オーバーヘッドの削減を考慮し全体的な処理時間を短縮する問題を最適化問題としてとらえ、これを解くための効果的なアルゴリズムの構築を行う。

③マルチグリッド環境においては、計算資源やネットワーク資源などの資源種別だけでなく、ネットワーク資源であれば遅延時間やパケット廃棄率などの資源属性も考慮する必要がある。また、同じグリッド資源でも利用するエージェントの位置により提供される計算資源やネットワーク資源などのサービス品質（ネットワーク遅延時間など）が異なる。さらに、モバイルエージェントの処理内容により求められるセキュリティレベルも異なる。これらの点を踏まえ、アクセス位置や要求するサービス品質が異なる様々なエージェントに対する最適資源割当て機能を明らかにする。

④モバイルエージェントの広域での強マイ

グレーションを考慮ることにより、資源の効率的利用、動的な負荷分散、障害時の迅速な復旧が期待できる。しかし、マイグレーションに伴い利用できる帯域減少や遅延増が発生し、マイグレーション後に通信性能が大幅に劣化する可能性がある。この通信性能劣化を回避する機能を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 強マイグレーションモバイルエージェントシステム AgentSphere

強マイグレーション可能なモバイルエージェントコードを記述するためにJavaコードに追加するメソッドはmigrate()である。このmigrate()の記述を含むJavaコードを通常のJVMで動作させるためのコード変換方式の基本形を図1に示す。migrate()メソッドではまずローカル変数をすべてヒープ領域

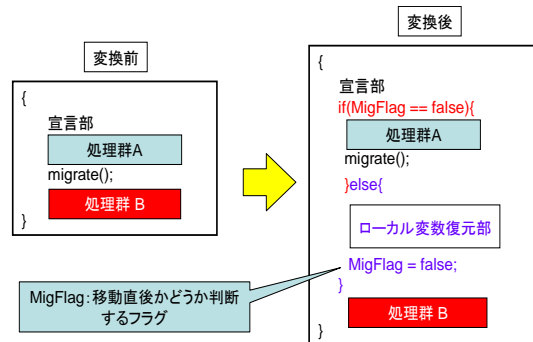


図1 変換の基本形

に退避し、プログラムコードと一緒に宛先のコンピュータへ移動する。移動先でプログラムは最初から実行を開始されるが、図1のコード変換によってスタック領域を再構築する処理だけを行ってすぐにmigrate()メソッドの直後まで進み、そこで退避していたローカル変数をスタックに復元する。この方法でプログラムカウンタを移動できないJVMにおいて、中断していた箇所からプログラムを再開することができ、強マイグレーションを実現した。

上記のモバイルエージェントを起動したり、他のコンピュータから移動してくるエージェントを受け入れたりする基本的なモバイルエージェントのサポートを行う機能を持つものをAgentSphereと名付けて開発した。ネットワーク内で自律型分散処理に参加するコンピュータはこのAgentSphereを動作させ、モバイルエージェントの出入りする空間を提供することとなる。

(2) 低レイテンシのヘテロジニアスグリッド環境

①広域に分散した複数のグリッド環境を前提に、各グリッドが異なるサービス品質の資源を提供する場合の複数資源の最適同時割当て方式（方式1）を提案した。基本的な考え方は、『制限の最も厳しい資源種別とその

資源属性に着目し、その着目した資源種別と資源属性の中で最も制限の厳しくない資源を選択し、後から発生するより制限の厳しい要求を処理できるようにする』である。また、方式1は、要求されるセキュリティレベルなどに応じてグリッドを使いわけることが可能である。

方式1の資源割当てアルゴリズムの概要を以下に示す。

・‘キー資源属性’の特定：複数ある資源種別ならびに資源属性の中で最も相対資源量が小さいものをキー資源属性とする。

・グリッド群の特定：キー資源属性に対応した資源種別ならびに資源属性に注目し、キー資源属性が提供するサービス品質以下のサービス品質を提供する資源を持つグリッド群（X）、同等のサービス品質を提供する資源を持つグリッド群（Y）、それ以上のサービス品質を提供する資源を持つグリッド群（Z）、に分ける。

