

パケット紛失を考慮した連続メディア転送プロトコルの研究

知念正 柴田義孝

東洋大学工学部情報工学科

E-mail:{chinen,shibata}@sb.cs.toyo.ac.jp

圧縮技術を用いた連続メディア転送においては、クライアント及びサーバ・ネットワークの負荷変動によりパケット紛失が発生した場合、画質の低下やフレームレートの低下を引き起こす。本研究においては、負荷変動に対して動的にパケット間隔を調整することにより、パケットロス率を抑制し、かつ、クライアント側での実効フレームレートをサーバ側にフィードバックし、送信フレームを間引いてフレームレートを調整することにより、ビデオサービスの実時間性を保証する転送方式を提案する。そして、これらの転送方式を導入したパケット オーディオ・ビデオシステム (PAVS) のプロトタイプを構築し、負荷変動によって生じるパケット紛失の影響を抑制するパケット紛失制御の性能評価を行なった。

1 はじめに

ネットワークを通して時間的制約を伴う連続メディアデータをユーザへ提供する Video-on-Demand (以下 VoD) サービスでは、ユーザの Quality of Service(QoS) 要求や格納されたメディアデータの属性、クライアントステーションやビデオサーバの処理能力、及びネットワークの負荷変動などを考慮して適切なサービスの質を保証する必要がある、そのためにはアプリケーションからネットワークまで一貫した QoS 保証機能が必要となる [3]。特に、クライアントステーションの過度の負荷変動は、パケットオーバーランによる紛失の原因となり、提供されるメディアの品質を劣化させてしまう可能性がある。そこでユーザが要求する QoS に基づくサービスを提供するためには、これらの負荷変動に応じてビデオのフレームレート及びパケットの転送レートの動的な制御や、パケット紛失に対する回復機構が必要となる。

一方、ビデオのようにデータ量が非常に大きなメディアを扱うためには MPEG のような圧縮技術が有効であるが、圧縮されたビデオはフレーム毎にそのデータ量が変化するため、これを一定のフレーム

レートでユーザに提供するためには、可変レート転送を行う必要がある [2]。可変レート転送を TCP プロトコルで行なう場合は信頼性のあるパケット転送が可能であるが、TCP プロトコルのエラー制御やフロー制御機能の複雑さによりスループットが十分に得られない点と時間的制約を保証できなくなる点などにより、可変レート転送の実現が困難となる。一方、UDP プロトコルはその簡潔性より高いスループットが期待でき、又、マルチキャスト機能も利用でき、マルチメディア情報サービスの構築が実現しやすいが、パケット紛失に対する制御機能が必要となる。

本研究では、転送プロトコルとしてより高いスループットで、なおかつ、トランポート層より上位でのフロー制御やレート制御を実現するために UDP のような軽装なプロトコルを用いて圧縮された連続メディア転送を考える。この場合、クライアント/サーバの負荷変動により生じるパケット紛失の影響による画質やフレームレートの低下を引き起こすので、動的にパケット間隔を調整することによってパケットロス率を抑制する 1) パケット間隔制御法と紛失したパケットを再転送させることによってパケット紛失を生じさせないための 2) パケット紛失回復制御法の 2 つの方法を導入する。

2 可変レート転送

本システムでは、無圧縮ビデオだけでなく圧縮ビデオでも一定のフレームレートでの転送表示を可能とするために、図 1 のようにパケットサイズを固

Continuous Media Transmission Protocol Considered
of Packet Loss

Tadashi CHINEN, Yoshitaka SHIBATA
Toyo University.

