

[奨励講演] OpenFlow 統計情報の誤差特性を活用した In-network 動画 QoE 推定手法

下川 駿平[†] 妙中 雄三^{††} 塚本 和也[†]

[†]九州工業大学大学院

〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

^{††}奈良先端科学技術大学院大学

〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: [†]p232046s@mail.kyutech.jp, tsukamoto@cse.kyutech.ac.jp, ^{††}yuuzo@is.naist.jp

あらまし これまでにアプリケーションの QoE を指標とした無線ネットワーク資源の有効利用に取り組んでいる。QoE を用いることにより複数の異なるアプリケーションが同一ネットワーク上で共存した場合でも、それぞれの品質を同じ基準で評価できるため、一部のアプリケーションによる資源占有を避けて効率的な利用が可能となる。本研究は、転送アプリケーションフローの QoE を推定するために、ネットワーク内で得られる OpenFlow の統計情報を用いる。先行研究では、パケットロス率が動画通信の QoE に大きく影響を与えることを示し、パケットロス率の測定誤差を補正する QoE 推定手法を提案した。一方、パケットロス環境では測定誤差の補正が十分でなく、QoE 推定精度は劣化した。そこで本研究では、OpenFlow の誤差特性に基づいたパケットロス率の測定誤差を補正する新しい QoE 推定手法を提案する。実機実験を通じて提案手法がパケットロス環境において QoE を正しく推定できる事を示した。

キーワード QoE 推定, 動画通信, 実験評価, OpenFlow

[Encouragement Talk] In-network video QoE estimation method exploiting error characteristics of OpenFlow statistics

Shunpei SHIMOKAWA[†], Yuzo TAENAKA^{††}, and Kazuya TSUKAMOTO[†]

[†] Kyushu Institute of Technology

680-4 Kawazu, Iizuka-shi, Fukuoka, 820-8502, Japan

^{††} Nara Institute of Science and Technology

8916-5 Takayama-tyo, Ikoma-shi, Nara, 630-0192, Japan

E-mail: [†]p232046s@mail.kyutech.jp, tsukamoto@cse.kyutech.ac.jp, ^{††}yuuzo@is.naist.jp

Abstract Toward efficient resource utilization, we have been tackling a SDN-enabled flow control considering application QoE. QoE helps us to handle application flows with the same basis even multiple different applications coexist on network. In this study, we estimate QoE of video streaming application based on the statistical information obtained from OpenFlow. The previous study showed that the packet loss rate is a key factor to estimate QoE on video streaming application, and proposed QoE estimation method which corrected measurement errors of OpenFlow. On the other hand, since the estimation accuracy of the previous method becomes worse in case of packet losses happening, in this study, we propose an improved QoE estimation method for video streaming that can distinguish between measurement errors and packet losses by exploiting the trend of occurrence in measurement errors. Through experiments, we showed that our proposed method can provide an QoE estimation even under the packet loss environments.

Key words QoE estimation, Video streaming, Experiment, OpenFlow

表 1 ITU-T G.1071 の対象動画

	低解像度式	高解像度式
通信プロトコル	RTSP over RTP	MPEG2-TS over RTP
動画コーデック	H.264, MPEG-4	H.264
解像度	QCIF(176×114), HVGA(480×320)	SD(720×480), HD(1280×720, 1920×1080)
動画ビットレート (bps)	QCIF:32~1000 k, HVGA:192~6000 k	SD:0.5~9 M, HD:0.5~30 M
フレームレート	5~30 fps	25~60 fps

1. はじめに

現在のインターネットではアプリケーションの種類が多様化しており、パケットロスやスループットなどの単一の評価指標では、一様に評価することが難しくなっている。そこで、アプリケーションの評価指標として QoE(Quality of Experience) が注目されている。QoE はアプリケーション毎に計算式が異なるため、それぞれの品質を同じ基準で評価することができる。

