

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01681

研究課題名(和文) アプリケーション・デバイス特化型次世代MVNOの研究

研究課題名(英文) Research on Application/Device Specific Slicing for Next Generation MVNO

研究代表者

中尾 彰宏 (Nakao, Akihiro)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号：60401238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,590,000円

研究成果の概要(和文)：アプリケーション・デバイス毎のスライス構築とSDN/NFV技術により、きめの細かいQoS制御と網内機能を導入する「アプリケーション・デバイス特化型次世代MVNO基盤の提案とその有効性を実ネットワークにおける実証実験を遂行した。(1)トラフィックから確実にアプリケーション・デバイスを特定しQoS制御を行う基盤技術、(2)網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末の利用を高度化するエッジコンピューティング応用技術、(3)オペレータと利用者の両方が限られた帯域を最適に利用可能とする帯域制御を実現した。学術論文、実証実験を計画通り遂行し、最終年度で商用化の技術移転など十分な成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We propose next-generation MVNO infrastructure based on application / device specific network slicing, which introduces fine-grained QoS control and network functions enabled by SDN / NFV technology designed for each application / device. We also conduct evaluations in the real world field experiments. Our research outcome is three-fold: (1) infrastructure technologies for application/device specific QoS by identifying applications and devices from the data traffic without privacy violation and despite encryption, (2) edge computing technologies for resource limited mobile terminals utilizing network edge resources and (3) bandwidth control technologies that enable both operators and users to optimally use the limited bandwidth.

We have published lots of academic research publication and field experiments as planned, and in the final year, we have achieved technology transfer for the commercialization of research outcome.

研究分野：情報通信・コンピュータネットワーク

キーワード：SDN Network Slicing NFV MVNO 仮想ネットワーク MEC ネットワークセキュリティ アプリケーション同定

1. 研究開始当初の背景

アクセスネットワークやモバイルバックホールにおいては P2P、動画配信、メール・ウェブなどアプリケーションの種類によってトラフィック制御をする必要性が指摘されているにも拘わらず、TCP ポート番号等のヘッダ情報を用いた簡単なトラフィック制御しかできないなど柔軟なトラフィック制御が実現できていない問題がある。特に、総務省がモバイルネットワークの普及とマーケットの活性化を狙って推進する MVNO において、契約数は急増しているものの（図 1）、低速・低価格だけの競争から逸脱すべき新たな付加価値を生む技術が求められている。

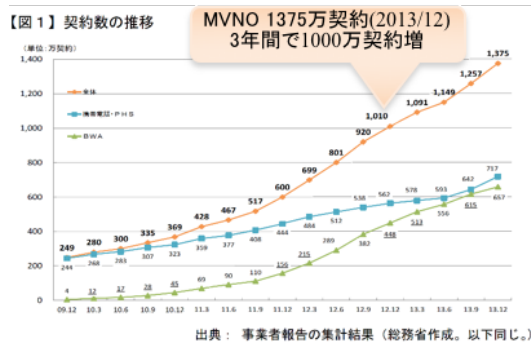


図 1 MVNO 契約者の推移（総務省 2013）

このような背景から提案者らは、アプリケーション・デバイス毎に特化した QoS 制御やユーザの利便性を高度化する網内ネットワーク機能を実装する「アプリケーション・デバイス特化型次世代 MVNO の研究」を提案する着想を得た。本研究は学術的な課題はもちろんのこと、社会実装まで視野に入れており、有用性を実ネットワークに適用可能であることを示すため、比較の実装可能性の高い MVNO に焦点をあてて研究提案を行うが、将来的にキャリアのモバイルバックホールへの適用可能性までを評価対象とする。本研究の技術課題は以下の 3 点である。

