

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：37111
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2017～2019
課題番号：17H03270
研究課題名(和文) 先進的無線・有線ハーモナイズドSDNの研究開発

研究課題名(英文) Advanced wireless/wired harmonized SDN

研究代表者

大橋 正良 (Ohashi, Masayoshi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：50500154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：通信フローに対して、ネットワーク資源を柔軟に割り当てる事を可能とするSDNを、ダイナミックに変化する無線通信へ拡張することを目的に、無線区間における「無線資源の環境適応仮想化」と有線区間における「サービスドリブンSDN」という新たな概念を提唱し、これらが有機的かつ定常的に連携する環境適応ネットワーク「先進的無線・有線ハーモナイズドSDN」と、サービスから無線資源までを協調的に扱う新たなSDNフレームワークの確立を行った。実測データに基づくシミュレーション評価などにより無線・有線ハーモナイズドSDN技術の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのSDNは有線ネットワークのフレキシビリティを飛躍的に向上させ、環境に適応したネットワーク資源の割り当てというパラダイムシフトを引き起こしたが、無線環境への適応は、双方のダイナミックなふるまいを協調制御できないためボトルネックとなっていた。本研究成果により、ダイナミックな無線資源を管理・仮想化する“スペクトラムマネージャ”とダイナミックなサービスの要求品質を把握する“サービスマネージャ”が連携することで、SDNの適用範囲を無線ネットワークにまで拡張させ、逼迫している周波数資源の有効利用にも活用できることが示され、将来の無線通信技術の発展に大きな影響を与えると考える。

研究成果の概要(英文)：SDN is known to be able to flexibly allocate network resources to communication flows. For the purpose of extending SDN to wireless communication whose channel state is dynamically changing, we proposed two concepts. One is "adaptive virtualization of wireless resources considering wireless environment" in the wireless domain and another one is "Service Driven SDN", in a wired network domain. The new SDN framework "advanced wireless/wired harmonized SDN" was established by constantly coordinating above two concepts, thus the proposed SDN may handle communication services and wireless resources in a coordinated manner. The effectiveness of wireless/wired harmonized SDN technology was shown by simulation evaluation based on measured data.

研究分野：ワイヤレスネットワーク

キーワード：SDN 無線通信 有線通信 ネットワーク 無線資源 環境適応

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

IoT(Internet of Things)時代の幕開けと共に、通信アプリケーションの利用主体が人から様々なモノへと移り、それにともない無線通信の重要性と通信に対する要求の多様性が飛躍的に増している。このような状況で、多様なアプリケーション要求に適応してフロー単位でネットワーク資源をフレキシブルに利用する考えとして、近年 SDN(Software Defined Network)や NFV(Network Function Virtualization)技術が注目されている。SDN は通信フローに対して、ネットワーク資源（経路制御、通信）を柔軟に割り当てる事を可能とする技術であり、データセンターなどで実際に運用されている。しかし SDN はその特性上、有線ネットワークを対象としているため、無線通信への適用は考慮されていない。これに対し、無線通信では、ソフトウェア無線の適用可能性の高まりとともに、利用システムや利用周波数をダイナミックに変更することが現実的になっており、多様な無線環境でも SDN を有効活用することが求められる。加えて、無線周波数資源が逼迫している状況を鑑みると、周波数の有効利用をも考慮した無線・有線を統合的に扱うネットワーク制御への期待は大きい。

今日まで、SDN の研究は主に上位レイヤを扱う研究者を中心に議論を進め、逆に無線周波数資源の有効利用を目指す研究は下位レイヤを扱う研究者を中心に議論されており、相互の連携は積極的には行われて来なかった。上位レイヤでは、無線ネットワークに対する SDN の適用に関して、企業や研究分担者（妙中、塚本）などが検討しているが、これらの研究ではフロー毎に既存の無線通信技術を割り当てており、利用システムや利用周波数帯の特性やそのダイナミックな変動は考慮していない。

