

クライアント品質推定のための 詳細なストリーミングサーバログ分析

寺田直美[†] 河合栄治[†] 砂原秀樹[†]

インターネットストリーミングにおいて、クライアントサービス品質をサーバサイドで把握することはサービス提供者やシステム管理者に必須となってきている。しかし、クライアント再生品質をサーバログから定量的に推定するための指標はこれまであまり知られていない。本論文では、まずクライアントサービス品質評価方法として、クライアントでの再生フレームレートに着目して分類を行い、実験結果から、クライアントサービス品質、サーバログとネットワーク状態の相関を明らかにした。サーバログに出力される情報の中で、「クライアント回復パケット数」がクライアントサービス品質劣化の重要な指標となることが分かった。

An In-depth Analysis of Streaming Server Logs for Client-side QoS Estimation

NAOMI TERADA,[†] EIJI KAWAI[†] and HIDEKI SUNAHARA[†]

Client QoS management on internet streaming has been crucial to server administrators and service providers. However, no quantitative analysis method of server logs has been established for estimation of client playing status. In this paper, we propose a novel approach for detailed server log analysis which classifies client-side service statuses by time-series data of playing frame rates. Our experimental results show clear correlations among client-side QoS, server log data and network environments. Especially, “client recovered packets” in server log data is proved to be a good indicator that predicts client QoS degradation.

1. はじめに

ストリーム配信の商用化にともない、サーバ側でのクライアントサービス品質管理がますます重要になってきている。しかし、現在のクライアント QoS 管理では、エンドユーザの満足度が必ずしもサーバ側で正しく把握されているとはいえない。

ストリーミングにおける QoS 管理で最も難しい点は、クライアントでの再生状態をネットワークパケットの状態から直接推測するのが困難なことである。推測が難しい理由は大きく 2 つ存在する。

1 つは、アプリケーションデータバッファによるデータロス緩衝によるものである。クライアントアプリケーションは、データロスによる再生中断を避けるために、独自のデータバッファを保持している。このため、ネットワーク輻輳によるパケット喪失が発生しても、短時間であればクライアントアプリケーションのバッファ

内に蓄積されたデータがあるため、再生は継続される。

もう 1 つは、コンテンツの違いに起因する再生品質変動によるものである。1 つのデータパケットロスが再生品質に与える影響は、動画像圧縮方式ごとに異なる可能性がある。また、コンテンツの動きが小さければ、データパケットロスによりフレームが欠落しても視聴者に認識されない可能性もある。このため、パケットレベルでのデータパケットロスと再生品質の劣化程度は必ずしも直結しない。

加えて、現在のストリーミング配信ではプロプライエタリなシステムが主流となっており、内部的な構造からシステムの挙動を分析することは困難となっている。このため、ブラックボックスであるシステムにおいては、外部から得られる限定的な情報から、システム挙動に関する運用上有益な知見を導出する必要がある。

本論文では、図 1 に示すように、サービス品質判断の基準となるクライアント、サービス品質の把握が必要なサーバ、そしてサービス品質に影響を与えるネットワーク環境のそれぞれの関係に注目した。まずク

[†] 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

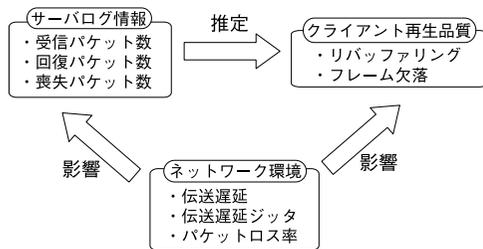


図 1 サーバログ情報からのサービス受信状態の推定
Fig. 1 Service quality estimation from a server log.

クライアントサービス品質指標として、エンドユーザの視聴感を反映させた定量的な画質評価方法を提案し、様々なネットワーク状態を人工的に再現した環境下において、クライアントサービス品質、サーバログ出力との相関を明らかにする。なお、ストリーミング再生品質評価では動画像と音声の両方について評価項目が考えられるが、本論文では動画像の再生品質評価のみを対象としており、音声に関する再生品質評価は行っていない。

本論文の議論により、エンドユーザ視聴感に即したより正確なクライアントサービス品質をサーバログから取り出すことが可能になる。サーバログを用いた品質推定手法をターゲットとしているため、配信システムに変更を加える必要がなく、解析による運用への影響が発生しない。加えて、仕様が公開されていないプロプライエタリな実装にも適用できる。

本論文での構成は次のとおりである。まず 2 章で既存のストリーミングサービス品質評価手法を説明し、3 章でサーバログの内容とクライアントサービス状態を定義、4 章でクライアント品質指標の評価方法を考察する。5 章で実験の説明と実験結果について示し、6 章で関連研究について説明し、7 章で結論について述べる。

2. ストリーミングサービス品質管理手法

サービス品質管理は、図 2 に示すように 4 つの地点での観測が考えられる。本章では、各地点における既存技術とその利点と欠点をふまえ、本論文での目的に最も適したアプローチを検討する。

2.1 エンドユーザ視聴感の主観評価手法

画質の評価手法として一番直接的な方法が、観測者による直接観測である。画質評価の主観評価については、ITU (International Telecommunication Union) によって評価方法が厳密に定義されている。評価には、専門家でない観測者が合計 15 名以上必要とされ、原画像と対象画像の比較を定められた手順、評価方法

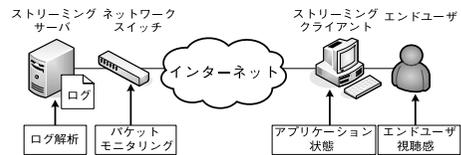


図 2 クライアント品質管理ポイント
Fig. 2 Client QoS management point.

