



Title	エッジコンピューティング研究開発の現状と今後の課題
Author(s)	飯田, 勝吉
Citation	電子情報通信学会技術研究報告, 117(187), 25-30
Issue Date	2017-08-21
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86952
Type	journal article
File Information	IA2017-16.pdf



エッジコンピューティング研究開発の現状と今後の課題

飯田 勝吉†

† 北海道大学 情報基盤センター
〒 060-0811 札幌市北区北 11 条西 5 丁目
E-mail: †iida@iic.hokudai.ac.jp

あらまし 現在、ETSI MEC, Open Edge Computing Initiative, Open Fog Consortium などエッジコンピューティングに関する研究開発が盛んにおこなわれている。本稿ではその最新動向と、今後の研究開発課題を紹介する。

キーワード エッジコンピューティング, cloudlet, フォグコンピューティング, MEC, 低遅延サービス, IoT, NFV, オーケストレーション。

Current R & D Status of Edge Computing and its Future Direction

Katsuyoshi IIDA†

† Information Initiative Center, Hokkaido University,
Kita 11, Nishi 5, Kita-ku, Sapporo-shi, 060-0811, Japan.
E-mail: †iida@iic.hokudai.ac.jp

Abstract There currently are many R&D efforts about edge computing area. We introduce a number of important survey papers and possible direction of future R&D.

Key words Edge computing, cloudlet, fog computing, MEC, low latency service, IoT, NFV, and orchestration.

1. はじめに

近年、エッジコンピューティング技術の研究開発が盛んにおこなわれている。エッジコンピューティング技術は、データセンターと呼ばれる施設に多数のサーバを配置するクラウドコンピューティング技術を発展させたもので、ネットワークの端の部分(=エッジ部)にサーバを分散的に配置するネットワーク技術の総称である(図1参照)。

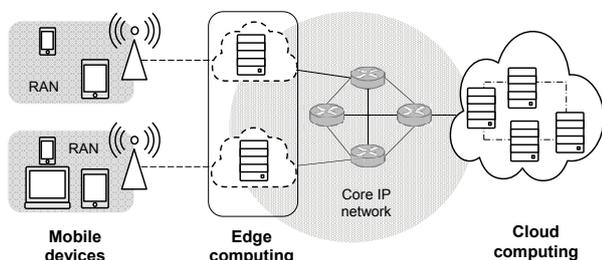


図1 エッジとクラウドコンピューティング環境

エッジコンピューティング技術の創始者は、CMUのSatyanarayanan氏の研究グループと考えられている。Satyanarayananらは、99年にユーザに近接した位置にサーバを配置するcloudletと呼ばれる技術を[1]で提案し、これが近代的なエッジコンピューティングの元祖と言える。さらに、その起

源を遡る[2]と、90年代後半にサービスが開始されたAkamai社によるContent Delivery Network(CDN)技術によって導入された分散キャッシュ技術[3]が存在する。cloudletを提案したSatyanarayananらは、その後、インテル社、Huawei社、Vodafone社らとともに、cloudlet技術の中核とした業界団体Open Edge Computing(OEC) Initiative[4]を設置した。

一方、2012年にCisco Systemsの研究者であるBonomiらがフォグコンピューティング(Fog Computing)という技術を提案[5]し、その後同社はその技術の研究開発に力をいれている。フォグコンピューティングに関連する業界団体としては、Cisco社が中心となってインテル社、ARM社、マイクロソフト社らとともにOpenFog Computing Consortium[6]を設置している。

また、ヨーロッパの通信分野の標準化団体であるEuropean Telecommunications Standards Institute(ETSI)がモバイルエッジコンピューティング(Mobile-Edge Computing)という技術の研究開発を行っている[7]。ETSIは、モバイルエッジコンピューティングの技術を開発するために2014年12月にETSI内にMobile-Edge Computing(MEC) Industry Specification Group(ISG)[8]を設置[9]した。同ISGはその後、2015年12月に最初の実証の実装を発表[10]し、2016年4月に仕様[11]を発表した。なお、ETSI MEC ISGは、モバイル分野だけで

なく、有線のアクセス網も対象とするために、2017年3月にその名称を Multi-access Edge Computing (MEC) ISG に変更した [12]。