2. 研究の目的

本研究開発では、無線区間における「無線資源の環境適応仮想化」と有線区間における「サービドリブン SDN」という新たな概念を提唱し、これらが有機的かつ定期的に連携しつつ動作するために必要となる機能の研究開発を行った。具体的には、上位レイヤで把握したフロー単位でのサービス要求を適宜、インデックス化して下位レイヤに通知する。その後、下位レイヤは無線環境と上位レイヤの要求に合わせて、周波数特性を鑑みた上で複数システムを適応的に束ねて無線資源を仮想化し、上位レイヤに提供する。これらの連携により、有線、無線区間を含めたフローに対して適切な資源を提供することを目指した。

3. 研究の方法

本研究開発は、研究代表者（大橋）を統括責任者とし、上位レイヤの研究者（塚本、妙中）および下位レイヤの研究者（藤井、田久、太田）が密接に連携して、研究を進める体制を取った。このような、複数レイヤの研究者が共同で研究開発を行う例はこれまでもあるものの、用語の定義や考え方の違いから、異なる研究テーマを並列に実施して、最後に一つの報告書にまとめる形を取っており、連携した研究成果が出ないことも多かった。本研究開発では、真に意味のある研究成果を生み出すため、全研究者が合同で実施する「ハーモナイズド SDN 検討会」を1ヶ月に1回開催することで、研究の進捗確認と、相互連携を深める体制とした。本検討会は、通常はテレビ会議で開催するものの、4半期毎に Face-to-Face で実施する体制を取ることで、意識合わせを重視した研究開発を心がけた。確実な研究成果が得られるように、本研究開発では三つの課題に分けて分担を明確化して研究を進めた。

本研究開発では、先進的無線・有線ハーモナイズド SDN の基盤技術の確立を目指し、三つの研究課題に分けて分担と責任を明確化した上で、三年間で着実な成果を目指した。課題1「環境適応無線資源仮想化技術の研究」は下位レイヤ分野の研究者が中心となって無線資源を SDN で扱う適応インデックス化技術を検討した。課題2「サービドリブン SDN による適応型ネットワーク構成技術の研究」は上位レイヤ分野の研究者が中心となって、End-to-End サービスの適応通信管理技術の研究を行った。課題3「先進的無線・有線ハーモナイズド SDN の研究」では統合システムのフレームワークおよび無線センサネットワークによる実証実験を行った。携わる研究者間の連携を強化するため、毎月、ハーモナイズド SDN 検討会を開催し、短時間で最大限の研究成果を目指した。

4. 研究成果

(1) 課題1「環境適応無線資源仮想化技術の研究」

環境適応無線資源仮想化技術のために、無線資源を SDN で扱う適応インデックス化技術を検討した。本研究では、通信端末が交換する情報をスペクトラムデータベースに集約し、その情報をスペクトラムマネージャ(SPM)に入力することで、無線資源の予測を行う。これらの無線資源を活用し、SDN による無線環境変動を反映した制御を行い、従来よりも通信品質を改善することを目指して研究をすすめた。はじめに、複数帯域を持つ無線アドホックネットワーク環境において、周波数の性質によりリンク接続性、リンク品質が異なる中で、システムの要求条件や帯域内の既存ユーザの状況に応じて利用する周波数帯を変更して通信を行なう無線アドホックネットワークの経路構築法についての検討を行った。ここでは、ノード間の接続性を重み付きラプラシアン行列で定義し、代数的連結度でその安定性を評価することで、その結果を複数の周波数帯域を適応的に活用する SDN コントローラを活用したネットワーク構築手法を提案した。図1に本研究

