

5. ネットワーク管理運用技術の進化と将来像

5-1 ネットワーク品質評価・設計・制御技術

Quality Assessment, Design, and Control of Communications Networks

岡本 淳 久保亮吾 津川 翔 平栗健史 松田崇弘

Abstract

情報通信ネットワークの通信品質に関する研究には、通信品質の評価指標を定義し適切に評価を行う通信品質評価、定義された通信品質指標に基づき通信品質を計測・予測する通信品質計測、計測・予測された通信品質に基づきネットワークの設計・制御を行う通信品質制御等の研究課題が存在する。本稿では、通信品質の分野で進められている研究について紹介し、これらの研究が将来ネットワークの発展に対してどのように寄与するかについて議論する。

キーワード：通信品質評価，通信品質計測，通信品質設計，通信品質制御，情報通信ネットワーク

1. はじめに

通信品質に関する研究はとどまるところを知らず、新たな通信サービスが開発されるとともに、それらのサービスを適切にユーザに提供するための通信品質に関する研究が重要となる。すなわち、通信サービスの発展とともに、通信品質の研究自体も発展している。

通信品質の研究は通信品質評価、通信品質計測、通信品質設計・制御に分類することができる⁽¹⁾。通信品質評価は、通信品質の指標を適切に定義し、通信品質を定量的に評価することである。通信品質評価に関する研究

は、通信サービスに対するユーザの体感品質である QoE (Quality of Experience) に関する研究が一つの主流となっている。また、M2M (Machine-to-Machine) 通信や構成要素がネットワークを介して接続された制御システムであるネットワーク化制御等、機械同士の通信に対する通信品質も重要な研究対象である。通信品質計測は、QoE, QoS (Quality of Service) 等の通信品質の計測やこれらの評価指標に影響を与えるネットワークの構成要素の性能を計測することである。また、通信サービスを受けるユーザの行動 (ユーザの通信行動) も重要な計測対象である。通信品質設計・制御は、計測した通信品質に基づき、通信品質評価指標を最大化するためにネットワークの設計・制御を行うことである。また、ネットワークの制御だけでなく、ユーザを適切な利用形態に導くユーザ誘導も通信品質制御に含まれる。本稿では、これらの研究について紹介し、将来ネットワークが通信品質を基に人や‘もの’に対して最善の便益提供を可能とする融合技術について議論する。

2. 通信品質評価

2.1 ユーザ体感品質

QoS はパケット紛失率や遅延など客観的な指標を用いた通信サービスの品質を表すのに対し、QoE はユーザのサービスに対する体感品質等、主観的な通信品質を

岡本 淳 正員 日本電信電話株式会社 NTT ネットワーク基盤技術研究所
E-mail okamoto.jun@lab.ntt.co.jp
久保亮吾 正員 慶應義塾大学理工学部電子工学科
E-mail kubo@elec.keio.ac.jp
津川 翔 正員 筑波大学システム情報系情報工学科
E-mail s-tugawa@cs.tsukuba.ac.jp
平栗健史 正員：シニア会員 日本工業大学工学部電気電子工学科
E-mail hira@nit.ac.jp
松田崇弘 正員：シニア会員 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻
E-mail matsuda@comm.eng.osaka-u.ac.jp
Jun OKAMOTO, Member (NTT Network Technology Laboratories, NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION, Musashino-shi, 180-8585 Japan), Ryogo KUBO, Member (Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522 Japan), Sho TSUGAWA, Member (Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8573 Japan), Takefumi HIRAGURI, Senior Member (Faculty of Engineering, Nippon Institute of Technology, Saitama-ken, 345-8501 Japan), and Takahiro MATSUDA, Senior Member (Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita-shi, 565-0871 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.100 No.8 pp.831-836 2017年8月
©電子情報通信学会 2017