以上の経緯を考慮にいれ、本稿ではユーザ端末の近傍にサーバを配置する技術の総称をエッジコンピューティング技術と呼ぶこととする。また、設置されるサーバの名称として「フォグノード」、「マイクロデータセンター」などと呼ばれることがあるが、本稿では「エッジサーバ」と呼ぶこととする。

これまで述べてきた通り、エッジコンピューティング技術は複数の業界団体 (OEC, OpenFog)、標準化団体 (ETSI) によって研究開発が進んでいるホットな技術分野である。当該技術がホットな技術分野になった理由は3つあると考えられる。

- (1) Tactile Internet (触れることができるインターネット) と呼ばれる超低遅延通信サービスの検討開始
- (2) IoT の研究開発の進展
- (3) NFV のために開発したソフトウェア基盤の存在

以下で上記3つの理由について説明する。一つ目の Tactile Internet (触れることが出来るインターネット) とは、文献 [13] で提案された技術で、往復通信遅延 (round trip delay) を 1ms 以下に抑えることが出来ると、自動車の安全運転支援、VR/AR、テレプレゼンスなどの新しいアプリケーションの提供が可能になる [14, 15]。このような質的に全く新しいアプリケーションやサービスの創出のためには、遠隔地に設置されることの多いクラウドコンピューティング環境では遅延時間の制約を満たせないことがあり、ユーザ端末の近傍にサーバを設置するエッジコンピューティング環境の利用が適している。

二つ目の IoT は、現在盛んに研究されている研究分野の一つである。IoT が普及すると、多数のセンサーによって発生する大量のデータがクラウドコンピューティング環境のデータセンターに届くために、ネットワーク中でデータ量を削減する処理が必要となる [16, 17]。この状況はエッジ・ヘビー・データと呼ばれており、対応が必要な研究課題とされている [18]。

三つ目の NFV は、Web プロキシやファイアウォールなどのネットワーク内部で実施する処理を専用装置ではなくソフトウェアで実現するもので、そのためにネットワークの内部に計算ノードを設置するための研究開発が行われている [19, 20]。NFV とエッジコンピューティングには、ネットワークの内部に計算ノードを配置する点で共通点があり、そのため NFV のために使われたソフトウェア基盤の流用が可能である ([21] の VI.C 節, VII.B 節)。例えば ETSI が NFV のために開発している OpenMANO [22] と呼ばれるソフトウェア基盤を流用することでエッジコンピューティング技術の開発が容易となる。

以下、2. 節では関連するサーベイ論文について紹介し、3. 節ではエッジコンピューティングに関する3つの技術グループを比較する。4. 節で、筆者らが関わっている関連する研究プロジェクトを紹介し、5. 節で、今後行うべき研究開発課題について述べ、最後に 6. で本稿をまとめる。

2. エッジコンピューティング関連サーベイ論文

前節で紹介したようにエッジコンピューティングの技術開発

が世界中で盛んにおこなわれている。現時点ですでに多数のサーベイ論文が出版されており、本技術の初学者にとってわかりづらい状況となっている。そこで本稿では代表的なサーベイ論文の外観を紹介する。

本節で紹介するサーベイ論文は [23], [21], [27], [28], [29], [16], [30] であり、特に先頭の二つの論文を中心に紹介する。

2.1 オフロード研究サーベイ論文 [23]

[23] は、モバイルエッジコンピューティング環境における処理のオフロードに関する研究を多数紹介し、また、今後の研究課題が多数述べられているサーベイ論文である。以下、本論文の具体的な内容を一部紹介する。

II 節ではエッジコンピューティングのユースケースが3つに分けられることが述べられている。ユースケースの例 (p. 3, Fig. 1)

- (1) ユーザ向けサービス
- (2) オペレータや大規模事業者向けサービス
- (3) 性能測定・QoE 向上

ユーザ向けサービスとしては、AR/VR、人物識別などのアプリケーションが紹介されている。また、ウェブアクセスを高速化するためにサーバ側でウェブページのレンダリングを行う事例 [24] も紹介されている。オペレータや大規模事業者向けサービスの例として、IoT やセンサネットワーク等で生じるビッグデータ処理や、自動車向けサービスなどが述べられている。性能測定・QoE 向上の例として、トラフィック・性能測定、コンテンツキャッシングの例が述べられている。

V 節では、与えられた計算タスクをローカルで実行すべきか、それともエッジサーバに依頼して計算させるべきかの判断アルゴリズムの研究が紹介されている (図2 参照)。