の評価で活用したシステムモデルを示す。図2に提案する SDN コントローラを活用した帯域割り当てを行った場合のスループット特性を示す。結果として、複数ユーザ環境下においてもそれぞれのユーザに対して適した経路を提供でき、それぞれのスループットが維持できることを確認した。次に、現状の無線環境のリンク品質を判断する仕組みとして、残余帯域を既存トラフィックから観測する手法について検討し、上位レイヤの経路選択向けに提供する手法について検討を行った。本手法は、パケットの占有時間率を送受信データログから予測し、その帯域に新たなフローが発生した場合に達成できるスループットの予測を行う。本手法を用いることで、正確な残余帯域の推定が行われていることが確認できた。

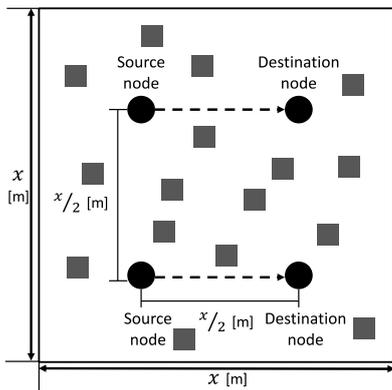


図1 システムモデル

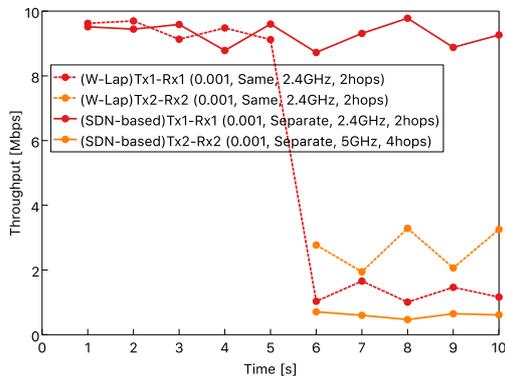


図2 平均スループット

また、有線・無線間通信品質予測法としてパケット解析を利用した、データリンク層における無線品質とトランスポート層における通信品質の関係性を明らかにした。無線 LAN のパケットキャプチャ (L2) とアクセスポイント後のミラーポートにおけるパケットキャプチャ (L4) の分析を進めた。分析方法として、今回 L2 でのパケットロス率を、取得したパケットのシーケンス番号の値が飛んでいるパケット数または 7 回連続で再送を行っているパケットと総取得パケット数の比として定義した。また、L4 では AP1 に有線で繋がれたモニタ PC と STA1 との取得パケット数に対する総取得パケット数の比をパケットロス率と定義した。図3のように 2 台の測定端末 STA1, STA2 を用意し、3 つの配置でそれぞれ通信品質劣化環境を変えて測定を行った。各配置の平均パケットロス率を表 1 に示す。配置 1 ~ 3 の順で L2 と L4 は連動してパケットロス率が劣化している。この結果から、上位のネットワークリンクと無線のリンク品質との間に一定の関係性を見出し、他階層の通信品質推定が可能であることがわかった。

