

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420370

研究課題名(和文) ユーザの視聴行動を考慮したP2P映像配信トラヒックの分析と制御への応用

研究課題名(英文) Characteristic Analysis and Control of P2P Video Traffic Considering Users Behavior

研究代表者

三好 匠 (Miyoshi, Takumi)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：40318861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：P2P通信はサーバの通信負荷を分散できる優れた情報配信基盤であり、今後P2Pを利用した映像配信サービス(P2PTV)の普及が期待されている。一方、P2PTVでは通信手順が明かされておらず、動画視聴時のトラヒック特性の解明が急務である。本研究では、ユーザの視聴行動を考慮したP2PTVトラヒックの分析を実施し、トラヒック制御に利用可能なモデル化を行った。研究成果として、P2PTVにおけるユーザの視聴行動のモデル化、オンデマンド形及びストリーミング形P2PTV視聴時に発生するトラヒックのモデル化に成功した。これらの数式モデルはトラヒック制御やコンピュータ解析に利用でき、今後の活用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：P2P communication is a valuable data delivery platform to distribute the server load to peers, and accordingly P2P-based video delivery services (P2PTV) has attracted attention. Characteristic analysis of P2PTV traffic is one of urgent issues because its communication protocols are still veiled. This research project tried to analyze P2PTV traffic considering users' behavior and to make the mathematical models that can be useful for traffic control. As results of this work, the following models were successfully established: (1) Users' viewing behavior on P2PTV, (2) P2PTV traffic considering users' behavior, and (3) P2PTV traffic on both on-demand video requests and live streaming channels. It is expected that these mathematical and statistical models can be utilized in traffic control and computer simulations in the near future.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学 ネットワーク インターネット高速化 ピア・ツー・ピア トラヒック分析 国際研究者交流(フランス)

1. 研究開始当初の背景

近年のインターネットトラフィックの爆発的増加は、映像配信が原因であると言われている。ピア・ツー・ピア（P2P）通信は、ユーザ端末（ピア）が相互に受信データのやり取りを行うことでデータ配信を実現する手法であり、サーバ負荷を削減する通信方式として広く普及している。映像配信サービスにおいても、サーバコストの増大を避けるため、P2P 技術を用いた P2P 映像配信サービス（P2PTV）に注目が集まっている。一方、P2P では同じアプリケーションを利用しているピア間で通信が発生するが、ピアは世界中に分布し時々刻々と変化するため、トラフィック特性が従来のクライアント/サーバ（C/S）型通信とは大きく異なる。インターネットは C/S 型通信を想定して設計されているため、P2P によって想定外の輻輳（ふくそう）が発生し、多くのインターネットサービス事業者を悩ませている。

この問題に対応するため、近年多くの P2P トラフィック分析に関する研究がなされている。一部の従来型 P2P アプリケーションでは通信手順が公開されており、通信方式の分析や改良を行うことが容易である。しかし、P2PTV の多くは商業用に開発されており、内部構造が一切明かされていない。そのため、P2PTV ではアプリケーション使用時に発生するトラフィックを計測し、統計的に分析する手法が一般的である。

従来研究では、世界的スポーツイベントのように人気の高いチャンネルを視聴したときや、1 週間以上にわたり同一チャンネルを視聴し続けたときの接続先ピアの変化や通信量を分析している。しかし、これらの研究の多くは定常状態のみに着目しており、総体的で平均的な定常的トラフィック特性の抽出に重点がおかれている。一方で、マイクロ視点でのトラフィックの過渡的な時間変化や、ユーザの動画視聴行動などは考慮されていないという問題点がある。

2. 研究の目的

本研究では、今後の P2PTV の普及を念頭に、ユーザの視聴行動を反映した P2PTV トラフィックの特性分析を実施し、現実的で正確なトラフィックモデルの構築を試みる。また、得られたトラフィック分析結果を P2P トラフィック制御に応用するための手法を検討する。

