

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

知念正 柴田義孝

東洋大学工学部 情報工学科

{chinen,shibata}@sb.cs.toyo.ac.jp

高速ネットワーク上で VoD(Video-on-Demand) サービスを実現するためには、転送効率を高めるために圧縮技術の利用が有効であるが、単位時間に転送されるデータ量が変化するため、可変レート転送が必要となる。又、クライアント及びサーバやネットワークの動的な負荷変動によるパケット紛失が発生し、フレームレートが変動し QoS が維持できない場合もある。そこで本研究では、動画像圧縮法として MPEG を使用した場合の 2 つの可変ビットレート転送方式を導入して、パケット オーディオ・ビデオシステムのプロトタイプを FDDI 上に構築し、負荷変動に対するパケット紛失及びスループットの評価を行なった。

Continuous Media Transmission Protocol for Compressed Audio · Video Data

Tadashi Chinen, Yoshitaka Shibata

Department of Information and Computer Sciences, Toyo University

{chinen,shibata}@sb.cs.toyo.ac.jp

In order to realize VoD(Video-on-Demand) service through high speed network, it is necessary to use video compression technique. However, since the data size for each video frame varies in time, variable bit rate transmission is required. Also, due to packet loss by increase of CPU load in client and server station over network, the video frame rate is seriously influenced, eventually, the user requested QoS is not guaranteed. In this paper, we introduce two continuous media transmission methods to realize variable bit rate transmission. The performance evaluation of packet loss and effective frame rate when the CPU load on client station has been changed, is analyzed using the prototyped Packet Audio · Video System(PAVS).

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り、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]。

転送プロトコルとしては、信頼性のある TCP を使用することも可能であるが、より高いスループッ

トやマルチキャスト機能の必要性を考慮すると UDP などの簡単なプロトコルを利用することも有効と考えられる。

そこで、本研究では、一つのバケット紛失が複数のフレームの再生に影響を及ぼす MPEG 圧縮ビデオ転送において、紛失したバケットを含むフレームのみを削除することによってビデオフレームの伸張への影響を最小限する方法を導入し、これらを実際にパケット オーディオ・ビデオシステム (以下 PAVS) のプロトタイプとして FDDI 上に構築し、動画画像圧縮法として MPEG を使用した場合の 2 つの可変ビットレート転送方式と、負荷変動に対するバケット紛失及びスループットの評価について述べる。

2 システムアーキテクチャ

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、図 1 に示すシステムアーキテクチャを導入した。これは、

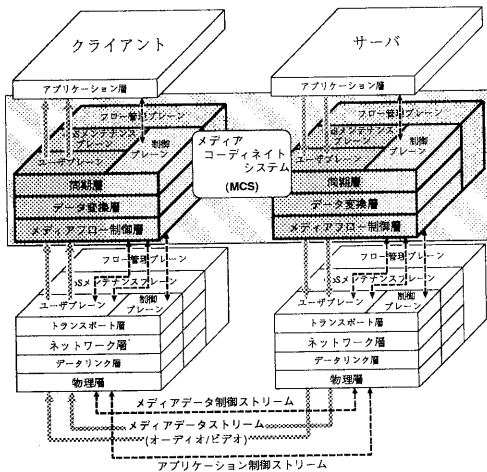


図 1: システムアーキテクチャ

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を導入しており、アプリケーションからネットワークまで一貫した QoS 保証しながら連続メディアデータをユーザに提供するための機能を有する [3]。

同期層: ビデオフレームと対応するオーディオフレーム間の時間的同期処理を行う。

データ変換層: ビデオデータ処理としてビデオフォーマット変換、圧縮・伸張などを、オーディオデータ処理としてサンプリングレート・量子化

ビット数・変調方式変換、無音検出などを行う。
メディアフロー制御層: サーバクライアント間のビデオフレーム及びオーディオフレーム転送におけるバケット転送レート制御、ジッタの吸収、さらにバッファの溢れを監視することによるフロー制御を行い、さらにバケットロス発生時には紛失したバケットの回復を行なう。

ここで、同期層、データ変換層、及びメディアフロー制御層の 3 層を総称して、メディアコーディネイトシステムと定義する。

図 1 において、QoS メンテナンスプレーンではオーディオ、ビデオフレームレートなどの QoS の保証状況やワークステーション及びネットワークの負荷状況を監視し、ストリーム管理プレーンでサーバクライアント間の QoS 交渉がなされ、保証すべき QoS が決定される。QoS が決定されると、その QoS を保証するための処理が各層の制御プレーンで行われる [3]。