ののって行う¹⁾。代表的なものに、DSIS (二重刺激妨害尺度法)、DSCQS (二重刺激連続品質尺度法)、SSCQE (単一刺激連続品質評価法)、SDSCE (同時二重刺激連続品質評価法)がある。

主観評価は、複数の人間が視聴した品質を直接評価するので、エンドユーザ視聴感と直結している。また、定められた基準ののってることにより、個人差や評価方法のばらつきも比較的 low 抑えることに成功している。しかし、主観評価を行うためには人手と時間が必要であるため、長時間の動画像評価や長期観測は非常に困難になる。

2.2 エンドユーザ視聴感の客観評価手法

観測者によらず画質を評価する手法として、画像の客観評価がある。最も基本的な客観手法として、PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) があげられる。PSNR は原画像と対象画像を比較し、混入したノイズ量の比率を示すことによって画像の劣化指標とする測定方法であり、主観評価値との高い相関が認められている。この手法では原画像が必要になるため、あらかじめ原画像が不要な評価手法も開発されており、ITU-J.144 勧告²⁾をはじめ多数の技術が存在する。

一方で、これらの客観評価をネットワークの影響を受けるストリーミングに適用しても、ユーザ視聴感との高い相関を得られるとは限らない。なぜなら現在のインターネットストリーミングでは、レート自動切替え、自動リバッファ機能を備えており、ネットワークの状態に合わせて動的に配信品質の変更を行うため、品質に影響を与える再生中断やレート変更が発生する。また、ネットワーク上でデータが失われることによって再生時にフレーム欠落や再生中断が発生する。これらインターネットストリーミング特有の現象は、映像に含まれるノイズよりはるかに大きな影響をユーザ視聴感に与えるため、リバッファやフレーム欠落を定量的に評価する必要がある。

2.3 ネットワークモニタリング

パケットモニタリングによる配信ネットワークの監視により、観測点における通信について非常に正確な情報を得ることができる。しかし、ストリーミングの場合、サーバに近いポイントで行うパケットモニタリ

表 1 クライアント品質評価手法
Table 1 Evaluation methods of client-side QoS.

評価手法	利点	欠点
主観評価	エンドユーザ視聴感を反映	人的リソースが必要
客観評価	エンドユーザ視聴感を反映	ストリーミングに適した評価が必要
パケットモニタリング	正確なパケット情報	ストリーミングで低い有効性
サーバログ分析	手軽に利用可能	エンドユーザ視聴感と直結していない

ングの有用性は低い。ストリーミングデータ転送では通例、トランスポートに UDP を用いており、送信先であるクライアントから TCP の ACK に相当する応答がサーバに返らない。このため、サーバ側でパケットの到着状態を知ることが難しい。

アプリケーションレイヤまでパケットを展開することにより、データ到着状態の解析を行う手法もある³⁾。これはパケットに含まれるデータフレームの ID を観測するため、喪失したパケットをリアルタイムに正確に知ることが可能である。しかし、上位レイヤまでパケットの展開が必要なため、途中ネットワークにおける観測機器の負荷が高くなることと、アプリケーション実装やビデオコーデックに大きく依存するという欠点がある。

2.4 サーバログ分析

サーバアプリケーションログおよびサーバへのアクセスログから、アクセスパターンの分析を行った研究は数多い。実環境下で収集したデータを用いてストリーミングトラフィックの特徴を分析したもの⁴⁾ や、ファイルの更新によるアクセスパターンの変化に着目したもの⁵⁾、接続元分析を行ったもの⁶⁾ やコンテンツタイプに着目したアクセスパターンの違い⁷⁾、オンデマンドコンテンツとライブコンテンツとの比較⁸⁾ など様々である。アクセスパターンを知ることは、サーバ負荷予想やキャパシティプランニングには有効であるが、クライアントサイドでの品質を知ることは難しい。サーバログを用いてクライアント品質を予測するという本論文と類似したアプローチの研究に関しては、6章で述べる。

2.5 まとめ

各評価手法の利点と欠点について表 1 にまとめた。本研究では、実運用でのストリーミング品質管理に有効性が高い評価項目として、再生品質の客観品質評価とサーバログを取り上げる。アプリケーションでの再生品質とサーバログ項目の相関を明らかにすることにより、サーバログからより詳細なサービス状態品質を引き出すことを目標とする。

3. サーバログとクライアントサービス状態

3.1 サーバログ

ストリーミングサービスでは、コンテンツデータ配信のためのセッションと、クライアント通信制御情報交換のためのセッションを分離している。クライアントアプリケーションにおけるパケット受信状態や再送リクエストは、後者のコントロールセッションを通じてサーバに送られる。このクライアントから送られる状態情報は、サーバログに記録されるため、このログを用いることでクライアントアプリケーションの挙動を比較的詳細に知ることができる。

Windows Media Server では、1 配信ごとにクライアントアプリケーションから得た情報を記録している。なかでも、クライアントにおけるサービス品質と関係が深いのは、クライアントアプリケーションの受信パケット数、回復パケット数、喪失パケット数、リバッファ時間である⁹⁾。受信パケット数はクライアントが再送なしで受信できたパケット数を、回復パケット数はデータ喪失により再送要求を送り、再生タイミングまでに受信することができたパケット数を、喪失パケット数は再生タイミングまでに受信できなかったパケット数を表している。リバッファ時間は、1 回の配信で発生したリバッファの合計時間を表している。

3.2 クライアントサービス状態

ストリーミングクライアントにおけるサービス品質は、クライアントアプリケーションにおける再生品質である。動画像の再生品質に影響を与える要素として、再生途中に起こるリバッファによる再生停止、動画像がなめらかに再生されないフレーム落ち、再生画質の劣化があげられる。再生画質の劣化は、1 つのフレームに含まれるスライス、あるいはより小さな単位であるマクロブロックやブロックの欠損によるものである。これらの原因による再生画質劣化は、フレーム落ちと比較した場合、視聴品質への影響はより小さいとされている¹⁰⁾。