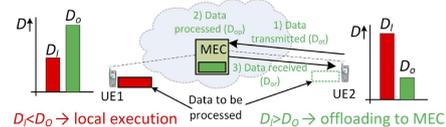


図2 オフロード判断の例 ([23], p. 10, Fig. 11)

この図では、ローカルで実行させた方が早い場合はローカルで実行し、そうでない場合はエッジサーバにタスクをオフロードさせている。V 節でこの判断アルゴリズムに関する研究が多数紹介されている。また VI 節では、エッジサーバにタスクをオフロードさせる判断が得られた場合、どのエッジサーバにオフロードさせるべきかに関する研究が多数紹介されている。多くの研究は数理計画問題に基づいて定式化されている。目的関数として、遅延の最小化や端末が消費するエネルギーを最小化を目指す研究等が紹介されている (p. 18, TABLE IV)。

VII 節では、移動ユーザに対応するための技術について述べられている。ユーザが移動すると、ユーザの最近傍のエッジサーバが異なるサーバになるため、その機能のハンドオーバーが必要となる。それらの技術の研究動向について詳細にまとめられている (p. 22, TABLE V)。

2.2 システムアーキテクチャサーベイ論文 [21]

[21] は、エッジコンピューティングのシステムアーキテク

チャに関するサーベイ論文であり、無線区間の超低遅延通信を実現する第5世代携帯電話網(5G網)を前提としている。

III節では、ユースケースやアプリケーションの例として、計算処理のオフロード、ウェブ性能改善、IoTとビッグデータ、スマートシティサービスなどが紹介されている。

V節では、エッジコンピューティングのフレームワークとアーキテクチャが紹介されている。図3にV節で紹介されている、ETSIが規定したソフトウェアフレームワーク[25]を示す。

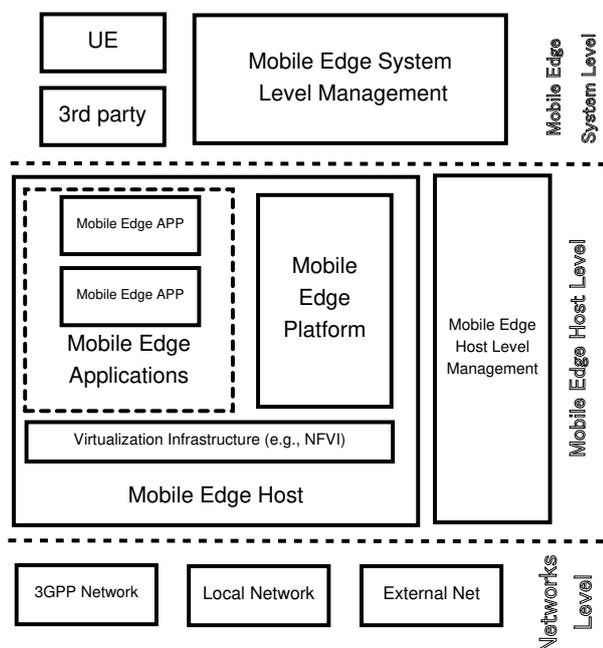


図3 ETSI MEC フレームワーク [25]

当該フレームワークは3層構造となっている。中間層は「ホストレベル」と呼ばれており、各エッジサーバ内に設置されるソフトウェアで、サーバ仮想化ソフトウェアとその管理ソフトウェアに分離されている。最上位層は「システムレベル」と呼ばれておりエッジサーバ全体の統括を担当している。さらに、p. 11のFig. 4にはさらに細かいソフトウェアアーキテクチャが記載されている。「システムレベル」には Mobile Edge Orchestrator というシステム全体を統括するソフトウェアが記載されている。

ここで Orchestrator とは、全体を統括するソフトウェアの名称で、NFV で利用されている用語である。NFV では、Orchestrator および Orchestration という用語が利用されており、文献 [26] によると Resource Orchestration と Service Orchestration の二つがある。Orchestration は Management(管理)に近いが、各サーバの管理を指す用語として Management が使われ、システム全体の管理には Orchestration という用語が使われている。

また V 節には関連するネットワーク技術として、SDN や NFV との関係が述べられている。次に VII 節について紹介する。エッジコンピューティングの実装を構築し、どのようにデプロイするかが記載されている。基本の実装として、OpenMANO