3 連続メディアデータ

MPEG ビデオデータは高圧縮率を実現するため、I、P、B ピクチャという 3 つのタイプのフレームから構成されており、これら複数のフレームが規則的に並んでいるグループを Group of Picture (以下 GoP) と呼ぶ。従来は、ネットワーク転送において GoP 単位による一括転送が行われていた [2]。一方、メディア間の同期や、フレームレート制御にも柔軟に対応させるためにフレームを単位ごとに転送する方法が必要とされる。

MPEG ビデオデータの性質として、伸張時は前後の I 又は P ピクチャから構成される予測参照フレームが存在しないと B ピクチャは伸張できず、P ピクチャもまた過去の I 又は P ピクチャから構成される参照フレームが存在しないと伸張できない。ここでビデオデータのネットワーク転送においては、B ピクチャを構成するバケットが紛失した場合は、他のフレームへの影響はないが、I ピクチャや P ピクチャを構成するバケットが紛失した場合には、後続の P 又は B ピクチャを伸張することができないので、実効的なフレームレートは低下する。

4 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 2 のようにバケットサイズを固定し、単位時間に送出するバケット数及びバケット間隔をフレームに応じて調整する可変バケット

レート転送を導入する [2]。例えば、図 2(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。1GoP 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

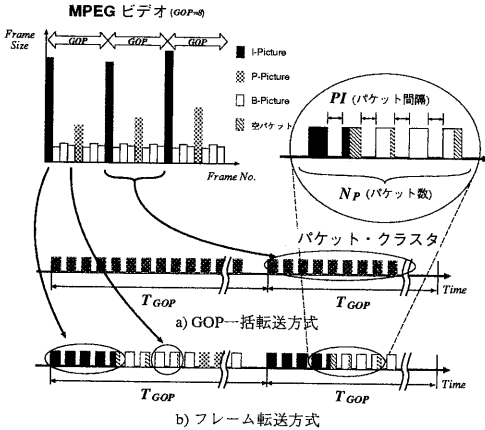


図 2: 可変レート転送

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 2(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した。

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。

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。

5 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 データの全てをも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。

Synchronization Data Unit(SDU): 同期を取る単位を Synchronization Data Unit と定義し、メディアタイプを区別せずに同期を行う。

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。

6 パケットレート制御

ビデオデータの再生表示では、ユーザの希望する品質、すなわち各ビデオフレームの画質と一定のフレームレートを保ちながら提供する必要がある。しかしながら、クライアントやサーバの負荷変動、ネットワーク上のトラフィックの変動により提供可能なフレームレートが変化するので、フレームレートを動的に制御するフレームレート制御、及びパケットの送信レートを動的に調整するパケットレート制御を同時に行う必要がある。図 4 では、フレームレート制御とパケットレート制御を同時に実行できるシステム構成及び制御の流れを示す。パケッ