ストリーミングサービスでは、指定された時間にフレームを再生する必要があるため、数秒先の再生デー

たまであらかじめアプリケーションバッファに保持しておく仕組みになっている。このバッファに、連続的な再生をするのに十分なデータがないと判断される場合は、一定量のデータを蓄えるまでは再生が開始されず、この動作をバッファリングと呼んでいる。バッファリングは配信開始時のほか、ネットワーク上でデータロスなどが発生し、配信中にバッファ内のデータが枯渇した場合にも起こる。バッファリングの期間は再生が中断するため、視聴感への影響は非常に大きいといえる。

動画のフレーム落ちも再生品質に与える影響が大きい。配信動画は指定されたフレームレート値でエンコードされ、クライアントでデコードし再生される。クライアントアプリケーションでは、デコード時のフレームレートを取得することができる。これを再生フレームレートとし、エンコード時の指定フレームレートをエンコードフレームレートとする。通常はエンコードフレームレートと再生フレームレートは一致するが、何らかの原因でフレームの一部が再構成できなかった場合、再生フレームレートの値が減少する。

Windows Media Player では、再生フレームレート値は配信中にのみ表示させることが可能であるが、記録することができないため、今回 Windows Media のライブラリキットである SDK を用いて 1 秒ごとのステータス変化を取得した。

3.3 クライアント再生状態の分類

配信中のフレームレート変動は、図 3 に示すような挙動を示す。予備実験より、バッファ直後に再生フレームレートの急激な上昇が発生し、その後減衰しながらエンコードフレームレートに収束する現象が確認されている（図 3, I の区間）。

配信中のクライアントアプリケーションは、停止、再生、バッファリングの 3 状態に分けることができ、再生状態は品質に基づきさらにいくつかに分類することができる。それぞれの状態の遷移を示したのが図 4 である。再生品質の指標となる再生時のフレーム落ちは、再生フレームレートの変動を観測することで検出が可能である。

停止状態

アプリケーションが起動され、再生を開始していない状態は停止状態である。他のステータスにあるとき

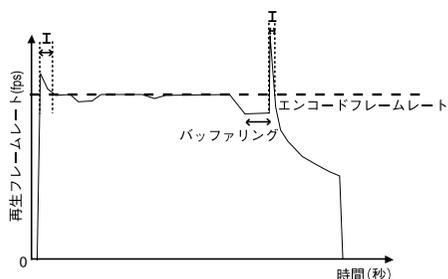


図 3 配信中のフレームレート変動の例

Fig. 3 A typical example of frame rate fluctuation.

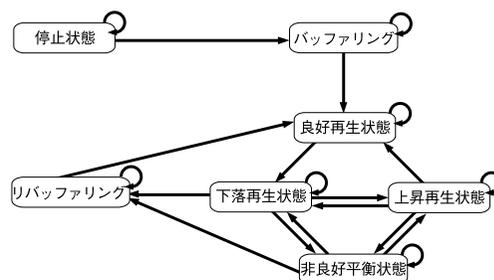


図 4 クライアント再生状態遷移

Fig. 4 Transitions of client playing statuses.

に、アプリケーションで再生停止命令を検出した場合や配信が終了した場合には停止状態に遷移する。

バッファリング

アプリケーションで再生イベントを検出すると、サーバとのコネクション確立後、データ転送リクエストが送られ、間もなくバッファリングに入る。

リバッファリング

配信中にデータの転送が滞りバッファが枯渇した場合には、リバッファリングを行い、データ再蓄積を行う。

良好再生状態

再生フレームレートがエンコードフレームレート以上の値を記録しているときは、フレームレートの下落が発生していても再生に影響が見られなかったことから、これを良好再生状態と定義する。データが損失し、再生タイミングまでにフレームとして再構成できなかった場合にはフレーム欠落が発生、下落再生状態に遷移する。

下落再生状態

再生フレームレートがエンコードフレームレート未満の値で、かつ再生フレームレートが下落が続いているとき、視認可能なフレーム落ちが多発する。フレームレートが下落したまま変動しなければ非良好平衡再生状態に、上昇すれば上昇再生状態に遷移する。

クライアントでの再生フレームレートは 1 秒間隔で小数点以下 2 桁まで記録されているが、1 秒間に 1 フレーム未満という微細な変動であれば、品質への影響は目視観測で確認できなかった。このため、本論文の分析では秒間 1 フレーム以上の再生フレーム変動のみを再生状態変動検出に用いた。

上昇再生状態

再生フレームレートがエンコードフレームレート未満の値で、かつ再生フレームレートが上昇を続けているとき、視認可能なフレーム落ちが観測されない。予備実験では、再生フレームレート上昇時の品質劣化は目視で確認できなかったが、再生フレームレート上昇時の視聴感への厳密な影響は明らかではないため、商業利用においては影響が出る可能性がある。

非良好平衡再生状態

再生フレームレートがエンコードフレームレート未満の値で、かつ再生フレームレートが変化していないとき、視認可能なフレーム落ちがところどころ観測された。

4. エンドユーザ視聴感に基づいた再生品質評価

4.1 各状態滞留時間による評価

配信中に、各状態に滞留している時間の長さはクライアント品質の基準となる。サーバからのデータ受信が問題なく行われ、安定した再生ができている場合は、エンコードフレームレートどおりに再生が行われるため、良好再生状態が長いほどクライアントにおける品質は高いといえる。下落再生状態が発生している場合は、再生時にフレーム落ちが発生していることを示しており、この時間の長さは、再生品質劣化を細粒度で観測する際に重要な指標になると考えられる。リバッファ状態では再生が停止するため、エンドユーザ視聴感に大きなマイナスになる。リバッファ状態に遷移する時点ですでにクライアントでの再生状態は相当悪化しており、品質劣化を早期に検出するためのパラメータとしては不適である。

上昇再生状態と非良好平衡再生状態については、他のパラメータほど直接的にクライアント品質を示さないと考えられる。上昇再生状態が存在するという事は、前段階でデータフレームレート以下への下落が発生していることを示しているため、一概に高品質とはいえない。非良好平衡再生状態は、再生フレームレートが連続的に下落しているときほどのコマ落ちが観測されないが、コマ落ちが発生していないことを表しているのでもないため、品質評価指標としての優先度は下がる。

各再生状態の判断アルゴリズムを表 2 に示す。なお、エンコードフレームレートを E (fps)、配信開始から n 秒後のフレームレートを F_n とする。

3.3 節で示した各配信状態について、配信中の合計時間をそれぞれ、「良好再生状態時間」「下落再生状態

表 2 再生状態判断アルゴリズム

Table 2 Algorithm for classify playback status.