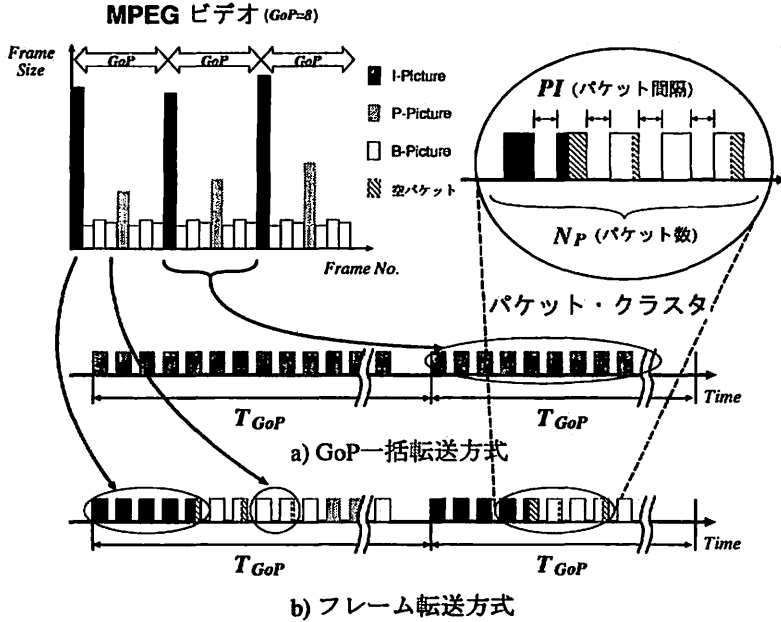


図 1: 可変レート転送

定し、単位時間に送出するパケット数及びパケット間隔をフレームに応じて調整する可変パケットレート転送を導入する [2]。例えば、図 1(a) のような MPEG 圧縮ビデオにおいて、1つの GoP に相当する複数のパケットを生成して転送する。1つの GoP に相当する時間を T_{GoP} 、パケットサイズを L_P 、GoP データのサイズを L_{GoP} とした場合、サーバは T_{GoP} 間に $N_P = \lfloor \frac{L_{GoP}}{L_P} \rfloor$ 個のパケットを送出することになる。このように、 T_{GoP} 内パケットの生成率を GoP のデータ量に合致させることにより可変レート転送を行ない、一定のビデオフレームレートを達成する。これを GoP 一括転送方式と定義する。しかし、この方式では GoP を最小単位と考えるため同一パケット内にフレームタイプの異なるデータが存在するため、パケットの紛失が生じた場合、その紛失の影響を受けるフレームの検出が複雑になる。そこで、図 1(b) のように GoP をフレームごとに識別し、フレーム単位でパケットを生成して転送する フレーム転送方式を導入する。

この2つの転送方式を比較すると以下の様になる。

GoP 一括転送方式の場合: フレームタイプに依存せずパケット化できるため、フレーム転送よりもパケット総数が少なく処理が軽くなるが、負

荷変動によりパケットロスが生じた場合、1つの GoP に含まれている複数のフレームが失われる場合がある。

フレーム転送方式の場合: GoP をフレームごとに識別し、パケット転送するため、GoP 一括転送よりもパケット総数は多くなり、各制御の処理が複雑となるが、フレームタイプごとに独立して処理が行なわれるため、パケットロスの及ぶ範囲は1フレームに限定でき、しかもパケット回復制御に柔軟に適用できる。

3 システム構成

本研究では、連続メディア転送サービスにおける動的レート制御機構を実現するにあたって、OSI 参照モデルのアプリケーション層とトランスポート層の間に、同期層、データ変換層、メディアフロー制御層の三層にメディアコーディネイトシステムを導入し、このアーキテクチャ[1,3,4]にしたがってレート制御を実現する機能モジュールと、制御の流れを図 2 に示している。メディアコーディネイトシステムにおけるストリーム管理プレーンおよび制御プレーンの機能は密接に関係しているため、この2つのプレーンを統合して1つのモジュールとしている。

