

# RTP を利用した動画配信システムにおける QoS 制御方式

下 間 芳 樹<sup>†</sup> 福 田 和 真<sup>††</sup> 奥 村 誠 司<sup>††</sup>  
鷹 取 功 人<sup>††</sup> 大 野 次 彦<sup>††</sup> 水 野 忠 則<sup>†††</sup>

本論文では、インターネット上で RTP を利用した動画配信システムにおいて、エンド間の経路上の通信状態に応じ受信側端末上で良い再生品質を実現するための QoS (Quality of Service) 制御方式を提案する。時間的制約を持つ連続メディア情報をベストエフォート型であるインターネット上で配信するとき、つねに再生品質が良いわけではなく、安定した配信や良い再生品質を提供するため QoS 制御が必要となる。提案する QoS 制御方式は、ネットワーク状態を的確に把握しその推移から転送レートを見積もる輻輳予測・検出機能、その結果をふまえてネットワークの状態に適応したパケット送出手を行う転送レート制御機能、パケット欠損時に対応するための限定的再送から構成される。これらの機能を配信サーバ上に実装し、インターネット上で測定を行った。本論文では、その結果や評価、提案した方式の有効性についても述べる。

## A QoS-control Method on Video Distribution by Means of RTP

YOSHIKI SHIMOTSUMA,<sup>†</sup> KAZUMA FUKUDA,<sup>††</sup> SEIJI OKUMURA,<sup>††</sup>  
NORIHITO TAKATORI,<sup>††</sup> TSUGIHIKO OHNO<sup>††</sup>  
and TADANORI MIZUNO<sup>†††</sup>

In this paper, we propose a QoS (Quality of Service) control method adapted network condition by means of RTP (over Internet), which method enables Clients to playback streaming media better quality. Network condition, in general, wasn't always served best quality on streaming over the Internet, so that it is necessary to consider QoS control in order to service better quality streaming. Our proposed method consists of following functions: to predict and detect network congestion, to control transport rate from sender and to retransmit damaged or lost packets selectively. Implemented a proposed method on Video distribution system, we will show some experiment results and describe the effectiveness of our proposed method.

### 1. はじめに

現在、インターネットの利用者数は増加し続け、またインターネット上で利用できるサービスも多種にわたり、インフラとしてのインターネットの重要性も日々増している。さらに最近では、インターネットを経由した音声や動画の配信サービスを利用する場面も多く見られる。

現在のインターネット上におけるパケット通信は、使用する帯域幅や遅延時間などが基本的に保証されな

い“ベストエフォート”型である。しかし、インターネット上で音声や動画などの連続メディア情報を扱うためには、単にデータを転送するだけでなく帯域幅や遅延時間などのリアルタイム性にとまらぬ制約にも従う必要があり、多くの課題が存在している。そのため、経路上のさまざまな状況に適応し効率的に転送することで受信側で連続メディア情報の品質良い再生を行うことが重要となる。

これらを解決するためにさまざまな研究が行われ、多くの方式が提案されている。たとえば、経路上の通信状態を把握しそれに応じて動的に転送レートや符号化レートを制御する方式、欠損したパケットを訂正する方式などである。また、経路上の通信状態を把握するため、受信側端末から送信側端末への受信状況のフィードバックを行うことが多い。

また、動画配信において、経路上の通信状態に適応するために動的に転送レートを変更する必要があるが、

<sup>†</sup> 三菱電機株式会社コミュニケーション・ネットワーク製作所  
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION Communication Networks Center

<sup>††</sup> 三菱電機株式会社情報技術総合研究所  
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION INFORMATION TECHNOLOGY R&D CENTER

<sup>†††</sup> 静岡大学情報学部  
Faculty of Information, Shizuoka University

その制御としては動画のフレームレートを制御する方法やコンテンツの符号化レートを変更する方法、それらの組合せの方法が考えられている。

本論文では、RTP (Real-time Transport Protocol)<sup>1)</sup>および RTSP (Real-Time Streaming Protocol)<sup>2)</sup>を使用して MPEG-4<sup>3),4)</sup> コンテンツを配信するシステムにおいて、エンド間の経路上の通信状態に適応し効率的に転送することで受信側で連続メディア情報の品質良い再生を実現するための QoS 制御方式を提案する。また、そのシステムにおいて提案した方式を実現し、インターネット上での転送実験と評価を行い、その方式の有効性についても述べる。

## 2. インターネット 上における動画配信の課題

現在のインターネット上での通信は基本的にベストエフォート型であり、使用する帯域幅や遅延時間などは保証されない。しかし、連続メディア情報は帯域幅や遅延時間などリアルタイム性に関して制約を持つ。そのため、インターネット上で連続メディア情報を扱うためには、これらの相反するような特徴に対して単にデータを転送するだけでなくリアルタイム性に関するさまざまな課題について考慮する必要がある。

インターネット上の転送プロトコルとして、TCP などのコネクション型と UDP などのコネクションレス型がある。前者は信頼性のある転送を実現するため、欠損したパケットに対して再送などのエラー訂正機構やネットワーク状況に応じた配送を行う輻輳制御の機構を持つ。しかし、これらの機構による遅延の変動は大きく、リアルタイム性を大きく損なう。後者はこれらの機能がなくシンプルで反応性は高いが、パケット欠損によるデータ欠落は連続メディア情報の再生品質の悪化となる。パケット欠損への対応として、エラー訂正や転送帯域の制御などの機構が必要となるが、それらの実現によりリアルタイム性が損なわれないようにする必要がある。