の他多数の実装が紹介されている (p. 17, TABLE II)。

2.3 その他のサーベイ論文

本節ではその他のサーベイ論文を紹介する。

[27] は、モバイルエッジネットワークにおけるコンピューティング、キャッシング等の技術がサーベイされている。ETSI MEC, cloudlet およびフォグコンピューティングの差が図を用いて紹介されている。また、キャッシングについてその機構やアルゴリズムに関する研究が紹介されている。

[28] は、フォグコンピューティングのサーベイ論文である。クラウドコンピューティング、フォグコンピューティング、エッジコンピューティング等を図を用いて説明されている。また、7節では多数の性能指標(時間、データ量、コスト、エネルギー消費量)が説明されている。関係する研究の比較が p. 22 の Table 1 に記載されている。

[29] は、フォグコンピューティングにおけるエネルギー消費量を中心に据えたサーベイ論文である。この論文では IoT ではなく、Internet of Everything (IoE) という用語が用いられ、論文の冒頭部に Fog や IoE をテーマとする研究数が増えていることをグラフを用いて説明されている。また、ユースケースの例として、Internet of Energy (いわゆるスマートグリッド技術)、スマートシティ、インダストリー 4.0 などの例が説明され、それぞれの QoS 要求がまとめられている (p. 9895, Table 7)。

[16] は、IoT を対象としたエッジコンピューティングのアーキテクチャに関する解説論文であり、重要なユースケースとして、監視カメラの人物認識、自動車の自動運転支援等の技術が述べられている。

[30] は、モバイルクラウドエッジシステムと題して、エッジコンピューティングを実現する技術のアーキテクチャや研究課題等がサーベイされている。エッジコンピューティングの特徴、サービスモデル、アーキテクチャなどが述べられている。特にエッジコンピューティングのためのサービス発見 (Service Discovery) 技術に関して深く議論されている。

3. ETSI MEC, cloudlet, フォグコンピューティング技術の比較

1. 節で説明した通り、エッジコンピューティング分野には ETSI MEC, cloudlet, フォグコンピューティングという3つの中核技術があり、それらの関係を理解することが重要となる。そのため、比較について記載した文献が多数存在する。本節では [27], [31], [32], [33] に基づき、3つの技術を比較する。参照した文献を独自に分析して作成した比較表を表1に示す。

表によると、クラウドコンピューティングと比べると3技術共に遅延時間を小さくすることができる。違いは、ETSI MEC が携帯電話事業者を対象としたものに対し、他の二つの技術は一般のネットワークを対象としている。特に、cloudlet は、幅広いアプリケーションを対象としている。また、フォグコンピューティングは、IoT を対象としていることに特徴がある。

表の階層数について説明する。クラウドコンピューティングでは、端末とクラウドの2種類なので2階層である。エッジコンピューティングの3技術共に、端末、エッジサーバ、クラウド

表 1 ETSI MEC, cloudlet, フォグコンピューティングの比較

	クラウドコンピューティング	MEC	フォグコンピューティング	cloudlet
提案者	-	ETSI [9]	Cisco [5]	M. Satyanarayanan 氏ら [1]
業界団体等	-	ETSI MEC ISG [8]	OpenFog Computing Consortium [6]	Open Edge Computing (OEC) Initiative [4]
遅延時間	大	小	小	小
階層数	2 階層	2 または 3 階層	3 階層	3 階層
所有者	クラウド事業者	携帯電話事業者	第 3 者	第 3 者
対象とする人口	大	中	小	小
サーバの設置場所	データセンター	携帯電話の基地局内	ルータ、スイッチ、AP 等	同左
提供される API	-	Mobile Orchestrator の API	Fog Abstraction Layer	OpenStack とその拡張

ドサーバの 3 階層を対象とできるが、ETSI MEC の場合だけは端末、エッジサーバだけの 2 階層とすることもできる。

なお、3 技術を推進するそれぞれの業界団体 (ETSI, OEC, OpenFog) の性格の違いについては [31, 32] に述べられている。3 技術はそれぞれ特徴に違いがあるが、関連が大きいと、互いに影響を与えあいながら研究開発が進められている。

4. 科学研究費補助金プロジェクトのご紹介

これまで述べたように、エッジコンピューティング技術はホットな技術領域である。筆者らも当該技術領域分野で研究活動を行っているため、それについて紹介する。

研究種目

日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (B)

研究課題名

次世代モバイルアプリのための軽量エージェントを用いた階層型クラウドアーキテクチャ

研究代表者

飯田勝吉 (北海道大学)