表1 代表的な主観・客観評価法

メディア	主観 評価法	客観評価法		
		メディア レイヤモデル	プランニング モデル	パケット レイヤモデル
音声 Audio	P. 800 BS. 1284	P. 862/863 BS. 1387	G. 107/107.1	P. 564
映像	P. 910/911 /920 BT. 500	J. 144/249 (SD) J. 247/246 (PC/携帯) J. 341/342 (HD)	G1070 (TV 電話) G. 1071 (IPTV)	P. 1201/1202 (IPTV) P. 1203 (映像配信)
Web	P. 1501	—	—	—

※BS, BT シリーズは ITU-R 勧告, G, J, P シリーズは ITU-T 勧告

表す。通信サービスを享受するのはユーザが中心であることから通信サービス設計には QoE の考慮が重要である。QoE の評価尺度を統一的に扱うため国際標準化機関である ITU (International Telecommunication Union) において検討が進められてきた。その評価手法として、規定の環境下において人による再現性が高く、安定した判断に基づき品質を評価する主観評価法が定められ、それを客観的な尺度として扱いやすくするため音や映像に関する物理量やネットワーク側で測定可能な情報を用いる客観評価法が定められてきた。客観評価法には音声や映像のようなメディア信号を利用して QoE を推定するメディアレイヤモデル、サービス設計時に想定されるパケット紛失率や符号化レートなどを設定し効率的に QoE を考慮してサービス設計を行うためのプランニングモデル、実際に流れるパケットの情報から再生ビットレートやバッファリング時間等を導出し QoE を推定するパケットレイヤモデル等に分かれる。表1に ITU において規定された勧告を示す。音声サービスでは IP 電話や携帯電話の品質基準としてプランニングモ

用語解説

エンゲージメント分析 ユーザのエンゲージメント（当該サービスを使い続けてもらうこと）を、サービスに対するユーザの利用行動観察などにより評価分析すること。

Tactile Internet 1 ms のエンドツーエンド遅延を保証可能なネットワークのこと。人間の触覚反応遅延が 1 ms 程度であることからこのように呼ばれる。

ハプティック通信 力触覚情報を遠隔地間で伝送する技術のこと。遠隔操作において操作者への力触覚フィードバックが可能となる。

MU-MIMO 複数の端末装置を仮想的な大規模アレーアンテナとみなして MIMO 伝送を行う技術。複数のユーザにビームを向け、同一周波数で空間多重接続を実現する。

Massive MIMO 次世代移動通信技術で、複数のアンテナを用いる MIMO/MU-MIMO などを発展させた技術。アンテナの数を数十、あるいは 100 以上のアンテナを利用することが想定されている。

デルである ITU-T 勧告 G. 107 を基に品質規定が進められ、現在、超広帯域コーデックを利用する VoLTE サービスに対応できるよう帯域拡張に向けた検討が進められている。映像サービスでは、近年、映像配信サービスに対する検討が進められ、パケットレイヤモデルである ITU-T 勧告 P. 1203 が 2017 年 1 月に規定された。更に 3D や 4K/8K のような映像サービスに対して、統一的な指標で扱えること、高臨場感を適切に捉えることが課題となっている⁽²⁾。

QoE が良くないことによる購入等の未達成、サービスの解約を解明するエンゲージメントを対象とした研究も進んでいる。Web 閲覧において、1 秒遅延することにより年間 16 億ドルの売上が落ちる⁽³⁾という報告や映像ストリーミングにおける読み込み時間に依存する視聴停止など、直接ビジネスに影響を与える分析が報告されている⁽⁴⁾。これらを意識して QoE 向上に向け NW 事業者と OTT 事業者が連携する検討も進む⁽⁵⁾。エンゲージメント分析^(用語)では、評価条件を制御することは難しいため、ユーザの利用状態（通信環境、利用目的、ユーザ属性等）と顧客満足度を把握し解析するアプローチが期待される。

2.2 M2M/H2M の通信品質

あらゆる‘もの’がネットワークに接続される IoT (Internet of Things) においては、人が介在しない通信、いわゆる M2M のトラフィックが増加すると予想される。また、IoT のアプリケーションやサービスは多様化を続けており、将来のネットワーク設計・制御において、人が介在することも含めて様々なアプリケーションやサービスによる M2M 通信をいかに収容するかが重要な課題である⁽⁶⁾。