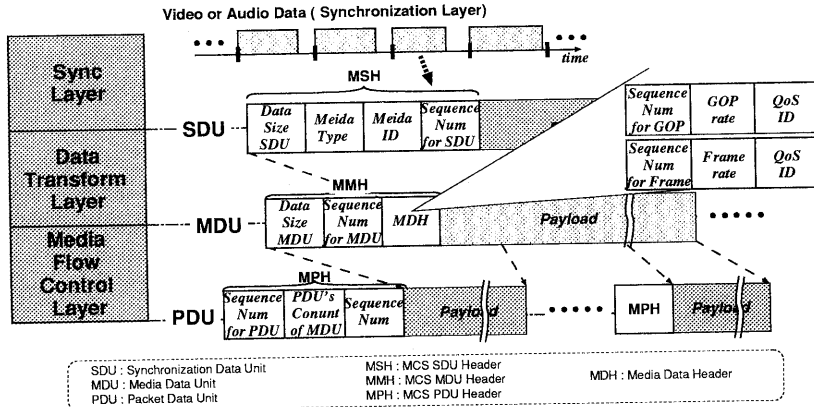


図 3: 各層のデータユニット (DU) の構成

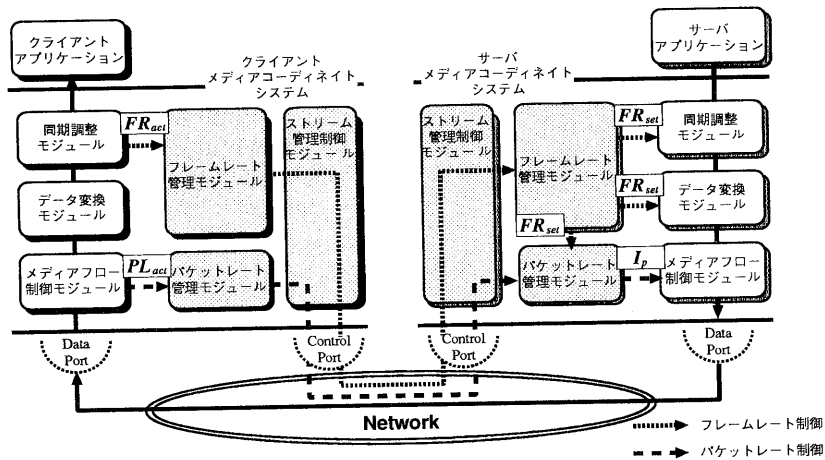


図 4: モジュール構成とレート制御の流れ

レート制御の流れは、まずクライアントのメディアフロー制御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設定値よりも大きい場合、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、適切なパケット間隔を決定し、パケット間隔 (I_p) を調整する。

パケットロスを許容率以下に抑制するためにパケット間隔 PI の調整が必要となる。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 5 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を発生するようになることが分かっている。そこで、図 4 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。パケット間隔を広げたことにより制約時間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。

6.1 平均フレームロス比率

フレームレート一定に保つためには、制約時間内にできるだけ短時間でパケット転送することが望ましい。しかしながら、UDP のような信頼性のないプロトコルを用いてパケットの転送間隔を短くするとオーバーランによるパケット紛失が生じてしまい、フレームレート低下を招く。ここでは、パケット紛失のフレームレートへの影響を解析する。

MPEG を仮定した場合、各フレームタイプ当た

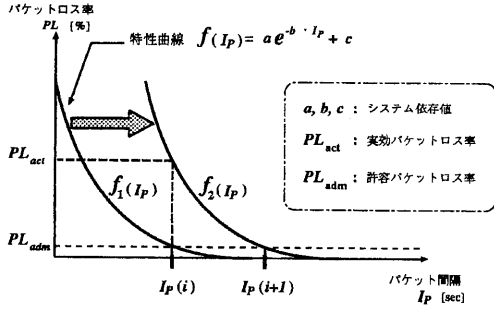


図 5: パケット間隔とパケットロス率の特性曲線
りに含まれる平均パケット数の比を、

$$I : P : B = m_i : m_p : m_b \quad (1)$$

とする。また GoP 当りに含まれるフレーム数を N とし、I、P ピクチャの周期を M とした場合、GoP 当りに含まれるフレームタイプ別の平均パケット生成数は、

$$I : P : B =$$

$$m_i : \left(\frac{N}{M} - 1\right) \times m_p : \left(N - \frac{N}{M}\right) \times m_b \quad (2)$$

で表せる。GOP 当たりの平均パケット総数を m_g とすると、

I、P、B の各フレーム毎の 1 パケットに対するロス比率は (1)、(2) より以下の式となる。

$$I : P : B =$$

$$\frac{m_i}{m_g} : \frac{m_p(N-M)}{m_g M} : \frac{m_b(NM-N)}{m_g M} \quad (3)$$

表 1: ビデオデータの評価条件

圧縮フォーマット	MPEG-1		
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 [packets/frame]	8	8	5

例えば、表 1 の評価条件において、式 (1) で示す各フレーム当りに含まれる平均パケット数の比は、

$$I : P : B = m_i : m_p : m_b = 8 : 8 : 5$$

である。また、GoP 当りに含まれる平均パケット総数 (m_g) は、

$$m_g = 1 \times 8 + 1 \times 8 + 8 \times 5 = 56[\text{packets/GoP}]$$

となるので、1 パケット紛失の影響を受ける各フレームタイプ毎の確率は、

$$I : P : B = \frac{8}{56} : \frac{8}{56} : \frac{40}{56}$$

となる。第 3 節でも述べたように MPEG ビデオ

は前後のフレームと依存関係を持つので、表 1 の場合、I ピクチャが紛失すると 1GoP に含まれるフレーム (10 枚) が伸張不可能となり、P ピクチャの場合は、I/P フレーム周期に相当するフレーム (5 枚) が伸張不可能となる。各フレームタイプ別の 1 パケットに対するフレームロス比率は、

$$I : P : B = \frac{1}{7} \times 10 : \frac{1}{7} \times 5 : \frac{5}{7} \times 1$$

と導ける。つまり、GoP 当たりでの 1 パケットロスにおける平均フレームロス数は、

$$\frac{10}{7} + \frac{5}{7} + \frac{5}{7} \approx 2.8$$

である。すなわち、10 フレーム中 2.8 フレームが影響 (フレーム紛失) を受けることが分かる。

同様に GoP 一括転送においては、GoP を最小単位として処理するので、GoP 当りに含まれるフレーム数を $10[\text{frame/GoP}]$ 、GoP 当たりの平均パケット総数は $51[\text{packets/GoP}]$ であり、1 パケットの紛失によって 10 枚のフレームが影響を受ける。フレーム転送を基準と考えた場合、パケットロスが GoP 一括転送方式に対して及ぼす影響は、以下のようになる。

$$10 \times \frac{51}{56} \approx 9.1$$

すなわち、1 パケット紛失した場合、10 フレーム中 9.1 フレームが影響を受けるため、フレーム転送よりも GoP 一括転送の方が平均フレームロス確率が約 3 倍高いことが分かる。