研究分担者

古閑宏幸 (北九州市立大学)

研究期間

平成 28~30 年度 (2016~2018 年度)

本プロジェクトでは、5G 網を対象に今後出現する様々なアプリケーションを収容するための適切なネットワークアーキテクチャを検討している。5G 網では、ミリ波帯を用いた新しい無線通信技術により広帯域を提供できるが、しかし、その基地局のカバーエリアは狭いので、カバーエリアの広い従来方式の基地局と組み合わせて使うこととなる。さらに 5G 網は、無線区間での遅延を小さく保つことができるが、しかし、通信相手がデータセンター上のサーバであった場合にエンド間遅延が大きくなり、超低遅延サービスの提供ができなくなる。本プロジェクトでは 5G 網のエッジ部に設置したサーバに軽量エージェントと呼ばれるプログラムを配置し、これを用いて 5G 網の無線区間で提供される超低遅延や超広帯域の特徴を活かす (有線区間を含めた) 全体的なネットワーク提供を目指している。図 4 に本プロジェクトの概要図を示す。

これまでに得られた成果としては、超広帯域環境に適した TCP に関する研究 [34]、エッジサーバを用いた超低遅延ネット

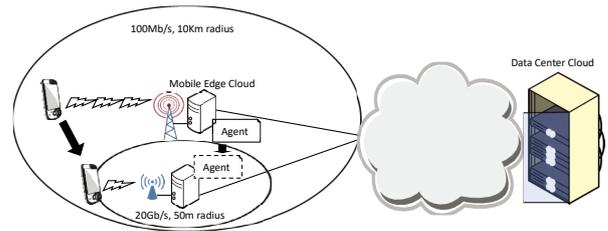


図 4 科学研究費補助金プロジェクトの概要

ワークアーキテクチャのモデル化に基づく研究 [35-39] などがある。また、クラウドコンピューティング環境での TCP の性能を向上する研究 [40] を拡張し、クラウドとエッジコンピューティング環境が混在した環境に適応した拡張方式の検討と性能評価を実施している [41, 42]。

以下では、[36] に基づきエッジサーバを用いた超低遅延ネットワークアーキテクチャ研究の概要を紹介する。図 5 に、当該論文で提案した解析モデルを示す。図の左側にあるソースノードは、ある基地局の周辺にあるユーザ端末群を示し、それらの端末から計算要求 (ワークロード) が発生し、右側にあるモバイルエッジノードのいずれかで計算処理を行う。その際、各エッジサーバの負荷とノード間の伝搬遅延を考慮に入れて、適切なエッジノードに割り当てる。そのための、割り当て方針等を提案し、シミュレーション評価により、その性能を明らかにした。

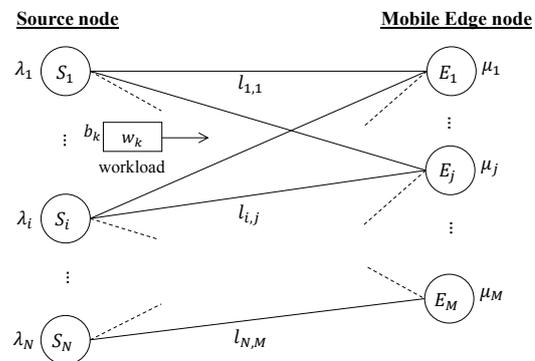


図 5 超低遅延ネットワークの解析モデル

さらに、モデルをより現実的に拡張し、その性能を評価した研究を [37, 38] で発表している。

5. 今後の研究開発課題

エッジコンピューティング研究分野は急速に勃興した技術領域であり、すでに多数の研究開発が行われているが、現時点でも多数の課題が残されている。本節では、[23], [21], [43], [30]に記載されている今後の研究課題に関する記述と、筆者のこれまでの経験に基づき、今後行うべき研究開発課題を記載する。

a) 多様なサービスに対応可能なエッジコンピューティングアーキテクチャ

[30]のV.A節および[43]のIII節Challenge 2を参考に記載する。エッジコンピューティングアーキテクチャの研究開発は始まったばかりであり、いくつかの先行的なソフトウェア実装があるものの、多数の研究課題が残されている。例えば、エッジサーバをどのように発見するのか、エッジサーバで実行すべきコードをどのように伝達するのか等の課題が存在する。また、オーケストレーションをどのように実現するのか、すなわち「オフロードの判断と資源割当」の研究成果をどのように利用したシステムの構築も課題と言える。

