

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

古村 隆明

藤川 賢治

池田 克夫

京都大学大学院情報学研究科

IP マルチキャストでマルチメディアデータを送信するさい、受信者ごとにネットワーク機器の受信能力が異なることがあるが、データを階層符号化することでこれに対応できる。階層符号化されたデータを送信するときにパケットの送信順序を制御することで、ルータは転送すべきデータとそうでないデータを適切に選択できるようになり、ネットワーク資源の利用効率を高めることができる。本稿では、パケットの送信順序を制御した場合にネットワーク資源の利用効率が向上することを示し、送信順序を決定するアルゴリズムについて検討する。また、送信順序を制御することで、遅延がどの程度大きくなるかについても考察する。

Layered transmission of multimedia data and control of packet order

KOMURA TAKAAKI

FUJIKAWA KENJI

IKEDA KATSUO

Graduate School of Informatics, Kyoto University

Layered transmission of multimedia data and control of packet order are very advantageous to cope with multiple recipients each of which has different capability of receiving data when IP packets are multicasted. Each router can distinguish packets to be sent from those or not to be sent in the case that the network is congested. We propose a method of control packet order in order to use network resource more effectively, and a simulation result shows the efficiency is improved. We also propose algorithms to determine the sending order, and discuss the additional delays caused by these processes.

1. はじめに

ネットワークの広帯域化と計算機の処理能力の向上により、インターネットを利用したマルチメディア通信が盛んになってきた。今後、各家庭まで高速なネットワークが張り巡らされると、インターネット上でマルチメディア情報の放送を行う環境が整うことになる。マルチメディア情報の具体例としてテレビが考えられる。この環境には、

- インタラクティブな放送が可能
- 誰でも気軽に放送を行うことができる

といった利点がある。

インターネット上で放送を行う場合、データ配信に IP マルチキャストが利用されると考えられる。このとき、受信者ごとの利用可能なネットワーク帯域の違いが問題となる。帯域の狭いネットワークしか利用できない受信者に大量のデータを送信

しようとする、予測できないデータ損失が起こりデータを正常に復号できなくなる。この結果、画像が乱れたり音声途切れるといった悪影響が発生する。この問題を回避するため、データを配送する途中のルータでデータ量を容易に削減することのできる階層符号化方式についての研究²⁾³⁾が行われている。

しかし、データを階層符号化しても、同じ階層のパケットをバーストして送信すると以下のような問題が起こると考えられる。

- 優先順位を有効に利用できず、優先順位の高いパケットであっても破棄される可能性がある。
- 経路が QoS 保証されている場合であってもパケットロスが発生する可能性がある。

本稿では、階層符号化を行なったデータに対してパケット送信順序の制御を行うことを提案する。

2. ネットワークモデル

本稿の提案は、ルータが優先度付きパケットの処理に対応していることを前提としている。これにより、ルータは輻輳発生時にキューの内のパケットの中から最も優先順位の低いパケットを破棄できるとする。パケットの優先順位は、パケットのヘッダの特定のフィールドを用いて指定する。具体的には、IPv4 では TOS(Type of Service) フィールドを、IPv6 では TC(Traffic Class) フィールド¹⁾を用いることができる。

また、データは複数の階層に分割されるが、これらのデータが実際にネットワーク上を流れるときは、ルータ内では一つのキューで処理されるとする。階層ごとに別のキューで処理する方法も考えられるが、一つのキューで処理する方が

- 資源予約が簡単に行える
- 資源予約自体の資源消費が減る

といった利点がある。

3. 階層符号化

ビデオデータを効率良くマルチキャスト配送するためには、階層符号化は必須である。最低限の画質を得るためのデータの優先順位は高く、画質が向上するほど優先順位が低くなるようにデータを階層化する。

動画像に対して階層化を行うときの主な基準は、フレームレートと画質である。

3.1 フレームレート

例えば MPEG 圧縮方式での I, P, B の 3 種類のフレームを別の階層とした場合、2 frames/sec, 10 frames/sec, 30 frames/sec, といった三つの階層に分けられる。この三つの階層に対して、この順に優先順位を設定する方法が考えられる。

