

令和元年6月14日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00130

研究課題名(和文)アプリケーションコンテキストを考慮したインタークラウドマイグレーションの実現

研究課題名(英文)A study for the Intercloud migration mechanism considering application contexts.

研究代表者

近堂 徹 (Kondo, Tohru)

広島大学・情報メディア教育研究センター・准教授

研究者番号：90437575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複数の仮想サーバから構成される分散システムに対してしなやかさを提供することを目的としたクラウド(インタークラウド)間のシステムマイグレーション手法の提案と有効性の検証を行った。仮想計算機のグローバルライブマイグレーションやIPモビリティにおける品質保証制御を有機的に結合した新しいマイグレーション管理フレームワークを検討し、インタークラウド上で提供されるアプリケーションに対してユーザエクスペリエンスの課題解決に寄与できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後一層加速することが予想されるインタークラウド上でのアプリケーション(サービス)提供を見据え、そこで問題になるアプリケーションQoSやユーザ要求に対する課題解決手法の提案を行なった点が本研究成果の学術的および社会的意義である。自律分散システムをインタークラウド上で構築する際に検討が不可欠なシステム可用性やユーザ利便性を、アプリケーション特性に合わせて制御することができることを実験から示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed the system migration method among the intercloud environment to provide flexibility for distributed systems composed of multiple virtual servers.

We considered a new migration management framework that organically combined QoS control and IP mobility mechanism for global live migration, and integrated it. And our research showed that it can contribute to solving user experience issues for applications provided on the intercloud environment.

研究分野：情報工学

キーワード：インタークラウド ライブマイグレーション エッジコンピューティング QoS

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク技術の高度化や仮想化技術の発展を背景に、分散システム的设计・構築モデルが大きく変化しつつある。これまでハードウェアの制約を大きく受けていたOSやアプリケーションは、ネットワーク上の潤沢な計算資源（クラウド基盤）と連携する形で、必要な時に必要な分だけ効率的に構築することが可能となった。また、ネットワークの高速化等により、各拠点のクラウド基盤を統合的に管理・運用することでクラウド環境の多様性や分散性を実現するインタークラウド（広域分散クラウド）が現実的なものとなっており、継続性を確保したシステム開発・運用を推進できる環境が整いつつある。

一方、インタークラウド環境を効率的に利用したシステム構築・運用を可能にするためには解決すべき技術的課題も多い。なかでも「ストレージ可用性」「ネットワーク透過性」「資源連携に対する柔軟性」は今後のインタークラウド技術の発展には避けて通れない。ストレージ可用性（障害時に継続してデータアクセスができること）やネットワーク透過性（拠点間や組織間に計算インスタンスがマイグレーションした場合でも継続したアクセスができること）はこれまでも多くの研究が行われてきている。本研究課題では資源連携に対する柔軟性について焦点を当てる。これまでの研究で、インタークラウド（IaaS: Infrastructure as a Service を想定）の資源監視・制御については標準の仕様が定義され、実環境での検証も進みつつあるが、ハードウェアを主な監視対象としているため、その上で展開されるアプリケーションに対する監視とその情報をもとにした資源割当や制御については課題が残る。

### 2. 研究の目的

本研究では、複数の仮想サーバから構成される分散システムに対してしなやかさを提供することを目的として、ハードウェアやハイパーバイザの資源利用状況だけでなく、その上で動く仮想サーバ（VM）のアプリケーションの内部状態や状態遷移（コンテキスト）を考慮したクラウド間のシステムマイグレーションを実現する。このために、仮想計算機のグローバルライブマイグレーションやIPモビリティにおける品質保証制御を有機的に結合しつつ、広域分散クラウド上でのシステムマイグレーション管理フレームワークを提案する。さらに、複数組織をまたぐ実ネットワーク環境で利用可能なプラットフォームを構築し、プロトタイプシステムの実装と有用性の評価を行う。

### 3. 研究の方法

本研究の構想としては図1に示す通り、ライブマイグレーション管理技術、システムアプリケーション管理・監視技術、アプリケーションQoS技術、クラウド連携技術に細分化可能な要素技術を組み合わせる。具体的には、(ア) 仮想化された分散システムに対するQoS要求要件とマイグレーション制御ポリシーの策定、(イ) フロー特性をアプリケーションコンテキストとして表現したライブマイグレーション手法の提案と実装、(ウ) 拠点間連携による広域分散クラウド基盤での実証実験、の3つの要素について研究開発を進める。