研究課題は以下の 3 点に分類される。

(1) P2PTV におけるユーザ視聴行動の特徴抽出と分析

P2PTV アプリケーションを利用する際のユーザの視聴行動に着目し、視聴行動パターンを分析する。ユーザの視聴行動のモデル化、及び定式化を実施する。

(2) ユーザの視聴行動を考慮した P2PTV トラフィックの特性解析

P2PTV では、同じチャンネルを視聴している

ピアからデータを受信するため、接続先ピアもまた P2PTV ユーザである。しかし、ピアは世界中に分布するため、これらのユーザの特性を直接記録・入手したり分析することは困難である。そこで、実験室に準備した複数の P2PTV 端末を利用して、接続先ピアの挙動を分析ためのトラフィック解析を実施する。

(3) P2PTV トラフィックのモデル化と定式化

P2PTV アプリケーションを利用した際に発生するトラフィックを分析し、モデル化及び定式化を行う。P2PTV における動画視聴方法は、大別してオンデマンド形とライブストリーミング形（以下、ライブ形）に分類される。そこで、これら 2 種類の方法で動画を視聴した際に発生する P2PTV トラフィックを統計的に分析し、確率分布によるトラフィックモデルの作成を実施する。

3. 研究の方法

以下の計画に基づいて、研究を遂行した。

(1) P2PTV におけるユーザ視聴行動の特徴抽出と分析

従来の P2PTV トラフィック分析では、P2PTV を長時間視聴した際の定常的なトラフィック分析がほとんどであり、ユーザの視聴行動を考慮した検討が不十分である。そこでまず、ユーザが動画配信を利用する時間帯や利用時間をアンケートにより調査する。また、ユーザが P2PTV アプリケーションを使用した際の視聴行動を細かく分析するため、P2PTV とデータ収集アプリケーションをインストールしたノート PC を貸与し、数日間にわたる視聴行動の追跡を行う。

(2) ユーザの視聴行動を考慮した P2PTV トラフィックの特性解析

ユーザの視聴行動特性を考慮するため、ユーザごとのトラフィックフローに着目した分析を実施する。P2PTV とデータ収集アプリケーションを 10 台の PC にインストールし、それぞれ異なるチャンネルを同時に視聴した際に発生するトラフィックを測定・分析する。

(3) P2PTV トラフィックのモデル化と定式化

P2PTV を使用して動画視聴した際に発生するトラフィックの統計的モデル化を行うため、オンデマンド形とライブ形の視聴方法により動画視聴した際のトラフィックを大量に収集し、特徴抽出を行う。また、特徴的な発生トラフィックにおいて、それらの確率分布を求めることで P2PTV トラフィックの定式化を実現するとともに、再現性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) P2PTV におけるユーザ視聴行動の特徴抽出と分析

平均年齢 21 歳の大学生 141 名（男性 124 名、女性 17 名）の協力を得て、アンケート調査を実施した。その結果、回答者の 1 週間あたりの平均視聴時間は 11.9 時間、平均視聴

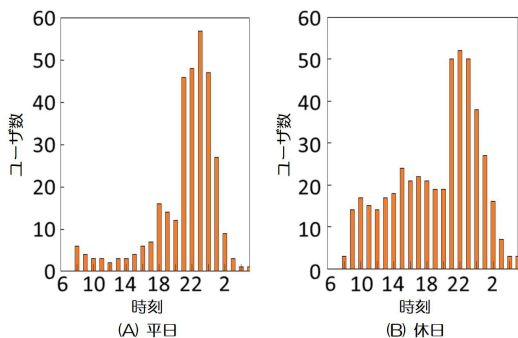


図 1 動画視聴ユーザ数の時間推移

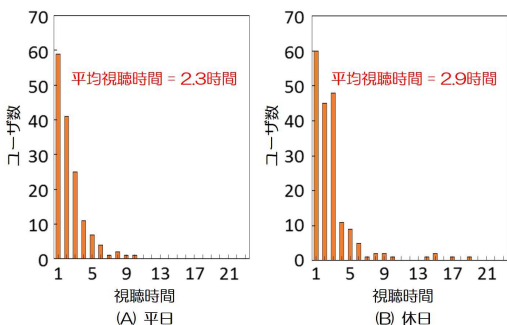


図 2 動画視聴時間の分布

頻度は 4.3 日で、約半数の回答者が YouTube、ニコニコ動画などの動画視聴サービスを楽しんでいることが分かった。動画視聴サービスは今後ますます普及すると考えられることから、更に多くのユーザが映像配信サービスを利用することが容易に想像できる。