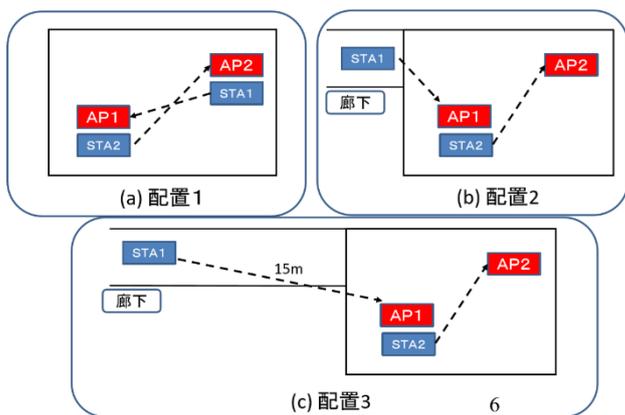


図3 無線 LAN の配置図

表 1 配置別の平均パケットロス率

	L4	L2
配置 1	0.000139	0.00059
配置 2	0.0023	0.0045
配置 3	0.0218	0.0421

さらに、隠れ端末状態に対する品質劣化補償法として、無線 LAN の品質劣化要因の一つである隠れ端末問題に対し、衝突を回避する方法として、変調方式符号化セット (MCS) を拡大することによるデータパケットの短縮効果を利用した、衝突回避法を提案した。分析方法として、本研究では、無線 LAN における隠れ端末問題によるスループットの変化を実機とパケット解析ソフトを用いて分析を進めた。本研究では 2 台の測定端末 STA1, STA2 を用意し、情報集約局 AP1 と AP2 とのそれぞれの距離が比較的短く高い信号電力対雑音電力比 (SNR) が確保できる環境で実験を行った。AP1, STA1 間を測定端末、AP2, STA2 間は負荷とする。MCS を STA が自律的に選択する自動選択をした場合と、最上位の MCS を指定するコマンドを AP が STA へ通知し、STA の自動選択に割り込む方法で、最上位の MCS を選択した場合の方法を検討した。図 4、図 5 に STA1 での MCS を固定選択した場合と自動選択した場合の STA1 の再送率、UDP スループットをそれぞれ示す。ここで再送率とはパケットを再送した割合である。

STA2 のトラフィック量が 7Mbps から 10Mbps においては、MCS を 54Mbps に固定する方法が、それぞれ 2Mbps の拡大と再送率の軽減を実現した。この結果より、高い MCS を AP がコマンド通知することによる、短パケット効果によるスループット改善を確認した。しかし、STA2 のトラフィック量が 15Mbps を超えた場合には明確な改善効果は認められなかった。これは、STA2 のトラフィック量が拡大するため、短パケット時においてもパケット衝突が回避できず、スループット改善及び再送率軽減の効果が得られなかったと考える。

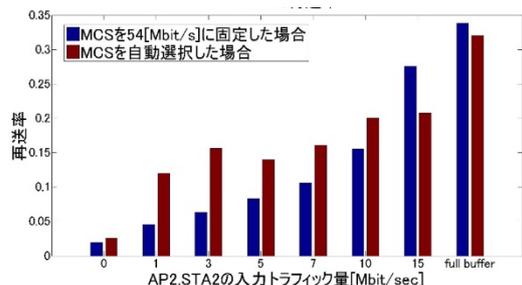


図4 STA1 の再送率

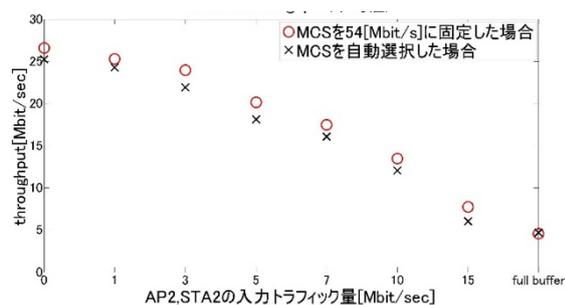


図5 STA1 のUDP スループット

(2) 課題2 「サービスドリブン SDN による適応型ネットワーク構成技術の研究」

ネットワークではサービス (アプリケーション) 品質志向のネットワーク利用を無線レイヤの資源状況を考慮して SDN 制御する方法の検討を行った。ネットワークでは無線干渉や無線環境変化等による無線レイヤの変化を認識できない上、ネットワークを介して提供されるサービス品質を認識できないため、無線の特性に合わせたネットワーク制御ができないばかりか、アプリケーション品質に応じたネットワーク制御が困難であった。そこで本課題ではこれらの2点の問題点に着目し、無線レイヤとの連携に必要な情報粒度や連携方法を検討しながら、(a)無線の環境認識を行う方法を検討し、サービス、特に(b)動画配信におけるサービス品質志向のネットワーク制御に取り組んだ。

