

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650010

研究課題名(和文) ゲーム論的アプローチによる自律分散システムの構築

研究課題名(英文) Game theoretic approach to autonomous mechanism in distributed systems

研究代表者

加藤 和彦 (Kato, Kazuhiko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：90224493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：自律分散型のインターネットサービス基盤の構築を目指し、研究を遂行した。特に、高い可用性と運用コストの削減を目指し、ゲーム理論の成果を取り入れた分散アルゴリズムの設計を行った。その基本的なアイデアは、システムを構成する計算機を利己的に振る舞う主体と見なし、各計算機はシステムの運用の貢献度に応じて利得を得るというものである。本研究課題では、上記の考え方に基づいたゲーム論的なモデルを与え、さらにポテンシャルゲームや受動的複製手法のアイデアを基にアルゴリズムを考案した。さらに、様々な障害に対する耐性や消費電力の削減について、プロトタイプ実装による評価を行い、その有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：We developed an autonomous distributed mechanism for Internet service platforms. In particular, we investigated a game-theoretic approach for high availability and power reduction in service platforms. The key idea was to consider nodes in a system as selfish agents playing a game in which each node may receive a payoff according to the level of contribution to providing services. In this research project, we gave a game-theoretic model then developed a distributed algorithm in terms of the idea of potential game and the passive-replication. We also demonstrated the service availability provided by our approach for simulated failure patterns. In addition, we evaluated the effectiveness of our power reduction mechanism in an environment where workload of the system may vary in time by using a prototype implementation.

研究分野：システムソフトウェア

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：自律分散システム ゲーム理論 耐障害 省電力

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、分散システムの構築技術は、クラウドコンピューティングと総称される大規模な広域分散システムを可能にし、さまざまな商用サービスの運用を実現させるにまで至っている。また、その規模は急速な拡大を続けており、そのため、従来技術に代わる拡張性に富んだ基盤システムの構築技術が求められている。そのためのアプローチの一つとして、自律分散型のシステムが考えられてきた。これは、中央コントローラを排し、各計算機を自律的に動作させながら、障害からの自動復旧やサービス要求に対するスケールイン・スケールアウトを行うというものである。一方で、経済学分野で発展を遂げてきたゲーム理論を、情報科学分野に応用する試みが注目され始めていた。こうした背景の下で、ゲーム理論の考え方を基にした自律分散システムの構築に期待が寄せられていた。

#### 2. 研究の目的

本研究は、高い拡張性と耐障害性を備え、また運用コストの削減も考慮したインターネットサービス基盤の構築を目的としている。特に本研究では、ゲーム理論の成果を基にした自律分散システムの構築を目指した。より具体的には、まずゲーム理論を基にした分散システムのモデルを与えることを目標とした。その基本原理は、システムを構成する各計算機を利己的に振る舞う主体と見なし、システム全体の機能を実現するために、その計算機がどれだけ貢献したかに応じて利得が配分されるというものである。次に、この原理のアルゴリズムの設計、およびプロトタイプ実装を行い、ネットワーク分断や大規模なノード故障に対する可用性を評価するとともに、サービス要求への応用性能やシステムの電力消費量などの計測により、本研究の成果として得られた手法の有用性を示すことを最終的な目標とした。

#### 3. 研究の方法

本研究課題は、大きく二つの段階を設けて遂行された。前半では、本システムの動作原理となるゲーム理論を基にした分散アルゴリズムの設計と、耐障害性と省電力性の二つの要求を満たすシステムの設計を行った。後半では、上記の設計を基にプロトタイプ実装を行う。特にここでは、これまでの研究経験に基づき、仮想化技術を用いたアプローチが採用された。これにより、仮想マシンの複製手法により耐障害性を実現しつつ、また一方で、サービス要求の変化に応じて仮想マシンを複数の物理マシン上で移動させることにより、スケールイン・スケールアウトを行い、省電力化の実現を目指した。さらに、この実装を用いた障害復旧の実証を行うとともに、サービス要求への応答性能やシステムの電力消費量の計測などにより、提案手法の有用性の実証が試みられた。