平日及び休日の映像配信サービス利用者数の推移を図 1 に示す。図より、休日には日中の映像配信サービス利用者数が増加することが分かる。また、いずれの日も 21 時から 23 時が視聴のピークとなっていることから、利用者が集中する夜間帯に、接続ピア数が増大するなどの影響が予想される。次に、ユーザの映像配信サービスの連続利用時間分布を図 2 に示す。図より、休日の方が分布の裾が長く伸び、平均視聴時間が長くなることが分かる。よって、休日には長時間滞在するピアが増加する可能性が示唆される。

ユーザが実際に P2PTV を視聴した場合の挙動を詳細に調査するため、P2PTV アプリケーションとデータ収集アプリケーションをインストールした測定用のノート PC を作成した。被験者は情報系の学生 15 名で、1 週間測定用 PC を自宅に持ち帰って自由に P2PTV を視聴させた。P2PTV アプリケーションには PPStream を用い、ユーザからの要求に対して個々に動画が配信されるオンデマンド形接続を利用した。実験結果より、被験者の 1 週間における平均視聴時間は 16.9 時間で、視聴頻度は 5.6 日であった。また、主として視聴されたコンテンツ長は 1200 から 1700 秒であることが分かった。

同一チャンネル視聴時間の累積確率分布を図 3 に示す。分析結果より、ユーザは指数分布に従って動画を視聴していることが分かる。本実験における平均視聴時間は 926 秒と

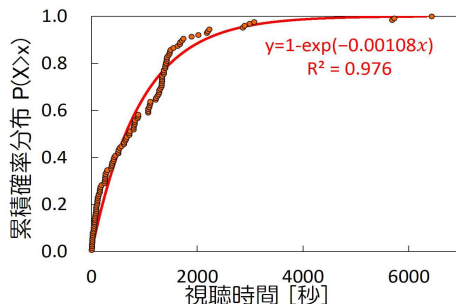


図 3 視聴時間の累積確率分布

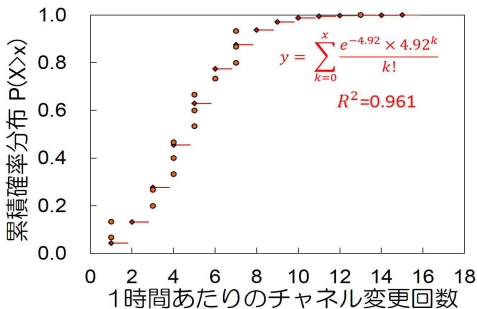


図 4 チャンネル変更回数の累積確率分布

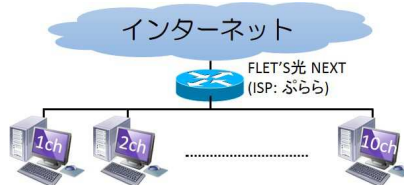


図 5 実験環境

なった。次に、1 時間あたりのチャンネル変更回数の累積確率分布を図 4 に示す。実験結果はポアソン分布によりかなり正確に近似できることが分かる。以上のことから、P2PTV のユーザ視聴パターンは待ち行列モデルとして高い精度で近似できると結論できる。

(2) ユーザの視聴行動を考慮した P2PTV トラフィックの特性解析

複数の実験用 PC を用いて、P2PTV アプリケーションで提供されている複数のチャンネルを同時に視聴してトラフィック収集を行った。実験環境を図 5 に示す。各 PC で同一チャンネルを継続的に視聴することで、接続先ピアのチャンネル切替を検出したり、チャンネルごとの接続特性を分析することができる。ここで、1 つのチャンネルのみで検出されたピアを単チャンネルピア、複数のチャンネルで検出されたピアを複チャンネルピアと呼ぶ。また、動画データに着目するため、1,000 バイト以上のパケットを分析対象とする。