(a)無線環境認識では二つの無線ネットワークに接続可能な端末において無線環境に応じて適切な無線資源を利用する手法を提案した。具体的には、SDN 技術を活用して二つの無線ネットワークの計測を用い、無線環境の変化 (無線干渉の発生・停止) を検知した上で、適応的にネットワークを制御する手法を提案した。本研究では無線ネットワーク経路上のルータにおいて、通信端末毎の送受信パケット数の変動を SDN で計測することでネットワーク上で実際にパケット損失が発生する前に干渉を検出できる方法を提案した。つまり、ルータで計測した特定の端末へのパケット入力数が出力数に比べて大きくなる場合、無線品質の低下と判断でき、速やかに転送経路を切り替えることでパケット損失を回避した。また、入出力パケット数の変動から干渉の発生度合いを推測し、損失が発生しない範囲で被干渉チャネルを利用し続け、パケット入出力数変動の誤差をチェビシェフの不等式を用いた誤差判定に基づいて除外することで干渉度合いを誤りなく判定出来る事を明らかにした。本手法は実環境における評価実験を行い、図6の結果を得た。ここでは二つのチャネルを利用可能な端末から通信フローを加算的に送信し、155秒目で片方のチャネル (図中 116ch) に干渉を発生させた。既存手法ではスループットが低下しているのに対し、提案手法では 116 チャネルを干渉の影響がないレベルで利用を継続しながらも、スループットを維持できることを明らかにした。

(b)動画配信のサービス品質制御においては、SDN の制御メッセージを用いて QoE を推定する手法を提案し、無線環境が良好な実験環境における有効性を示した。多様なアプリケーションが混在するネットワークにおいてサービス品質志向のネットワーク制御を行うためにはアプリケーションの種類を問わない共通の品質指標が必要となる。そこで本研究では QoE をその指標として用いて、SDN において通信フローの転送途中に QoE を推定しながら適切なネットワーク制御を行う方法を検討した。SDN を用いて動画フローの QoE を推定するために、ITU-T G. 1071 で標準化されている QoE 評価モデルを用いた。QoE 算出に必要なパラメータに関しては、ネットワーク内部で取得もしくは、それに基づき推定するモデルを提案し、実環境において評価した。G. 1071 ではパケット損失が QoE の多大な低下を招くため、提案手法では SDN 管理するマルチホップネットワーク全体から取得した入出力トラフィック情報を用いてネットワーク全体のパケット損失推定を行った。この場合、計測範囲が広いため計測誤差が避けられないため、その誤差回避方法を提案した。まず、安定した無線環境において高い推定精度を獲得出来る事を示し、その後、無線干渉が発生する環境に適用するために過去の累積的な変動を用いて誤差補正を行う拡張を行った。その結果、パケットロスが頻発する劣悪なネットワーク環境において、図7に示すように QoE をリアルタイムかつ正確に推定できる事を示した。加えて、実際の利用環境においては、ネットワーク内に流入するフローを最初に識別し、その後、上記で提案した QoE 推定を行う必要がある点に着目し、SDN の制御メッセージで得られる情報を基に再帰型ニューラルネットワーク RNN を用いてアプリケーションを特定する手法を提案し、実験ネットワーク環境において有効性を示した。

以上の研究成果について、これまでに論文誌 1 件、国際会議 2 件、国内研究会 3 件の発表を行

った。特に国際会議 INCoS での発表が Best workshop paper award を、国内研究会の 2 件が電子情報通信学会 九州支部 学生講演奨励賞ならびに電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会 若手研究奨励賞をそれぞれ受賞した。