これらの課題を解決するため、たとえば次のような方式<sup>5)</sup>が提案されている。

- 経路上の通信状態を把握しそれに応じて動的に転送レート<sup>6)~8)</sup>や符号化レート<sup>9),10)</sup>を制御する方式、動画のフレームレートを制御する方式<sup>7),11),12)</sup>、また、それらを組み合わせた方式<sup>13)</sup>
- 欠損したパケットを訂正する(再送、冗長な情報の同時転送)する方式<sup>8),14)</sup>
- 受信側端末のバッファ量やネットワーク上で転送中のデータ量を考慮して送信側端末における制御方針を考える方式<sup>15)~17)</sup>

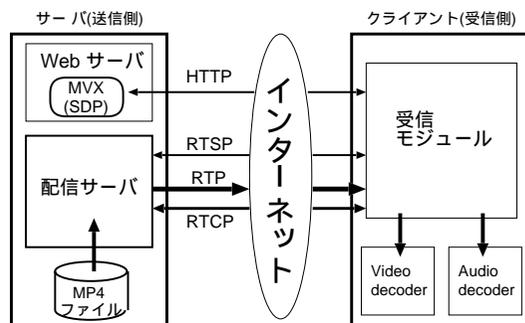


図1 動画配信システムの基本構成

Fig.1 Basic configuration for our video distribution system.

- 受信側端末の受信状況により受信側端末上で送信側端末における制御方針を考える方式<sup>18)</sup>

なお、提案されている多くの方式では、経路上の通信状態を把握するために受信側端末から送信側端末への受信状況などについてフィードバックを行っている。また、多くのものが転送プロトコルとしてUDPを利用しており、RTP(とフィードバックなどで使用されるRTCP)を利用した場合のQoS制御方式など<sup>19),20)</sup>もいくつか提案されている。なお、転送プロトコルとしてTCPを利用したもの<sup>21)</sup>も提案されている。

しかし、動画配信システム全体の客観的な評価手法についてはいくつか提案<sup>15)</sup>されているが、現在まで決め手となるような動画配信システム全体についての客観的な評価手法は見つかっていない。なお、その一部の特性について考慮する場合にはその限りではない。

## 3. 動画配信システムの構成

まず動画配信システムの全体構成について述べ、その上に搭載するQoS制御方式については後述する。

動画配信システム全体における基本構成は図1である<sup>22),23)</sup>。動画はMPEG-4 Simple Profile、音声はCELPを使用し、それらをRTPペイロード部に格納して配信する。RTPペイロード部にMPEG-4ストリームを格納するための標準化も行われており、本システムではRFC3016<sup>24)</sup>の仕様によるペイロードタイプである。なお、RTPはUDP上に実装されている。ネットワーク再生時のサーバ/クライアント間でのセッション管理やストリーミング制御(再生・停止など)は、RTSPを使用している。

RTSP 標準のサーバやクライアントへの相互接続を可能としている。

インターネット上で連続メディア情報を転送してクライアント上で再生するまでの処理の流れは次のようになる(図1)。

- (1) クライアントは、コンテンツの詳細情報や配信サーバ情報を SDP (Session Description Protocol, RFC2327) で記述した MVX (Movie Video eXtention) ファイル( 独自) を配信サーバ/Web サーバ/ローカルホスト上から得る。
- (2) クライアントは MVX に記述された情報を解析し、配信サーバへ RTSP セッションを確立し、コンテンツデータの受信準備 (RTP, RTCP セッションの確立) を行う。
- (3) 配信サーバでは、クライアントから要求されたコンテンツデータ (MP4 ファイル) を読み込み、RTP パケットに乗せて送信する。
- (4) クライアントでは、RTP パケットを受信 (バッファリング) し、コンテンツデータの再生 (decode) を行う。

#### 4. 提案する QoS 制御方式

ここで、ネットワーク状態の早期把握とその状態に適応した配信を行うことでクライアント上で良い再生品質を実現するための QoS 制御方式を提案する。なお、提案する QoS 制御方式は、標準的なプロトコル (今回の場合 RTP/RTCP) の基本的な部分のみを使用したものを検討する。

提案する QoS 制御方式は、配信サーバ上で 3 つの機能 (図 2) で実現されている。1 つ目は“輻輳予測・検出機能”であり、クライアントからフィードバックされる RTCP の情報に基づきネットワークの輻輳状態の予測・検出を行い、その状態に適応する転送レートを計算する。2 つ目は“転送レート制御機能”であり、輻輳予測・検出機能で求めた転送レートに従ったパケットの送出時間 (間隔) の計算やフレームレートの調整を行う。また、これらは動画・音声それぞれのメディアについて行う。

さらに、ネットワーク上におけるパケットロスが発生したときに、欠損したパケットの回復のため、そのパケットを配信サーバから再送する機構も備えている。ただし、再送する機構は、再送パケットによる輻輳の悪化を抑制し、再送するパケットを限定する“限定的再送機能”を持っている。このとき、クライアントから配信サーバへの再送要求は RTCP で行い、欠損したパケットに関して通知を行う NACK のような形となる。なお、再送要求のための通知方式は現在 IETF において標準化が進められている方式の 1 つ<sup>25)</sup> (比

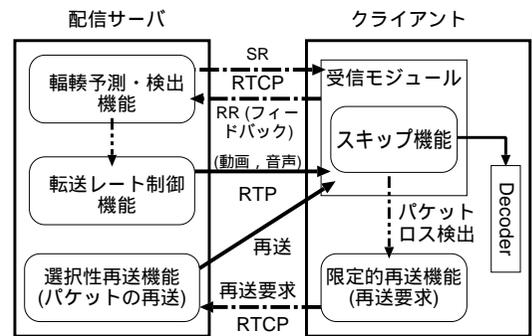


図 2 QoS 制御機能の構成  
Fig. 2 QoS-control functions.