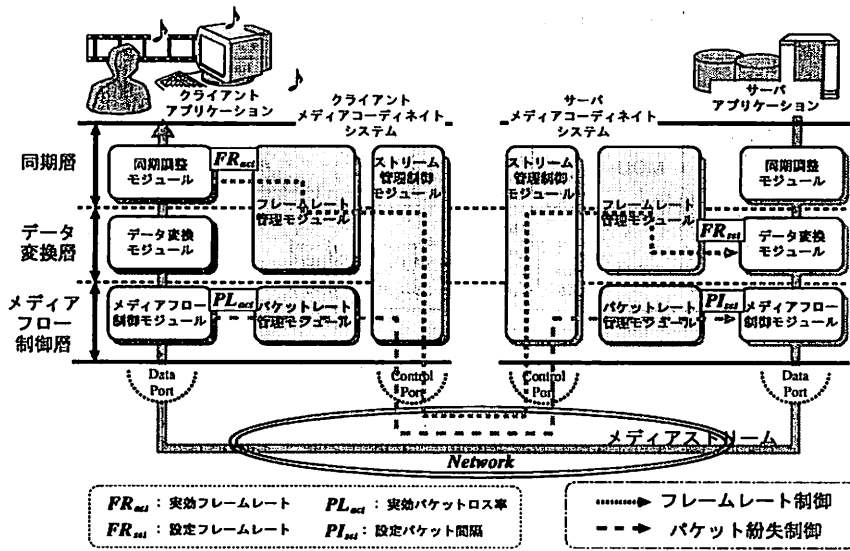


図 2: モジュール構成とレート制御の流れ

また、制御プレーンとして主にフレームレートを司る機能をフレームレート管理モジュールに、転送パケット間隔などの管理制御機能をパケットレート管理モジュールに分割して割り当てている。

可変ビットレート転送されるメディアデータのパケット紛失制御の流れは、クライアント側のメディアフロー制御モジュールで実効パケットロス率を検出し、パケットレート管理モジュールにおいてパケット間隔変更の判断を行なう。そして、サーバ側のパケットレート管理モジュールであらかじめ評価しておいたパケットロスの性質より適切なパケット間隔を決定し、メディアフロー制御モジュールで扱う設定パケット間隔を変更する。

一方、パケット紛失制御の影響やマシンの処理能力にあわせてフレーム処理量を調整するフレームレート制御の流れは、クライアント側の同期調整モジュールで実効フレームレートを検出し、フレームレート管理モジュールにおいてフレームレート変更の必要性を判断し、必要に応じて実効値および統計値をサーバに通知する。サーバ側のフレーム管理モジュールでは、通知された実効値及び統計値から適切なフレームレートを決定してデータ変換モジュールで設定フレームレートに合わせてフレーム量を調整する。

4 パケット構成

メディアコーデインイトシステムのデータ変換層では、GoP データの伸張において、パケットの紛失によるデータの欠落を知ることができなければ、受信した GoP データの全てを破棄しなければならない。従って、パケット紛失により GoP データのどの部分が失われたかを知ることが重要であり、その部分のみを破棄するか、あるいは、紛失パケットの再転送により残りの他のフレームを伸張することができる。

これを実現するために、各層での情報のやり取りを容易にし、どのように GoP もしくはフレームデータを分割したかを認識できるように図 3 のような各層毎での処理単位を以下のように定義する。

Media Data Unit(MDU): MPEG ビデオは複雑な階層構造をしているため、扱う処理単位として GOP、ピクチャ、スライス等の 6 つがある。そこで、データ変換層とメディアフロー制御層のインタフェースの処理単位として転送を行う。

Packets Data Unit(PDU) 可変レート転送を行う場合、MDU に相当する連続メディアデータをパケットにフラグメント化する。パケットの通し番号など付加することでパケット紛失を認識し、紛失したパケットを回復するために受信