PPStream と PPTV を用いて実験を行った際の、各 1 チャンネル分の受信トラフィックフローをそれぞれ図 6、図 7 に示す。図では、実験中に新たに接続されたピアに番号を振り、これらのピアとのフロー継続時間を線分により表現している。図 6 より、PPStream では一度ピアと接続を行うと測定終了まで継続して通信を行う傾向が確認できる。一方、図 7 より、PPTV では接続直後に通信が行われる

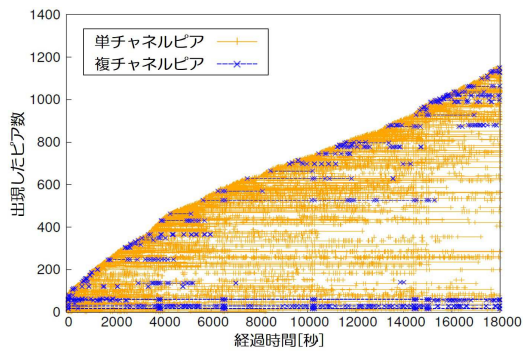


図6 PPStream の受信トラフィックフロー

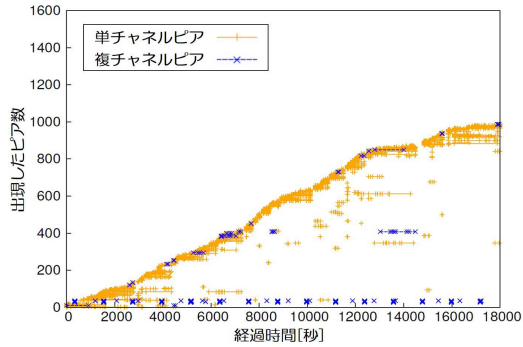


図7 PPTV の受信トラフィックフロー

もののフローの継続時間が非常に短いことが確認できる. このように, 使用する P2PTV アプリケーションやチャンネルの人気度などによって, 発生するトラフィックフローに大きな違いが生じることが分かる.

次に, PPStream と PPTV を使用した際の複チャンネルピアからの受信トラフィックフロー継続時間分布を, それぞれ図 8, 図 9 に示す. 図では, フロー継続時間の累積確率補分布を両対数グラフで示している. これらの結果から, PPStream の受信フロー継続時間は対数正規分布により非常によく近似できるが, PPTV ではフロー継続時間が大きい領域において近似のずれが生じている. 図 7 から分かるように, PPTV ではフロー継続時間が短くなる傾向があり, 相対的に長時間フローが少なくなるためと考えられる.

最後に, PPStream を利用した際の新規接続ピア数と接続フロー数の関係を図 10 に示す. 図では, 新規に接続したピアの数 (赤) を左軸に, 5 分以上のフロー長をもつ長期接続フロー数 (青) と 5 分未満の短期接続フロー数 (緑) を右軸に表す. 図から, 長期接続フロー数が急激に減少したときに, 新規接続ピア数が 10 を超えて増加していることが確認できる. 長期接続フローは, 同一チャンネルを視聴している他のピアから安定的にデータを受信できていることを表しており, そのようなピアが多数存在すれば動画データを安定的に受信できる. 一方, 長期接続フロー数が激減すると, データの安定的な受信ができなくなるため, 新たなピアを検索して新規接続を行うものと考えられる. なお, この特徴は PPStream 特有のものと考えられ, PPTV や SopCast では見られなかった.