・グリッド選択：キー資源属性に対応するサービス品質以下の品質を必要とするエージェントに対しては、まずグリッド群Xの中から最適なグリッドを選択する。最適なグリッドは最繁群選択（best-fit法）により決定する。選択できるグリッドがない場合は、次はグリッド群Y、グリッド群Zの順番で選択可能なグリッドを探す。キー資源属性に対応するサービス品質を必要とするエージェントに対しては、まずグリッド群Yの中から最適なグリッドを選択する。該当するグリッドがない場合は、次にグリッド群Zの中からグリッドを選択する。また、キー資源属性に対応するサービス品質より上の品質を必要とするエージェントに対しては、グリッド群Zの中から最適なグリッドを選択する。

・資源割当て：選択されたグリッドからエージェントに必要な資源種別・資源属性の資源を割当てる。

C言語を用いたシミュレーション評価を実施し、提案する方式1は従来方式に比べ要求棄却率を低下させ、かつ総資源量を最大で30%程度削減できることを示した。

さらに、同一グリッドであってもアクセス地点によりネットワーク遅延時間が異なる場合にも最適な資源割当てができるよう方式1を拡張した。具体的には、ネットワーク遅延に対する要求が厳しくないエージェントには遅延時間の大きいグリッドをまず選択させ、後で発生するネットワーク遅延に対する要求が厳しいエージェントに対する資源をより多く確保するものである。シミュレーション評価により、拡張方式は従来方式に比べ必要資源量を最大で20%程度まで削減できることを明らかにした。

②モバイルエージェント移動後にWAN高速化機能をネットワーク側で動的に挿入するこ

とにより、モバイルエージェント移動後の通信性能劣化を防止する方式を提案した。現状のWAN高速化装置を利用するためにはTCPコネクションの新たな設定が必要であり、mSCTPをベースに移動前と移動後で別TCPコネクションを利用する新たな移動方式を提案した。さらに、仮想化システムとしてVirtualBoxを前提とした評価システム(図2)を構築し、提案方式の有効性を確認した。本機能により、モバイルエージェントのマイグレーション活用範囲を一層拡大させることが期待できる。

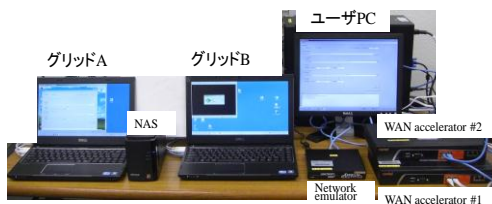


図2. 構築した評価システム

(3) 自律型分散処理システム向けプラットフォーム

①AgentSphereは通常のJVMで動作する。本研究で想定したのは、規模が不定で随時増加減少するPC群からなるネットワークである。このように、ネットワーク上にJVMが動作できるコンピュータを多数接続したヘテロジニアスな処理環境では、あるクラスのインスタンスをコンピュータ間で移動可能にすることで様々なメリットが考えられる。しかし、本来JVMではそれが起動時に設定されたクラスパス以外のクラスを動的に導入して実行することはできなかった。本研究はこの問題を多階層型クラスローダと特別なオブジェクトストリームおよび転送オブジェクトのディスパッチ機構を通常のJVM上で実装することにより、動的に未知クラスを認識して実行できる機構を新しく実現した。この要素技術は並列分散処理のフレームワークには必要不可欠であるとともに、一時的にも停止できないソフトウェアサービスなどの実現にもつながる。

②AgentSphereの利用目的として、複数台のPCがつながれた環境を並列処理による高速化に利用することが考えられる。本研究では、単一JVMで使うことができるThreadPoolと同様の働きを持つAgentPoolを実現した。ただしAgentSphereでは複数のAgentSphereにエージェントが移動して処理できるので、単一JVMで使えるThreadPoolよりも多くのプロセッサコアを利用することができ、並列処理性能を上げることが可能である。この機能を作成するにあたり、プログラムの記述方式をConcurrency Utilitiesに合わせていくことで、JavaAPIによる並列実行機能の利用者