良好再生状態	$F_n \geq E$
下落再生状態	$F_n < E$ かつ $F_n < F_{n-1}$
上昇再生状態	$F_n < E$ かつ $F_n > F_{n-1}$
非良好平衡再生状態	$F_n < E$ かつ $F_n = F_{n-1}$

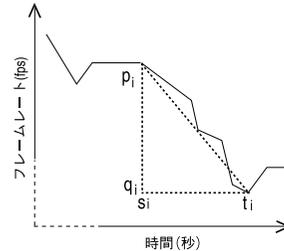


図 5 フレームレート下落の連続性による評価

Fig. 5 Detection of successive frame rate decreases.

時間」「上昇再生状態時間」「非良好平衡再生状態時間」と定義する。

4.2 再生フレームレート下落の連続性による評価

下落再生状態が続いた場合、フレーム落ちが連続して起こるために再生が中断したように観測され、視聴感を大きく下げる。下落再生状態が持続している場合と、ごく短時間に突発的に発生している下落再生状態を区別するために、再生フレームレート下落の連続性を考慮した評価方法を考える。

クライアントでの再生フレームレートを毎秒記録し、3.3 節で定義した各状態が連続している箇所を検出する。この結果、1 回の配信は、いくつかの状態連続区間の集合に分けられる。これらのうち、下落再生状態の連続区間 (図 5) において、 i 番目のものの開始地点の時刻を s_i 、フレームレートを p_i 、連続状態が終了する地点の時刻を t_i 、フレームレートを q_i とする。

下落再生状態が継続した場合は連続的なフレーム落ちが発生するため、視聴者には再生が停止したように観測される。再生停止はリバッファと同様に再生品質を大きく低下させるため、短時間のパースト的なフレーム落ちとは区別する必要がある。そこで、下落再生状態が継続した時間について 2 乗し重み付けをした。1 配信中で検出した下落再生状態の区間数を n とし、クライアント再生品質評価式を次のように定義する。

$$V_{down} = \sum_{i=1}^n (q_i - p_i) \cdot (t_i - s_i)^2$$

なお、エンコードフレームレートが高い場合は同じフレームレート下落幅であっても再生品質への影響は小さくなる。逆にエンコードフレームレートが低い場

合はフレームレート下落の影響は大きくなる．現在は多くの配信で 30 fps によるエンコードが標準的に用いられているため，エンコードフレームレートに対する下落割合は評価式では考慮していないが，異なるエンコードフレームレートで評価する際には下落割合について検討する必要がある．

5. 実験

5.1 実験環境

ストリーミングの配信形態には，サーバにあらかじめエンコードしたファイルを配置しておき，クライアントからのリクエストに応じて提供するオンデマンド方式と，エンコーダで動画をリアルタイムにエンコードしながら順次サーバに送出し，サーバから配信を行うライブ方式がある．オンデマンド配信では，まとめてクライアントにデータを送信することが可能なため，QoS 管理要求は一般にライブ配信ほど困難ではない．本論文では，より高い精度で QoS 管理が求められるリアルタイム配信を適用対象とし，実験はライブ方式で行った．ライブ方式では，テレビカメラなどの映像をデータソースとすることが一般的であるが，実験では再現性の観点から動画ファイルをデータソースとし，エンコーダハードディスク上に配置した．

図 6 に実験環境の概要を示す．各機器は 100 Mbps のイーサネットによって接続されている．インターネット上で発生する様々なネットワーク環境を再現するため，サーバとクライアントの間に PC ルータを設置し，NIST Net¹¹⁾ によるネットワークエミュレートを行った．実験ではネットワーク伝送遅延，ネットワーク伝送遅延ジッタ（ゆらぎ），パケットロス率について表 3 に示す値を設定した．

本研究で提案する方式は，サーバ・クライアント形態で配信するストリーミング配信システムには基本的に適用可能である．本実験では，サービスソフトウェアに Windows Media シリーズ¹²⁾ を用いた．Windows Media シリーズは現在最も普及しているストリーミング配信コンポーネントである．

クライアント再生品質取得には，Windows Media SDK を用いて 1 秒ごとの再生状態とイベントをログとして記録した．再生状態として記録した項目は，再生開始からの経過時間と毎秒の再生フレーム状態である．イベントとして記録した項目は，再生開始，再生停止，バッファリング開始，バッファリング終了である．このログに記録された毎秒の再生フレーム状態と，4 章で示した再生状態判断アルゴリズムを用いて，各再生状態時間と下落の連続性による再生品質評価値を

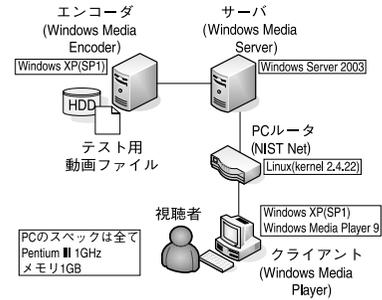


図 6 実験ネットワーク環境

Fig. 6 Experimental environment.

表 3 ネットワーク設定パラメータの値

Table 3 Network configurations.