・技術課題 1：トラフィックから確実にアプリケーション・デバイスを特定し QoS 制御を行う基盤技術

アプリケーションやデバイス毎の QoS 制御を正確に行うためにはトラフィックの観測からそれを発したアプリケーションやデバイスを 100% (に近い) 確度でリアルタイムに同定可能な技術、および、その情報に基づいて QoS 制御を行う手法が必須である。しかし、既存の手法では、DPI(Deep Packet Inspection)による推定やバッチ処理による機械学習などで 90%近い精度の同定が提唱されているが、暗号化やプライバシーの保護などから DPI の手法は適用が困難であり、新たな手法が必要となる。またこれまでのアプリケーション推定手法はプロトコル推定が殆どであり、本研究で提案するようなアプリケーションプロセスまで「確実」かつ「リアルタイム」に同定する

技術、および、同定が完了したらそのアプリケーションプロセス毎に動的に QoS 制御を実現する SDN(Software Defined Networking) の拡張が必要となる。

・技術課題 2：網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末の利用の高度化する応用技術

モバイル端末においては計算資源やネットワーク帯域が制限されている場合が多く、端末外の資源を活用する必要がある。既存技術では、モバイル端末とクラウドにおける資源を使うネットワーク機能の連携が提案されているが、端末とクラウドが連携する際の遅延の課題や、折り返しのトラフィックの増大などの課題がある。そこで、端末により近い場所つまり網内にネットワーク機能を配備し連携する技術が必要となる。また、技術課題 1 が実現できると、アプリケーション・デバイス毎に異なるネットワーク機能と連携させる基盤技術が課題となる。

・技術課題 3：帯域利用を最適化する機械学習を用いた次世代 MVNO 帯域制御技術

従来の MVNO では帯域を絞り低価格で提供する競争が激化している。技術課題 1 が実現できれば、多数の端末に対してアプリケーション毎・デバイス毎の帯域利用を計測、解析を行う(ビッグデータ解析)ことで、帯域を一律に絞るのではなく、特定の時間に特定のアプリケーションの帯域制限を設定することで、ユーザの本来の帯域利用パターンに合致した、きめ細かい MVNO の課金プランを設定する、次世代の MVNO 帯域制御技術が実現可能である。つまり、アプリケーション・デバイスが集合的に発生する通信量の計測、解析による利用パターンの特定、機械学習による通信量予測が課題となる。

2. 研究の目的

前述した 3 つの技術課題を解決する、下記 3 つの研究課題に取り組むことを目的とする。

・研究課題 1：トラフィックから確実にアプリケーション・デバイスを特定し QoS 制御を行う基盤技術の開発

端末においてアプリケーションやデバイス情報をパケットにマーキングをし、暗号化に左右されずプライバシー保護を実現しながら確実かつリアルタイムにアプリケーション・デバイスの同定を実現する、ソフトウェアプログラム可能な SDN スイッチを用いて複雑な弁別をエッジで、簡略化されたフロー識別やパターンマッチによるアクションをコアで実行することでスケラブルにアプリケーション・デバイスに特化した QoS 制御が可能なシステム設計とシステム開発を行う。これにより、従来困難であったモバイルバックホールなどにおける P2P、動画配信などを制限が、ポートなどの簡単で回避されやすい方法ではなく、アプリケーション毎やデバイス毎に直接トラフィック制御が可能となる。また作成したシステムを、協力企業からモバイル端末

用の SIM カードとネットワーク帯域を購入し、MNO (Mobile Network Operator)の P-Gateway(Packet Network Gateway) から VLAN で研究室ネットワークを経由してインターネットに接続することにより、MVNO として実ネットワークに展開し、実証実験による本技術の有用性の評価・検証を行う。