私達の研究グループでは SDN(Software Defined Network) を用いてアプリケーションの QoE を指標とした無線ネットワーク資源の有効利用に取り組んでいる。QoE を用いることで複数の異なるアプリケーションが同一ネットワーク上で共存した場合においても、一部のアプリケーションによる過剰な資源利用を避けてネットワーク資源の効率的な利用が可能となる。QoE を制御に反映するためにはネットワーク内で取得できる情報のみを用いて、フローの転送中にアプリケーション毎の QoE を推定する必要がある。先行研究 [1] では、SDN の実装の 1 つである OpenFlow の制御メッセージから得られる情報を用いて、動画通信サービスの QoE を推定する手法を提案した。OpenFlow の制御メッセージから得られる情報であるフローの統計情報 (FlowStats) によるパケットロス率の計測は計測タイミングのずれに起因する誤差を含むため、先行研究では測定誤差の補正を時間軸方向で行った。しかし、パケットロスの発生する環境ではパケットロスに対して誤った補正を実施してしまうため、測定誤差補正手法の高度化が求められる。

本研究では、QoE の推定精度の向上を目的とし、パケットロス発生環境における FlowStats の測定誤差を補正可能な QoE 推定手法を提案する。具体的には、FlowStats の測定誤差は発生して一定時間後に回復するという特性があるため、その特性を活用して測定誤差の補正を行う手法を提案する。そして、先行研究の実機実験によって、提案手法に基づく推定 QoE と先行研究の手法 (先行手法), QoE の真値を比較することによって評価を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 関連研究

QoE ドリブンネットワークは現在盛んに研究されている [2], [3], [4] が、その多くは QoE が正確に把握できるという前提の上で、把握した QoE を用いたネットワーク制御方法について焦点をあてている。QoE をネットワーク制御に用いるためには、QoE を正しく測定できる必要である。文献 [5] では、アプリケーションレイヤから API を用いて直接情報を取得できる測定エージェントを用いて QoE の測定を行っているが、すべてのアプリケーションにそのような API が実装されているとは限らないため、現実的ではない。QoE をネットワーク制御に用いるためには、ネットワークの管理者が QoE を把握できる必要があるため、本研究では、SDN を用いたネットワークの内部で得ることができる情報のみを用いて動画通信サービスの QoE を推定する方法を検討する。

3. 動画通信の QoE 計算

本章では、本研究で用いる QoE 計算式について説明する。動画通信の QoE 算出方法は ITU-T G.1071 [6] において標準化されており、G.1071 では、エンド端末で計測できるネットワークの品質や動画の設定パラメータを入力として、動画通信の QoE の計算式が定められている。G.1071 では動画と音声を統合した QoE が定義されているが、本研究では動画通信の主な部分である動画部分の QoE に着目する。また、QoE は主観的な品質指標の 1 つである MOS 値に合わせて 1~5 の実数値で計算される。

G.1071 は、表 1 に示すように、動画の解像度によって高解像度用の式と低解像度用の式の 2 種類の計算式があるが、本稿では紙面の都合上、高解像度用の式のみを扱う。

高解像度の動画の QoE は以下の式で計算される。

$$QoE = 1.05 + \frac{3.85}{100QV} + QV(QV - 60)(100 - QV) \times 7.0 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$QV = 100 - QcodV - QtraV \quad (2)$$

$$QcodV = A \cdot e^{B \cdot bp} + C + (D \cdot e^{E \cdot bp} + F) + G \quad (3)$$

$$bp = \frac{br \cdot 10^6}{r \cdot fr} \quad (4)$$

$$QtraV = H \cdot \log(I \cdot plc + 1) \quad (5)$$

$$plc = J \exp\left\{K(L - M) \cdot \frac{pl}{M(N \cdot plb + O) + pl}\right\} - J \quad (6)$$

QV は QoE を 0~100 の値で評価したもので、これを式 (1) を用いることで 1~5 の QoE の値が得られる。A~O は G.1071 で定められた固定値である。なお、B, E は必ず負の数、それ以外の固定値は必ず正の数となる。パケットロス率 pl [%] と平均連続パケットロス回数 plb はネットワーク品質のパラメータであるため、測定が必要であり、動画ビットレート br [Mbps] とフレームレート fr [fps], 解像度 r [pixel], は動画エンコード時に設定されたものを用いる。また、Packet Loss Concealment (PLC) 方式によって式 (6) の固定値 $J \sim O$ が変化する。PLC 方式はアプリケーション層のパケットロスの補完方法であり、パケットロスを見捨てる Freezing 方式とパケットロスを補完する Slicing 方式の 2 種類が存在する。