2.2.1 機械同士の通信における品質

M2M 通信の代表例としてセンサネットワークがあるが、近年は計測だけでなく制御を含めたセンサ・アクチュエータネットワークとして議論されることも多い。センサ・アクチュエータネットワークでは、センサによる計測情報がサーバに集約される。サーバでは、計測情報を基に制御アルゴリズムが動作し、適切な制御信号がアクチュエータに送出される。センサ・アクチュエータ間の M2M 通信では、‘ひと’同士の H2H (Human-to-Human) 通信では求められなかった程度の通信品質が求められる⁽⁷⁾。

遠隔操作ロボットや次世代電力網であるスマートグリッド等のネットワーク化制御システムでは、制御器・制御対象間でフィードバックループが形成されるため、ネットワーク部分の遅延や情報損失がシステムを不安定化させる要因となり得る。制御分野では、遅延や情報損失の補償法が検討されているが、ネットワーク側での対

処も重要である。例えばエッジコンピューティングによる低遅延化は有望な解決策となるであろう。また、Tactile Internet^(用語)、⁽⁸⁾という1msのエンドツーエンド遅延を目指す概念も登場し、厳しい遅延要求に対応できるネットワークの実現が求められている。

遅延要求の厳しいアプリケーションが存在する一方、データバックアップや統計情報の収集など遅延に対して寛容なアプリケーションも存在する。また、遅延を許容してネットワークを制御するDTN (Delay Tolerant Networking) 技術の導入が可能となるアプリケーションも少なくない⁽⁹⁾。例えばデータバックアップでは、中継ノードでバッファリングを行いながら、遅延クリティカルなデータがない隣接ノードへのリンクやタイミングを探索して転送を続けることなどが考えられる。このように、M2M通信では、1ms以下の超低遅延を要求するものから、数時間、数日の超高遅延を許容するものまで、様々なアプリケーションやサービスが混在している。

2.2.2 ‘ひと’と機械が混在するシステムの評価

H2H通信におけるユーザ体感品質であるQoEに対し、M2M通信におけるユーザ体感品質とは何であろうか。また、‘ひと’と機械が混在するネットワーク環境における品質評価はどのようにあるべきであろうか。ここではM2Mの外側にユーザが存在し、実際にユーザがサービスを楽しむアプリケーションについて考えてみる。

‘ひと’と機械が混在するネットワーク環境における興味深いアプリケーションが力触覚（ハプティック）通信である⁽¹⁰⁾。ハプティック通信^(用語)では、マスター側デバイスを用い、位置・力情報をマスタ、スレーブ間でネットワークを介して相互に伝送する（図1）。マスタ側デバイスを‘ひと’が操作し、スレーブ側デバイスはマスタ側デバイスに追従するように動作する。スレーブ側デバイスが物体に接触すると、その反力をマスタデバイスで再現する。

ハプティック通信はネットワーク化制御システムの一つであり、ネットワークの遅延や情報損失により安定性

や操作性が劣化する。操作性はデバイスの形状や周辺環境によっても変化するためQoE評価は欠かせない。一方、制御システムには制御パラメータが存在し、QoSを考慮した適切な制御器設計も必要となる。制御パラメータの設定によってQoEも変化するため、QoSとQoEの関係性は制御器、つまり制御性能（QoC: Quality of Control）を考慮しなければモデル化が難しい。

このように、‘ひと’と機械が混在する環境では、QoS、QoEに加えて、M2Mの評価指標を組み込む必要がある。ただし、この評価指標や手法は画一的なものではなく、アプリケーションに応じて定義されるべきものである。

3. ネットワーク計測・設計・制御技術

3.1 ネットワーク品質計測技術

ネットワーク品質計測の目的は、ネットワーク設計・制御のために必要な品質の計測であり、高信頼通信サービスを提供する上で不可欠である。これまでルータ等の通信機器の品質計測・故障検出、無線伝搬路推定、異常トラフィックの検出技術やトラフィック行列推定等多くの研究がなされてきたが、いずれも、パケット紛失率、遅延時間、スループット等、客観的かつ定量的な評価が可能指標を計測することを目的としていた。しかし、今後はQoEや次節で述べるユーザ行動等主観的な品質評価の出現により、新たな計測技術を検討する必要がある。