#### 4. 研究成果

平成 24 年度は、目的とするシステムの動作原理を、分散アルゴリズムのモデル上で確立することを目指して研究が遂行された。その主要な成果としては、目的とするシステムの動作原理の根幹をなす計算機間のプロトコルの構築があり、その概要は以下の通りである。まず、複数の物理マシンと、その上で稼働する仮想マシンによって構成される分散システムを想定し、サービスはこの仮想マシン層によって提供される。仮想マシンは全て同一のプログラムのインスタンスであり、どのサービス提供グループの構成要素ともなり得るものとする。さらに、ゲーム理論の基本概念である「利己的な」動作原理に基づき、各仮想マシンは自律的に自らの利得を最大化すべく、他の計算機と連携して一つのサービス提供グループの構成要素としての役割を担う。各グループでは、前述のように「連携したグループ内での機能維持への貢献度」に応じて、各仮想マシンに報酬が支払われる。すなわち、サービス要求に応えた分だけ、サーバの役割を担う仮想マシンの持つ「口座」に対価が振り込まれ、サーバは一定時間ごとにその口座から報酬をグループ内で配分するというものである。また、当初の目的の一つであるシステムの省電力化のアルゴリズムについても研究を進め、その成果を査読付き国際会議 (CloudComp 2012) などにて発表した。

続く平成 25 年度には、まず、故障ノードの代替のアルゴリズムと、システム全体の負荷に応じた稼働ノードの最適化のアルゴリズムを考案した。これらのアルゴリズムは、ポテンシャルゲームと呼ばれるゲームのクラスによるモデルを用いて、既存の受動的複製手法などを参考に構築されたものである。また、平成 25 年度の後半では、先に考案されたアルゴリズムを、シミュレーションとプロトタイプ実装の両方を用いて評価した。耐障害性については、過半数のノードの故障やネットワーク分断などに耐性を有することが示され、また省電力化についても、ノード間での負荷に偏りが生じるような状況において、自律的に負荷の集約が行われることが確認された。これらの成果は、2 本の査読付き国際会議論文などによって発表した。

本研究課題の遂行により、当初の目標であるゲーム理論による基盤システムの基本的なメカニズムの構築は、おおそ達成されたと言える。一方、今後の研究の展開に向けた課題としては、耐障害性の向上と省電力化の二つのアルゴリズムを完全に有機的に統合し、より実用的なシステムを構築することが挙げられる。また、当初は協力ゲームによって上記のシステムの実現を目指していたが、研究の遂行過程でポテンシャルゲームを採用することとなった。これは、目的を実現する上で、ポテンシャルゲームを用いる方がより容易であったためであるが、協力ゲームを

基にしたアルゴリズムの可能性について検討することも有意義であると考えられる。

#### 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3件)

Koji Hasebe, Naofumi Nishita, and Kazuhiko Kato. Highly Available Primary-Backup Mechanism for Internet Services with Optimistic Consensus. Proceedings of the IEEE Third International Workshop on Cloud Computing Interclouds, Multiclouds, Federations, and Interoperability (Intercloud 2014), 査読有, pp.410-416, 2014.

URL: <http://intercloud.cloudcom.org>

Koji Hasebe, Takumi Sawada, and Kazuhiko Kato. Using a Potential Game for Power Reduction in Distributed Storage Systems. Proceedings of the IEEE International Workshop on Software Defined Systems (SDS 2014), 査読有, pp.550-555, March 2014.

URL:

[http://www.staffs.ac.uk/personal/engineering\\_and\\_technology/eb26/SDS-2014/default.php](http://www.staffs.ac.uk/personal/engineering_and_technology/eb26/SDS-2014/default.php)

Jumpei Okoshi, Koji Hasebe, and Kazuhiko Kato. Power-Aware Autonomous Distributed Storage Systems for Internet Hosting Service Platforms, Proceedings of the 3rd International Conference on Cloud Computing (CloudComp 2012), 査読有, Springer LNICST vol.112, pp.52-61, 2012.

DOI: 10.1007/978-3-319-03874-2\_6

[学会発表](計15件)

Koji Hasebe, Naofumi Nishita, and Kazuhiko Kato. Highly Available Primary-Backup Mechanism for Internet Services with Optimistic Consensus. IEEE Third International Workshop on Cloud Computing Interclouds, Multiclouds, Federations, and Interoperability (Intercloud 2014), 査読有, pp.410-416, Boston, US, March 11, 2014.

