

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11263

研究課題名(和文)次世代IoT環境のための超分散エッジコンピューティング技術の開発

研究課題名(英文)A hyper-distributed edge computing architecture for the next generation IoT environments

研究代表者

小泉 佑揮 (Koizumi, Yuki)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：50552072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、モバイルコアネットワークに設置したサーバーなどのモバイルエッジのみならず、ルーターや究極的にはIoTデバイスで計算が可能な分散エッジコンピューティング環境の実現を目的としている。主要な研究成果は以下の3つである。第一に、相反する複数の制御目的を最適化するルーティングフレームワーク、第二に、IoTデバイスなど小型デバイスへの計算の委譲を可能な高速かつ低消費電力なフォワーディングとネットワーク関数機構の設計、第三に、ルーターやIoTデバイスなど潜在的に信頼できないデバイスが相互にプラットフォームを検証することで安全に計算を委譲できるセキュアなコンピューティング機構を設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報や計算処理をクラウドに一極集中する時代から、ネットワークのエッジに近い領域に配備した計算資源を用いてエッジに情報や計算処理を分散するエッジコンピューティング環境が到来している。5Gネットワークでモバイルエッジがサポートされるなど、エッジコンピューティングとそのアプリケーションはさらに重要な課題である。本研究の成果により、ルーターやIoTデバイスなどの種々のデバイスをエッジノードとして利用することが可能になり、エッジコンピューティングを、消費電力やレスポンスタイム、あるいはトラフィック量などの性能の観点で効率化を図るものであり、エッジコンピューティングの浸透に寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is to realize a hyper-distributed edge computing architecture where computation can be delegated to IoT devices or routers as well as edge servers in a mobile core network. The key achievements of this project are three-fold: First, we developed a routing framework that derives sub-optimal routing for mutually exclusive multiple objectives. Second, we developed a high-speed and low-energy forwarding framework for in-network functions, assuming that computation is delegated to small devices, such as IoT devices. Finally, we developed a computing framework that securely allows computation to be delegated to routers and IoT devices, which are potentially untrusted, by attesting each other in terms of the integrity of their platform.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：エッジコンピューティング 分散計算

1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT) 環境は、IoT 端末から得た情報をクラウドに一局集中する時代から、IoT 端末が収集した情報を局所的に集約、および計算処理する時代に突入しつつある。次世代 IoT 環境では、膨大な IoT 端末とユーザ端末を収容するスケーラビリティのみならず、IoT 端末で収集した情報を使うユーザ端末に即座に伝達するリアルタイム性が要求される。

これに対して、エッジコンピューティングの活用が期待されている。ネットワークのエッジ付近に分散的に配置したサーバ群で情報を集約、計算処理、および保存する。ユーザー端末はエッジのサーバ群から計算結果を取得することで、従来型のクラウドと比較して情報へのアクセス遅延を削減することができるのみならず、ネットワークのトラフィック削減や、消費電力削減などの効果が期待できる。

エッジコンピューティングは、ETSI において標準化が進められている、あるいは、5G ネットワークのモバイルコアネットワークでサポートされるなど、普及の兆しは見えるものの、基本的には基地局設備内への計算資源の配置しか想定されていない。したがって、計算資源の配置は、必ずしもアプリケーションには最適化されていないため、アプリケーションの特性に応じて基地局間の計算資源をまたがって計算処理を最適にスケジューリングすることができない。

一方、アプリケーションが要求するリアルタイム性に応じた最適な計算資源に情報を集約して計算処理をスケジューリングしたとしても、ネットワークにおけるルーティングやフォワーディングは制御できないため、スケジューリングの結果が必ずしも最適とは限らない。このように、ネットワークとアプリケーションが自身の収益や性能指標に応じて独立かつ利己的に最適化されているため、エッジコンピューティング環境は高コストな設備設計であるにも関わらず、結果的に次世代 IoT に要求される性能が実現できないことが課題である。