・研究課題 2：網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末利用を高度化する応用技術の開発

低遅延で端末と連携し、ユーザのアプリケーション利用やデバイス利用を高度化するために、いくつかの応用技術を開発する。例えば、(a) 特定のアプリケーショントラフィックに対し、データ圧縮・解凍や集約・解放などを行うネットワーク機能を P-Gateway 直後に導入し、クラウドとゲートウェイ間のトラフィック削減、(b) デバイスではなく網側に、特定のアプリケーションのトラフィックを指定された時間遮断するペアレンタルコントロールの実現、(c) マルウェアアプリケーションプロセスの網内検出・遮断など、いくつかのアプリケーション、デバイス毎のネットワーク機能を実装し評価する。また、このような端末と網の連携の仕組みを一般化するフレームワークを設計する。また、研究課題 1 と同様、実ネットワークにおける実証実験により本技術の有用性の評価・検証を行う。

・研究課題 3：帯域利用を最適化する機械学習を用いた次世代 MVNO 帯域制御技術の開発

アプリケーション・デバイスが発生する通信の詳細を、プライバシーを保護しながら収集し、解析を行う。

ここでは、(a) パケットにマーキングされたアプリケーションやデバイス情報とフロー情報 (IP アドレスやポート番号等) のマッピング情報、および、(b) 全ての通信のキャプチャデータ、の 2 種類のデータを収集する。また収集された情報をリアルタイムに解析し、(1) 通信パターンの把握、(2) オンライン機械学習による通信予測を実現する。また、研究課題 1 と同様、計測データと解析をもとに、実ネットワークにおける実証実験により本技術の有用性の評価・検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では前述の目的で示した 3 つの研究課題を遂行する。

第一に、SDN を利用し、トラフィックから確実にリアルタイムでアプリケーション・デバイスを特定した上で QoS 制御を行う基盤技術を開発する。様々な端末に対応するパケットマーキング技術、SDN コントローラ (制御装置) との連携による QoS 技術、SDN インターフェース設計などを行う。

第二に、その基盤技術を用いて、アプリケーションに特化した網内に導入可能なネットワーク機能としてトラフィック削減を目的とする圧縮・解凍、キャッシュ技術や、網内で高

度なセキュリティを提供する技術などを開発し、網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末利用を高度化する応用技術を開発する。

第三に、個人情報保護しつつ制御に有効な情報を収集し、機械学習を駆使して帯域利用の予測やマーキングをしない端末におけるアプリケーション・デバイス情報の推測を用いて帯域利用を最適化する次世代 MVNO 帯域制御技術の開発を行う。

4. 研究成果

上記の研究課題各々について研究成果を述べる。第一に、SDN を利用し、トラフィックから確実にリアルタイムでアプリケーション・デバイスを特定した上で QoS 制御を行う基盤技術を開発した。様々な端末に対応するパケットマーキング技術、SDN コントローラ (制御装置) との連携による QoS 技術、SDN インターフェース設計などを行った。第二に、その基盤技術を用いて、アプリケーションに特化した網内に導入可能なネットワーク機能としてトラフィック削減を目的とする圧縮・解凍、キャッシュ技術や、網内で高度なセキュリティを提供する技術などを開発し、網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末利用を高度化する応用技術を開発した。第三に、個人情報保護しつつ制御に有効な情報を収集し、機械学習を駆使して帯域利用の予測やマーキングをしない端末におけるアプリケーション・デバイス情報の推測を用いて帯域利用を最適化する次世代 MVNO 帯域制御技術の開発を行った。

詳細は下記のとおりである。

(1) 研究課題 1：トラフィックから確実にアプリケーション・デバイスを特定し QoS 制御を行う基盤技術の開発

本課題に対しては、リアルタイムに確実にアプリケーション・デバイスを特定するために、端末の OS の仕組みとして通信の最初のパケット (TCPSYN パケットや UDP の最初のパケット) のトレーラにアプリケーションやデバイスの情報のマーキングを行い、プログラマブルノード FLARE にてそのトレーラを解釈・除去しネットワークアドレス変換を実行する仕組みと、アプリケーション・デバイス毎に QoS 制御を実施するための、Southbound Interface (SBI) を設計実装した (図 2)。SDN コントローラ (制御装置) との連携による QoS の実現、SBI の設計・実装を行い、Android 端末を用いた実証実験を遂行した (平成 27 年度)。