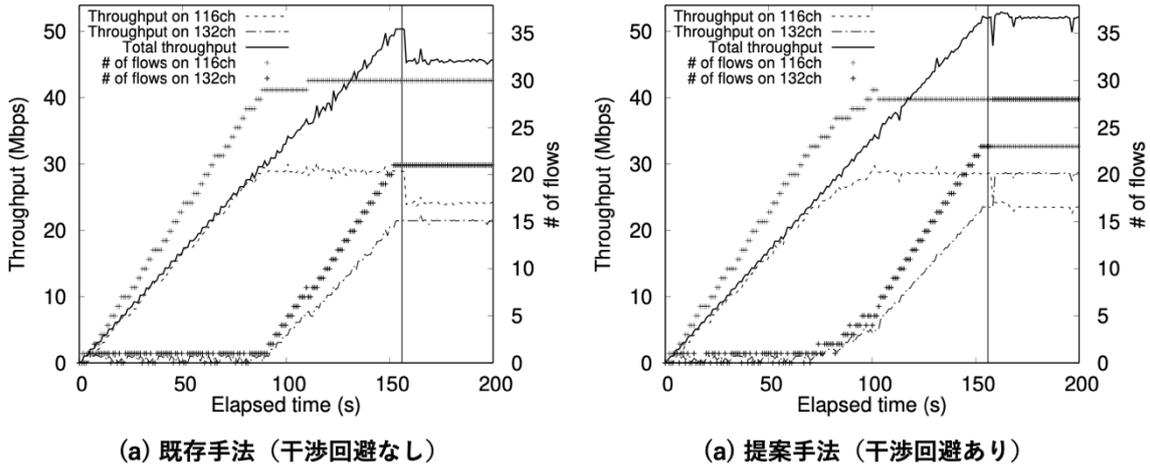


図 6 無線干渉下におけるスループット性能

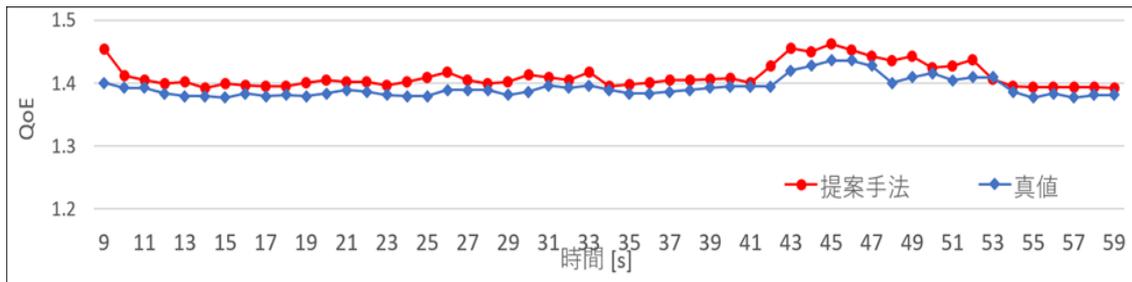


図 7 推定 QoE (パケットロス率 1%環境)

(3) 課題 3 「先進的無線・有線ハーモナイズド SDN の研究」

課題 3 においては今後無線アクセスが高い周波数を用いて広帯域化してゆく動向を踏まえ、通信キャリアにそれぞれ固定的に周波数を割り当てるより、広域周波数をそれぞれのキャリアのトラフィックデマンドに応じて動的に利用することが有益である。このため基地局やネットワークも基盤を共有し、必要に応じバーチャルに資源をそれぞれに割り当てる仕組みが必要となってくる。無線・有線にまたがったこの制御を実験的に構築・実証することをめざし、2つのキャリアネットワークに接続された基地局共有模擬環境を構築し、有線と無線のリソース割り当てを行うことをめざした。図 8 に示すように無線 LAN システム (2.4GHz, 5GHz) ならびに VLAN を用いて模擬システムを構築し、電波暗室環境で実際にトラフィックを発生させ、その負荷を時間変化させた際、負荷の変化に応じて、共有対象の無線 LAN の所属キャリアを Coordinator の指示によりスイッチさせて帯域制御を模擬し、スループットを計測した。その結果、図 9 に示すように、時間ごとにキャリア A, B のトラフィックを増減させたのに応じて、スループットが制御されていることを確認した。