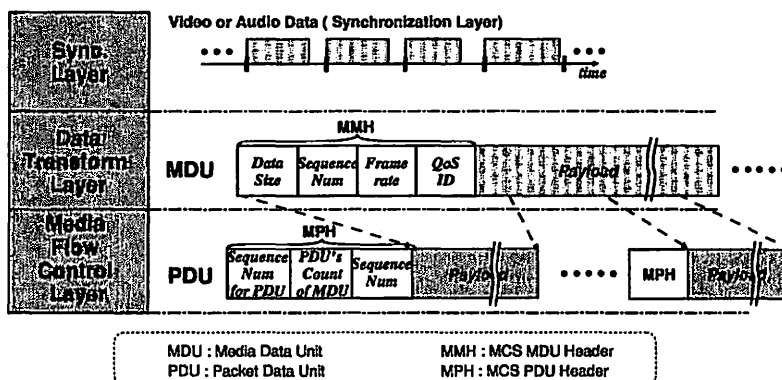


図 3: 各層のデータユニット (DU) の構成

側で必要となるヘッダ情報 (MPH) と固定長パケットで構成する。

このように、各層毎に必要な情報を含むヘッダとデータから構成され、これらのヘッダを用いてデータの認識を可能とする。

5 パケット紛失制御

本システムでは、パケット紛失を抑制するために 1) パケット間隔制御法と 2) パケット回復制御法を導入する。1) のパケット間隔制御法では、過負荷によって生じるパケットの取りこぼしを許容範囲に抑えるためにパケット間隔を調整する方法があり、制御の特徴として制御機構が比較的簡単に実現できるが、パケット紛失を抑えるためにパケット間隔を大きく取ると連続メディアが持つ時間的制約に影響するので、その制御に早応性が要求される。

一方、パケット回復制御法においては、紛失したパケットを回復するためにパケットの再転送を行なうもので、パケット紛失を完全に回復できるが、制約時間内に処理できない場合があり、フレームレートの実時間性を保てなくなる場合がある。

5.1 パケット間隔制御法

図 2 のようにパケット間隔制御の流れは、まずクライアントのパケットレート管理モジュールにおいて実効パケットロス率 (PL_{act}) を測定し、実効パケットロス率がユーザ要求もしくは QoS 交渉によってあらかじめ設定された許容パケットロス率よりも大きい場合、パケット間隔変更の要求をサーバに通知する。その通知を受けたサーバは、あらかじめ評

価しておいたパケットロスの性質と比較し、パケット間隔を決定し、パケット間隔 (PI) を調整する。これまでの研究 [2] で、クライアントステーション負荷に対する連続転送されるパケットのロス率は、図 4 のように、その負荷状態に対してパケット間隔が一定以上に小さいとパケットロスが発生するようになることが分かっている。そこで、図 2 の制御フローにおいて、クライアントで検出されたパケットロス率 PL_{act} が許容パケットロス率 PL_{adm} を超えた時にはすぐに $PL_{act} < PL_{adm}$ となるようにパケット間隔を動的に調整する。パケット間隔を大きく取ったことにより時間的制約が保てなくなる場合には、フレームレート制御ループのフィードバックによりフレームレートの設定値が下がり、これにより転送パケット数が減少することになる。

5.2 パケット回復制御法

MPEG ビデオでは、パケット紛失により複数のフレームへ影響するので高画質を確保するためにパケット紛失を 0% にする必要が生じる場合もある。この場合、パケットの再転送によるパケット回復制御が必要となる。そこで、パケット毎に付加されているシーケンス番号を用いてパケット紛失を検知し、パケットの再転送によるパケット回復方式として "Go back n" と "Selective repeat" の 2 つの方式を提案する。

Go back n 方式の場合: 送信側では、紛失したパケット以降の全てのパケットを再転送し、再転送要求の間に受信側に転送されたパケットは全て削除する。特徴としては、アルゴリズムが