遅延 (ms)	0, 50, 100, 200, 300
遅延ジッタ (%)	0, 50, 100
パケットロス率 (%)	0, 3, 5, 7, 10

表 4 エンコード設定

Table 4 Encode configurations.

動画 Codec	Windows Media Video 9
音声 Codec	Windows Media Audio 9
エンコードビットレート	340 kbps, 148 kbps, 58 kbps
エンコードフレームレート	30 fps

算出した．

5.2 コンテンツ

エンコーダで利用可能な動画のエンコード方式は大きく VBR (Variable Bit Rate) と CBR (Constant Bit Rate) に分けることができる．VBR が動画の内容によって時間あたりのデータ量が増減するのに対して，CBR は動画の動き量などと関係なく一定のレートでデータをエンコードする方式である．ネットワーク消費帯域がコンテンツに依存しにくいいため，ストリーミングのエンコード方式では，一般に CBR が用いられている．実験では，CBR を用いてエンコードを行った．エンコード設定は表 4 のとおりである．

映像の長さは 3 分間で，講義の様子を撮影したものを使用した．実験機では動きの大きい動画のエンコードが困難であったため，動きの比較的小さい映像を用いている．動きの大きい動画を用了場合は，フレーム落ちがより視聴者に視認されやすい可能性がある．本論文では再生フレームレートからフレーム落ちを検出するため，目視による観測を併用して閾値の設定を行った．その結果，比較的動きの大きい部分においても 1 秒間 1 フレーム未満の再生フレームレート下落ではフレーム落ちとして視認できなかった．このため，1 秒間 1 フレーム以上の下落を目視可能なフレーム落ちとして統一的に取り扱った．

5.3 実験結果

本節では、まず提案した品質評価関数がエンドユーザ視聴感を表しているかを確認するために、目視によるフレーム落ち観測結果と提案方式による再生品質評価を比較する。次に、ネットワーク環境がサービス品質にどのような影響を与えているかを明らかにするために、クライアント側で現れる影響とサーバ側で現れる影響の両方について検討する。具体的には、ネットワーク環境とクライアント再生品質評価値との相関、ネットワーク環境とサーバログ項目との相関を示す。これらをふまえ、サーバログパラメータとクライアント再生品質評価値との相関を示し、サーバサイドでのクライアント品質把握のために、有効なログ項目に関して議論する。

なお、以降の項で示す図中で、プロットが打たれていない部分は、測定不能であったためのデータ欠落による。

5.3.1 品質評価方法と目視によるコマ落ち観測結果の相関

図 7 は、ネットワーク環境と目視によるフレーム落ちの有無を示したものである。結果に若干のばらつきは見られるが、パケットロスに遅延ジッタ、遅延をともなう場合はほとんどの場合でフレーム落ちが観測された。

図 8 は、クライアントでの再生品質とネットワーク状態の相関を示したものである。クライアント再生品質として、左の図は 4.1 節で定義した良好再生状態時間を、中央の図は 4.1 節で定義した下落再生状態時間を、右の図は 4.2 節で定義した下落連続性による品質評価値を用いてプロットした。なお、4.1 節で定義した再生状態時間のうち、上昇再生状態時間と非良好平衡再生状態時間についてはネットワーク状態との強い相関は見られなかった。

3つの評価方法による品質評価結果と目視結果と比較すると、目視でコマ落ちを確認できた場合についてはいずれのケースでも劣化を検出しており、加えて目視で確認できなかったケースでも品質劣化を検出できていることから、目視結果よりやや細かい精度で品質劣化を検出できているといえる。

5.3.2 ネットワーク状態とクライアント再生品質の相関

図 8 より、ネットワーク上でパケットロスが発生し

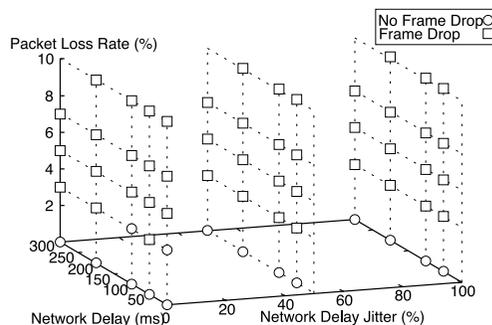


図 7 目視によるコマ落ちの有無とネットワーク状態の相関
Fig. 7 Correlation of frame drop by direct observation and network status.

ていない場合は遅延、遅延ジッタが増大しても品質に影響はほとんど出ていないことが分かる。パケットロスが発生している場合は、遅延時間が長くなると品質は劣化するが、遅延ジッタをともなう場合は特に大幅な品質劣化が起きている。この結果より、パケットロスが発生している環境下では、遅延そのものの大きさよりも遅延ジッタの大きさがクライアント再生品質に大きな影響を与えていることが分かる。

5.3.3 ネットワーク状態とサーバログの相関

ネットワーク環境によるサービス品質への影響がサーバログにどのように現れるかを知るために、ネットワーク状態とサーバログとの相関を示す。図 9 は、サーバログ項目とネットワーク状態の相関を示したものである。左の図は、サーバログ中のクライアント受信パケット数について、中央の図は、クライアント喪失パケット数について、右の図は、クライアント回復パケット数についてプロットしている。

左図、中央図より、パケットロス率が増加すると、サーバログでは受信パケット数の減少、喪失パケット数の増大が観測される。また、パケットロスが発生している環境下では、遅延ジッタの増加や遅延の大幅な増加が、受信パケット数減少、喪失パケット数増大を招く。回復パケット数は、受信、喪失パケット数と異なる変動を見せる。右図より、ネットワーク環境の悪化にともなって回復パケット数も増大するが、悪化が著しい場合には逆に回復パケット数は微減している。回復パケット数とは再送が成功した数を示しており、パケットの到達性が非常に悪くなると再送成功率が下がるため、回復パケット数も減少していると考えられる。