前述の入力パラメータの中でも QoE に与える影響が大きいものはパケットロス率、平均連続パケットロス回数、PLC 方式

表 2 パケットロス率が QoE に与える影響

パケットロス率 (%)	QoE
0	4.654314
0.01	3.333041
0.1	1.874826
1	1.390250

の 3 つである [1]. 中でもパケットロス率は特に QoE に与える影響が大きく、わずか 0.1% で QoE が大幅に変化するため (表 2), 動画通信のアプリケーションにおいて重要なパラメータであると言える.

4. 先行研究：累積余剰パケットによる誤差補正に基づく QoE 推定手法 [1]

先行研究で提案した累積余剰パケット数を活用した動画配信の QoE 推定手法を概説する. QoE 計算には G.1071 を用い、計算に必要となるパケットロス率の計測手法とその他のパラメータの推定手法を 4.1 節と 4.2 節でそれぞれ説明する.

4.1 パケットロス率の計測手法

OpenFlow では OpenFlow Controller (OFC) が OpenFlow Switch (OFS) からフロー単位の統計情報 (FlowStats) を取得できる. FlowStats に含まれる情報は累積値であるため、任意の間隔で取得した FlowStats の差分から転送パケット数が得られる (図 1(i)). その上で、1 つの経路上を転送する動画通信のフローに対して、経路の送信側に最も近い OFS (送信側 OFS) と受信側に最も近い OFS (受信側 OFS) の転送パケット数の差分を計算する事で経路途中のパケットロスを計算できる (図 1(ii)). しかし、FlowStats の取得タイミングは完全に同期できないため、たとえパケットロスが発生していなくても、測定誤差が生じる (図 1(iii)).

そこで、先行研究では FlowStats の取得タイミングによって生じる OFS 間の転送パケット数の誤差を時間軸で補正することでパケットロス率 (率) を推定した. 具体的には、受信側 OFS の転送パケット数が送信側 OFS より多い場合 (受信過多) は必ず測定誤差となるため、その差分を累積余剰パケット数として保持し (図 1(iv)), 以降の測定誤差の補正に用いる. 一方、送信側 OFS の転送パケット数が受信側 OFS より多い場合 (送信過多) にはパケットロスと測定誤差の可能性がある. この時、累積余剰パケット数が 1 以上の場合は以前に発生した受信過多の回復挙動と予測できるため、受信側 OFS の転送パケット数に余剰パケットを加算する事で誤差を補正する (図 1(v)). その後、補正したパケット数に基づいてパケットロス率を計算する.

4.2 その他のパラメータの推定手法

3 節で述べたとおり、G.1071 ではパケットロス率に加え、平均連続パケットロス回数、動画ビットレート、フレームレート、解像度、PLC 方式を用いる. これらのパラメータは計測できないため下記の方法で推定する.

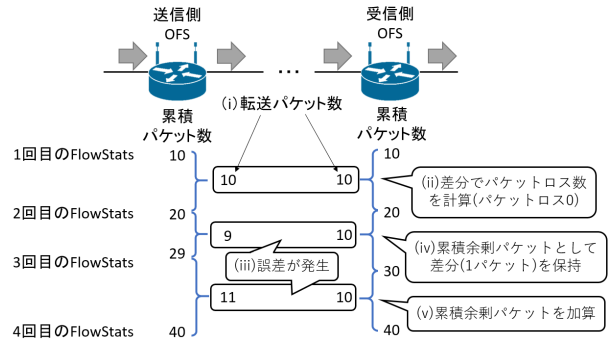


図 1 先行手法の累積余剰パケットを用いた誤差補正の動作例

表 3 解像度・フレームレート推定表

動画ビットレート (kbps)	解像度	フレームレート (fps)
~3,250	SD(720×480)	30
3,250~4,500	SD(720×480)	60
4,500~6,250	HD(1280×720)	30
6,250~7,750	HD(1280×720)	60
7,750~10,000	HD(1920×1080)	30
10,000~	HD(1920×1080)	60

平均連続パケットロス回数:QoE が最も低下する 1 回とする.