b) エッジとクラウドの連携機構

[21]のVIII.A節および[30]のV.E節を参考に記載する。3.節に述べた通り、エッジコンピューティングではクラウドコンピューティングのすべての機能をエッジサーバに肩代わりさせるのではなく、両者の機能の分担および連携が求められている。これらは重要な研究開発課題と言える。

c) オフロードの判断と資源割当

本課題は重大な課題ととらえられており、[23]のIX.B節-IV.C節、[30]のV.D節、[21]のVIII.C節、そして[43]のIII節Challenge 3-4に記載されている。[23]によると、特にタスクの発生状況やエッジサーバの負荷状況が動的に変動するときどのように対応するかについてほとんど研究されていない。また、エッジサーバやクラウドが階層的に配置されている場合の検討も必要と言える。また、[23]のV節-VI節によるとほぼすべての研究がシミュレーション評価によってなされている。理論解析や実システムを用いた実証的研究も必要といえる。

d) ユーザ端末移動への対応

モバイル網を対象とすると、ユーザ端末は移動するため適切なエッジサーバの位置が変わる。そのため、本課題に関しても複数の文献で必要性がうたわれている([23]IX.D節、[21]VIII.B節)。ユーザ端末の移動すると、サービスが継続できなくなる可能性があるため、それを継続することが重要となる。特に、複数のエッジサーバを利用して並列処理をしている場合についての検討はこれからである。

e) ビジネスモデルの構築

エッジコンピューティングは新しい技術であり、そのビジネスモデルの検討は十分行われていない。携帯電話事業者が直接課金するのか、外部事業者が課金するモデルにするのか、またその際の適切な課金モデルの策定が必要である([21]のVIII.E節)。

6. おわりに

本稿では、最新技術であるエッジコンピューティング技術に

ついて、サーベイ論文の紹介、関連する研究プロジェクトの紹介、そして、今後の研究開発の方向性について述べた。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会における科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号16H02806)の支援を受けている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] J. Flinn, and M. Satyanarayanan, "Energy-Aware Adaptation for Mobile Applications," *Proc. ACM Symp. Operating Systems Principles (SOSP99)*, Kiawah Island, SC, USA, Dec. 1999. pp. 48–63. doi: 10.1145/319344.319155
- [2] M. Satyanarayanan, "The Emergence of Edge Computing," *IEEE Computer*, vol. 50, no. 1, pp. 30–39, Jan. 2017. doi: 10.1109/MC.2017.9
- [3] J. Dille, et al., "Globally Distributed Content Delivery," *IEEE Internet Computing*, vol. 6, no. 5, pp. 50–58, Sept. 2002. doi: 10.1109/MIC.2002.1036038
- [4] Open Edge Computing Initiative (OEC), "Open Edge Computing," <http://openedgecomputing.org/>, Last Accessed at Aug. 2, 2017.
- [5] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog Computing and its Role in the Internet of Things," *Proc. ACM Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC'12)*, Helsinki, Finland, Aug. 2012, pp. 13–16. doi: 10.1145/2342509.2342513
- [6] OpenFog Consortium, "OpenFog Consortium," <https://www.openfogconsortium.org/>, Last Accessed at Aug. 2, 2017.
- [7] H. Flinck, "Multi-access Edge Computing (MEC) Applications," <https://www.ietf.org/proceedings/98/slides/slides-98-nfvrg-sessb-12-multi-access-edge-computing-mec-applications-00.pdf>, Mar. 29, 2017.
- [8] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "Multi-access Edge Computing," <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing>, Last accessed at Aug. 2, 2017.
- [9] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "New ETSI Mobile-Edge Computing Industry Specification Group starts work," <http://www.etsi.org/news-events/news/852-2014-12-news-new-etsi-mobile-edge-computing-industry-specification-group-starts-work>, Dec. 12, 2014.
- [10] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "ETSI Mobile Edge Computing ISG announces first Proofs of Concept," <http://www.etsi.org/news-events/news/1037-2015-12-etsi-mobile-edge-computing-isg-announces-first-proofs-of-concept>, Dec. 22, 2015.
- [11] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "ETSI Mobile Edge Computing publishes foundation specifications," <http://www.etsi.org/news-events/news/1078-2016-04-etsi-mobile-edge-computing-publishes-foundation-specifications>, Apr. 18, 2016.
- [12] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "ETSI Multi-access Edge Computing starts second phase and renews leadership team," <http://www.etsi.org/news-events/news/1180-2017-03-news-etsi-multi-access-edge-computing-starts-second-phase-and-renews-leadership-team>, Mar. 28, 2017.
- [13] G. Fettweis, "The Tactile Internet: Applications and Challenges," *IEEE Vehicular Tech. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, Mar. 2014. doi: 10.1109/MVT.2013.2295069
- [14] ITU-T, "The Tactile Internet," *ITU-T Technology Watch Report*, 24 pages, Aug. 2014. https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf
- [15] M. Maier, M. Chowdhury, B. Rimal, and D. Van, "The