較的実装が容易なもの)に基づき実装した。一方、再送されるパケットは通常の配信と同様に RTP で行い、欠損したパケットと同じシーケンス番号とタイムスタンプで配信サーバから送出するものである。

また、動画再生においては (MPEG-4 における) 差分フレームが欠損したとき、そのまま再生を続けると次の I フレームが再生されるまでブロックノイズが発生し続けるため再生品質の悪化となる。そのため、クライアント上で受信した差分フレームが欠損した場合、配信サーバから次の I フレームが届くまでデコードを行わない“スキップ機能”も用意した。なお、スキップ機能が実行されている間はフレームが欠損する直前の画面の静止画 となる。

次に、配信サーバ上における QoS 制御の各機能について説明する。

##### 4.1 輻輳予測・検出機能

輻輳予測・検出機能では、クライアントからの RTCP RR パケットに含まれるパケットロス率とジッタ評価値からネットワーク状態を判定し、輻輳の予測と検出を行う。そして、その結果から理想的な転送レートを計算する。ここで、クライアントからの RTCP RR パケットに含まれるジッタ評価値を  $J$ 、パケットロス率を  $P_r$  とする。

まず、ジッタ評価値とパケットロス率について (後述する) 事前に設定した閾値 (それぞれ  $\alpha, \beta$ ) と比較し、クライアントから RTCP RR パケットを受信した時点でのネットワークの状態を分類する。そのとき、図 3 で示すように 4 つのどの領域 (A, B, C, D) に属するのか判定する。ただし、RTCP RR パケット

受信側端末に到着していないのであれば順序が入れ替わったものとして、また、先に送出されたものが非常に遅れて到着した場合には重複になるが、そのときは後で到着したものを廃棄すればよい。

この現象はフリーズと呼ばれ、その時間をフリーズ時間と呼ぶ。

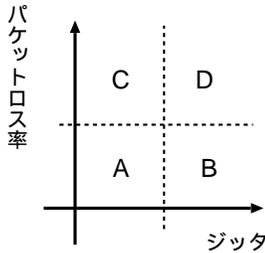


図3 ネットワーク状態の分類

Fig. 3 The judgement of network conditions.

表1 ネットワークの状態  
Table 1 About network conditions.

状態	説明
A	$J$ も $P_r$ も小さく、良好な状態.
B	$P_r$ は小さいので輻輳とはまだ断定できないが、 $J$ が大きいので輻輳になる可能性が大きい.
C	$P_r$ は大きい $J$ は小さいため、一時的にネットワークが混雑した、または、輻輳状態から安定し $J$ が収束した.
D	輻輳状態である.
N	前の状態が B, C, D, N であれば、輻輳状態が悪化している.

は UDP 上で転送されるため、ネットワークの状態によってはそのパケット自体が欠損する場合もある。したがって、その状態を N とし、ネットワーク状態を計 5 つのいずれかに分類する。なお、分類したそれぞれの状態は、RTP におけるジッタ評価式の特徴から表 1 のように説明できる。

判定時に使用する閾値については次のように設定する。なお、 $r_{media}$  はメディアの(符号化)ビットレート、 $r_{calc}$  は後述する算出された転送レート、 $aps$  はフレームの平均サイズとする。

パケットロス率閾値  $\alpha$ : メディアとフレームレートに応じて設定

動画: RTCP フィードバック間隔において平均フレームサイズ分のデータが欠損する割合 ( $r_{media}$  の 10~20% に相当)

音声:  $r_{media}$  の 5% の大きさのデータ欠損に相当するロス率

ジッタ閾値  $\beta$ : 算出された転送レートに応じ次のように動的に変更する(次のパケットまでの送出時間間隔に相当)。

$$\beta = aps \cdot \frac{1 - \alpha}{16 \cdot r_{calc}}$$

大きなジッタ値の後、パケットが欠損することなく小さいジッタ値が続く場合には評価値は緩やかに減少する(グラフにプロットすると角のない L 字型となる)、など。

表2 転送レート変更方針

Table 2 The policy decision on changing rate to send.

		1つ前の状態				
		A	B	C	D	N
現在の状態	A	↑	—	—	—	—
	B	↓	↓	↓	↓	↓
	C	↓	↓	↓	—	↓
	D	↘	↘	↘	↘	↘
	N	↓	↓	↓	↘	↘

—: 変更なし, ↑: レート上, ↓: レート下(小),  
↓: レート下(中), ↘: レート下(大)

次に、これらの状態を動画・音声ごとに RTCP フィードバックのあった過去数回分記憶し、ネットワーク状態や輻輳を予測するため、1つ前の状態から現在の状態への遷移を調べ、表 2 のように転送レートの変更方針を定める。その結果から(理想的な)転送レートを求める。輻輳が発生したときの変更方針に基づく転送レートの計算方法は、過大であると考えられる帯域幅の量を減少させるものであり、それぞれの場合において次のように求める。なお、変更前の転送レートを  $r_{pre}$ 、求める転送レートを  $r_{calc}$  とし、 $k, m, n, q, w$  は(1より大きい)正の定数である。

[レート下(中, 大)]

まず、転送レートを下げる割合  $\Delta_R$  を  $J, P_r$  から計算する。なお、 $0 < \Delta_R < 1$  となる。

$$\Delta_R = (1 - w\Delta_{P_r}) \left(1 - \frac{\Delta_J}{q}\right) \quad (1)$$

ただし、

$$\Delta_J = \begin{cases} \frac{J}{k\beta} & 0 \leq J < k\beta \\ 1 & k\beta \leq J \end{cases}$$

$$\Delta_{P_r} = \begin{cases} P_r & 0 \leq P_r < m\alpha \\ m\alpha & m\alpha \leq P_r \end{cases}$$