主観評価によるQoE導出は、実験室の理想的な環境で行われることが多く、実際にサービスを受けているユーザの環境では取得できない。一方QoEの客観評価技術は、ネットワーク品質等客観的な指標からQoEを推定するための技術であるが、QoEは騒音等ユーザがサービスを受けている環境にも影響されるため、これらの指標が有効でない場合も存在する。この問題を解決する一つの手段が、クラウドソーシングによりユーザ/端末からNW品質をはじめとした品質値を取得する手法である⁽¹¹⁾。すなわち、サービスを受けたときのユーザの体感品質とともに、サービスを受けた環境等の情報を協力的な不特定多数のユーザ/端末から収集し、得られ

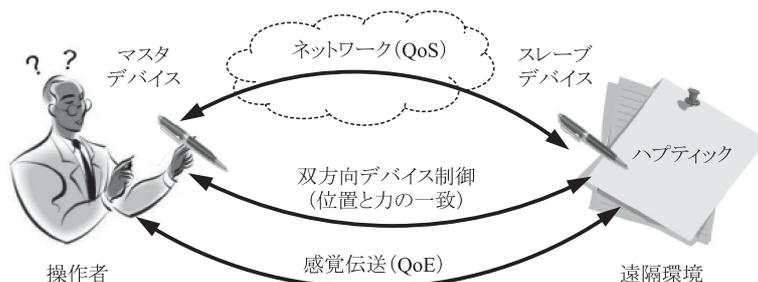


図1 ハプティック通信のイメージ

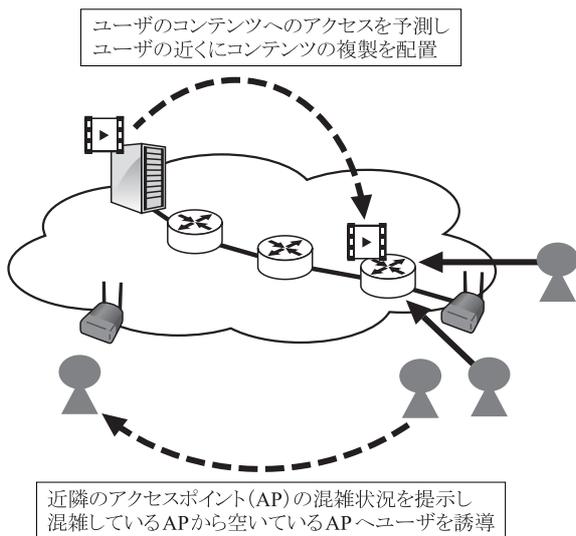


図2 ユーザ誘導

た情報を分析することにより、様々な環境におけるQoEの導出を実現する。しかし、ユーザが少ないエリアのQoE値は信頼性が低い等、ユーザ分布や行動パターンに依存するため、ユーザ行動によらないロバストな計測技術が求められる⁽¹²⁾。

3.2 ネットワーク設計・制御技術

古くから、ユーザ行動に基づくネットワーク設計が行われてきた。電話網では、呼の到着がポアソン過程に従うことを前提とし、待ち行列モデルを用いて、所望の呼損率を満たす回線容量設計が行われていた。IP網においても、同様の待ち行列モデルがルータのバッファ容量の設計などに利用されてきた。電話網や初期のインターネットでは、ユーザ行動の多様性はそれほど高くなく、ユーザ行動に対して大胆な仮定を置き、シンプルなモデルをネットワークの設計に利用することが有効であった。