更に、トラフィックから確実にアプリケーション・デバイスを特定し QoS 制御を行う基盤技術の開発を実施した。特に、Android 端末だけではなく Windows OS と iPhone / iPad (iOS) において OS 内にパケットマーキングを行う手法の設計と実装をした。大規模化のためスケールさせるためメニーコアプロセッサ内で、ソフトウェア的に、効率良く高速でフローの識別 (Classification) を行う手法を開

発した。更に、本手法の基礎となるケットマーキングをTCP SYNのTrailer(パケットの最後)に付加してトラフィック解析を行う手法について、基本特許として2015年に出願したものが、米国において特許取得した。(平成28年度)。

最終年度では、ユーザー参加型として広く開発した技術を社会展開するため、各端末OSにマーキングを行う汎用的な設計と、端末でのパケットマーキングの実用化を推進した。具体的には、本研究の基礎技術を基にする端末メーカーとの共同研究を開始した。FLARE上でQoSを実行するためのSBIの標準化議論と商用化(ベンチャー企業への技術移転を実施)を推進した。(平成29年度)。

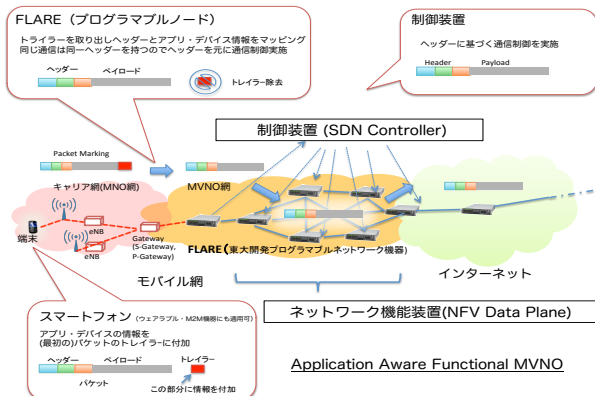


図2 アプリケーションデバイス特化型次世代MVNO全体アーキテクチャ

(2) 研究課題2: 網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末利用を高度化する応用技術の開発

特定のアプリケーションが発出するトラフィックを分類し、ネットワーク機能を実施するアーキテクチャを提案し様々なネットワーク機能を開発し評価した。(図3)。

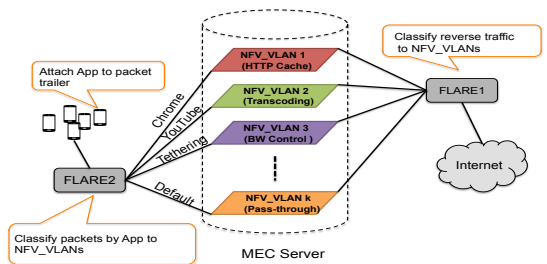


図3 アプリケーション毎にネットワーク機能を適用するアーキテクチャ

特定のウェブブラウザが送受信するトラフィックに対し、透過型プロキシを導入し、データキャッシュ機能の実装と評価を行った。センサーデータの集約開放のネットワーク機能の検討も実施した。また、サーバ負荷の増大をSNSにより検出し特定アプリケーションのトラフィックを分離したり超低遅延を要求するアプリケーションのトラフィックを分離するなど予定していなかった応用研究も実施した(平成27年度)。

更に、網内ネットワーク機能により資源の少ないモバイル端末利用を高度化する応用技

術の開発を実施した。特に、特定のアプリケーションに対し、網内にて通信遮断を実行するセキュリティ機能を実装・評価した(平成28年度)。

最終年度は、マルウェアプロセスの網内検出・遮断のためホワイトリスト・ブラックリストの手法を開発実装・評価した。また、エッジコンピューティングの新規アプリケーション分野の提案を行い論文として発表している。(平成29年度)。