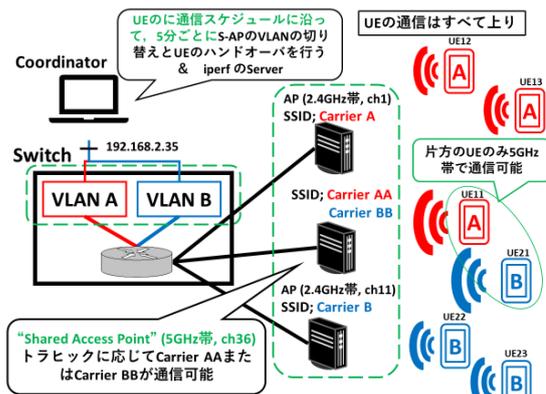


図 8 実験系の構成

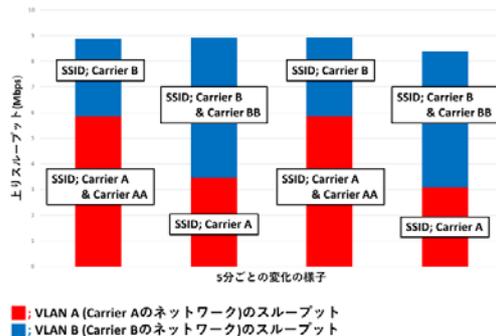


図 9 トラフィックを変化させた際のスループット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Taenaka, K. Mizuyama, K. Tsukamoto	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Adaptive bundle flow management for reducing control traffic on SDN-enabled multi-radio wireless networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications, Jul. 2018	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2017EBT0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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 Toshiyuki Shizuoka, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Environmental Aware Hierarchical Ad Hoc Network with Multiple Frequency Bands using Weighted Laplacian Matrix
3. 学会等名 APSIPA ASC 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川 駿平, 金岡 拓哉, 妙中 雄三, 塚本 和也
2. 発表標題 OpenFlow制御メッセージを用いたQoS推定手法の提案と評価 ～ 無線メッシュネットワーク上の動画通信に対する有効性評価 ～
3. 学会等名 電子情報通信学会, 信学技報(NS), vol.118, no.465, NS2018-216, pp. 135
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神尾明典、田久修、太田真衣、藤井威生、笹森文仁、半田志郎
2. 発表標題 無線LANのパケット解析による隠れ端末状態の識別法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, B17-2
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金岡 拓哉, 妙中 雄三, 塚本 和也
2. 発表標題 アプリケーション要求と空間的周波数利用率の違いを考慮したSDN制御の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会九州支部 学生会講演会 B-5
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuzo Taenaka, Kazuya Tsukamoto
2. 発表標題 Elastic channel utilization against external radio interference on SDN-enabled multi-radio wireless backhaul networks
3. 学会等名 IEEE International Conference on Cloud Networking (CloudNet2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Shizuoka, Osamu Takyu, Mai Ohta, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Hierarchical Ad Hoc Network with Wireless Environment Recognition
3. 学会等名 Proc. APSIPA ASC 2017, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 2017. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiyuki Shizuoka, Osamu Takyu, Mai Ohta, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Environmental Aware Hierarchical Wireless Ad Hoc Network on Multiple Frequency Bands and Multiple Channels
3. 学会等名 Proc. SmartCom 2017, Rome, Italy, Oct. 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田久修, 木村匠, 藤井威生, 太田真衣
2. 発表標題 Open Flow によるトラヒック経路切り替えを利用したマルチチャネルアクセス機構における一検討
3. 学会等名 信学技報, vol.117, no. 56, SR2017-14, pp. 81-88, 2017年5月
4. 発表年 2017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
研究分担者	藤井 威生 (Fujii Takeo) (10327710)	電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・教授 (12612)	
研究分担者	塚本 和也 (Tsukamoto Kazuya) (20452823)	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授 (17104)	
研究分担者	太田 真衣 (Ota Mai) (20708523)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	
研究分担者	田久 修 (Takyu Osamu) (40453815)	信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601)	
研究分担者	妙中 雄三 (Taenaka Yuzo) (50587839)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授 (14603)	