動画ビットレート:送信側 OFS で計測した転送バイト数をビットに変換して算出する.

フレームレート・解像度:動画の推奨設定 [7] から表 3 を作成し、動画ビットレートから解像度・フレームレートの推定を行う.

PLC 方式:QoE が最悪値となる Slicing かつ 1 フレーム 1 スライスとする.

4.3 先行手法の課題点

累積余剰パケットを用いた誤差補正は、受信側 OFS の転送パケット数が送信側 OFS より大きい場合 (受信過多) は確実に誤差である特徴を活用した. しかし、FlowStats の取得タイミングは前後するため、以下の問題が発生する.

- 送信側 OFS の転送パケット数が受信側 OFS より大きくなる誤差が発生した場合、誤ってパケットロスとして判断する可能性がある.
- 実際にパケットロスが発生すると、送信側 OFS の転送パケット数が受信側 OFS より多くなる頻度が増加する. しかし、その差分がパケットロスか測定誤差のどちらに起因するのか判断ができずにパケットロスを誤って累積余剰パケットで補正し、QoE を過大に推定し、精度が劣化する.

5. パケット誤差特性を用いた QoE 推定手法

5.1 FlowStats の測定誤差の特性調査

本研究では、測定誤差とパケットロスの判別を行うために、FlowStats の測定誤差特性 (測定誤差の発生頻度、測定誤差の大きさ、測定誤差の回復時間) を調査し、分析を行う. OFS 間 が 1 ホップの構成でコーデック H.264、解像度 SD(720×480)、フレームレート 30fps、動画ビットレート 2.5Mbps で固定レートの動画を延べ 1508 秒配信し、243 回の測定誤差が発生した.

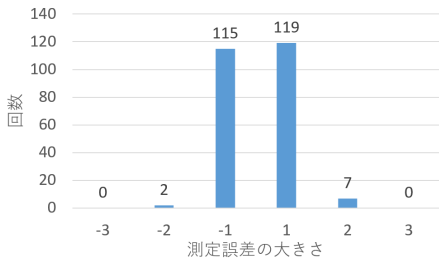


図2 測定誤差の大きさ別発生回数

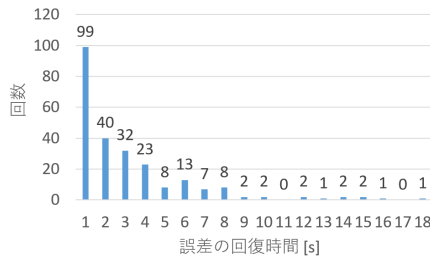


図3 測定誤差の回復時間別回数

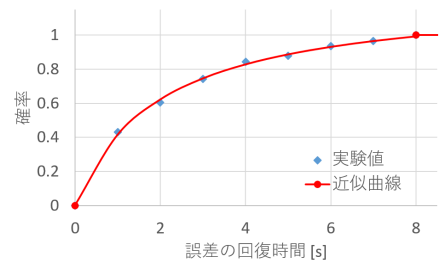


図4 測定誤差の回復時間の累積分布

なお、測定誤差の発生特性はパケットロスの有無に依存しないため、本稿ではパケットロスがない環境での結果を示す。

5.1.1 測定誤差の発生頻度・大きさの調査

2つのOFS間の転送パケット数の測定誤差は4.3節で説明したとおり、FlowStatsから算出するパケット数が送信側OFSが多い場合（送信過多）と、受信側OFSが多い場合（受信過多）がある。本節では、測定誤差の大きさならびに送信・受信過多の発生頻度を調査する。正の値を受信側過多、負の値を送信側過多として、それぞれの発生回数を図2に示す。図2より、送信過多と受信過多は一樣で偏りが無い。また、測定誤差のうち全体の96%は1パケットの誤差であり、2パケットの誤差は全体の4%、3パケット以上の誤差は発生しなかったため、測定誤差は1パケットで発生すると仮定できる。