(3) 研究課題3: 帯域利用を最適化する機械学習を用いた次世代MVNO帯域制御技術の開発

本課題に対しては、通信の詳細を個人情報保護しながら収集する手法を開発した。(a)パケットにマーキングされたアプリケーションやデバイス情報とフロー情報のマッピング情報、および、(b)全ての通信のキャプチャデータ、の2種類のデータを収集し、機械学習を行う手法を開発し(図4)評価した(平成27年度)。

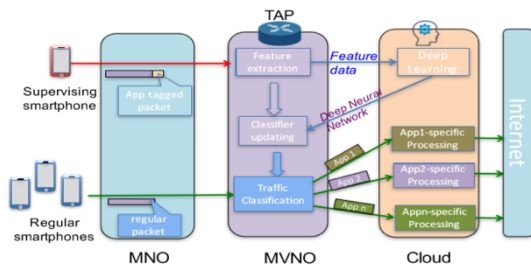


図4 網内深層機械学習によるアプリケーション同定手法

更に、帯域利用を最適化する機械学習を用いた次世代MVNO帯域制御技術の開発を実施した。特に、アプリケーション毎の通信パターンの把握、オンライン機械学習による通信予測を実現する手法を開発した。オンライン機械学習には教師データの収集と学習済みのアルゴリズムの適用との両方を実行する必要がある。パケットマーキングを行う端末によりアプリケーションやデバイス情報とフロー情報のマッピングによる教師データの作成を行う。従来手法に比較して、常に新しい教師データが供給される点と時間ウィンドウ幅の小さいバッチ手法が特徴的である。また、アプリケーション同定の精度を高度化する機械学習アルゴリズムを新規開発した。更に、当初の計画にない応用例としてITS、特に自動運転制御への適用や、上記基本方式を実現するスイッチの実装方式を実装した。さらに、最終年度では、機械学習のアルゴリズムのさらなる改良と評価を遂行した。教師モデルは、1週間のMVNOデータを教師データとし、各日のトラフィックは4000フローで構成される。トレーニングとテストに加え、1日分のトラフィックをトレーニングの確認として使用した。200アプリケーションの分布を図5、図6に示す。

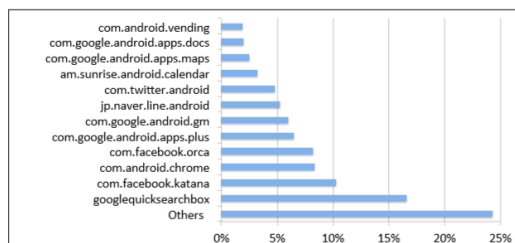


図 5 アプリケーションのトラフィック量分布

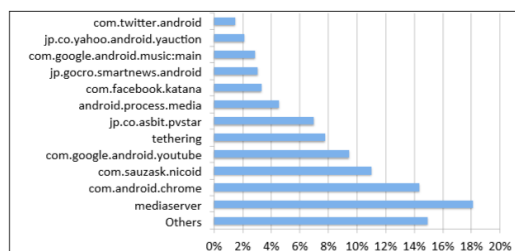


図 6 アプリケーションのユーザ利用時間分布

さらに、図 7 に示すように、MVNO でキャプチャしたアプリケーション・トラフィックの特徴として、宛先 IP アドレス、宛先プロトコル、TTL、パケット・サイズのタプルを使用して、8 テンソル・フローによる層の深層ニューラル・ネットワークを使用して 39 日間のトラフィックにわたって 93.5%の精度で 200 アプリケーションの識別ができた。隠れ層は 40000 (200x200) ニューロンで構成される。