この方式の問題点は、MPEG の圧縮方式では四つ以上の階層に分割することが難しい点である。

3.2 画 質

画質を制御する方式としては、

- 解像度
- S/N

によって階層化を行う方法が考えられる。S/N による階層化では画像の高周波成分と低周波成分に分ける方法や、量子化ステップ数を変える方法な

どがある。これらを用いることで、例えば低画質と高画質の 2 つの階層を作ることが考えられる。

4. パケット送信順序による影響

階層符号化によりデータは複数の階層に分割されるが、それらのデータのサイズは、一つの IP パケットで送信できるほど小さくない。そのため、データを複数の IP パケットに分割して送信する。ここで問題となるのが、パケットの送信順序である。

特定の階層がバーストするような順序でパケットを送信すると、瞬間的にその階層のデータ転送レートが上昇する。長い時間で平均すれば転送可能なレートであったとしても、瞬間的に転送可能なレートを越えるとパケットは破棄されてしまう。

階層符号化では、高品質な情報は低品質な情報からの差分として表現する。このため、たとえ優先順位の低いパケットを受信できても、それより優先順位の高いデータが欠けていると復号には利用できない。この場合、優先順位の低いパケットはネットワーク資源を浪費したことになる。ネットワーク資源を浪費させないためには、単に転送するパケット数を多くするのではなく、優先順位の高いパケットを確実に転送する必要がある。

4.1 シミュレーション

パケットの送信順序を制御することで、破棄されるパケットが変化することをシミュレーションにより確かめた。

シミュレーション環境は、

- キューが溢れる場合は、キュー内で優先順位が最も低いパケットを破棄

- ルータのキューサイズは、5 パケット分

- (受信レート) 対 (送信レート) は、5 対 3 とした。表 1 と 表 2 は、それぞれ 2 通りの送信順序について各階層ごとのパケットロス率を表している。表中の 0, 1 などの数字はパケットの優先順位である。表 1 は各階層は 3 パケットで構成され、そのような階層が五つ、という条件での結果である。階層 0 が最も優先順位が高く、値が大きくなるに従って優先順位が低くなるとする。各階層をバースト的に送信した場合(表中の上)と、送信順序を入れ替えて送信した場合(表中の下)とでは、破棄されるパケットに大きな違いが見られる。

受信レートと送信レートの比が 5 対 3 なので、

表1 バケット送信順序と階層ごとのパケットロス率(1)

送信順序	階層ごとのパケットロス率				
	0	1	2	3	4
000111222333444	0.0%	13.2%	39.6%	45.2%	100.0%
012340123401234	0.0%	0.0%	0.0%	98.0%	100.0%

理論上は5階層のうち3階層の転送が可能である。パケット送信順序を変更した場合は、実際に3階層分のデータを転送することができているが、バースト的に送信した場合には、全てのパケットを転送できたのは最も優先順位の高い階層だけである。

表2は階層数を六つとした場合の結果である。

4.2 考察

シミュレーション結果から、適切な順序でパケットを送信することで、効率良くデータを転送できることが分かる。

このように、送信順序が変わると破棄されるパケットが変化するのは、ルータのキューサイズによる影響が大きい。キューサイズを十分に大きく取ることができれば、どのような順序でパケットを送信しても、破棄されるパケットに変化は生じない。

この理由は次のように考えられる。キューが大きくなるほど受信したパケットを溜め込むことが可能になり、瞬間的にバーストしたデータを平均レートに近付けるクッションとしての働きが強くなる。そして、このクッションとしての働きは階層ごとの転送レートについて見た場合にも当てはまり、各階層のパケットがバーストして送られてきても適切に処理できることになる。

しかし、キューサイズを十分に大きく取れない場合は、パケットを破棄しなければならなくなったとき、キューの内から優先順位の低いパケットを見付けることができなくなる。結果として優先順位の高いパケットであっても破棄されることになる。

しかし、ルータを実装する場合には、キューサイズが大きくなるとルータでの遅延が増大することや、コストが上昇するなどの問題があり、キューサイズを大きくすることは難しい。逆に、ルータのキューサイズが一定ならば、パケット送信順序を適切に設定することで効率良いパケット転送が行える。よって、送信順序を制御してバーストした送信を行わないようにすることが望ましい。