次に、 $r_{calc}$  を求める。

$$r_{calc} = r_{pre} \cdot \Delta_R \quad (2)$$

[レート下(小)]

式(1)と同様に  $\Delta_R$  を求め、その減少する割合をより小さくして転送レートを計算する。

$$r_{calc} = r_{pre} \cdot (1 - (1 - \Delta_R)/2) \quad (3)$$

[レート上]

転送レートを増加させる割合を  $\Delta_R$  として次のように計算する。

$$\Delta_R = 1 + \min \left\{ \alpha \left(1 - \frac{J}{n\beta}\right), \alpha - P_r \right\} \quad (4)$$

$$r_{calc} = r_{pre} \cdot \Delta_R$$

これらの定数により、環境に合わせた微調整も可能である。

$$\text{ただし, } r_{calc} \leq \frac{r_{media}}{1 - \omega\alpha}.$$

ここで上限を設定しているが、これは  $r_{media}$  よりも  $r_{calc}$  を大きくしすぎたために発生することが考えられる。パケットロスを抑制するためである。もしその状況でパケットロスが発生したとき、 $r_{calc}$  を  $r_{media}$  より下げないようにする必要もある。そのとき、 $\Delta_R \leq 1 - \omega\alpha$  であるため、 $r_{calc} \cdot \Delta_R = r_{media}$  から上限を求めることができる。

ここで、音声の  $r_{calc}$  と  $r_{media}$  をそれぞれ  $r_{calc}^a$ 、 $r_{media}^a$ 、動画のそれぞれを  $r_{calc}^v$ 、 $r_{media}^v$  とする。音声の品質悪化は動画の品質悪化より知覚的に敏感であるため、必ず  $r_{calc}^a \geq r_{media}^a$  となるように補正し、補正による音声での差分は  $r_{calc}^v$  に反映する。そのとき、 $r_{media}^a$  と  $r_{media}^v$  の比率を考慮する。つまり、次のようになる。

$$r_{calc}^v = r_{pre}^v - (r_{media}^a - r_{calc}^a) \cdot \frac{r_{media}^v}{r_{media}^a}. \quad (5)$$

以上のように転送レートを求めたとき、輻輳時などのように転送レートを下げるときは比較的大きく減少し、転送レートを上げるときには緩やかに上昇するものとなる。

#### 4.2 転送レート 制御機能

輻輳予測・検出機能で求めた転送レートに基づき、送出するパケットの時間間隔やフレームレートの変更などの制御を行う。これらの制御により、ネットワークの輻輳悪化防止や転送効率の向上を可能とする。また、ネットワークの状態が良好な期間にデータを可能な限り多くクライアントへ転送しバッファに貯えておくことで、輻輳時でも動画・音声再生の中断や品質悪化を緩和する効果を与える。

次に送出時間間隔の計算方法やフレームレートの変更方法について述べる。なお、ある時間間隔内の  $i$  番目のパケットサイズを  $S_i$  とし、メディアのフレームレートを  $f_{media}$  とする。

[ 輻輳状態ではないとき ( $r_{calc} \geq r_{media}$ ) ]

- 1) 単位時間内に  $r_{calc}$  でパケットを送出する。  $i$  番目のパケットの送出時刻  $T_i$  は次となる。

$$T_i = T_{i-1} + \frac{S_{i-1}}{r_{calc}}. \quad (6)$$

- 2) 総クライアントバッファ量  $buf$  と  $r_{media}$  からバッファ可能な時間  $T_b = \lfloor buf / r_{media} \rfloor$  を求める。または、総クライアントバッファフレーム数  $buf_f$  から  $T_b = \lfloor buf_f / f_{media} \rfloor$  を求めて

もよい。

- 3) 配列  $Arr_n[T_b]$  と  $Arr_s[T_b]$  を用意し、それぞれに毎秒に送出したパケット数と総パケットサイズを記録する。 $T_b$  秒より前の配列の記録は削除する。
- 4)  $buf \leq S_i + \sum_{j=1}^{T_b} Arr_n[j]$  または  $f_{media} \cdot T_b \leq \sum_{j=1}^{T_b} Arr_n[j]$  のとき、つまり  $i$  番目のパケット送出によりクライアントバッファのオーバーフローが発生すると判断したとき、1 秒単位または再生時間単位でパケットの送出を中断する。1 秒単位または再生時間単位で中断することで受信側端末での再生によるクライアントバッファ内のパケットが消費され、自然に減少するため（オーバーフローが回避される）、パケットの送出を再開する。
- 5) RTCP フィードバック情報の最大受信シーケンス番号と送出パケットの最大シーケンス番号を比較し、差が  $f_{media} \cdot T_b$  より大きい場合は同様にパケット送出を中断する。

[ 輻輳状態であるとき ( $r_{calc} < r_{media}$ ) ]

- $\sum_{j=1}^{T_b} Arr_n[j]$  や  $\sum_{j=1}^{T_b} Arr_s[j]$  が一定時間分（たとえば 2 秒分）以上あれば送出時刻を式 (6) で求める。
- そうでないとき、転送レートが  $r_{calc}$  以下となるようにつまり毎秒の  $Arr_s[j]$  が  $r_{calc}$  以下となるように（動画）フレームを間引く。なお、必ず  $r_{calc} \geq r_{media}$  であるため音声パケットの間引きは行われない。
- 動画フレームでは I フレームは間引かず必ず送出する。間引くときは次の I フレームの直前の P フレームから順に間引く（これは、間引きによる動画のブロックノイズの発生やフリーズ時間の増大を抑制するためである）。