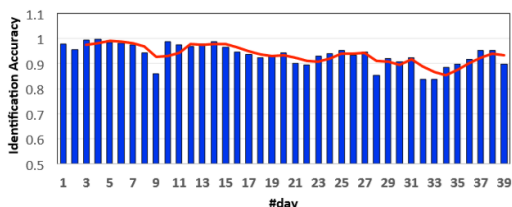


図 7 アプリケーション識別精度

識別制度を改善する効果的な方法は教師データの増加であるが(図 8)同時にある程度の期間の教師データで制度が飽和することもわかっている。データ量よりもデータの多様性が精度向上には重要である。

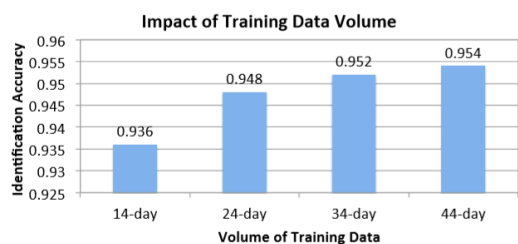


図 8 トレーニングデータ量の精度への影響

従来のデータ分析は、単純にデータを収集し、大量の計算資源で計算を行う、いわゆるピッ

グデータ解析である。計算資源が限られている場合は、ランダム・サンプリングでデータ量を減らして解析する手法がとられてきた。アプリケーション識別のようなデータの多様性が量より有用になる場合は、重複データでの深層機械学習には不适当である。インテリジェントなデータのサンプリングを検討した。データ・ソースが精度向上に寄与しない場合は、そのデータは使用しないで、多様化を生成するデータを選択する投機的データ収集の手法を提案している。

また、最終年度では、同時に商用化に向けた仕様確定や要素技術の評価など、社会実装に向けた研究開発を遂行した。その結果、並行して協力企業との共同研究が発展し、技術移転を実施することができた(平成 29 年度)。

(4) まとめ

本研究においては当初予定した研究計画以上に研究開発を遂行し、十分な学術的成果を得ることができた。また、社会実装の観点でも、最終年度には、実用化・商用化に繋がる研究活動に注力した。その結果、端末メーカーとの商用化を目指した共同研究開始、および、東大発ベンチャーに技術移転を行い、ある MVNO への商用化案件を 1 件実施するなど、研究の社会実装の面において大きな成果を得ることができた。

(5) 本研究期間における発表論文成果の概要を下記に示す。

平成 27 年度の発表論文実績は、ジャーナル論文 1 本(2015 年度に執筆; 2016 年度発表確定)、学会発表 11 件(うち招待講演 4 件、うち国際学会 3 件)である。また、電子情報通信学会より、研究賞 1 件、学生賞 1 件を受賞した。

平成 28 年度の発表論文実績は、ジャーナル論文 1 本(2015 年度に確定)、学会発表 20 件、うち国際学会 13 件(2 件が基調講演)である。また、最優秀論文賞の受賞や米国特許取得など、当初の計画にはない研究成果を達成した。

平成 29 年度の発表論文実績は、ジャーナル論文 3 本、学会発表 11 件(うち招待講演 4 件、うち国際学会 8 件、うち査読付き論文は 3 件、国際共著論文は 5 件)である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](総件数 4; ジャーナルのみ集計)

- ① Akihiro Nakao and Ping Du, "Toward In-Network Deep Machine Learning for Identifying Mobile Applications and Enabling Application Specific Network Slicing", IEICE Transactions on Communications, 2018 Jan, 査読有, DOI: 10.1587/transcom.2017CQI0002
- ② Akihiro Nakao and Ping Du, "Application-Specific Slicing for MVNO and Traffic Characterization [Invited]", IEEE/OSA Journal of Optical Communication and Networking, vol. 9, pp.A256-A262, 2017 Feb, 査読有, DOI: 10.1364/JOCN.9.00A256