図 8 の結果と合わせると、再生品質の劣化度合が大きいほど、受信パケット数は小さく喪失パケット数が大きいことから、サーバログにおける受信パケット数、喪失パケット数の割合はクライアント再生品質の

4.2 節で示した評価式とは別に、下落再生状態の継続時間の重み付けを 3 乗して算出しプロットしたものと図 7 の比較も行ったが、目視による結果と大きく異なる結果になったため、重み付けは 2 乗が適当であると判断した。

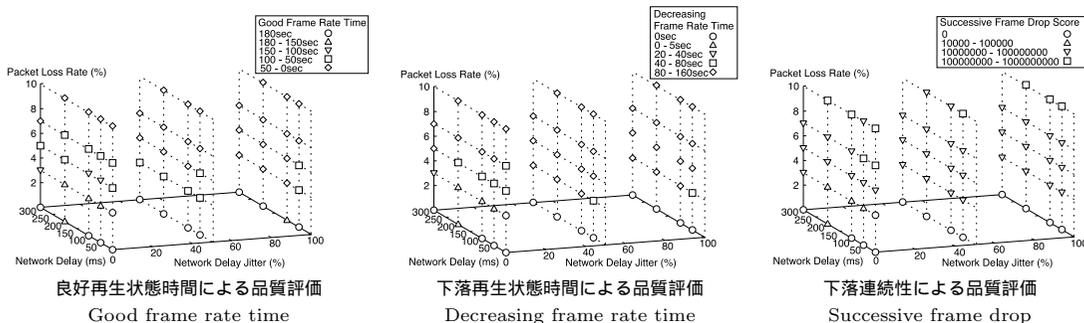


図 8 各評価関数による品質評価とネットワーク状態の相関
Fig. 8 Correlation of client QoS and network.

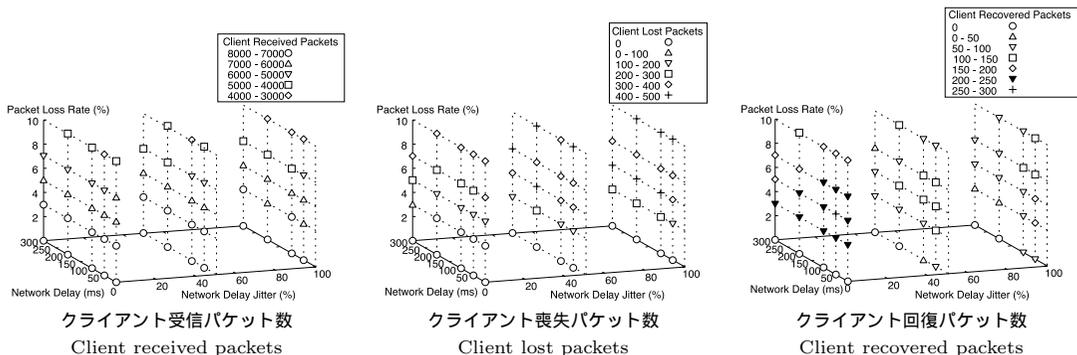


図 9 サーバログ項目とネットワーク状態の相関
Fig. 9 Correlation of server log data parameter and network.

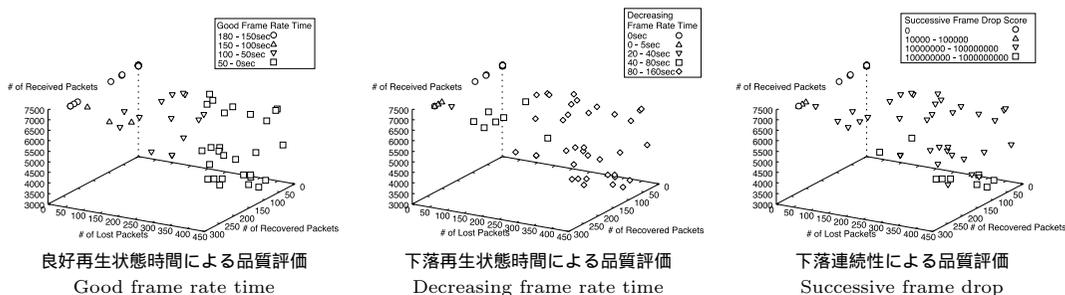


図 10 各評価関数による品質評価とサーバログの相関
Fig. 10 Correlation of client QoS and server log data.

程度を直接的に表していると予想できる。回復パケット数は、再生品質劣化が見られない場合（パケットロス率 0%，遅延ジッタ 50%以上の場合など）でも若干見られ、再生品質劣化が起きている場合は必ず大き

な値を示している。このことから、サーバログ中の回復パケット数は、ネットワーク環境、クライアント再生品質の低下に敏感に反応しているといえる。

5.3.4 サーバログとクライアント再生品質の相関

図 10 は、サーバログ項目とクライアント再生品質の相関を示したものである。左の図では、良好再生状態時間によるクライアント品質評価を、中央の図では、下落再生状態時間によるクライアント品質評価を、右の図では、下落連続性によるクライアント品質評価を行った。

パケットロス率 0%，遅延 200 ms 以上では、短い遅延の場合と異なり、遅延ジッタの影響がほとんど見られない現象が見られた。アプリケーションサイドの要因が考えられるが、詳細は不明である。ただし、片道遅延 200 ms 以上の遅延は実配信ではそれほど頻繁には見られない。大規模配信では広域負荷分散技術によりネットワーク的に近いサーバを選択させることが通例であるからである。

品質の劣化が見られない場合は受信パケット数が100%の地点を起点とし、回復パケット数の増加にともない再生品質の劣化が見られる。喪失パケットが発生し始める時点では再生品質はかなり劣化している。さらに再生品質が劣化するほど受信パケット数と回復パケット数が減少、喪失パケット数が増加する。この傾向はいずれの再生品質評価でもほぼ同じである。