がこの機能を習得するのに余計な時間をかけないで済むように工夫した。このAgentPoolを利用して大量の並列タスクを生成して実行するアプリケーションの例としてNQueens問題を並列実行の対象にした結果では、15Queenの問題を1台のPCで解く場合と比べて、64台の同性能のPCを用いて解いた場合に、80%の並列化効率で50.7倍の高速化を達成した。

③エージェントが処理能力に余裕のあるコンピュータを選んで自律的に移動したり、他のAgentSphereで活動するエージェントにメッセージを送ったりするためには、参加しているAgentSphereの情報およびネットワークに分散しているエージェントの情報を共有し、必要な情報をできる限り高速に取得できるようにするしくみが必要である。このようなAgentSphereにおいてマシン間の情報共有の方法に関する問題を解決するために、オーバヘッドが大きくなる単純なブロードキャストではなく、分散ハッシュテーブルの一種であるMercuryという手法を用いて解決を行った。Mercuryでデータを分散するときには、あらかじめデータの属性をすべて定義済みしておくなければならない。しかしAgentSphereではエージェントの自律的な活動によって新規の属性を取り扱うことになるのは当然であるため、そのたびにMercuryの再起動が必要になると合わせてAgentSphereも再起動しなければならないことになる。これは、根本的にはJavaで開発を行った場合に生じる、未知クラスをオブジェクト化できないという問題に起因している。この問題に対してAgentSphereの動的クラスローダを利用することでMercury自体の再起動なしに新規の属性を扱うことができるようにMercuryに対する拡張を行った。これによりAgentSphereでのエージェント間およびAgentSphere間での情報共有がネットワークに高い負荷をかけることなく実現できることになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

- ①小峰瞭芽、栗林伸一：「広域ライブマイグレーション時間短縮法の提案」、成蹊大学理工学研究報告、査読無、Vol. 50、No. 1、2013
- ②山口大祐、甲斐宗徳：「AgentSphereにおけるAgentPoolの実現とMaster/Slave型並列APIの作成」、成蹊大学理工学研究報告、査読無、Vol. 49、No. 1、2012、13-18
- ③栗田浩一、甲斐宗徳：「通信遅延を含むタスクスケジューリング問題の並列分枝限定法に基づく探索解法」、成蹊大学理工学研究報告、査読無、Vol. 50、No. 1、2013
- ④鈴木幸祐、甲斐宗徳：「AgentSphereにお

ける分散ハッシュテーブルを用いた情報共有機構」、成蹊大学理工学研究報告、査読無、Vol. 50、No. 1、2013

⑤S. Kuribayashi, "Improving Quality of Service and Reducing Power Consumption with WAN accelerator in Cloud Computing Environments", International journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), 査読有, Vol.5, No.1, 2013, pp. 41-52.

⑥Y. Awano, S. Kuribayashi: "Proposed Joint Multiple Resource Allocation Method for Cloud Computing Services with Heterogeneous QoS", CLOUD COMPUTING 2012: The Third International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, 査読有, 2012, 1-6

⑦ T. Tomita, S. Kuribayashi: "Congestion control method with fair resource allocation for cloud computing environments", Proc. of IEEE PACRIM'11 on Communications, Computers and Signal Processing, 査読有, 2011, 1-6

⑧ S. Kuribayashi: "Proposed congestion control method for cloud computing environments", International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), 査読有, Vol.3, No.5, 2011, 161-176

⑨Daisuke YAMAGUCHI, Yuuki AKAI, Munenori KAI: "Design and Implementation of Serializing Method for Non-procedural Object Transfer between JavaVMs", Proc. of IEEE PACRIM'11 on Communications, Computers and Signal Processing, 査読有, 2011, 262-267

⑩T. Yoshino, S. Kuribayashi: "Evaluation of congestion control methods for joint multiple resource allocation", 国際会議NBIS2010, 査読有, 2010, 94-97

⑪ Y. Akai, K. Wakao, T. Yokouchi, M. Kai: "Development of the Strong Migration Mobile Agent System AgentSphere for Autonomic Distributed Processing", Proc. of IEEE PACRIM'09 on Communications, Computers and Signal Processing, 査読有, 2009, 582-587

⑫ T. Kondoh, F. Kato, M. Kai: "Implementation of self-backup mechanism and inter-agent communication for strong migration mobile agent system", Proc. of IEEE PACRIM'09 on Communications, Computers and Signal Processing, 査読有, 2009, 576~581