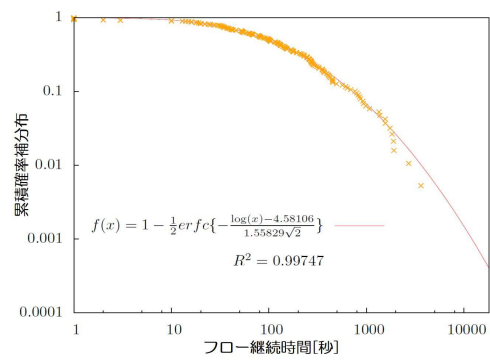


図8 PPStream のフロー継続時間分布

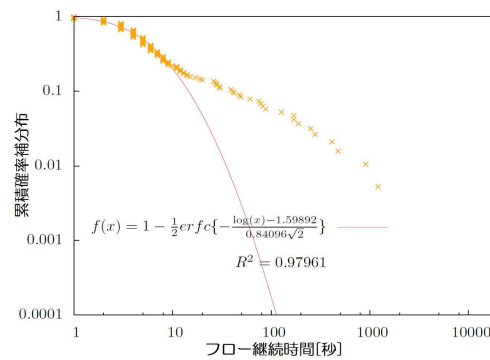


図9 PPTV のフロー継続時間分布

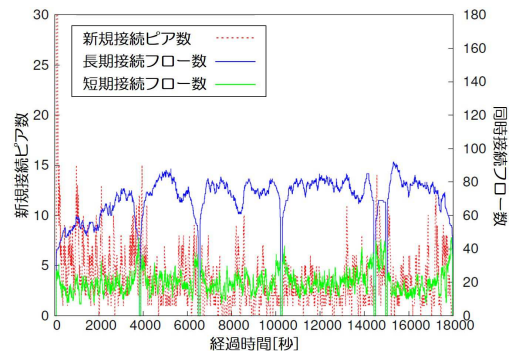


図10 PPStream 使用時の接続ピア数の変化

(3) P2PTV トラフィックのモデル化

P2PTV により発生するトラフィックをモデル化するため, さまざまな種類の P2PTV アプリケーションを用いてオンデマンド形とライブ形の動画を視聴した際の受信トラフィックを収集した.

オンデマンド形では PPStream を使用し, アニメ, ドラマ, 映画など合計 353 個 (計 83GB) のコンテンツを視聴した. これら大量の視聴データを分析した結果, オンデマンド形 P2PTV の受信トラフィックは 3 種類に分類することができることが明らかになった. 特徴的な受信トラフィックを図 11~図 13 に示す. 図 11 では, 接続ピア数が比較的多く, 低スループットで連続的にデータの受信が続いていることから, 安定形トラフィックと称する. 一方, 図 12 は極端なバースト形となっており, ピア数も非常に少ない. これは同一チャンネルを視聴している他のピアが著しく少なく, 動画コンテンツのオリジナルを保持するサーバからデータを受信しているものと考えられる. そこ

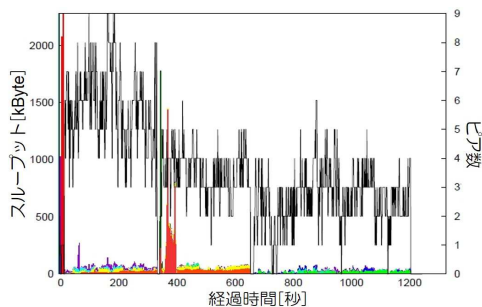


図 11 安定形トラヒック

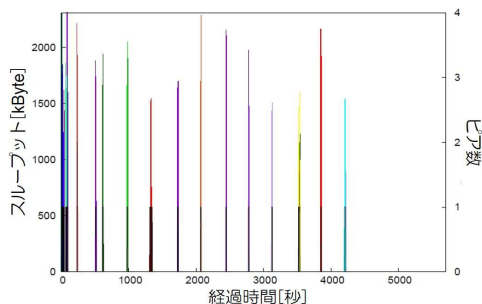


図 12 バースト形 (S) トラヒック

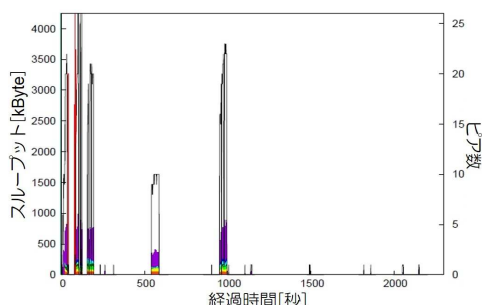


図 13 バースト形 (P) トラヒック

で、これをバースト形 (S) トラヒックと称する。図 13 もバースト形であるが、ピア数の観点からは安定形よりも多いピアからデータ受信が行われている。よって、大量のピアに接続することで高速にデータ取得することができ、バースト形になっていると考えられる。そこで、これをバースト形 (P) トラヒックと称する。