#### 4.3 限定的再送機能

現在、基本的にベストエフォート型であるインターネット上に UDP を使用して転送を行うとき、前述の 2 つの機能を利用してもパケットの欠損は発生する。そのため、エラー訂正の機能と組み合わせることでそれらに対応することを考える。

方式としては、冗長な情報も同時に送ることで受信側端末上で欠損したパケットの再構築を行う方法もあるが、本論文では欠損したパケットを検出したときに受信側端末から送信側端末へ欠損したパケットの再送

出を要求する再送方式を採用した。なお、送信側端末では再送を要求されたすべてのパケットを送出するのではなく、その中からネットワークの状態に応じて再送するパケットを限定する“限定的再送”である。なお、受信側端末では欠損したパケットの再送要求を行うのみである。また、受信側端末上での欠損したパケットの検出は、一定時間間隔で、受信側端末上にある受信バッファ内の受信した RTP パケットのシーケンス番号を調査することで行う。

ここで、再送要求があった場合に、ネットワークの状態に応じて再送するパケットを考える。本論文では、音声優先して送出手法としているため、音声は再送要求がある場合にはすべて再送する。動画の場合は、MPEG における I フレームの再送を要求された場合にはそのフレームを再送し、差分フレーム (P, B フレーム) については、送信側端末がネットワークの状態が良好だと考えている場合に、再送されるフレームの大きさとそのときの動画の送出されている実際の転送レートの和が計算された転送レートを超えない範囲で再送する。

#### 4.4 輻輳時の動画フレームの理想的な間引き数について

MPEG のような可変長符号化方式の場合、すべてのフレームが同じ大きさではない。動画全体の容量を抑えるため I, P, B というフレームの種類があり、それらの大きさは平均的に大きく異なる。そのため、ネットワーク上の負荷が大きくなり輻輳状態になったとき、その負荷に応じて全フレームの平均の大きさに単純に比例してフレームを間引くのでは十分な対応とは言えない。そのため、少なくともどの程度フレームを間引く必要があるのか考える必要がある。

ここで説明を容易にするために (MPEG-4 Simple Profile を対象としているので), I フレームは  $t$  秒に 1 回、フレームのサイズは各々のフレームタイプごとに平均の一定な値 (P フレームであれば  $s_p$  byte) であるとして考える。また、ネットワーク上の利用可能な帯域幅に対し負荷が一定に  $r_{load}$  bps あるとする。大きな変動を含めた形ではないので、想定する環境として理想的なものであるといえる。

輻輳状態になり音声のパケットは落とさず次の I フレームの直前の P フレームを必要な数だけ間引くとき、I フレーム間隔の  $t$  秒間で間引く P フレーム数  $f_d$  は次で求められる (図 4)。

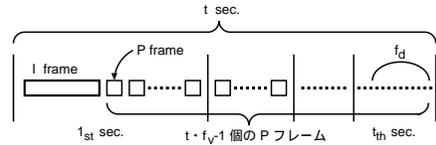


図 4 動画フレームの間引き

Fig. 4 Video frames to thin out.

$$f_d = \left\lceil \frac{t \cdot r_{load}}{8 \cdot s_p} \right\rceil.$$

このとき、ネットワーク上の負荷のある期間の動画総フレーム数を  $F$  とすると、その期間におけるネットワーク輻輳時にパケットロスが発生しない理想的な総フレーム数  $x$  は次で求めることができる。

$$x = F \cdot \frac{t \cdot f_v - f_d}{t \cdot f_v}. \quad (7)$$

ここで導出した式は理想的な環境による値であるため、実際の変動の大きい環境の場合、より小さい値 (より多く間引く必要がある) となることが考えられる。そのため、これらの式による値を“理想的な上界”として考える。

一方、下界としては実装される QoS 制御方式により異なる。また、負荷がなくなったときにすぐに QoS 制御がそのことを検出し、早急に転送レートを増加させることは現実的に難しいため、多少のタイムラグが発生する。そのため、送出フレーム数の下界は“理想的な下界の最大値”という形で考える。

その下界値であるが、本論文では I フレームは必ず送出する制御を行うため、負荷がある期間にすべての P フレームが間引かれ、I フレームのみ送出されたものとして考えられる。

## 5. 実験と考察

提案した QoS 制御方式の効果を評価するため、実際にインターネットを経由した動画配信を行い、その測定結果から評価する。

### 5.1 実験環境

ネットワーク環境は、配信サーバ側が ODN 128 kbps 常時接続回線、クライアント側が ISDN 64 kbps ダイヤルアップ回線、両者間の hop 数は 15 である。また、コンテンツとして、音楽、アニメ、ニュース (すべて 4 分) を用意した。他の設定については表 3 である。ネットワーク上に負荷を与えた実験を行うため、コンテンツの時間の半分の間 (4 分のコンテンツの中で

P, B フレームを間引くことを考えたとき、それらの大きさは相対的に小さいため、間引くフレーム数は多くなるのは自然に理解できる。

動画のフレームレートは、符号化時の目標値としては 8 fps であった。

表 3 実験環境  
Table 3 Environment of experiment.

項目	設定
計算機	
サーバ	PentiumIII 500 MHz, 762 MB WindowsNT Server 4.0, C
クライアント	PentiumIII 500 MHz, 256 MB Windows2000, C++
コンテンツ	
動画 codec	MPEG-4 Simple Profile ( ES )
音声 codec	CELP
Bit Rate	50 kbps ( 動画 : 44 kbps, 音声 : 6 kbps )
Frame Rate I フレーム	動画 : 7.5 fps, 音声 : 4 fps 約 2 秒に 1 回
その他の設定	
クライアント バッファ	初期バッファ : 5 秒 総サイズ : 10 秒
RTCP フィード バック	4 秒 ( 固定 )

再生開始から 30 秒後から 2 分 30 秒後にかけて ) 負荷を与えた . なお , サーバからクライアントに向けて 16 kbps の負荷であるが , 別途測定した ISDN dialup による実効帯域幅が約 57 kbps であったため , コンテンツに直接影響する負荷は約 9 kbps となる .