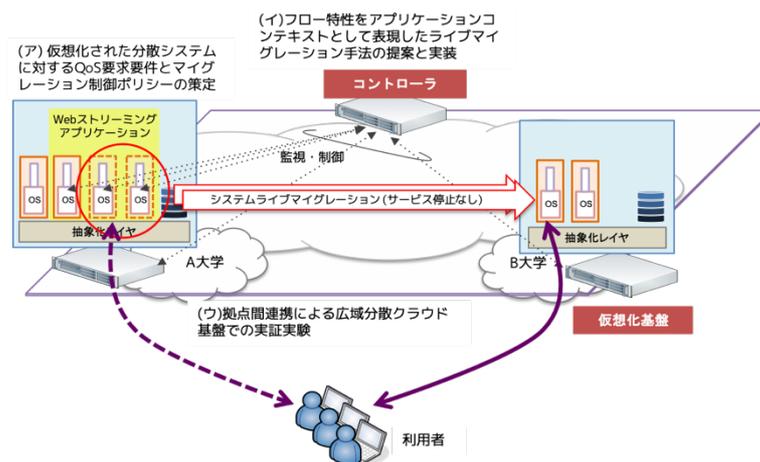


図1 本研究の構成要素

(ア) については、アプリケーションは単一の仮想サーバで実現されるだけでなく複数の仮想サーバから構成され、管理する情報も複雑になることが予想される。そこで、マイグレーション指標に有用と考えられる項目（例えば、アプリケーション負荷、トランザクション応答性能、同時接続数等）に限定して要求要件を整理し、変動するアプリケーションの状態遷移を体系的に表現することでマイグレーション制御ポリシーに反映させる。一方で、インタークラウド環境では、障害、監視装置の機能の制限、運用ルールなどにより、クラウド事業者間で必要なリソース監視情報を相互に得られないことも考えられるため、この点についても検討する。(イ) については、ストリーム系アプリケーションを対象とした、データの発生源（クライアント端

末)から処理対象サーバまでの経路やレイテンシを考慮した VM マイグレーションの支援システムの開発を行う。フロー特性をコンテキストとして表現、マイグレーション指標とすることで、アプリケーションのネットワーク要求に応じた処理ポイントに VM を移動することが可能となる。(ウ)については、広域分散クラウド基盤上でのライブマイグレーションの適用先としてエッジコンピューティングプラットフォームを想定し、複数 VM から構成される広域分散アプリケーションサービスのライブマイグレーション手法について実装・評価を行う。評価実験では、アプリケーションスループットの観点から提案手法の有効性を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) リソース監視情報の提供量を用いるクラウド構成管理フレームワーク

本研究では、アプリケーションユーザの品質要求を満たしつつ、リソース監視情報が欠損する場合でもできるだけ効率的なリソース配置を行えるモデルを作成した。更に、このモデルから、現実のネットワークを想定し、数あるリソース監視情報の中からネットワークリソースとサーバリソースを取りあげ、それぞれ RTT と CPU 使用率を仮定したシミュレーションモデルとそのシミュレータを作成した。シミュレーション結果から、提供されるリソース監視情報が少なければ少ないほどインタークラウド全体で使用される CPU 使用率が少なくなる、非効率な状況に置かれることを示した。また、定義したアルゴリズムを適用することによってリソース監視情報を積極的に提供するクラウドリソースを優遇できることを示した。これらの情報を管理・利用することで、インタークラウド上の適切なリソースを用いたシステム構築を実現するためのフレームワークを提案した。(発表論文[2],[7]ほか)

##### (2) サービス品質を考慮したインタークラウド VM マイグレーション支援システム

本研究では、モバイル端末の処理をクラウド上の VM へオフロードする Mobile Cloud Computing (MCC) を想定し、ユーザに対するレスポンス(ネットワーク特性やサービス品質)を指標としたグローバルライブマイグレーション支援システムを開発した。