2. 研究の目的

前章の背景をふまえ、本課題では、IoT 端末などの計算資源制約の大きい端末も含めた環境下で、情報のルーティングと計算処理のスケジューリングをネットワーク層で同時に制御する超分散型エッジコンピューティングアーキテクチャを設計する。提案するアーキテクチャでは、ルーターなどネットワーク内のデバイスによる計算・キャッシングをサポートする情報指向ネットワーク技術を基盤技術として用い、それを昇華することで、ルーターや IoT デバイスに対する計算要求のルーティングをネットワーク層で処理することが可能であり、アプリケーションの要求する性能を達成する。さらに、このアーキテクチャ上で、アプリケーションごとの性能要求についてパレート効率性を達成するための制御フレームワークの実現、IoT 端末にサービスを展開するインフラ技術の設計も含めて、エッジコンピューティング環境を総合的に設計する。

3. 研究の方法

本課題では、上記の研究目的の分散型エッジコンピューティング環境の実現のために、研究課題 1) 相反する複数の制御目的を持つアプリケーションに対してパレート効率な経路とスケジューリングを実現するルーティングフレームワーク、研究課題 2) IoT デバイスなど小型デバイスへの計算の委譲を可能にするフォワーディング機構の設計、研究課題 3) 潜在的に信頼できない IoT デバイスやルーターに対して安全な計算委譲を可能にするセキュアなコンピューティング機構の設計に取り組んだ。

4. 研究成果

研究課題 1 :

はじめに、様々なアプリケーションに対するエッジノードへの計算要求のルーティングを実現するために、複数の本質的に相反する制御目的に対するパレート効率な経路を導出するルーティングフレームワークを設計した。ここでは、ノードやルーターの消費電力の削減とネットワーク上のリンク負荷の削減という 2 つの制御目的を持つ場合を想定し、2 つの目的に対してパレート効率性を満たす経路を導出するルーティングを設計した。

最新のルーターや IoT デバイスなどのコンピューティングノード CPU は、その省電力機構に

より、計算負荷に対する消費電力の関係がある種の上に凸の増加関数で表現できることが知られている。したがって、トラフィックを多くのノードに分散するより、可能な限り特定のノードに集中させた方が、システムトータルの消費電力が削減できることが予想される。その一方で、エンド間の遅延やノードの処理遅延などは、負荷に対して下に凸な関数で表現できることが知られている。これは、遅延の削減のためには、多くのノードやリンクに負荷を分散させることが有利である。このように、消費電力と性能は相反する関係を有している。

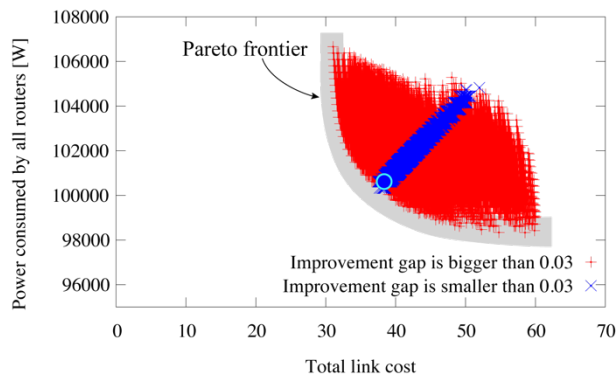


図 1 消費電力とリンク上の遅延の関係

これに対して、本研究では、消費電力とリンクの遅延目的関数とするルーティングのそれぞれを最適化問題として定式化し、それら全体を、それぞれのルーティングをプレイヤーとする協力ゲームとしてモデル化した。図 1 に示すように、協力ゲームを求解することでパレート効率なルーティングを導出した。さらに、2つの相反する制御目的を公平に達成するルーティングを導出するために、ラグランジュ緩和に基づいた発見的的手法を開発した。これらの成果は、IEEE 国際会議にて発表済みである。

研究課題 2 :

本課題では、ネットワーク内キャッシングやネットワーク内計算をサポートする情報指向ネットワーク技術 (Information-Centric Networking: ICN) を用いて、IoT デバイスやルーターなどモバイルエッジよりもさらに分散的に配置されている計算資源を用いたエッジコンピューティング環境を設計した。