一方、大容量通信サービスの普及、移动通信技術の高度化、通信アプリケーションやサービスの多様化により、ユーザの行動は電話網の時代から大きく変化しており、従来のシンプルなユーザ行動を前提としたネットワークの設計では解決できない問題も生じている⁽¹³⁾。例えば特定の場所でのイベントが基地局でのふくそうを引き起こす、ソーシャルメディアによりユーザ間で急速に拡散された情報が引き金となりトラフィックがバースト的に発生するといった現象が問題となっている⁽¹³⁾。このように空間的あるいは時間的に偏ったトラフィックパターンの予測は一般には難しく、このようなトラフィックを効率的に収容するためのネットワーク設計・制御が課題となっている。

多様化するユーザの行動を分析／理解／モデル化し、それをネットワークやサービスの設計・制御に応用する

研究ははまだ萌芽的な段階ではあるが、幾つかの成果はこれまでも報告されている。図2に示すように、ユーザのコンテンツへのアクセスパターンの履歴を分析することにより、ユーザ行動のモデルを構築する研究⁽¹⁴⁾や、そのモデルをコンテンツの複製配置に利用する研究が行われている⁽¹⁵⁾。これらの研究はユーザの行動に合わせて柔軟にネットワークを設計・制御することを目指しているが、逆にネットワークの状態に応じて、ユーザの行動を変容させるアプローチも存在する。実際に混雑状況を可視化し、ユーザに対するインセンティブによりユーザ誘導を促し、混雑時に限りある無線リソースを再配分する手法も提案されている⁽¹⁶⁾、⁽¹⁷⁾。このような研究を専門的に議論するコミュニティとして、IEEE Communication SocietyにおけるSocial Networks Technical Committeeや、本会の通信ソサイエティの通信行動工学時限研究専門委員会^(注1)などが存在する。これらのコミュニティを中心として、ユーザの行動に基づき、ネットワークを設計・制御し、更にはネットワークの状態に応じてユーザの行動を(さりげなく)誘導するといったアプローチによって、人とネットワークが協調して高い品質を実現する方向に研究が発展していくと期待している。

4. 通信品質評価と設計・制御技術の融合

通信品質や設計・制御技術の動向・重要性について述べてきたが、これらの技術をどのように融合し、将来ネットワークの発展へとつなげるのかが重要である。ここでは、無線ネットワークを例として、品質評価と設計・制御技術の融合であるレイヤ間統合技術について述べる。

無線伝送は、有線伝送よりも帯域利用効率が悪いいため、限られた周波数帯域内での伝送効率の向上、伝送速度の高速化を様々な技術によって実現してきた。例えば、高速化を図るための技術として、送信局と受信局の両方に複数のアンテナを用い、複数のアンテナから同時に異なる信号を多重で送受信するMIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送技術がある。このMIMO伝送技術は、現状、高速化の必須技術といっても過言ではない。更に、高速化とユーザ収容数増加を同時に実現するために、MU-MIMO (Multiuser-MIMO)^(用語)やMassive MIMO^(用語)の研究開発が進められ、MU-MIMOは、現在、無線LANの標準規格IEEE802.11acやLTE-Advancedに準拠した民生品に採用されている。しかし、これらの技術を用いて、物理層の伝送速度を上げても、結局MAC (Media Access Control) 層では、アクセス