これらの3種類のうち、安定形とバースト形 (S) トラヒックを統計的に解析し、モデル化を行った。安定形では、接続ピア数の累積確率分布は対数正規分布に、接続ピアの滞在時間の累積確率分布は指数分布に従うことが分かった。一方、バースト形 (S) では、不定期な間隔でバーストが連続して発生しており、バースト持続時間の累積確率分布は指数分布に、バースト発生間隔の累積確率分布は対数正規分布に従うことが分かった。

次に、ライブ形 P2PTV として PPStream, PPTV, SopCast を使用し、各アプリケーションでの人気ランキングの上位 6 チャンネルを選択し、複数の実験用 PC を用いて 6 時間分 (延べ 36 時間) のトラヒックを収集した。PPStream 及び PPTV 視聴時の受信トラヒックを、それぞれ図 14, 図 15 に示す。PPStream では 40~100 のピアと同時接続を行い、400K~1.2MB/s の高速受信を実現していることが

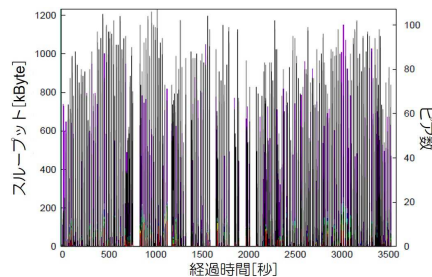


図 14 PPStream ライブ視聴時のトラヒック

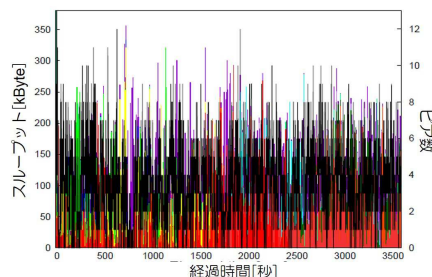


図 15 PPTV ライブ視聴時のトラヒック

分かる。また、トラヒックの形状がオンデマンド形におけるバースト形に近い。統計的分析結果から、バースト持続時間、バースト発生間隔ともにポアソン分布に従うことが確認された。また、スループットの発生頻度は対数正規分布に従うことが明らかとなった。

一方 PPTV では、接続ピア数とスループットが連動しながら、受信速度は 100~400KB/s で安定していた。ピア数の頻度分布がポアソン分布に従っていることから、ピアの抽出にはランダム選択が用いられていると考えられる。また、トラヒックの形状から、オンデマンド形の安定形トラヒックと同様の方法で、トラヒックの再現が可能であると考えられる。なお、統計的分析結果から、スループット発生頻度は対数正規分布に、ピアの滞在時間は指数分布に従うことが分かった。

以上のように、本研究では複数の P2PTV アプリケーションに対する受信トラヒックのモデル化に成功した。これらの数式モデルを利用することで、P2PTV より生じる通信トラヒックの予測が可能になるだけでなく、ネットワーク設計時に実施するコンピュータシミュレーションのトラヒックモデルとしての利用も期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Mizutani, T. Miyoshi, O. Fourmaux, "Traffic analysis in concurrent multi-channel viewing on P2PTV," Information Science and Applications, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer-Verlag, Vol.339, pp. 85-92, 2015 年, 査読有.
DOI: 10.1007/978-3-662-46578-3_11
- ② C. Wechtaisong, K. Ikeda, H. Morino, T. Miyoshi, "Delay-insertion-based P2PTV traffic localization using AS-level topological information," IEICE Transactions on Com-

munications, Vol.E98-B, No.11, pp.2259-2268, 2015 年, 査読有.

DOI: 10.1587/transcom.E98.B.2259

- ③ H. Pham-Thi, H. Hoang-Van, T. Miyoshi, “Correlating objective factors with video quality experienced by end users on P2PTV,” *International Journal of Computer Networks & Communications*, Vol.7, No.3, pp.59-73, 2015 年, 査読有.
DOI: 10.5121/ijcnc.2015.7305
- ④ H. Hoang-Van, T. Miyoshi, O. Fourmaux, “A router-aided P2P traffic localization method with bandwidth limitation,” *VNU Journal of Science: Computer Science and Communication Engineering*, Vol.30, No.3, pp.50-63, 2014 年, 査読有.