ここで注目したいのは、再生品質がやや劣化を始める地点では、喪失パケットは観測されず、受信パケット数もほとんど減少しないことである。このため、受信パケット数、喪失パケット数だけに着目した場合、品質の劣化が始まっている事実を見逃す可能性がある。一方、回復パケット数は、品質劣化が始まる少し前の状態から大幅な増加を見せるため、サーバログにおける回復パケット数は品質劣化の重要な指標になることが分かる。

5.3.5 実験結果のまとめ

クライアント品質評価、ネットワーク状態情報、サーバログの相関を見たとき、ネットワークでパケットロスが発生した場合は遅延ジッタ、遅延の順で品質に影響が出ることが分かった。サーバログ項目のうち、受信パケット数、喪失パケット数はクライアント再生品質劣化の発生と、サービスに影響を与えるだけのネットワーク環境劣化検出には有効である。ただし、微細な品質の劣化は検出できない場合がある。一方、回復パケット数はクライアントでの品質劣化が発生した時点では必ず増加が見られ、また品質劣化が発生する前段階のネットワーク環境劣化が起きた場合にも増加が見られた。このため、サーバログで回復パケット数を観測することは、クライアント再生品質把握とネットワーク環境把握に有効であることが明らかになった。

5.3.6 議論

回復パケット数の再生品質劣化への影響に関しては、以下の可能性が考えられる。再送発生でデータパケット到着タイミングが遅れた場合、アプリケーション内のデコード処理、表示といったクライアント内処理が加わることで、再生タイミングが遅れることがある。これは品質劣化として検出される。この場合、クライアント負荷が高いほど回復パケットの影響は顕著になると考えられる。

Windows Media のほか、代表的なストリーミングサーバシステムとしては Real 社の Helix Server、Apple 社の Darwin Streaming Server がある。これらも含めた現在のストリーミング配信システムでは、クライアントでのデータパケットの受信状態を RTSP プロトコルを用いてサーバに通知する仕組みとなって

いる。サーバログでは RTSP 制御コネクションから得た情報を記録するため、送信成功パケット数（受信パケット数）、再送信パケット数（回復パケット数）や再送失敗パケット数（喪失パケット数）と各システムとも項目は共通している。

また、現在これらのシステムで標準的に用いられているのは MPEG-4 に準拠した圧縮方式となっている。今回用いた動画コーデックである Windows Media Video 9 も MPEG-4 方式である。特に高画質なものには MPEG-2 が用いられることもあるが、これらはいずれもフレーム間圧縮方式である。再生品質劣化が起き始める閾値が異なる可能性はあるが、データロスによる映像への影響の傾向は基本的には共通していると予想される。

実装の違いが大きい部分として、配信状態が変化した際にサーバからの配信フレームレートを切り替えるタイミングがある。フレームレート切替え時にはクライアントではバッファリングとして観測されるが、本論文ではフレームレート切替えが起こる以前の、フレーム落ちによる再生品質劣化を対象としているので、結果に大きな影響は与えないと考えている。

このようにストリームデータ転送、制御の枠組みは同様であることから、サーバログで得られる再送パケット数（Windows Media における回復パケット数）が品質劣化を示す指標となる点、ネットワーク環境における遅延ジッタが再生品質により大きな影響を与える点に関しては同様の結果が得られると考えられる。

また、実験で用いた MPEG-4 のようなフレーム間圧縮方式では、厳密にはパケットロスによってどのフレームが喪失するかにより再生品質に影響が現れる可能性があった。このため、複数回数実験を行い、得られた結果に差が見られないことを確認した。

本論文では音声に関する品質評価は行っていないが、音声の途切れは、画像の乱れ、フレーム落ちよりも一般に敏感に知覚されるとされており、ユーザ視聴感に大きく影響すると考えられる。このため、動画像では1秒間1フレーム未満の下落は視認できなかったため検出しなかったが、音声の場合はより細かい時間単位での検出が求められると考えられる。クライアントでの音声品質評価を行い、本論文での評価手法を適用することにより、音声に関してもネットワーク環境、音声再生品質、サーバログの相関を導出することは可能である。

6. 関連研究

ストリーミングにおけるネットワークの影響に関し

て、実際にダイヤルアップによりインターネット上の複数箇所から接続し、解析を行った研究がある¹³⁾。実環境下で、広域での実験結果で有効性は高いが、実験年が古いため 64 kbps での接続実験であることと、オンデマンドコンテンツによるものであるため、今日の高速回線を利用した高ビットレートでのストリーミングにそのまま適用することは難しい。また、本研究はライブ配信を前提としており、ターゲットが異なる。

同じく実環境下で、クライアントに再生品質をサーバサイドにフィードバックするよう実装を行い、ネットワーク状態との連動を長期間調べた研究¹⁴⁾がある。ここでの実装はネットワークの状態との相関を得るために利用されている。アプリケーションは実験当時非常に大きなシェアを占めていた Real Player をターゲットとしている。こちらもオンデマンド配信を対象としており、ターゲットが異なっている。

クライアントで品質を分析、サーバ側へフィードバックを行うことで品質管理を行うためのフレームワークを提示したものがある¹⁵⁾。この方式ではリアルタイムにクライアントでの再生品質を収集するため、最も正確なサービス品質をサーバ側で得ることができる。しかし、クライアントアプリケーションに変更を加える必要があり、コストが高いこととプライバシーに関する問題も発生する可能性がある。本論文で提案した方式では、サーバ側ですでに持っているログ情報からより正確なクライアント品質情報を引き出すものであり、クライアントへの変更は行わない。

クライアントにおける受信品質とネットワーク環境の相関を調べた研究¹⁶⁾は本論文でのアプローチと基本的なアイデアは類似している。リバッファ回数とリバッファ時間をクライアントにおける品質の指標としており、ログ中のクライアント喪失パケット数を品質判断の指標としている。対して本論文では、再生フレームレートの状態遷移を詳細に分析することにより、より細粒度の品質定義を行い、ネットワーク環境がサーバログとサービス品質に与える影響とクライアント品質劣化の予兆を示すサーバログパラメータの抽出を行った。