5. 順序決定アルゴリズム

パケット送信順序の入れ替えを行うデータの集合をグループと呼ぶことにする。グループ内ではパケットの送信順序を入れ替えるが、グループの境界を越えて順序を入れ替えることはしない。

グループ内で各階層のパケットが同数である場合は、簡単に最適なパケット送信順序を決定できる。しかし、実際には、各階層のサイズはそれぞれ異なるためパケット数も異なる。このような状況でも適切と思われる順序にパケットを並べ変えることができるアルゴリズムを検討した。

以下で二つのアルゴリズムを説明し、両者を比較する。

5.1 提案方式1

このアルゴリズムでは、優先順位の高い階層から順に、できるだけ等間隔で送信できるスロットを予約していく。処理の手順を以下に示す。

- (1) 順序制御する全パケット数と同数のスロットを用意する
 - (2) 各階層ごとに最適な送信間隔を計算する
 - (3) 優先順位の高い階層から順に、送信間隔に合うスロットを予約する
- (3)でスロットが他の階層によって予約されている場合は、そのスロットに一番近い空きスロットを探して予約する。また、最適な送信間隔は(全パケット数)を(その階層のパケット数)で割った値とする。

具体的な例を図1に示す。この例は、階層数が三つで、優先順位の高い階層から2個、3個、5個のパケットで構成されている場合である。

この方式の特徴は、

- 優先順位の高い階層ほど、最適な間隔で送信できる
- 優先順位が低くなるに従って送信間隔が乱れることである。

5.2 提案方式2

提案方式1では、それぞれの階層についてパー

表2 パケット送信順序と階層ごとのパケットロス率(2)

送信順序	階層ごとのパケットロス率					
	0	1	2	3	4	5
000111222333444555	0.0%	13.2%	39.6%	39.6%	45.2%	100.0%
012345012345012345	0.0%	0.0%	0.0%	37.0%	100.0%	100.0%

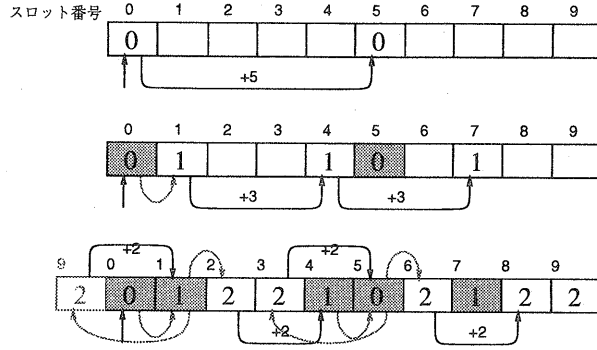


図1 提案方式1による送信順序の決定過程

ストが起きないように順序を決定した。提案方式2では更に、階層の近いパケット同士についてもバーストが起きないように処理する。

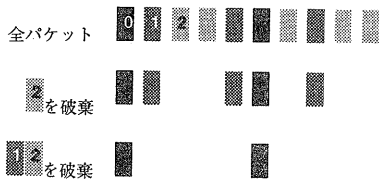


図2 階層内の順序だけ考慮した場合

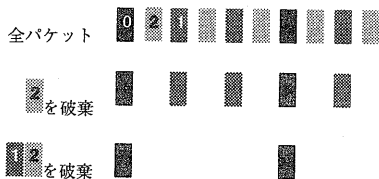


図3 階層間の順序まで考慮した場合

ルータでパケットが破棄される時、優先順位が低いパケットが選ばれ、破棄されずに残ったパケットが転送されることになる。この残ったパケットの転送間隔についてもバーストが起き難いことが望ましい。図2と図3を比較した場合、階層2を破棄した状態のパケット間隔は図3の方が一定しており、より良い送信順序であると考えられる。

このような並び順になるように順序を入れ替えるアルゴリズムについて考察した。以下にそのアルゴリズムを示す。

階層数を N とする。バッファサイズが階層0のパケット数と同じ B_0 を用意し、階層0のパケットを入れる。この初期状態で、 $n = 0$ とし以下の手順を繰り返す。