まず、OpenFlow で取得できるフロー特性をマイグレーション指標のコンテキストとして表現するための手法について検討した。OpenFlow ではフローのマッチに指定できる条件として様々なものが定義されているため、送信元/送信先の IP アドレスやポート番号、DSCP フィールドをフローの識別に活用し、フロー特性の把握と管理を行う手法を提案した。さらに VM (サーバ側) とユーザ端末(クライアント側)間のサービス応答性能を示す指標値として経路遅延を用いて、経路遅延が小さくなるように VM を動的にマイグレーションできる手法の提案を行った。これらの手法を実現するために、OpenFlow コントローラと連携するマイグレーション管理システムについて設計と実装を行った。

図2にシステム構成を示す。本システムは OpenFlow の機能を用いて、OpenFlow スイッチに IP アドレス変換機構とスイッチ間レイテンシ計測機能を実装した。これを、ネットワーク上に分散配置させることで、VM (図では VMN (仮想移動ノード)) に対する IP レベルでのモビリティを提供し、スイッチ間を透過的に VM がライブマイグレーションすることができる。加えてマイグレーション先を、レイテンシ情報を用いて動的に決定することが可能になった。評価実験では、ライブマイグレーション前後の通信継続性や端末と VM 間でのスループットの評価を行い、有用性を明らかにした。(発表論文[1], [3], [4], [9] ほか)

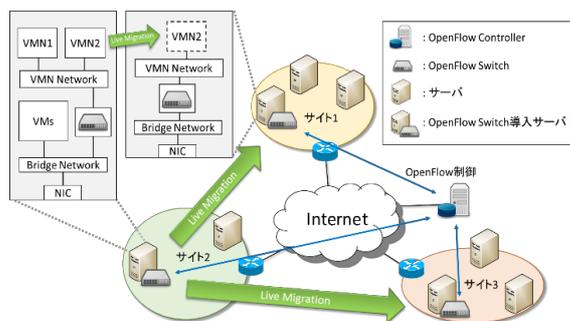


図2 VM マイグレーションシステム構成

また、障害時や災害時のシステム継続性を実現するために、VM を用いたインタークラウド環境でのシステム自動復旧に関して検討を行った。具体的には、複数 VM から構成される広域分散サービス(例えばウェブおよびDBサービス)に対して、JSON を用いた形式言語で VM 間の連携(起動順序等)を表現し、これをもとに VM の制御を行う手法を提案した。これにより、障害時に該当 VM と関連がある VM 群を適切な順序で復旧することができる自動復旧システムのプロトタイプを作成した。

さらに、インタークラウド環境でのアプリケーション適用例としてユーザ協調型ストリーム配信プラットフォームへの展開について検討を行い、これまで利用してきた VM より軽量なコンテナ仮想化によるアプリケーションを提案した。この過程において、コンテナを用いたライブマイグレーションによるポータビリティの向上がアプリケーションに対しても効果的であることを示した。(発表論文[13])

##### (3) 広域分散クラウド基盤上での VM マイグレーション評価実験

本研究では、広域分散クラウド基盤の一例として、エッジコンピューティングプラットフォ

ームを想定する。複数クライアントをグルーピングして、そのグループに対してアプリケーションサービスを提供する VM のライブマイグレーションを実現するために、オーケストレーション手法の設計と実装を行った。広域クラウド基盤上に構築した構成図を図 3 に示す。本手法は、VM とクライアントデバイス間のネットワークに依存しない相互接続性を確保することができ、クライアントデバイスの移動に伴って変化するフローのレイテンシ情報をトリガーにライブマイグレーションすることができる。

広域実験環境を想定した高遅延環境を意図的に作成し、クライアントデバイスの移動に対して VM が自動的に追従する環境を構築して実験を行った。図 4 にマイグレーションにおけるスループットの時間的推移を示す。横軸が時間で、縦軸がユーザ端末(UE)と VM(Edge server VM)間のスループットを示している。赤枠部分がユーザ端末の移動と VM マイグレーションをそれぞれ表している。この結果から、ユーザ端末が移動したタイミングで一時的にスループットが落ち込むものの、ユーザ端末に追従して VM がマイグレーションすることで最終的にはユーザ端末の移動前のスループット (約 900Mbps) まで回復していることがわかる。このことから、スループットの低下を一時的なものに抑制できることを定量的に示した。(発表論文[10], [14], [16] ほか)