5.1.2 測定誤差の回復時間の調査

転送パケット数の誤差はFlowStatsの取得のタイミングのずれに依存して発生するため、誤差発生後に誤差発生OFSとは反対のOFS（送信過多であれば受信側OFS、受信過多であれば送信側OFS）で誤差によるパケット数差と同数分だけ転送パケット数が大きくなる状態が生じる。例えば、受信過多が1パケット生じるとその後、送信側OFSの転送パケット数が受信側OFSより1パケット多くなる。これを測定誤差の回復と定義する。そこで次に測定誤差の回復時間の傾向を調査する。測定誤差が発生した243回の誤差回復の時間分布を図3に示す。図3より、誤差発生からの経過時間が短いほど回復する数が多い。この結果から、全体のうち95%が8秒以内に回復しているため、誤差の回復は8秒後までに完了すると仮定し、9秒以降のデータは外れ値とする。

上記の通り、回復時間には傾向があるため、図3を累積分布に変換し、 $y = \frac{A}{x+B} + C$ で近似曲線を求めたものを図4に、近似曲線の式を式(7)に示す。

$$F(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ \frac{-2.45300}{x+1.98451} + 1.23839 & (0 < x < 8) \\ 1 & (8 \leq x) \end{cases} \quad (7)$$

なお、 x は測定誤差発生からの経過時間である。また、前述の通り9秒以降のデータは外れ値とするため、8秒以上の場合は確率1とする。

5.2 提案手法

5.1節で得た「測定誤差は1パケット」という特徴と、図4の累積分布関数を活用してパケットロス率を得ることで、動画

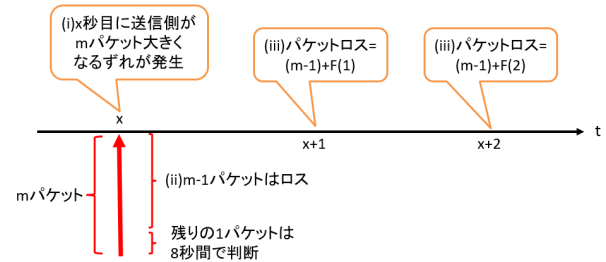


図5 送信過多の場合の提案手法の動作

のQoEを推定する手法を提案する。4.3節で述べた通り、測定誤差は送信過多と受信過多の2種類に分類されるため、それぞれの誤差発生に対する補正方法を説明する。

• 送信過多の誤差補正

この事象の発生要因は測定誤差とパケットロスのいずれかの可能性があり、誤差発生時点では、どちらか判断することは難しい。しかし、測定誤差であれば8秒以内に回復するが、パケットロスの場合は回復しない。本研究では、リアルタイムにパケットロス数を計測してQoE推定に反映するために、OFS間の転送パケット数にずれが発生した時刻を基準とし、前述した累積分布関数を用いて、経過時間毎のパケットロス率を推定し、QoEの更新を行う。まず、「測定誤差は1パケット」という特徴から、2パケット以上のずれが発生した時点で（図5(i)）、1パケット分を除いた部分はパケットロスとする（図5(ii)）。また残りの1パケット分については累積分布関数を用いてパケットロス率の推定を行う。具体的には、FlowStatsの計測（QoE計算）のたびに送信過多の発生時刻から経過時間（ n 秒）に応じて、式(7)を用いて、 $F(n)$ の確率でパケットロスが発生したものと扱い、その期待値である $1 \times F(n)$ 個のパケットロスが発生したと推定する（図5(iii)）。その後、回復した、つまり測定誤差が解消された場合、その時点でパケットロスを0に変更し、一方で8秒経過時点で回復しない場合は100%パケットロスとして、QoE値を更新する。

• 受信過多の誤差補正

送信したパケット数以上に受信することはないため、受信過多は発生時点で測定誤差と断定できる。またその場合、8秒以内に回復することがわかっている。そのため、直後に発生する送信過多を受信過多の回復として扱う。この時の送信過多は実際には回復と新しい測定誤差の可能性が考えられるが、図4より、ずれ発生後から1秒後の時点で約42%が、2秒後では約62%が回復していることから、次に発生するずれを回復として