5.2 実験結果

それぞれのコンテンツにおいて 10 回実行した結果から , 動画においてサーバが送出したフレーム数とクライアントで再生できたフレーム数 , 欠損したフレーム数の平均値を図 5 に , 動画と音声それぞれにおけるパケットロス率の平均値を図 6 に示す . なお , 前に述べた負荷があるときの理想的な送出フレーム数の上界と理想的な下界の最大値についても示してある .

図 5 では棒グラフの横に数値があるが , これは配信サーバから送出したフレーム数に対してクライアント上で表示されたフレーム数 ( ここでは “表示フレーム数” と呼ぶ ) の割合である . この値が大きいと送出されたパケットが有効に利用されたことになり , 配信の効率性能の目安として考えることができる .

5.3 考 察

図 5 において , QoS 制御機能がある場合にはネットワークの負荷に応じ動画フレームが間引かれるため , QoS 制御機能と比較しすべてのコンテンツにおいて送出フレーム数が減少していることが分かる . しかし , 動画の表示フレーム数の割合はすべての場合において大きく増加し , 表示フレーム数自体も平均的に増加している . なお , QoS 制御機能がない場合には , 動画フレームのパケットが欠損した場合にそれ以降の次の I フレームが到着するまで再生されないだけでなく , 遅

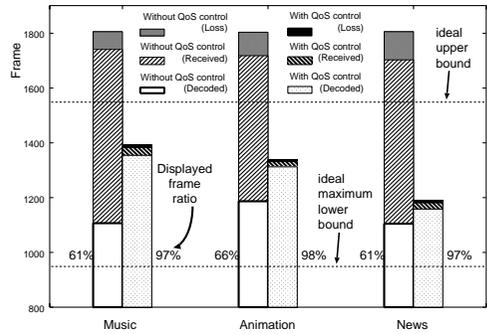


図 5 動画の受信フレーム数と有効フレーム数  
Fig. 5 Received video frames and displayed video frames.

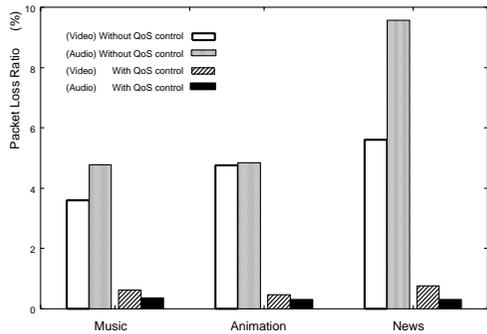


図 6 パケットロス率  
Fig. 6 About packet-loss ratio.

延時間の増大により再生されないフレームも含まれている . QoS 制御を行ったときはそのようなフレームは実験した総数で数フレームであった . そのため , 結果として , 無駄なパケットの送出を抑制しネットワークの利用効率を向上させていると考えられる .

また , 図 6 から , パケットロス率は QoS 制御機能がある場合にはすべてにおいて大きく減少 ( いずれも 1% 未満 ) しており , このことから QoS 制御によって , ネットワークの状態に適応し無駄なパケット送出を抑制し , ネットワークの利用効率向上の効果が表れているといえる . なお , QoS 制御機能がない場合において , 遅延時間の増大により再生されないフレームは動画だけでなく音声にも存在し , 平均的に受信したフレームの 10 ~ 20% ほどであった .

限定的再送についてはその結果を図示していないが , すべてのコンテンツにおける 1 度の配信において , 再送要求による再送パケットがクライアント上で受信された数は , 平均的に動画で約 1.3 パケット , 音声で約 3 パケットであった . 音声に関しては 1 つのパケットロスであっても知覚的に認識できるため , 音声における効果は十分あると考えられる . また , 動画においても欠損した I フレームが再送されるため , 受信したパ

表 4 理想的送信パケット数との比較  
Table 4 Comparison with the ideal number of sent packets.

コンテンツ	サーバ送出 フレーム数	理想的上界	理想的下界 の最大値	全フレーム数	平均 I frame サイズ (byte)	平均 P frame サイズ (byte)
音楽	1,391.3	1,563	962	1,805	1,036.8	713.2
アニメ	1,337.9	1,561	961	1,803	1,557.5	679.7
ニュース	1,190.5	1,563	962	1,804	2,316.8	631.7

なお、すべてのコンテンツにおける I フレーム数は 121 。

ケットをより効率的に使用できていることになる。

QoS 制御機能によりパケットロス率をさらに 0 に近づけるためには、より多くのフレームを間引くことも考えられる。ただし、表示フレーム数の割合は増加するがフリーズ時間が大きくなることが考えられるため、エラー訂正技術を活用する、コンテンツ作成時にフレームサイズを可能な限り平滑化するなどの方法を併用することも必要である。

負荷を与えた時間と実際のコンテンツにおける各フレームの平均サイズ、式 (7) から求めた各々のコンテンツについての配信サーバからの理想的送出フレーム数の上界や理想的な下界の最大値を求めたものは表 4 に示した。一方、式 (7) のようにフレームタイプを考慮せず、単純に負荷量に比例してフレーム・レートを計算した場合の送出フレーム数は約 1616 フレームとなる。そのため、各フレームタイプを考慮せず単純に負荷量に比例してフレームを間引くだけでは不十分であり、そのままでは品質悪化が解消されにくいことが考えられる。