また、本グローバルマイグレーション手法をよりセキュアに実施するために属性ベース暗号を利用した認可機能を追加する拡張も行なっている。仮想デスクトップアプリケーションを複数人で共同利用することを想定し、利用グループにもとづいた利用権限の付与やネットワーク遅延性能をもとにしたライブマイグレーション機能を実現している。本研究開発により、任意のクラウド拠点でアプリケーションを継続的に実行可能にすることでユーザエクスペリエンスの課題を解決することに寄与できた。(発表論文[11],[12])

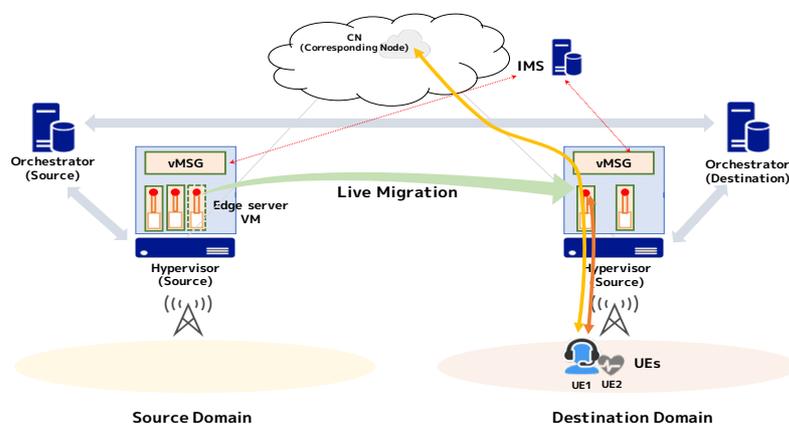


図 3 広域分散クラウド基盤での実験構成図

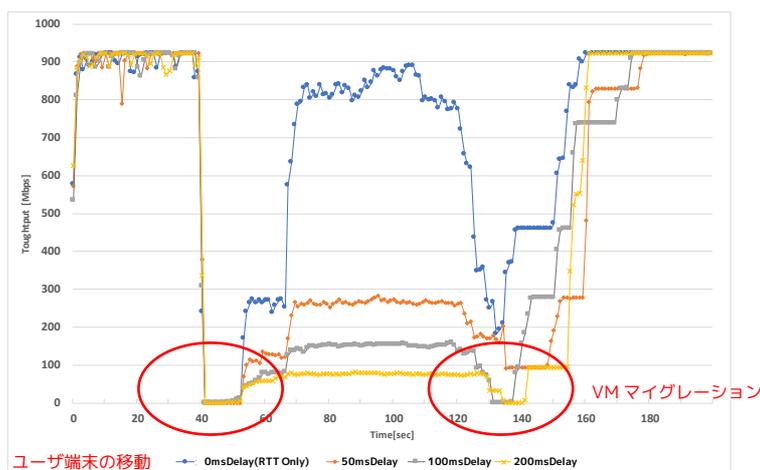


図 4 マイグレーションにおけるスループットの時間的推移

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

1. Hidenobu Watanabe, Tohru Kondo, Toshihiro Ohigashi, “Implementation of Platform Controller and Process Modules of the Edge Computing for IoT Platform”, 査読有, Proc. the IEEE PerCom 2019, Work in Progress, pp. 407-410, 2019.
2. Yoshinori Kamori, Kenta Hayasi, Kaori Maeda, Tohru Kondo, Reiji Aibara, “A Secure Sharing System for Cloud Desktop Applications Migrating with Optimized User Experience”, 査読有, Proc. the 2018 IEEE 42th Annual International Computers, Software and Applications Conference, pp.947-950, 2018 (DOI: 10.1109/COMPSAC.2018.00164).
3. Tohru Kondo, Keita Iwasaki, Kaori Maeda, “Development and Evaluation of the MEC Platform supporting the Edge Instance Mobility”, 査読有, Proc. the 2018 IEEE 42th Annual International Computers, Software and Applications Conference, pp.193-198, 2018 (DOI: 10.1109/COMPSAC.2018.10228).
4. 近堂徹, 小川竜之介, 前田香織, 石川直樹, “コンテナ連携によるユーザ協調型ストリーム配信プラットフォームの開発”, 査読無, 信学技報, vol.117, no.354, IA2017-63, pp.61-66, 2017. (2017年度インターネットアーキテクチャ研究会優秀論文賞受賞)
5. 林健太, 加森剛徳, 前田香織, 近堂徹, 相原玲二, “CP-ABE を用いた VDI の使用権限委譲機構の開発”, 査読有, 情報処理学会インターネットと運用技術シンポジウム 2017 論文集, pp.19-24, 2017. (優秀論文賞受賞)
6. 加森剛徳, 林健太, 前田香織, 近堂徹, 相原玲二, “属性ベース暗号による認証を用いたグローバルライブマイグレーション支援システムの開発”, 査読有, 情報処理学会インターネットと運用技術シンポジウム 2017 論文集, pp.25-32, 2017. (企業冠賞 (シスコシステムズ賞) 受賞)
7. Tohru Kondo, Hidenobu Watanabe, Toshihiro Ohigashi, “Development of the Edge Computing Platform based on Functional Modulation Architecture”, 査読有, Proc. the 2017 IEEE 41th Annual International Computers, Software and Applications Conference, Torino, pp. 284-285, Jul. 4-8, 2017 (DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.108).