- Tactile Internet: Vision, Recent Progress, and Open Challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 138–145, May 2016. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470948
- [16] D. Sabella, et al., “Mobile-Edge Computing Architecture: The Role of MEC in the Internet of Things,” *IEEE Consumer Electronics Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 84–91, Oct. 2016. doi: 10.1109/MCE.2016.2590118
- [17] 田中裕之, 高橋紀之, 川村龍太郎, “IoT 時代を拓くエッジコンピューティングの研究開発,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 27, no. 8, pp. 59–63, 2015 年 8 月. <http://www.ntt.co.jp/journal/1508/files/jn201508059.pdf>
- [18] 丸山 宏, “エッジ・ヘビー・データとそのアーキテクチャ: ビッグデータ時代の IT アーキテクチャ,” *情報管理*, vol. 56, no. 5, pp. 269–275, 2013 年 8 月. doi: 10.1241/johokanri.56.269
- [19] H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi, and R. Asal, “NFV: State of the Art, Challenges, and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC),” *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 18–26, Nov.-Dec. 2014. doi: 10.1109/MNET.2014.6963800
- [20] K. Iida, “[Invited Talk] Recent Research Trend in Networking: Software-Defined Networking and Network Functions Virtualisation,” *IEICE Tech. Rep.*, vol. 114, no. 286, IA2014-48, pp. 69–72, Nov. 2014.
- [21] T. Taleb, et al., “On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Architecture & Orchestration,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials* advanced publication, 25 pages, May 2017. doi: 10.1109/COMST.2017.2705720
- [22] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “Open Source MANO,” <https://osm.etsi.org/>, Last Accessed at Aug. 2, 2017.
- [23] P. Mach, and Z. Becvar, “Mobile Edge Computing: A Survey on Architecture and Computation Offloading,” *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 29 pages, advanced publication, Mar. 2017. doi: 10.1109/COMST.2017.2682318
- [24] N. Takahashi, H. Tanaka, and R. Kawamura, “Analysis of Process Assignment in Multi-tier mobile Cloud Computing and Application to Edge Accelerated Web Browsing,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering (MobileCloud2015)*, San Francisco, CA, USA, Mar.-Apr. 2015, pp. 233–234. doi: 10.1109/MobileCloud.2015.23
- [25] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “Mobile Edge Computing (MEC): Framework and Reference Architecture,” http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/01.01.01_60/gs_MEC003v010101p.pdf, 18 pages, Mar. 2016.
- [26] R. Mijumbi, et al., “Management and Orchestration Challenges in Network Functions Virtualization,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 1, pp. 98–105, Jan. 2016. doi: 10.1109/MCOM.2016.7378433
- [27] S. Wang, et al., “A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6757–6779, Mar. 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2685434
- [28] R. Mahmud, and R. Buyya, “Fog Computing: A Taxonomy, Survey and Future Directions,” arXiv:1611.05539, 28 pages, Nov. 2016. <https://arxiv.org/abs/1611.05539>
- [29] E. Baccarelli, P. Naranjo, M. Scarpiniti, M. Shojafar, and J. Abawajy, “Fog of Everything: Energy-Efficient Networked Computing Architectures, Research Challenges, and a Case Study,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9882–9910, May 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2702013