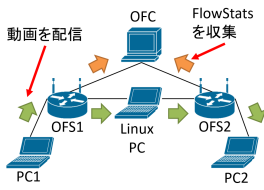


図6 実験環境

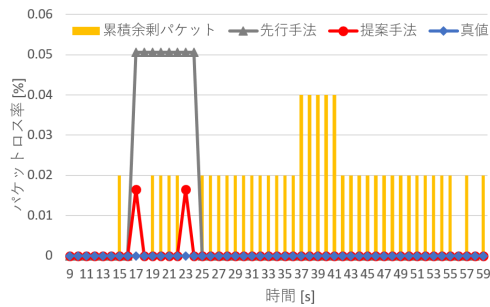


図7 パケットロスのない環境でのパケットロス率と先行手法の累積余剰パケット数

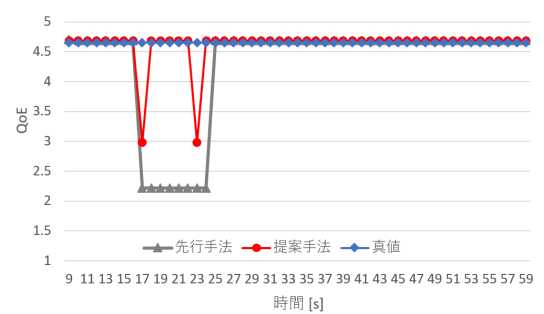


図8 パケットロスのない環境での推定 QoE

用いる。もしパケットロスであった場合には誤補正してしまうが、本来の回復による誤差(送信過多)が代わりにパケットロスとして判断されるため、時刻は遅れるものの、パケットロスとして検出できる。

上記の方法を用いて、FlowStatsで計測する毎に直近8秒間のパケットロス数を計算し、パケットロス率からQoE値を推定する。なお、パケットロス率以外のパラメータは4.2節と同様の方法を用いて決定する。

6. 実機実験による評価

本節では、提案手法のQoE推定値を先行手法のQoE推定値、エンド端末で算出したQoEの真値と比較することで、提案手法の評価を行う。パケットロス率の誤差補正手法の評価を行うため、パケットロス率とQoEに着目して評価を行う。

6.1 実験環境

実験トポロジを図6に示す。OFCにはTrema、OFSにはOpenvSwitchを用いる。OFS間はパケットロスを発生させるために、Linux PCを有線接続で挿入する。コーデックH.264、解像度SD(720×480)、フレームレート30fps、動画ビットレート2.5Mbpsで固定の60秒の動画をPC1からPC2に対して配信する。また、計測の最初の1秒は動画再生開始のタイミングに起因して計測パケット数に差異が生じ、最後の1秒は動画再生終了で計測結果に差異が生じるため、実験結果からは除外した。QoE推定には過去8秒間のデータが必要なため、動画開始後9～59秒の結果を示す。

6.2 パケットロスのない環境での評価

パケットロスが発生しない環境における推定パケットロス率と先行手法の累積余剰パケット数を図7に、推定QoEを図8に示す。図7より、先行手法では17～24秒までの間にパケットロス率が真値と比べて大きくなっている。これは、17秒時点で累積余剰パケット数が0かつ送信過多が発生したため、パケットロスと誤判定した事に起因する。加えて、QoE推定は過去8秒間のデータを用いてQoE値を算出するため、パケットロス率およびQoE推定値が8秒間に渡って真値から大きく乖離している(図8)。また、25秒以降は先行手法も正しく推定できているように見えるが、これは17秒の誤差回復である受信過多が累積余剰パケットに加算され(図7の19秒)、以降の計測で生じた別の誤差の補正に誤用されている(図7の23、56、58秒)。従って、もし19秒以降にパケットロスが発生した場