8. 藤本大地, 前田香織, 近堂徹, 大石恭弘, 相原玲二, “ネットワーク遅延情報に基づく動的 VM ライブマイグレーションシステムシステムの開発”, 査読無, 信学技報, vol. 116, no. 490, IA2016-107, pp.129-134, 2017.
9. Yuta Ukida, Kaori Maeda, Tohru Kondo, Hidenobu Watanabe, Reiji Aibara, Yasuhiro Ohishi, “A Design and Evaluation of User-space IP Mobility Implementation”, 査読有, Proc. the International Workshop on Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL 2016), pp.251-256, 2016.
10. 坂口和也, 小川竜ノ介, 前田香織, 高野知佐, 近堂徹, “リソース監視情報の提供量を用いるクラウド構成管理フレームワークの実装”, 査読無, 信学技報, IA2016-56, pp.1-6, 2016.
11. 大畠史也, 前田香織, 相原玲二, 近堂徹, “移動透過通信アーキテクチャ用アドレス管理サービスの動的 DNS による実装”, 査読無, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-IOT-34(6), pp.1-7, 2016.
12. Takafumi Shintani, Kaori Maeda, Tohru Kondo, “An Investigation of Effectiveness of an Estimation Method of Wireless Network Conditions using MAC Layer Information”, 査読無, 信学技報, vol. 115, no. 307, IA2015-57, pp. 109-111, 2015.
13. Yuta Ukida, Yasuhiro Ohishi, Kaori Maeda, Tohru Kondo, Reiji Aibara, “Implementation of an IP Mobility Support Function Considering Portability to Android Terminals”, 査読無, 信学技報, vol. 115, no. 307, IA2015-57, pp. 105-107, 2015.
14. Keita Iwasaki, Yuta Ukida, Daichi Fujimoto, Yasuhiro Ohishi, Kaori Maeda, Tohru Kondo, Reiji Aibara, “A Proposal of Intercloud Network Scheme Using an IP Mobility Architecture MAT”, 査読無, 信学技報, vol. 115, no. 307, IA2015-57, pp. 101-103, 2015.
15. 坂口和也, 前田香織, 近堂徹, 相原玲二, “クラウドリソース監視情報の提供量に応じた動的リソース融通の提案”, 査読有, 情報処理学会 インターネットと運用技術シンポジウム 2015 論文集, pp.14-21, 2015.
16. 藤本大地, 近堂徹, 前田香織, 大石恭弘, 相原玲二, “OpenFlow による移動透過な広域ライブマイグレーションシステムの提案と実装”, 査読有, 情報処理学会 インターネットと運用技術シンポジウム 2015 論文集, pp.36-43, 2015.

[学会発表] (計 2 件)

1. Keita Hayashi, Kaori Maeda, Tohru Kondo, “A Design of Failure Injection Testing considering Edge Computing Environment”, Internet Conference 2018, 2018 (東京都).
2. 岩崎圭太, 前田香織, 近堂徹, 相原玲二, “エッジサーバの移動透過通信を支援するモバイルエッジコンピューティングプラットフォームの提案”, 第 18 回インターネットテクノロジーワークショップ, 2017 (愛媛県松山市).

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。