⑬ K. Tatakeyama, Y. Osana, M. Tanabe and S. Kuribayashi: "Proposed congestion control method reducing the size of

required resource for all-IP networks”, Proc. of IEEE PACRIM’09 on Communications, Computers and Signal Processing, 査読有, 2009, 1~4

〔学会発表〕(計 14 件)

- ①粟野勇輝、栗林伸一：「アクセス位置によりサービス品質が異なるクラウドコンピューティング環境の最適複数資源同時割当て方式」、電子情報通信学会 ICM 研究会、2013. 3、屋久島環境文化村センター
- ②疋田直也、鈴木幸祐、甲斐宗徳：「モバイルエージェントシステム AgentSphere の開発 —強マイグレーションコードのための構文木を利用したソースコード変換器—」、FIT2012(第 11 回情報科学技術フォーラム)、2012. 9. 5、法政大学
- ③黒崎信清、甲斐宗徳：「モバイルエージェントシステム AgentSphere の開発 —エージェント移動プロトコルの設計と実装—」、FIT2012(第 11 回情報科学技術フォーラム)、2012. 9. 5、法政大学
- ④大久保秀、甲斐宗徳：「モバイルエージェントシステム AgentSphere の開発 —デバッグ補助機能を持つオブジェクト操作可能なシェルの開発—」、FIT2012 (第 11 回情報科学技術フォーラム)、2012. 9. 5、法政大学
- ⑤粟野勇輝、栗林伸一：「異なるサービス品質を提供するクラウドコンピューティング環境における最適複数資源同時割当て方式の提案」、電子情報通信学会 ICM 研究会、2012. 3、沖縄県男女共同参画センター (那覇市)
- ⑥亀屋俊介、粟野勇輝、栗林伸一：「クラウドコンピューティング環境における省エネならびにサービス品質向上対策の提案」、電子情報通信学会 ICM 研究会、2012. 3、沖縄県男女共同参画センター (那覇市)
- ⑦鈴木幸祐、山口大祐、甲斐宗徳：「モバイルエージェントシステム AgentSphere における強マイグレーション機構の改良」、FIT2011 (第 10 回情報科学技術フォーラム)、2011. 9. 9、函館大学
- ⑧山本拓哉、山口大祐、甲斐宗徳：「モバイルエージェントシステム AgentSphere における通信プロトコルの開発」、FIT2011 (第 10 回情報科学技術フォーラム)、2011. 9. 9、函館大学
- ⑨山口大祐、市川顕、白谷浩次郎、甲斐宗徳：「強マイグレーションモバイルエージェントシステム AgentSphere におけるエージェントの活動管理」、FIT2010 (第 9 回情報科学技術フォーラム)、2010. 9. 7、九州大学伊都キャンパス
- ⑩長名保範、栗林伸一：「クラウドコンピューティング環境におけるふくそう制御方式の適用領域評価」、電気学会通信研究会、

2010. 6. 24、北見工業大学 (北海道)

- ⑪宮田大輔、長名保範、栗林伸一：「複数種別資源同時割り当てを前提として公平性アルゴリズム拡張方式の評価」、電子情報通信学会情報通信マネジメント研究会、2010. 3. 11、沖永良部 (鹿児島県)
- ⑫赤井雄樹、若尾一晃、横内貴、甲斐宗徳：「強マイグレーションモバイルエージェントシステム AgentSphere の開発」、FIT2009(第 8 回情報科学技術フォーラム)、2009. 9. 2、東北工業大学八木山キャンパス (宮城県)
- ⑬近藤敬宏、加藤史彬、甲斐宗徳：「強マイグレーションモバイルエージェントの自己バックアップ機能とエージェント間通信の実装」、FIT2009 (第 8 回情報科学技術フォーラム)、2009. 9. 2、東北工業大学八木山キャンパス (宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 宗徳 (KAI MUNENORI)
成蹊大学・理工学部・教授
研究者番号：40194659

(2) 研究分担者

栗林 伸一 (KURIBAYASHI SHINICHI)
成蹊大学・理工学部・教授
研究者番号：30384655