合、ここで加算された累積余剰パケットによって誤補正され、QoE推定値に誤差が生じる。

一方、提案手法では、図7の16、23秒でパケットロス率に測定誤差が発生しているものの、パケットロス率の測定誤差は先行手法に比べて小さく、QoEの推定誤差も先行手法と比べて小さい(図8)。これは、送信過多の発生時に、先行手法では即座に100%パケットロスと判定するのに対し、提案手法では回復までの累積分布を加味してパケットロス率を更新するためである。さらに、先行手法では、8秒間は測定誤差を含む数値を利用し続けるのに対して、提案手法では図7の18、24秒のように誤差回復を確認した時点でパケットロスを0とするため、測定誤差がQoE推定に影響を与える時間も短い。以上より、提案手法はパケットロスのない環境において、先行手法よりも良好な性能を示していると言える。

6.3 パケットロスのある環境での評価

パケットロスのある環境での手法の評価を行う。パケットロス率0.1%の際の推定パケットロス率と先行手法の累積余剰パケットを図9に、推定QoEを図10に示す。先行手法では図9の9～17秒、29～33秒においてパケットロスを累積余剰パケットを用いて誤補正し、パケットロス率を0%と推定した結果、推定QoE値が真値よりも過大となっている(図10の9～17、19～33秒)。これは測定誤差とパケットロスを区別しないためである。

これに対し、提案手法では、測定誤差とパケットロスの判別を測定誤差に対する回復の累積分布を用いて行うため、パケットロスの誤補正、及びQoEの過大推定は少ない。先行手法でQoEの過大推定が発生した図9、10の9～17、19～33秒に着目すると、提案手法はパケットロス率に関して、最大0.13%ほど誤差が発生するものの、推定QoEと真値との差は0.5以下に留まり、良好な推定精度と言える。一方、今回の実験結果では、図7の18～20、29、38～40、52～55秒のパケットロスの真値が一時的に0%になっているが、提案手法では、パケットロス率を0.05%程度と推定している。この結果は、提案手法は一時的なネットワーク状態の回復を検出できていないと言えるが、アプリケーションによっては、一時的なネットワーク状態の回復が誤った経路選択を招く可能性があるため、QoEに基づくアプリケーション通信制御の観点では安定性を重視した良好な特性であると言える。