[学会発表] (計 29 件)

- ① 武内直喜, 三好 匠, オリヴィエ フルモー, “ライブストリーミング形 P2PTV アプリケーションにおけるトラヒックのモデル化と比較,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2016-210, 沖縄県, 2017 年 3 月 2 日, 査読無.
- ② N. Takeuchi, T. Miyoshi, O. Fourmaux, “Characteristic analysis and modeling of P2PTV traffic,” 3rd International Conference on Information Science and Security (ICISS 2016), Pattaya, Thailand, 4 pages, 2016 年 12 月 21 日, 査読有.
DOI: 10.1109/ICISSEC.2016.7885846
- ③ 武内直喜, 三好 匠, オリヴィエ フルモー, “P2PTV トラヒックの特性分析と予測手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2016-103, 山口県, 2016 年 11 月 17 日, 査読無.
- ④ M. Ghanem, O. Fourmaux, F. Tarissan, T. Miyoshi, “P2PTV multi-channel peers analysis,” 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS 2016), Kanazawa, Japan, TS6-3, 6 pages, 2016 年 10 月 6 日, 査読有, 最優秀論文賞受賞.
DOI: 10.1109/APNOMS.2016.7737215
- ⑤ 武内直喜, 水谷光貴, 三好 匠, オリヴィエ フルモー, “複数チャネル同時視聴時における P2PTV アプリケーションのトラヒックフロー特性分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2015-121, 新潟県, 2015 年 11 月 27 日, 査読無.
- ⑥ N. Takeuchi, K. Mizutani, T. Miyoshi, O. Fourmaux, “Analysis of users’ viewing behavior on P2PTV,” 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2015), Busan, Korea, II-2, 12 pages, 2015 年 8 月 19 日, 査読有.
- ⑦ C. Wechtaisong, H. Morino, T. Miyoshi, “Delay-insertion-based P2PTV traffic localization using AS-level topological information,” 10th Asia-Pacific Symposium on

Information and Telecommunication Technologies (APSITT2015), Colombo, Sri Lanka, pp.40-42, 2015 年 8 月 5 日, 査読有.

DOI: 10.1109/APSITT.2015.7217119

- ⑧ C. Wechtaisong, H. Morino, T. Miyoshi, “Decentralized traffic localization in P2PTV using AS hop information,” 9th South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC2015), Nakhon Ratchasima, Thailand, Vol.5, pp.29-33, 2015 年 7 月 29 日, 査読無.
- ⑨ 水谷光貴, 三好 匠, オリヴィエ フルモー, “複数の P2PTV アプリケーションにおけるユーザの行動特性を考慮したトラヒックフロー特性分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2014-193, 沖縄県, 2015 年 3 月 2 日, 査読無.
- ⑩ C. Wechtaisong, H. Morino, T. Miyoshi, “Delay insertion based P2PTV traffic localization using AS-level topology information,” 電子情報通信学会技術研究報告, IN2014-84, 山口県, 2014 年 11 月 18 日, 査読無.
- ⑪ H. Hoang-Van, T. Miyoshi, O. Fourmaux, “Peer list sharing by router collaboration for P2PTV traffic localization,” 5th International Conference on Communications and Electronics (ICCE 2014), Da Nang, Vietnam, pp. 623-628, 2014 年 7 月 30 日, 査読有.
- ⑫ H. Hoang-Van, T. Miyoshi, O. Fourmaux, “A hierarchical P2P traffic localization method with bandwidth limitation,” IEEE International Conference on Communications (ICC 2014), Sydney, Australia, pp.3142-3147, 2014 年 6 月 12 日, 査読有.
DOI: 10.1109/ICC.2014.6883803

ほか, 電子情報通信学会大会論文 15 件 (査読無), 同東京支部学生会研究発表会論文 2 件 (査読無).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 匠 (MIYOSHI, Takumi)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 40318861

(2) 研究協力者

オリヴィエ フルモー (FOURMAUX, Olivier)

パリ第 6 大学・情報学研究所・准教授