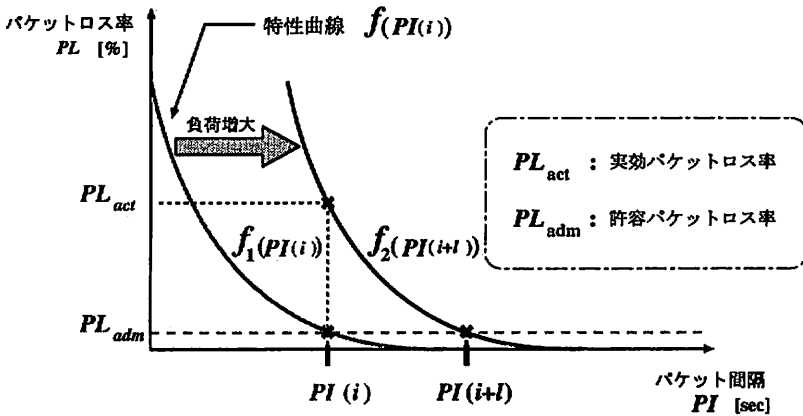


図 4: パケット間隔とパケットロス率の特性曲線

単純であるが冗長なデータが再転送される。図 5 に示すように Go back n 方式の具体的な処理の流れは、次のようになる。

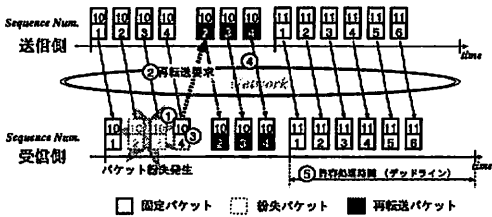


図 5: Go back n 方式

- 受信側
 - ① MPH のシーケンス番号を用いて紛失パケットの検出
 - ② 紛失パケットの発生により再転送要求
 - ④ 要求した目的のパケットが到着するまで受信パケットは削除
 - ⑤ 再転送がデッドラインに間に合わない場合は MDU 単位で削除
- 送信側
 - ③ 紛失パケット後のパケットを再転送

Selective repeat 方式の場合: 受信側では、紛失したパケットのみだけを送信側に再転送要求し、再転送要求間に転送されたパケットは、あらかじめ受信側に用意されたバッファに格納する。この方式は紛失が少ない場合は有効であるが、受信パケットを格納するために大きなバッ

ファが必要となる。図 6 に示すように Selective repeat 方式の具体的な処理の流れは、次のようになる。

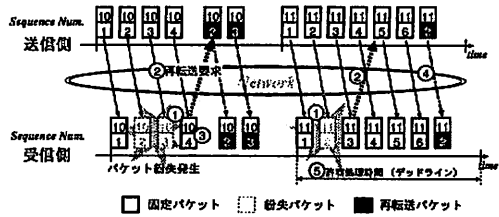


図 6: Selective repeat 方式

- 受信側
 - ① MPH のシーケンス番号を用いて紛失パケットの検出
 - ② 紛失パケットが生じるたびに再転送要求し、紛失パケットの通知
 - ④ 受信パケットをバッファに格納
 - ⑤ 再転送がデッドラインに間に合わない場合は MDU 単位で削除
- 送信側
 - ③ 紛失パケットのみをパケットを再転送

6 プロトタイプ及び性能評価

パケット紛失を抑制するためパケット紛失制御機構の評価を行ない GoP 一括転送方式とフレーム転送方式について パケット オーディオ・ビデオシステム (PAVS) のプロトタイプを図 7 のように構築した。ネットワークとして転送速度 100Mbps の非

同期サービスをサポートする FDDI を用い、ネットワークプロトコルとしては UDP/IP を用いた。ここでの評価に使用したビデオデータは表 1 の通りである。

評価は、640x480 の MPEG ビデオのソフトウェア伸張処理を負荷としてクライアントに与えた場合、パケット間隔に対するパケットロス率の影響を測定した。又、パケットロス率とパケット間隔の関係式を用いてクライアント負荷変動に基づくパケット間隔の動的な制御について評価を行なった。

表 1: ビデオデータ及び測定条件

圧縮フォーマット	MPEG-1		
画像サイズ	640 x 480 [pixel]		
色数	24 [bits/pixel]		
フレームレート	30 [frames/sec]		
必要転送速度	5.0 [Mbps]		
パケットサイズ	4K [bytes]		
GoP 当たりのフレーム数 (N)	10		
I、P フレーム周期 (M)	5		
フレームタイプ	I	P	B
平均パケット数	8	8	5