Koji Hasebe, Takumi Sawada, and Kazuhiko Kato. Using a Potential Game for Power Reduction in Distributed Storage Systems. IEEE International Workshop on Software Defined Systems (SDS 2014), 査読有, pp.550-555, Boston, US, March 11,

2014.

大越淳平, 長谷部浩二, 加藤和彦. ファイル共有サービスにおけるアクセス傾向予測を用いた分散ストレージシステムの省電力化手法, 第11回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW 2013), 2013年12月26日・27日, ホテルリゾーピア熱海.

西田尚史, 長谷部浩二, 加藤和彦. 大規模なノード故障やネットワーク分断に対する可用性を持つ受動的複製手法, 第11回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW 2013), 2013年12月26日・27日, ホテルリゾーピア熱海.

Islam A.K.A.Md. Shariful, Koji Hasebe, Kazuhiko Kato. Network Traffic-Aware Power Optimization in Cloud Data Center, 第11回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW 2013), 2013年12月26日・27日, ホテルリゾーピア熱海.

澤田匠, 長谷部浩二, 加藤和彦. ゲーム理論を用いた大規模分散ストレージシステムの省電力化手法, 第11回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW 2013), 2013年12月26日・27日, ホテルリゾーピア熱海.

荒拓馬, 長谷部浩二, 加藤和彦. ゲーム論的アプローチによるクラウドコンピューティング上での動的な計算資源管理手法, 第11回 ディペンダブルシステムワークショップ (DSW 2013), 2013年12月26日・27日, ホテルリゾーピア熱海.

西田尚史, 長谷部浩二, 加藤和彦. 大規模なノード故障やネットワーク分断に対する可用性を持つ受動的複製手法, 日本ソフトウェア科学会第30回大会, 2013年9月10日~13日, 東京大学本郷キャンパス.

澤田匠, 長谷部浩二, 加藤和彦. ゲーム理論を用いた大規模分散ストレージシステムの省電力化手法, 日本ソフトウェア科学会第30回大会, 2013年9月10日~13日, 東京大学本郷キャンパス.

大越淳平, 長谷部浩二, 加藤和彦. ファイル共有サービスにおけるアクセス傾向予測を用いた分散ストレージシステムの省電力化手法, 日本ソフトウェア科学会第30回大会, 2013年9月10日~13日, 東京大学本郷キャンパス.

荒拓馬, 長谷部浩二, 加藤和彦. ゲーム論的アプローチによる仮想計算機への動的な物理コアの効率的割当の手法, 情報処理学会第75回全国大会, 2013年3月6日~8日, 東北大学川内キャンパス.

Islam A.K.A.Md. Shariful, Koji Hasebe, and Kazuhiko Kato. Decentralized Management for Power

Optimization in Cloud Data Centers Using VM Migration, 情報処理学会第75回全国大会, 2013年3月6日～8日, 東北大学川内キャンパス.  
大越淳平, 長谷部浩二, 加藤和彦. ホスティングサービスにおけるアクセス傾向予測を用いた分散ストレージシステムの省電力化手法, 情報処理学会 第75回全国大会, 2 ページ, 2013年3月6日～8日, 東北大学川内キャンパス.  
大越淳平, 長谷部浩二, 加藤和彦. ホスティングサービスにおける自律制御を用いた分散ストレージシステムの省電力化手法, 日本ソフトウェア科学会第29回大会, 2012年8月22日(水)～24日(金) 法政大学小金井キャンパス.  
Jumpei Okoshi, Koji Hasebe, and Kazuhiko Kato. Power-Aware Autonomous Distributed Storage Systems for Internet Hosting Service Platforms, Proceedings of the 3rd International Conference on Cloud Computing (CloudComp 2012), 査読有, Springer LNICST vol.112, pp.52-61, Wien, Austria, September 24-26, 2012.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 和彦 (KATO, Kazuhiko)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 90224493

### (2) 研究分担者

長谷部 浩二 (HASEBE, Koji)  
筑波大学・システム情報系・助教  
研究者番号: 80470045