7 プロトタイプ及び性能評価

GoP 一括転送方式とフレーム転送方式の性能比較を行なうために PAVS のプロトタイプを図 6 の環境で構築した。ネットワークには転送速度 100Mbps の非同期サービスをサポートする FDDI を使い、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 2 の通りである。

測定は、640x480 の MPEG ビデオの伸張プロセスを負荷としてクライアントに与えた場合、パケット間隔とパケットロス率及びスループットを測定し、又、各パケット間隔でのパケットの紛失によるフレームレートへの影響について解析を行なった。

まず図 7 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す。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複数の伸張プロセスの負荷を与えた時の各パケット間隔を変化に対するソースビデオのフレームレート (30fps)

圧縮フォーマット	MPEG-1
画像サイズ	640 × 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]

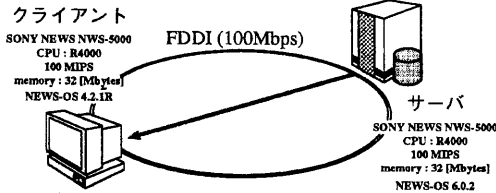


図 6: プロトタイプ

を示す。フレームレートを保つために、1パケット当たりの限界パケット間隔は 6.13msec となる。無負荷の場合、この間隔を越えた場合は、 30fps を保てなくなり、間隔が大きくなるにつれ、フレームレートは低下する。又、過負荷の場合、パケット間隔を減少するにつれて、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大し、実効フレームレートへの低下に継ることが分かる。

同様に図 8 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す。GoP を各フレームごとに識別する必要性のため GoP 一括転送に比べてパケットのオーバ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。クライアントに生じる有負荷時の 2 つの方式のフレームレートを比較した場合に、両方ともほぼ同一のフレームレートを示しているが、これはパケット紛失が一樣に起こるのではなく、バースト的に起こっており、その結果、GoP 一括転送の場合には、1GoP 内で複数のパケット紛失が起こり、結果としてパケット紛失によるフレーム数が 6.2 節で示した計算値よりもかなり小さいためである。この結果より、クライアント、サーバとも十分な処理能力の無い場合には、GoP 一括転送の方が有効であり、十分な処理能力を有する場合は、フレーム同期やレート制御の点より、フレーム転送の方が有効と考えられる。

8 まとめ

VoD サービスを実現するために、効率的な転送方式を導入した PAVS の転送プロトコルの設計及

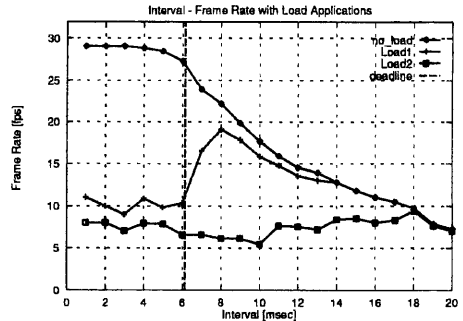


図 7: GoP 一括転送の場合

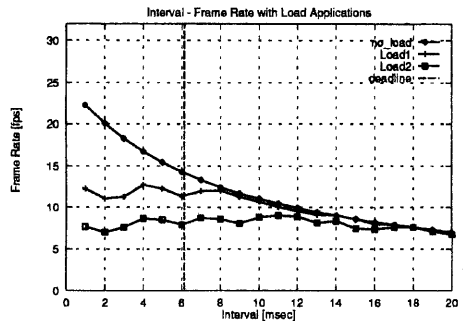


図 8: フレーム転送の場合

び開発を行なった。性能評価では、圧縮ビデオの転送方式として GoP 一括転送やフレーム転送を導入した時の各パケット間隔毎のフレームレートへの影響を比較したが、フレーム転送方式では十分な処理能力が得られなかった。又、有負荷では、パケット紛失の影響を受けるためパケットの再転送が必要とされる。現在、特に、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、フレームレートの低下に継がる。そこで、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を検討しており、実際にパケット回復制御を導入した際の性能評価、及びレート制御を行なった。

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,” 情処研報 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,” 情処研報 DPS-67, Vol. 94, pp. 37-42, 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,” 情処研報 DPS-74, Vol. 96, pp. 67-72, 1996.