7. 結 論

インターネットストリーミングにおけるクライアント品質管理はますます重要になってきているにもかかわらず、これまでエンドユーザの視聴感に基づいた品質をサービス提供者側で推定する手法は確立されていなかった。その原因は、ストリーミングに適したエンドユーザ視聴感品質評価手法が定義されていないこ

と、サーバログ、クライアント品質、サービス品質に影響を与えるネットワーク環境の相関が明らかでないことの2つである。そこで本論文では、クライアントでの再生フレームレートに着目し、再生状態遷移を分析、評価することにより再生品質を定量化することで、目視よりも高精度な品質評価を行った。次に再生品質評価値とサーバログ、ネットワーク状態の相関を散布図により示し、インターネットストリーミングではパケットロス率がサービスに最も影響を与え、遅延の大きさよりも遅延ジッタがサービス品質劣化を招くことを明らかにした。また、サーバログに記録されるクライアント回復パケット数が再生品質劣化とネットワーク環境悪化をいち早く検出するための指標となることが分かった。

本論文で得られた知見から、実運用時には回復パケット数を特に重点的に観測することで、管理者はサービス品質劣化の兆候を知ることが可能である。さらに、喪失パケットが発生していればクライアントでの再生品質劣化は必至である。喪失パケットが発生していなければ再生品質の劣化はまだ発生していないが、途中ネットワークでの遅延、遅延ジッタが増大している可能性が高い。

本論文での結果をふまえ、実環境下での観測結果との比較を行うことが今後必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) ITU-R Recommendation BT.500: Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures.
- 2) ITU-T Recommendation J.144: Objective perceptual video quality measurement techniques for digital cable television in the presence of a full reference.
- 3) Reibman, A., Sen, S. and der Merwe, J.V.: Video Quality Estimation for Internet Streaming, *Proc. 14th International Conference on World Wide Web*, pp.1168-1169, ACM (2005).
- 4) Chesire, M., Wolman, A., Voelker, G.M. and Levy, H.M.: Measurement and Analysis of a Streaming-Media Workload, *Proc. 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems* (2001).
- 5) Cherkasova, L. and Gupta, M.: Analysis of Enterprise Media Server Workloads: Access Patterns, Locality, Content Evolution, and Rates of Change, *IEEE/ACM Trans. Networking (TON)*, Vol.12, pp.781-794 (2004).
- 6) Sripanidkulchai, K., Maggs, B. and Zhang, H.: An Analysis of Live Streaming Workloads

- on the Internet, *Proc. 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*, pp.41–54 (2004).
- 7) Guo, L., Chen, S., Xiao, Z. and Zhang, X.: Analysis of Multimedia Workloads with Implications for Internet Streaming, *Proc. 14th International Conference on World Wide Web*, pp.519–528 (2005).
- 8) Veloso, E., Almeida, V., Meira, W., Bestavros, A. and Jin, S.: A Hierarchical Characterization of a Live Streaming Media Workload, *Proc. ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop*, pp.117–130 (2002).
- 9) Koyun, H.: *Loggin Model for Windows Media Services 9 Series* (2003).
<http://www.microsoft.com/windows/windowsmedia/howto/articles/LoggingModel.aspx>
- 10) 間 伸一, 渡部 優, 片山頼明: ネットワーク配信映像の視聴品質推定技術, NTT 技術ジャーナル 2005 年 7 月号, NTT コミュニケーションズ (2005).
- 11) Carson, M. and Santay, D.: NIST Net: A Linux-based Network Emulation Tool (2003).
<http://www-x.antd.nist.gov/nistnet/>
- 12) Microsoft Inc.: Windows Media Technology.
<http://www.microsoft.com/windows/windowsmedia/>
- 13) Loguinov, D. and Radha, H.: Measurement Study of Low-bitrate Internet Video Streaming, *Proc. 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*, pp.281–293 (2001).
- 14) Wang, Y., Claypool, M. and Zuo, Z.: An Empirical Study of RealVideo Performance Across the Internet, *Proc. 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*, pp.295–309 (2001).
- 15) Dalal, A.C. and Perry, E.: A New Architecture for Measuring and Assessing Streaming Media Quality, *Proc. 3rd Workshop on Passive and Active Measurement Workshop (PAM 2003)*, La Jolla, CA, pp.223–231 (2003).
- 16) Wang, Z., Banerjee, S. and Jamin, S.: Studying Streaming Video Quality: From An Appli-

cation Point of View, *Proc. 11th ACM International Conference on Multimedia*, Berkeley, CA, pp.327–330, ACM Press (2003).

(平成 17 年 11 月 30 日受付)

(平成 18 年 5 月 9 日採録)



寺田 直美 (学生会員)

1998 年から 2001 年まで神戸大学文学部哲学科在籍。2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程在籍。IEEE, ACM 各学生会員。



河合 栄治 (正会員)

1996 年京都大学理学部数学科卒業。1998 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2001 年同大学同研究科博士後期課程修了。2000 年 10 月より、科学技術振興事業団さきがけ研究 21「機能と構成」領域研究員。2003 年 4 月より、奈良先端科学技術大学院大学附属図書館研究開発室科助手。インターネットにおける大規模情報配信システムの開発、高速 I/O 指向オペレーティングシステムの研究に従事。博士 (工学)。



砂原 秀樹 (正会員)

1983 年慶應義塾大学工学部電気学科卒業。1988 年同大学大学院博士課程修了。同年電気通信大学情報助手。1994 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター助教授。2001 年同大学情報科学センター教授。2005 年同大学情報科学研究科教授、現在に至る。工学博士。インターネット、大規模広域分散環境、ネットワーク、並列処理、オペレーティングシステム、電子図書館に関する研究に従事。ACM, IEEE 各会員。