実際の送出フレーム数は、理想的な上界値・下界の最大値との比較から妥当な量であると考えられる。さらなる改良により、多少増加させることは可能であると考えられるが、さらに増加させるとパケットロス率が大きくなり、品質の悪化となってしまう可能性が考えられる。そのため、式 (7) は、送出フレーム数の理想的な上界としての意味は十分に与えていると考えることができる。ただし、与えた負荷以外の負荷やコンテンツにおける各々のフレームサイズの (局所的な) 変動、遅延の影響、QoS 制御機能において負荷がなくなったときの転送レートを回復するまでのタイムラグへの考慮は、より厳密な計算方法の課題として残されている。

なお、図 5 と図 6 と表 4 での各コンテンツにおける I フレームの平均サイズを比較すると、I フレームの平均サイズに対して QoS 制御機能があるときの動

画の送出フレーム数は反比例し、QoS 制御機能がないときのパケットロス率 (動画、音声とも) は比例する傾向が見られる。これは、I フレームサイズが相対的に大きくなると、その後の P フレームの受信時刻において遅延が発生しやすくなる、または、パケットロスが発生しやすくなるためと考えられる。

コンテンツ再生時の実際の知覚的な印象として、QoS 制御機能がないときに負荷を与えると、動画はクライアント上での制御であるスキップ機能により静止した画像になり、音声の途切れが多く非常に聞き取りが難しいため不快感が大きかった。これは、ネットワークの状態に適應せず無駄に送出されたパケットによる音声の受信状態の悪化であるともいえる。QoS 制御機能がある場合には、クライアント上での動画の動きについては多少増加したような程度の印象であるが、音声の途切れはほとんどなく不快感は大きく減少しているため、その差は歴然であった。そのため、QoS 制御機能がないときと比較し、測定した数値だけでなく知覚的な品質も向上していると考えられる。

また、結果として示していないが、提案した QoS 制御機能による配信サーバ上での 1 クライアントあたりの処理負荷の増加は非常に小さかった。

## 6. 今後の課題

以上のように、提案した QoS 制御によって配信サーバがネットワーク状態に適應して配信することで、クライアント上での良い再生品質を実現し効率的な配信を行えることが分かった。しかし、さらに向上させるために今後取り組むべき課題や検討すべき課題は残っている。

パケットロス率は減少したがなくなったわけではない。そのためには、一時的・局所的な輻輳やコンテンツのフレームサイズの変動にもより追従するなど、輻輳予測・検出機能の精度向上を検討する必要がある。また、転送レート制御機能において動画フレームの間引きだけでなくコンテンツの符号化レートの変更を行うことや、限定的再送によるエラー訂正だけでなく冗長な情報も送出することでクライアント上で欠損した

計算値は、式 (7) での繰り上げがない値は異なるが、繰り上げの計算によりすべてが同じような計算結果となっている。

パケットの訂正を行うエラー訂正なども含め、複合的に対応する必要があると考えている。

さらに、ネットワーク上に負荷がある場合に間引く必要のあるフレーム数の評価として式 (7) を考えたが、実際的な可変長符号化によるコンテンツや遅延を考慮した場合について求める方法も考えていく必要がある。そして、それを利用した動画配信技術における客観的な評価方法の確立にも貢献していきたいと考えている。

## 7. 終わりに

本論文では、インターネット上で RTP を利用した動画配信システムにおいて、ネットワークの状態に応じ受信側端末上で良い再生品質を実現するための QoS 制御方式を提案した。その方式は、ネットワーク状態を把握しその推移から転送レートを見積もる輻輳予測・検出機能、その結果をふまえてネットワークの状態に適応したパケット送出を行う転送レート制御機能、欠損したパケットの中でネットワークの状態に従って限定したパケットを再送する限定的再送機能で構成される。これらの機能を実現することで、インターネット上で測定を行い、提案した方式の評価を行った。

結果として、提案した方式はさまざまなコンテンツに対して有効であり、動画配信におけるネットワーク利用の効率性向上やパケットロス率の低下を実現することで、ネットワークの状態が悪化した場合であっても受信側端末で良い品質での再生が可能であった。さらなる性能向上のため、精度の良い輻輳予測や転送レート制御技術、エラー訂正技術などについて検討していく必要がある。また、動画配信技術における客観的な評価方法についても検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) Shulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R. and Jacobson, V.: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Application, RFC1889 (1996).
- 2) Shulzrinne, H., Rao, A. and Lanphier, R.: Real Time Streaming Protocol, RFC2326 (1998).
- 3) ISO/IEC 14496-1: ISO/IEC 14496-1 Information Technology — Coding of audio-visual objects — Part1: Systems (1999).
- 4) ISO/IEC 14496-1: ISO/IEC 14496-1 Information Technology — Coding of audio-visual objects — Part2: Visual (1999).
- 5) Wang, X. and Shulzrinne, H.: Comparison of Adaptive Internet Multimedia Applications, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E82-B, No.6 (1999).
- 6) Cen, S., Pu, C., Staehli, R., Cowan, C. and