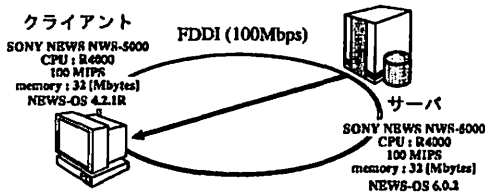


図 7: プロトタイプ

6.1 パケット間隔とパケットロス率の関係

パケット紛失が許容パケットロス率よりも大きく越えてしまった場合、パケット間隔の適当な調整を行なうためにパケットロス率とパケット間隔の関係式をあらかじめ知る必要がある。そこで、クライアントの異なる負荷に対してパケットロス率とパケット間隔を測定した(図 8)。図中でプロットされている点は、無負荷状態とソフトウェア伸張処理プロセスを負荷としてクライアントに与えたときの各パケット間隔に対するパケットロス率の実測値である。この図から有負荷時においてパケット間隔が小さくなるにつれてパケットロス率がほぼ直線的に上昇し、パケット間隔が大きくなるにつれてパケットロス率は 0% に近づくことがわかる。これより、パケット間隔とパケットロス率の関係は、

$$\text{パケットロス率} = a \times \text{パケット間隔} + b$$

の次式により近似できることが分かった。実際に PAVS を動作させた時にクライアント負荷として 640x480 の MPEG ビデオの伸張プロセスを与え、そのときのパケットロス率とパケット間隔と近似式により(パケットロス率 = $-4 \times \text{パケット間隔} + 27$)、パケット紛失が生じた場合に、この式で現在の実効パケットロス率とパケット間隔によって示される座標を通るように平行移動させることにより、次に設定すべき適当なパケット間隔を再設定することができる。そして、この設定値 $PI(i)$ によってパケットロス率 ($PL_{act}(i)$) が許容パケットロス率の近傍においては、再設定すべき $PI(i+1)$ は $PI(i) \times (1 + (k \times (PL_{act}(i) - PL_{adm})))$ により小まかな調整を行なう (k : 設定回数が増えるにつれて指数関数的に減少する係数)。

6.2 パケット間隔とフレームレートの関係

図 9 は、GoP 一括転送方式のパケット間隔とフレームレートの関係を示している。図中でプロットされている点はクライアントを無負荷の場合とソフトウェアによる複数の伸張処理プロセスの負荷を与えた場合を表している。フレームレートを保つためには、ここで 1 パケット当たりには課せられる最大処理時間を限界パケット間隔と定義する。この場合、1 パケット当たりの限界パケット間隔は 6.13msec となり、無負荷の場合は、この間隔よりも大きくなると 30fps を維持できなくなり、間隔が大きくなるにつれ、フレームレートは低下する。又、有負荷の場合、パケット間隔が減少するにつれて、クライアントのパケット取りこぼしのため、パケットロス率が非常に増加し、実効フレームレートの著しい低下を招くことが分かる。同様に図 10 は、フレーム転送方式のパケット間隔とフレームレートの関係を示している。GoP を各フレームごとに識別する必要があるため GoP 一括転送に比べてパケットのオーバーヘッドが大きくなり、又、GoP 当たりのパケット数も大きくなるので、パケット間隔を限界パケット間隔に減少させても、30fps で転送することはできなかった。これはサーバの処理能力が無負荷時でさえ、30fps のソースビデオを転送するのに十分でないことが分かる。

6.3 パケットロス率とフレームレートの分布状況

図 11 と図 12 は、GoP 一括転送方式においてパケット間隔が 8msec でクライアントにソフトウェアの MPEG 伸張処理プロセスを負荷として与えたと

きのパケットロス率及びフレームレートの時間的変化を示している。このときの平均パケットロス率は図8に示すように1%であるが、図11のパケットロス率をみるとランダムでバースト的に発生すること明らかに分かる。しかし、パケット転送がGoPを最小単位としているためパケット紛失によるフレームレートへの影響が大きいことが分かる。一方、図13と図14は、同様にフレーム転送方式の場合のパケットロス率とフレームレートを示している。8msecでのフレームレートの時間的変化は、図14のようにフレームが個々に独立して転送されているため、パケット紛失によるフレームレートへの影響は小さいが、サーバ側での転送処理が大きくパケット間隔も8msecのために平均フレームは13fpsしか得られないことが分かる。