(注1) 2017年度から通ソ・コミュニケーションクオリティ研究専門委員会内の組織として活動している。

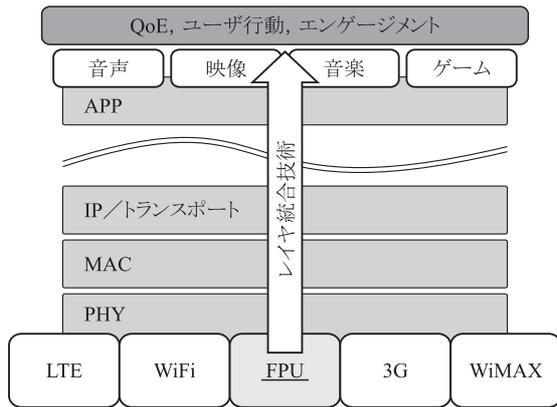


図3 レイヤ間統合技術

制御プロトコルで費やされるオーバーヘッドにより伝送効率が低下し、伝送速度を十分に利用できない課題がある⁽¹⁸⁾。例えば、有線LANと比較した場合、伝送効率には大きな差があり、従来の無線LANシステムでは、60%程度の伝送効率しか得られない⁽¹⁹⁾。有線LANと無線LANとの違いとして、有線は全二重で通信されるのに対し、無線は半二重通信となる。この違いは、無線は複数のユーザで通信周波数を時分割で共有するために有線と比較して通信効率が低下することを意味する。また有線LANは干渉もなく、パケット衝突も考慮する必要がないのに対し、無線LANは、パケットを送信する際の衝突回避機能や、衝突後の再送処理が大きなオーバーヘッドとなり、伝送効率が低下する要因となる。

伝送効率の低下は、物理層技術の研究開発とMAC層やTCP/IP等上位層プロトコルの研究開発が個別の研究テーマとして研究されてきたからである。もちろん異なるプロトコル階層間の融合技術として、クロスレイヤ設計技術についての研究は行われてきたが、前節までに述べたQoEやユーザ行動、更には、エンゲージメントなどを考慮した新たなレイヤ統合技術(Beyond Cross Layer)について検討する必要がある(図3)。例えば文献(20)では、無線LAN上で伝送された映像に対するQoEを評価し、QoEが最適となるようネットワークの設計・制御を行う研究が進められている。レイヤ間統合技術は、伝送媒体、ネットワーク、サービス、ユーザ等、無線通信システムにおける総合力を駆使したネットワーク設計・制御手法であり、将来ネットワークにおいてQoEを最適化するキー技術と言える。

5. 最後 に

本稿では、ネットワーク品質評価と計測・設計・制御技術に関する研究動向と両者の融合技術について述べた。QoEやエンゲージメント等をベースに人やマシンに対する品質を向上させるため、将来のネットワークに