- Walpole, J.: Distributed Real-Time MPEG Video Audio Player, *5th International Workshop on Network and Operating System Support of Digital Audio and Video*, pp.142-153 (1995).
- 7) Gringeri, S., Shuaib, K., Egorov, R., Lewis, A., Khasnabish, B. and Basch, B.: Traffic Shaping, Bandwidth Allocation, and Quality Assessment for MPEG Video Distribution over Broadband Network, *IEEE Network*, pp.94-107 (1998).
- 8) 太田 賢, 増田彰久, 渡辺 尚, 水野忠則: ワイヤレスマルチメディア通信における QoS を保証する先読み方式, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム, pp.685-692 (1998).
- 9) Kanakia, H., Mishra, P. and Reibman, A.: An Adaptive Congestion Control Scheme for Real Time Packet Video Transport, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.3, No.6, pp.671-682 (1995).
- 10) 古村隆明, 藤川賢治, 池田克夫: マルチメディアデータの階層伝送とパケット送信順序制御, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.2, pp.271-279 (2000).
- 11) 佐藤 純, 橋本浩二, 柴田義孝: Dynamic Rate Control for Continuous Media Transmission, 情報処理学会 DPS 研究会研究報告 1997-DPS-85, Vol.97, pp.85-90 (1997).
- 12) 橋本浩二, 知念 正, 佐藤 純, 柴田義孝: 圧縮ビデオデータ転送のためのパケットおよびフレームレート制御法, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.2, pp.337-346 (1998).
- 13) 宮地悟史, 松本修一: 超低ビットレート動画像符号化方式 — 空間的, 時間的, 統計的情報量制御による高品質符号化, 情報処理学会 AVM 研究会研究報告 1997-AVM-16, Vol.97, No.121, pp.7-12 (1997).
- 14) Carle, G. and Biersack, E.: Survey of Error Recovery Techniques for IP-Based Audio-Visual Multicast, *IEEE Network*, pp.24-36 (1997).
- 15) Verscheure, O., Garcia, X., Karlsson, G. and Hubaux, J.: User-Oriented QoS in Packet Video Delivery, *IEEE Network*, pp.12-21 (1998).
- 16) 矢野晃一, 佐藤宏明, 瀬崎 薫: 連続メディアのリアルタイム転送に適したラウンドトリップ時間に基づくレート制御法, 信学技報 IN98-23, CS98-23, MVE98-23, pp.85-90 (1998).
- 17) 呉 鉄城, 西原 功, 吉田俊之, 酒井善則: ベストエフォート型ネットワーク上での MPEG 画像のメディア同期手法, 画像電子学会誌, Vol.28, No.5, pp.521-531 (1999).
- 18) Amir, E., McCanne, S. and Katz, R.:

Receiver-driven Bandwidth Adaptation for Light-Weight Sessions, *Proc. ACM Multimedia'97*, pp.415-426 (1997).

- 19) Busse, I., Deffner, B. and Schulzrinne, H.: Dynamic QoS control of multimedia applications based on RTP, *Computer Communications*, No.19, pp.49-58 (1996).
- 20) 櫻尾次郎, 胡 杭陵, 本田泰弘, 鈴木秀智: TCP と共存するリアルタイム通信プロトコル (RTP) のためのレート制御, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム, pp.381-386 (1999).
- 21) 加藤聡彦, 木村 昭, 鈴木健二: QoS を保証しないネットワークのための輻輳制御機能を有する連続メディア情報転送プロトコル, 情報処理学会 DPS 研究会研究報告 83-8, pp.43-48 (1997).
- 22) 奥村誠司, 福田和真, 鷹取功人, 大野次彦, 下間芳樹: MPEG-4 over RTP 配信システムと QoS 制御方式, 情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2000) シンポジウム, Vol.2000, No.7, pp.433-438 (2000).
- 23) 福田和真, 奥村誠司, 鷹取功人, 大野次彦, 下間芳樹: RTP を利用した動画配信システムにおける QoS 制御方式, 情報処理学会 DPS 研究会研究報告 2000-DPS-99, Vol.2000, No.88, pp.49-54 (2000).
- 24) Kikuchi, K., Nomura, T., Fukunaga, S., Matsui, Y. and Kimata, H.: RTP Payload Format for MPEG-4 Audio/Visual Streams, RFC3016 (2000).
- 25) Fukunaga, S., Sato, N., Yano, K., Miyazaki, A., Hata, K., Hakenberg, R. and Burmeister, C.: Low Delay RTCP Feedback Format, draft-fukunaga-low-delay-rtcp-\* (2001).

(平成 13 年 4 月 5 日受付)

(平成 14 年 6 月 4 日採録)



下間 芳樹 (正会員)

1973 年京都大学工学部電子工学科卒業。1975 年東京大学大学院電気工学科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。以来,産業用およびビジネス用コンピュータのハードウェア

開発に従事。また,ネットワーク関係のソフトウェアの研究にも従事。現在,同社コミュニケーション・ネットワーク製作所副所長。



福田 和真 (正会員)

1971 年生。1994 年東京農工大学工学部卒業。1996 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。1999 年同大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。同年三菱電機(株)入社。現在,ストリーミング技術の研究開発に従事。工学博士。電子情報通信学会会員。



奥村 誠司

1972 年生。1995 年茨城大学工学部情報工学科卒業。1997 年同大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)に入社し,マルチメディア情報処理技術に従事。現在,ストリーミング技術の研究開発に従事。



鷹取 功人 (正会員)

1986 年電気通信大学電気通信学部材料科学科卒業。同年三菱電機(株)に入社。以来,産業用コンピュータのストレージシステム,マルチメディア配信システムの研究開発に従事。



大野 次彦 (正会員)

1982 年日本大学大学院理工学研究科電子工学修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。以来,高速グラフィックエンジン,コンピュータアーキテクチャ,マルチメディア通信に関する研究に従事。



水野 忠則 (正会員)

1945 年生。1968 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授。現在,情報学部情報科学科教授。工学博士。情報ネットワーク,モバイルコンピューティング,放送コンピューティングに関する研究に従事。著書としては「プロトコル言語」(カットシステム)、「コンピュータネットワーク概論」(ピアソン・エデュケーション)等がある。電子情報通信学会,IEEE,ACM 各会員。当会フェロー。