6.4 動的なパケット間隔制御

図15は、クライアントの負荷変動によりパケットの取りこぼし生じた場合、許容パケットロス率以下に抑えるパケット間隔制御機構の性能評価を示す。許容パケットロス率を1%以下とし、連続メディアデータ転送サービスを行なっている最中に、新たなソフトウェアMPEG伸張プロセスがクライアント負荷として加わった際のパケットロス率とパケット間隔を測定した。ビデオ転送開始時は、パケット間隔が1msecで許容パケットロス率以下に抑制されているが、45秒後から負荷をクライアントに与えることでパケットロス率が急激に8%まで上昇する。しかしながら、パケット間隔制御法のフィードバックループが働きパケット間隔が大きくなり、その3秒後以降にはほぼ0%付近に抑えるながら、パケット間隔を維持している。又、負荷を取り除いた際にはもとのパケット間隔である1msecへ徐々に収束していくことがわかる。このように、連続メディア転送サービスはほぼ許容パケットロス率以下で行なえることも確認できた。

7 まとめ

パケット紛失を抑制するためパケット紛失制御機構を導入したPAVSの転送プロトコルの設計及び開発を行なった。性能評価では、MPEGデータは前後のフレームに対する依存性があるためにパケット紛失により伸張不可能な状態が生じ、極度のフレームレートの低下を招く。そこで、パケット間隔制御法を用いることによって負荷変動によるパケッ

ト紛失を許容パケットロス率以下に抑えながら、その負荷状況に応じた連続メディア転送を行なうことが確認できたが、パケット紛失を0%するためにはパケットレベルでの回復制御として、“Go back n”や“Selective repeat”のパケット再転送方法が必要となる。今後の課題は、実際にパケット回復制御を導入した際の性能評価、及びレート制御が挙げられる。

参考文献

- [1] 渡辺光輝, 知念正, 橋本浩二, 柴田義孝: 連続メディア転送のための動的レート制御法の性能評価情報研報 DPS-75, Vol. 96, pp. 43-48, 1996.
- [2] 赤間孝司, 渡辺光輝, 橋本浩二, 柴田義孝: パケットオーディオ・ビデオシステムのための動的なパケット間隔制御, マルチメディア通信と分散処理研究会, 67-7, 1994
- [3] 橋本浩二, 渡辺光輝, 柴田義孝: 連続メディアのためのQoS保証及び交渉機能情報研報 DPS-74, Vol. 96, pp. 67-72, 1996.
- [4] 知念正, 柴田義孝: 圧縮オーディオ・ビデオのための連続メディア転送プロトコルの研究情報研報 DPS-77, Vol. 96, pp. 7-12, 1996.