次に、劣悪な無線環境における提案手法の有効性を評価する

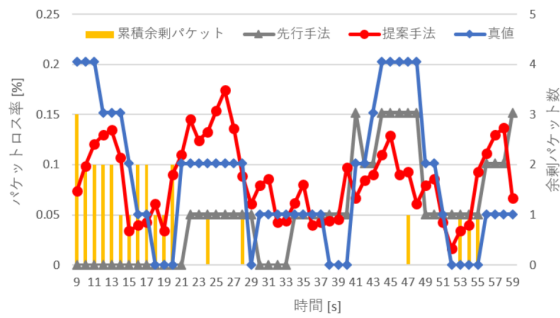


図9 パケットロス 0.1% でのパケットロス率と先行手法の累積余剰パケット数

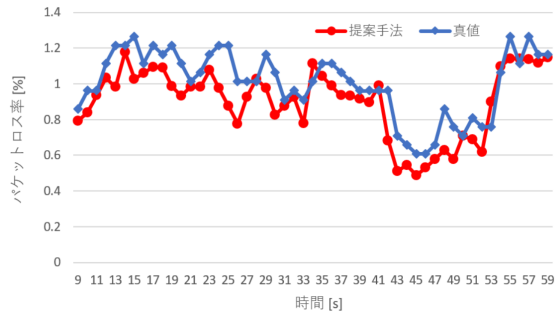


図11 パケットロス 1% でのパケットロス率

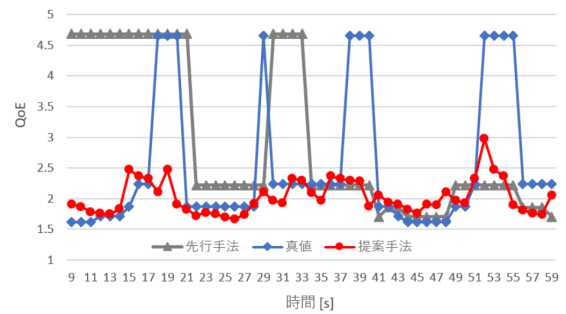


図10 パケットロス 0.1% での推定 QoE

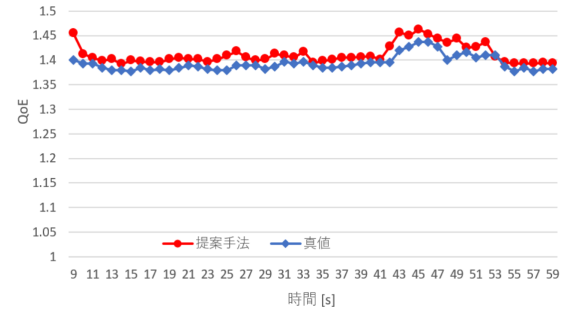


図12 パケットロス 1% での推定 QoE

ために、パケットロスを 1% と設定した際の推定パケットロス率を図 11、推定 QoE を図 12 に示す。なお、パケットロスが 1% あると、パケットロスによって受信過多が発生せず、累積余剰パケットを取得する機会がないため、先行手法は動作自体をしない。そのため、ここでは先行手法との比較評価は行わない。

提案手法は毎回の誤差測定時に、1 パケット分を除いて全てパケットロスと判断するものの、その 1 パケットに関してはパケットロスと測定誤差の判定を保留し、誤差回復確率の累積分布に従ってパケットロス数を加算していく。そのため、推定パケットロス率はやや低め、推定 QoE 値はやや高めとなる。しかし、QoE の推定誤差は最大でも 0.05 程度に留まるため、良好な推定精度であると言える。

以上の結果から、提案手法はパケットロスのある環境においても有効だと言える。しかし、本研究では、G.1071 の入力パラメータの 1 つである平均連続パケットロス回数については OpenFlow では取得できないため、QoE が最悪値となる 1 回と仮定を置いて QoE の推定を行っており、更に推定精度を向上させる余地がある。このパラメータについては、無線レイヤと情報連携することで、利用可能であると考えられるため、今後はこの連携に取り組む。

7. おわりに

本稿では、OpenFlow の制御メッセージを用いた QoE 推定手法の精度を向上させるために、まず FlowStats の測定誤差についてのデータの分析を行った。その結果、測定誤差のうち 95% 以上が 1 パケット分の誤差に留まっており、更に誤差発生から 8 秒後までには 95% 回復することが分かった。これらを基に、誤差が回復に関する時間毎の累積分布関数を作成し、この分布関数をパケットロス発生確率として用いることで、経過

時間毎のパケットロス率を算出する手法を提案した。提案手法は先行手法と比較して、パケットロスの有無に関わらずリアルタイムかつ良好な推定精度を実現できることを示した。今後はより推定精度を向上させるために、無線レイヤとの連携に取り組む予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H03270、及び国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究による成果を含む。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 下川駿平, 金岡拓哉, 妙中雄三, 塚本和也, "OpenFlow 制御メッセージを用いた QoE 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—," 電子情報通信学会, 信学技報, vol.118, no.465, NS2018-216, pp.135-140, 2019 年 3 月.
- [2] H. Nam, K.H. Kim, J.Y. Kim, H. Schulzrinne, "Towards QoE-aware Video Streaming using SDN," GLOBECOM, Dec. 2014.
- [3] J. Seppänen, M. Varela, "QoE-Driven Network Management For Real-Time Over-the-top Multimedia Services," WCNC, April 2013.
- [4] A. Erfanian, F. Tashtarian, M.H. Yaghmaee, "On Maximizing QoE in AVC-Based HTTP Adaptive Streaming: An SDN Approach," IWQoS, June 2018.
- [5] A. Farshad, P. Georgopoulos, M. Broadbent, M. Mu, N. Race, "Leveraging SDN to Provide an In-network QoE Measurement Framework," INFOCOM Workshop CNTCV, May 2015.
- [6] Recommendation ITU-T G.1071, "Opinion model for network planning of video and audio streaming applications," Nov. 2016.
- [7] YouTube ヘルプ アップロードする動画の推奨エンコード設定 <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=ja>