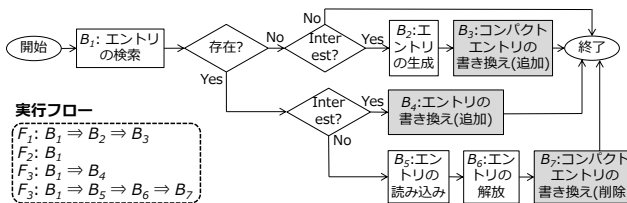


図 2 PIT 制御フロー

特に、本研究課題では、IoT デバイスなどの計算に関する制約が厳しい環境において、高速に ICN のフォワーディングやネットワーク内コンピューティングの実現を目指した。具体的には、IP とは異なり、ICN ではパケット転送時にパケット転送情報を Pending Interest Table (PIT) と呼ばれるテーブルに読み書きをする。この特徴が、高速・軽量のフォワーディングを阻害していることに注目した。高速化に際して、並列化が必要不可欠ではあるが、排他制御をすると、CPU 上のバスがロックされ転送速度が急激に低下することを明らかにし、排他制御なしに並列化する手法を検討した。

本研究では、PIT 操作のうち、真に排他制御が必要な操作の組み合わせと、その操作が発生する条件を明確化した。図 2 に示す PIT の処理において、同じデータ領域を書き換えるブロックを 1 つ以上含む処理フローの組み合わせを導出することで、本来は排他制御を必要とする処理ブロックを明確化し、それぞれの処理フローが同時に発生した場合に、発生する問題を明確化した。これにより、プログラムが停止せずにパケットの再送でエラーから回復可能なフローにおいては排他制御をする必要がなくなることを示した。これにより、排他制御を削減して高速なパケット転送が実現できる見込みを得た。これらの成果は、総合大会などで発表した。

研究課題 3 :

提案する超分散型エッジコンピューティング環境では、IoT デバイスやルーターなどのコンピューティングが可能なデバイスに対しても計算処理を委譲することが可能である。しかし、モバイルオペレーターが管理するモバイルエッジなどとは異なり、図 3 に示すように、これらのデバイスは、要求された計算を実施しない、あるいは、異なる計算をする、計算結果を改竄するなど、潜在的に信頼できないと仮定する必要がある。

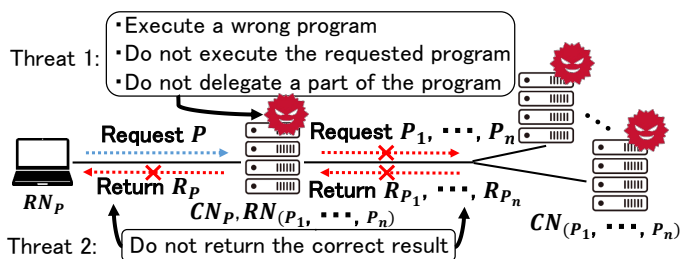


図 3 分散エッジコンピューティングの脅威モデル

この問題に対して、本研究課題では、Trusted Platform Module (TPM) を前提とする Remote Attestation (RA) を拡張して、プログラムの実行検証する方法を設計した。提案手法の概要を図 4 に示す。TPM 上の情報が書き換え不可能である、TPM を含むハードウェアは正しく動作する、BIOS など計算ノードが起動後に最初に実行するプログラムは、書き換え不可能であると仮定する。提案手法では、1) 検証情報生成時は、あるプログラムが次に実行するプログラムのハッシュ値を TPM に記録し、2) 検証時は、TPM に記録されたハッシュ値を検証し、信頼の起点となる BIOS などから実行された全てのプログラムが信頼できることを検証することで、実行されたプログラムが正しいことを検証する。