おいては新たなレイヤ統合・連携により自動かつ自律的にネットワークが制御される世界が求められる。

文 献

- (1) 松田崇弘, 岡本 淳, 久保亮吾, 津川 翔, 平栗健史, “CQ 研究のアクティビティから見る将来のネットワーク像—通信品質評価・計測・制御の統合に向けて—,” 2017 信学総大, no. BI-6-7, March 2017.
- (2) 川嶋喜美子, 山岸和久, 林 孝典, “4K 及び FullHD 映像視聴時の主観評価特性の分析,” 信学技報, CQ2016-123, pp. 83-88, March 2017.
- (3) K. Eaton, “How one second could cost Amazon \$1.6 billion in sales, March 2012,” Sept. 2016, <http://www.fastcompany.com/1825005/how-one-second-cost-amazon-16billion-sales>
- (4) F. Dobrian, V. Sekar, A. Awan, I. Stoica, D. Joseph, A. Ganjam, J. Zhan, and H. Zhang, “Understanding the impact of video quality on user engagement,” Proc. ACM SIGCOMM '11, pp. 362-373, Aug. 2011.
- (5) T. Kimura, M. Yokota, A. Matsumoto, K. Takeshita, T. Kawano, K. Sato, H. Yamamoto, T. Hayashi, K. Shiomoto, and K. Miyazaki, “QUBE: QoE maximizing framework for video-streaming,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 11, no. 1, pp. 138-153, Feb. 2017.
- (6) 久保亮吾, “IoT/M2M 時代のコミュニケーションクオリティ,” 2015 信学ソ大, no. BI-4-5, Sept. 2015.
- (7) 久保亮吾, 田所将志, 鈴木謙一, 奥野通貴, 緒方祐次, “スマートコミュニティ向け情報インフラとアプリケーション,” 信学誌, vol. 98, no. 2, pp. 118-123, Feb. 2015.
- (8) ITU-T Technology Watch Report, “The tactile Internet,” Aug. 2014.
- (9) 鶴 正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田 晃, 松田崇弘, 已波弘佳, 山村新也, “DTN 技術の現状と展望,” 信学通誌, no. 16, pp. 57-68, March 2011.
- (10) P. Huang and Y. Ishibashi, “QoS control and QoE assessment in multi-sensory communications with haptics,” IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 2, pp. 392-403, Feb. 2013.
- (11) S. Rosen, S.-J. Lee, J. Lee, P. Congdon, Z.M. Mao, and K. Burden, “MCNet: Crowdsourcing wireless performance measurements through the eyes of mobile devices,” IEEE Communi. Mag., vol. 52, no. 10, pp. 86-91, Oct. 2014.
- (12) 田行里衣, 金正英朗, 池上大介, 松田崇弘, 高橋 玲, 滝根哲哉, “モバイルネットワークの地理的依存性を利用した通信品質劣化推定,” 信学技報, CQ2016-1, pp. 1-6, April 2016.
- (13) 新井田 統, “人の通信行動のモデル化に関する研究概要,” 第10回通信行動工学研究会, pp. 1-4, Aug. 2016.
- (14) S. Traverso, M. Ahmed, M. Garetto, P. Giaccone, E. Leonardi, and S. Niccolin, “Temporal locality in today's content caching: Why it matters and how to model it,” Comput. Commun. Rev., vol. 43, no. 5, pp. 5-12, Oct. 2013.
- (15) E. Leonardi and G.L. Torrisi, “Least recently used caches under the shot noise model,” IEEE INFOCOM '15, pp. 2281-2289, Aug. 2015.
- (16) 高橋 玲, 林 孝典, “お客さまの体感に基づく QoE セントリックオペレーションを目指して,” NTT 技術ジャーナル, vol. 11, no. 5, pp. 12-15, Feb. 2013.
- (17) 新熊亮一, 矢守恭子, “通信制御においてインセンティブができること／できないこと,” 第5回通信行動工学研究会, pp. 25-41, Nov. 2013.
- (18) 平栗健史, 西森健太郎, “コミュニケーションクオリティ: 無線通信品質の課題と新しい技術の提案,” 信学技報, CQ2014-30, pp. 83-88, July 2014.
- (19) T. Hiraguri and K. Nishimori, “Survey of transmission methods and efficiency using MIMO technologies for wireless LAN systems,” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 7, pp. 1250-1267, July 2015.
- (20) 設楽 勇, 森野善明, 西森健太郎, 平栗健史, “無線マルチキャスト通信における映像品質評価の一検討,” 信学技報, CQ2016-106, pp. 93-97, Jan. 2017.

(平成 29 年 2 月 27 日受付 平成 29 年 3 月 29 日最終受付)



おかもと じゅん (正員)

平6 東京理科大・電気卒。平8 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社 (NTT) 入社。映像サービスをはじめとした通信サービスの品質研究に従事。現在 NTT ネットワーク基盤技術研究所主幹研究員。平20 年度電気通信普及財団賞、平22 年度日本 ITU 協会賞各受賞。



くぼ りょうすけ (正員)

平17 慶大・理工・システムデザイン卒。平19 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社 (NTT) 入社。平21 慶大大学院博士課程了。平22 慶大・理工・電子・助教。現在、同学科准教授。システム制御、光通信システム等の研究に従事。博士 (工学)。平22 年度本会通信ソサイエティ論文賞受賞。



つがわ しゅう (正員)

平21 阪大大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程了。平24 同大学院博士後期課程了。同年同大学院経済学研究科助教。平25 から筑波大システム情報系助教。ネットワーク科学に関する研究に従事。博士 (情報科学)。



ひらくり たけふみ (正員：シニア会員)

平10 筑波大大学院理工学研究科理工学専攻了。同年 NTT アクセスサービスシステム研究所勤務。平22 から日本工大・工・電気電子・准教授。平26 教授。現在に至る。無線通信工学のアクセス制御に関する研究に従事。博士 (情報学)。



まつだ たかひろ (正員：シニア会員)

平8 阪大・工・通信卒。平11 同大学院博士後期課程了。同年同大学院助手。平17 講師。平21 准教授。現在に至る。無線ネットワークに関する研究に従事。博士 (工学)。平24 本会通信ソサイエティ Best Tutorial Paper Award, マガジン論文賞, 平26 本会論文賞各受賞。