- [30] H. Liu, F. Eldarrat, H. Alqahtani, A. Reznik, X. de Foy, and Y. Zhang, “Mobile Edge Cloud System: Architectures, Challenges, and Approaches,” *IEEE Systems Journal*, advanced publication, 14 pages, Feb. 2017. doi: 10.1109/JSYST.2017.2654119
- [31] G. Klas, “Fog Computing and Mobile Edge Cloud Gain Momentum: Open Fog Consortium, ETSI MEC and Cloudlets,” 13 pages, Nov. 2015, <http://yucianga.info/wp-content/uploads/2015/11/15-11-22-Fog-computing-and-mobile-edge-cloud-gain-momentum-%E2%80%93Open-Fog-Consortium-ETSI-MEC-Cloudlets-v1.pdf>, Last accessed at Aug. 4, 2017.
- [32] E. Borcoci, “Fog Computing, Mobile Edge Computing, Cloudlets: Which One?” Tutorial presentation, IARIA Int’l Conf. Advances in System Testing and Validation Lifecycle (VALID2016), Aug. 2016. https://www.iaria.org/conferences2016/filesICSNC16/Softnet2016_Tutorial_Fog-MEC-Cloudlets-E.Borcoci-v1.1.pdf
- [33] K. Dolui, and S. Datta, “Comparison of Edge Computing Implementations: Fog Computing, Cloudlet and Mobile Edge Computing,” *Proc. IEEE Global IOT Summit*, Geneva, Switzerland, June 2017, 6 pages. http://www.eurecom.fr/fr/publication/5193/download/comsys-publi-5193_1.pdf
- [34] 佐野修一, 飯田勝吉, “超広帯域基地局の帯域獲得と競合フローのスレーブット維持を両立する輻輳制御切替手法,” *電子情報通信学会 和文論文誌 (B)*, vol. J99-B, no. 10, pp. 843–858, 2016 年 10 月. doi: 10.14923/transcomj.2016IAP0011
- [35] K. Intharawijitr, K. Iida, and H. Koga, “Analysis of Fog Model Considering Computing and Communication Latency in 5G Cellular Networks,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops 2016)*, Sydney, Australia, Mar. 2016, 4 pages. doi: 10.1109/PERCOMW.2016.7457059
- [36] K. Intharawijitr, K. Iida, and H. Koga, “Simulation Study of Low Latency Network Architecture using Mobile Edge Computing,” *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, vol. E100-D, no. 5, pp. 963–972, May 2017. doi: 10.1587/transinf.2016NTP0003
- [37] K. Intharawijitr, K. Iida, and H. Koga, “Simulation Evaluation of Practical Model of MEC in Low-Latency Network Architecture,” *IEICE Tech. Rep.*, vol. 116, no. 362, IA2016-77, pp. 79–84, Dec. 2016.
- [38] K. Intharawijitr, K. Iida, H. Koga, and K. Yamaoka, “Practical Enhancement and Evaluation of a Low-latency Network Model using Mobile Edge Computing,” *Proc. IEEE Annual Computer Software and Applications Conf. (COMPSAC2017)*, Turin, Italy, pp. 567–574, July 2017. doi: 10.1109/COMPSAC.2017.190
- [39] K. Intharawijitr, K. Iida, H. Koga, and K. Yamaoka, “Use Cases and Strategy for Model of Low-latency Network Architecture,” *Proc. IEICE General Conf. 2017*, Nagoya-city, Aichi-pref., BS-5-1, Mar. 2017, 2 pages.
- [40] Y. Ito, H. Koga, and K. Iida, “A Bandwidth Allocation Scheme to Improve Fairness and Link Utilization in Data Center Networks,” Special Section on Network Resource Control and Management for IoT Services and Applications, *IEICE Trans. Commun.*, accepted with a condition with minor revisions, 9 pages, May 2017.
- [41] 伊藤友輔, 古閑宏幸, 飯田勝吉, “モバイルエッジコンピューティングにおけるフロー要求に応じた帯域割当手法の提案,” *電子情報通信学会 技術研究報告*, vol. 116, no. 484, NS2016-175, pp. 105–110, 2017 年 3 月.
- [42] Y. Ito, H. Koga, and K. Iida, “A Bandwidth Allocation Scheme to Meet Flow Requirements in Mobile Edge Computing,” to appear in *Proc. IEEE Int’l Conf. Cloud Networking (Cloudnet’17)*, Prague, Czech Republic, Sept. 2017, 5 pages.
- [43] B. Varghese, et al., “Challenges and Opportunities in Edge Computing,” *Proc. IEEE Int’l Conf. Smart Cloud (SmartCloud)*, New York, USA, Nov. 2016, pp. 20–26. doi: 10.1109/SmartCloud.2016.18