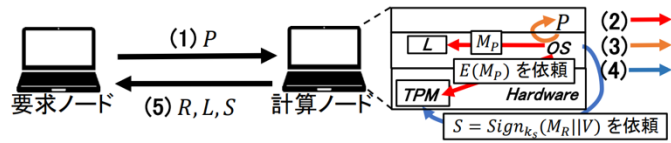


図 4 計算ノードの動作

さらに、この方法、および類似の既存研究では、検証する側のプログラムが攻撃者にのっつけられていることを仮定していない問題に注目した。具体的には、図 5 に示すように、計算ノードの真正性を確認するための検証プログラムに対して攻撃、とりわけ脆弱性をついた動的な攻撃がしかけられた場合を想定し、攻撃検出手法を設計した。具体的には、対策として、検証プログラム V の実行後に、V の実行時の分岐命令の実行列である実行パスを検証することで攻撃を検知する。これを実現するために、V の実行パスが想定する実行パスに含まれているかどうかを検証する Control Flow Attestation (CFA) を拡張した。

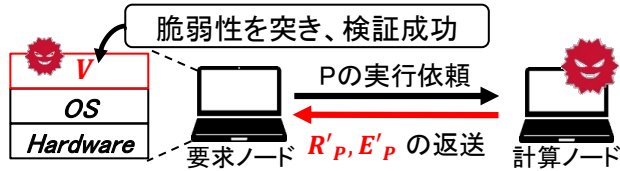


図 5 要求ノードに対する攻撃

V の実行パスに関する検証情報 CV の生成と検証の流れを図 6 に示す。1) CV は V の実行パスの各分岐命令の分岐元と分岐先アドレスを要素としたハッシュチェーンであり、各分岐命令ごとに次の分岐先アドレスを実行する前に CV を生成するプログラム M に制御を渡し、M が分岐元と分岐先のアドレスを TPM に記録する。2) V の実行後、CV を入力として、要求ノードは検証プログラムを実行し、CV が想定する実行パスであるか検証する。検証に成功する場合、V が正しく実行されたと判断する。

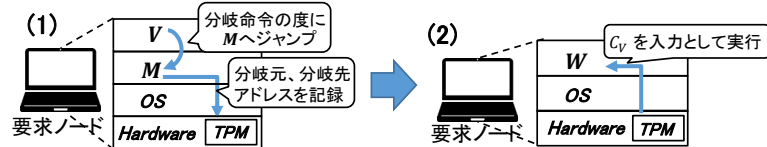


図 6 要求ノードに対する攻撃

これらの手法により、IoT デバイスやルーターなどの潜在的に信頼できないデバイスに対して安全に計算を委譲可能な分散エッジコンピューティングアーキテクチャを実現した。これらの成果は IEEE の国際会議にて発表するとともに、国内研究会や総合大会、ソサイエティ大会にて発表済みである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Masuda Hiroki, Kentaro Kita, Yuki Koizumi, and Toru Hasegawa
2. 発表標題 On Verification of Remote Computing on Potentially Untrusted Nodes
3. 学会等名 IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), Poster&Demo Session (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 大輝, 北 健太郎, 小泉 佑揮, 長谷川 亨
2. 発表標題 遠隔計算検証法における検証情報を用いた攻撃と対策
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 大輝, 北 健太郎, 小泉 佑揮, 長谷川 亨
2. 発表標題 信頼されていない計算ノードにおけるプログラム実行の検証法に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会情報指向ネットワーク研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田 大輝, 北 健太郎, 小泉 佑揮, 長谷川 亨
2. 発表標題 信頼されていない計算ノードのプログラムの実行検証法に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Koizumi, Junji Takemasa, Toru Hasegawa
2. 発表標題 A Game-Theoretic Approach to Resolve Conflict Between Traffic Engineering for Energy Efficiency and Load Balancing
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 裕太郎, 武政 淳二, 小泉 佑揮, 長谷川 亨
2. 発表標題 マルチコアNDNルータにおける排他制御の必要なPITの操作に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会講演論文集 (B-7-53)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Hasegawa, Kentaro Kita, Yuki Koizumi
2. 発表標題 Security Architecture/Protocol for Middlebox-based Communications
3. 学会等名 Workshop on Programmable Networking (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Koizumi, Shunsuke Higuchi, Junji Takemasa, Atsushi Tagami, Toru Hasegawa
2. 発表標題 Compressing Name Space Based on Machine Learning for Information-centric Networking on Programmable Switches
3. 学会等名 Workshop on Programmable Networking (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------