- ③ Akihiro Nakao, Ping Du, Yoshiaki Kiriha, Fabrizio Granelli, Anteneh Atumo Gebremariam, Tarik Taleb, and Miloud Bagaa, “End-to-end network slicing for 5G mobile networks,” *IPSI Journal of information Processing.*, vol. 25, pp. 153-163, 2017 Feb., 査読有, DOI: 10.2197/ipsjjip.25.153
- ④ Akihiro Nakao, Ping Du, Takamitsu Iwai, “Application Specific Slicing For MVNO Through Software-Defined Data Plane Enhancing SDN”, *IEICE TRANSACTIONS on Communications, Special Section on Network Systems for Virtualized Environment. Vol. E98-B, No. 11, PP2111-2120*, 2015 Nov., 査読有, DOI: 10.1587/transcom.E98.B.2111

[学会発表] (総件数 42)

- ① Akihiro Nakao, “France-Japan Forum on Challenged Future Cities”, 日仏学術フォーラム「未来のスマートシティへの新たな挑戦」, 招待講演, 2018/2/13
- ② Kengo Sasaki, Naoya Suzuki, Satoshi Makido and Akihiro Nakao, “Layered Vehicle Control System Coordinated between Multiple Edge Servers”, The 3rd IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), 2017/7/3-7, 査読有.
- ③ Akihiro Nakao, “Flexible Network Slicing for Low-latency 5G Mobile Services”, ON*Vector Photonics Workshop 2017/2/22-23, 招待講演
- ④ Takamitsu Iwai and Akihiro Nakao, “Adaptive mobile application identification through in-network machine learning”, IEEE/IEICE 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2016/10/5-7, 査読有.
- ⑤ Akihiro Nakao, “Application Driven Network Softwarization and Network Slicing”, IEEE/IEICE 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 招待講演, 2016/10/5-7.
- ⑥ Ping Du and Akihiro Nakao, “Application Specific Mobile Edge Computing through Network Softwarization”, IEEE International Conference on Cloud Networking (CloudNet) 2016/10/3-5, 査読有.
- ⑦ Kengo Sasaki, Naoya Suzuki, Satoshi Makido and Akihiro Nakao, “Vehicle Control System Coordinated Between Cloud and Mobile Edge Computing, The 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2016/9/20-23, 査読有.
- ⑧ Akihiro Nakao, “Software Defined Data Plane and Applications”, IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing, 2016/6/14-17, 招待基調講演
- ⑨ Akihiro Nakao, “Application-Driven Network Softwarization”, The 2nd IEEE Conference on Network Softwarization (IEEE NetSoft 2016) 2016/6/6-10, 招待基調講演
- ⑩ Ping Du, Pratama Putra, Shu Yamamoto, and Akihiro Nakao, “A Context-aware IoT Architecture Through Software-defined Data Plane” IEEE TENSYP 2016 (Best Paper Award), 2016/5/9-11, 査読有.
- ⑪ Akihiro Nakao, “Application Specific Slicing For MVNO Through Software-Defined Data Plane Enhancing SDN”, OFC 2016 (Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2016/3/20-24, 招待講演.
- ⑫ Akihiro Nakao, “End-to-End Slice Programmability and Mobile Edge Computing”, ON*Vector Photonics Workshop, 2016/2/29-3/1, 招待講演.
- ⑬ Akihiro Nakao, “End-to-End Slice Programmability and Mobile Edge Computing”, Comsys2015, 2015/11/25, 招待講演.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: Information transmission system, information communication apparatus, and information transmission apparatus
 発明者: Akihiro Nakao
 権利者: Akihiro Nakao
 種類: 特許
 番号: US 20150222529 A1
 取得年月日: 2017 年 02 月 15 日
 国内外の別: 外国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 彰宏 (NAKAO, Akihiro)
 東京大学・大学院情報学環・教授
 研究者番号: 60401238

(2) 研究分担者

杜 平 (DU, Ping)
 東京大学・大学院情報学環・特任講師
 研究者番号: 10462912

山本 周 (YAMAMOTO, Shu)
 東京大学・大学院情報学環・特任助教
 研究者番号: 1059031