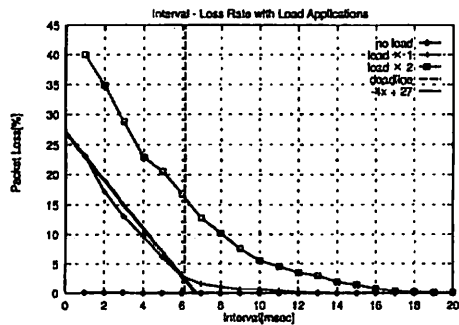


図8: 負荷状況が異なるクライアントでのパケットロス率とパケット間隔

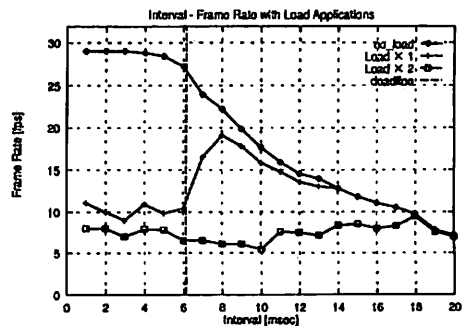


図9: GoP一括転送の場合

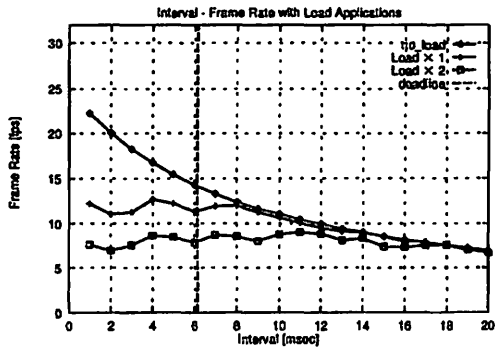


図 10: フレーム転送の場合

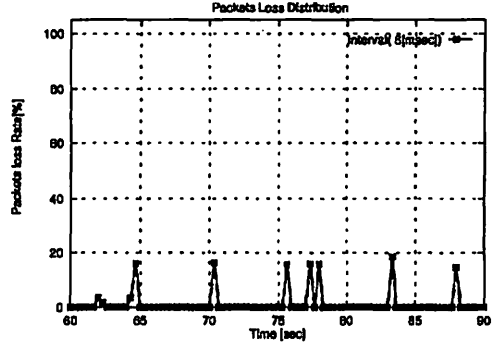


図 13: フレーム転送方式でのパケットロス率 [8msec]

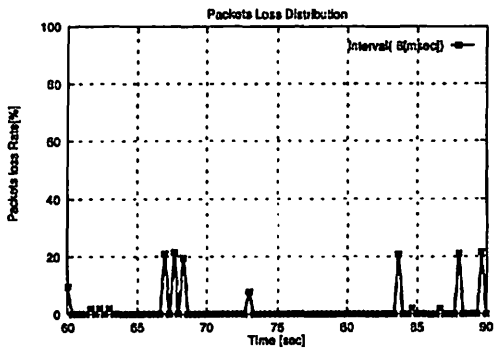


図 11: GoP 一括転送方式でのパケットロス率 [8msec]

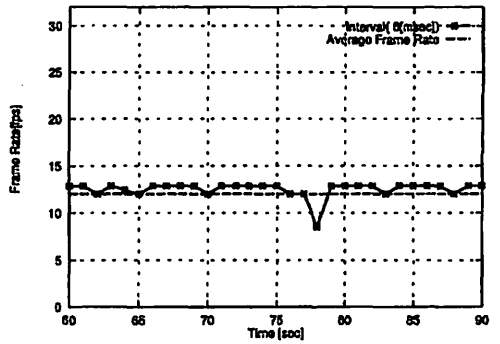


図 14: フレーム転送方式でのフレームレート [8msec]

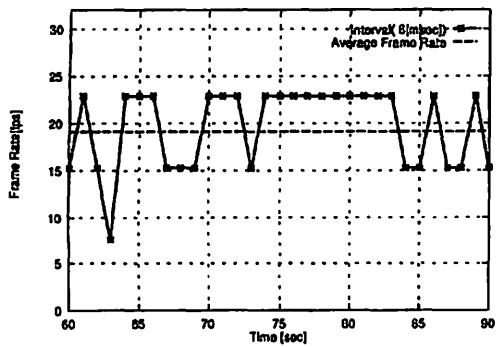


図 12: GoP 一括転送方式でのフレームレート [8msec]

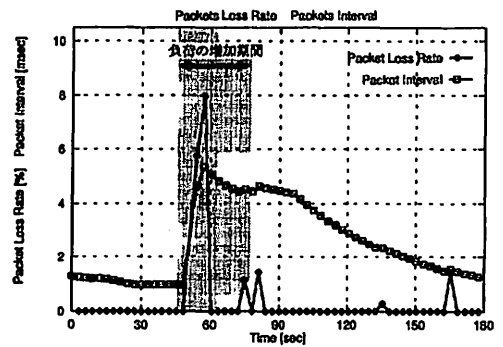


図 15: クライアント負荷変動時におけるパケットロス率とパケット間隔