- (1) バッファ B_{n+1} を用意する。このバッファのサイズは、 $(B_n \text{のサイズ}) + (\text{階層 } n+1 \text{ のパケット数})$ 。
- (2) B_{n+1} 内で、 B_n のパケットを等間隔で送信できる位置を確保する。
- (3) B_{n+1} の空いている位置に優先順位 $n+1$ のパケットを入れる。
- (4) n を1増やし、 $n < (N-1)$ なら(1)~(4)の処理を繰り返す。

提案方式1で示した例と同じ条件の場合、図4のようにして送信順序が決定される。

5.3 アルゴリズムの評価

提案した二つのアルゴリズムの比較を行なった。順序を並び換えるデータの階層数とパケット数は、実際の MPEG データを元に設定した。

ここでは、MPEG データを I, P, B の3種類のフレームによって3階層に分割した場合について考える。各階層のパケット数は実際のデータから得られた平均的な値である8個、25個、28個を設

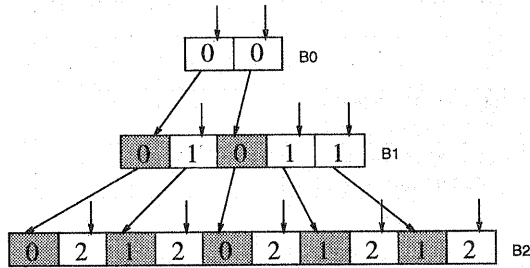


図4 提案方式2による送信順序決定過程

表3 パケット送信順序とパケット送信間隔の標準偏差(1)

方式	送信順序	パケット送信間隔の標準偏差	
		階層 0~1	階層 0
提案方式 1	01221221220121212012121201212120121212012121201212120121212122	0.7	1.5
提案方式 2	01212120212121201212120212121201212120212121201212120212121212	0.4	1.3

定する。このパラメータによるシミュレーション結果が表3である。表3では決定された送信順序と、パケット送信間隔の乱れを標準偏差によって示している。標準偏差が小さいほど送信間隔が一定していることを表わす。標準偏差の中の「階層0~1」のフィールドは階層0と階層1のパケットを転送する場合、「階層0」のフィールドは階層0のパケットだけを転送する場合のパケット送信間隔の標準偏差を表わす。提案方式2の方が間隔が安定していることが分かる。

更に、画質による階層化を行なった場合を想定し、全6階層の条件を設定してシミュレーションを行なった。前の条件の3つの階層をそれぞれ2つに分割すると想定し、各階層のパケット数は、4, 4, 12, 13, 14, 15とした。結果を表4に示す。この結果では、階層0のみを転送する場合には提案方式1の方が良い値を示している。この理由は、提案方式1は最も優先順位の高い階層から送信間隔を決めていくため、階層0のみに注目した場合には提案方式2よりも有利であるからである。それ以外の場合については提案方式2の方が良い結果を示しており、全体的に見て提案方式2の方が優れていると考えられる。

6. 遅延

送信順序を入れ替えることで、遅延がどの程度大きくなるかを考察した。送信順序を制御しない場合に比べて、

- (1) 送信ホストでの送信順序制御
- (2) 受信ホストでのバッファ管理の2箇所での遅延が増加する。

まず、送信ホストでの遅延について考える。送信ホストでは、送信順序が決定されるまで送信を開始できない。送信順序を決定するにはグループ内のパケット数を知る必要があるため、グループ内のデータが全て揃っている必要がある。よって、送信ホストでは、1グループ分のデータが揃うために必要な時間だけ遅延が発生する。ただし、元データが既にディスクなどに記録されている場合にはこの処理による遅延は無視できると考えられる。

次に受信ホストでの遅延について考える。受信ホストでは、ばらばらな順序で転送されて来るデータを元の順序に戻す必要がある。最悪の場合、グループ内で最後に送られてくるデータがデコードの最初の処理に必要な場合が考えられる。よって、受信側での遅延も、1グループ分のデータが揃うために必要な時間に等しい。

両者を加算すると、送信順序制御によって増加する遅延は最大で、[(1グループ分のデータが揃う時間) × 2] になる。

7. ジッタとバッファサイズ

本節では、受信ホストで準備すべきバッファサイズについて考察する。

受信ホストでは、パケット受信間隔のジッタを吸収するためにバッファを利用する。ここではジッタ

表4 バケット送信順序とバケット送信間隔の標準偏差(2)

方式	送信順序	バケット送信間隔の標準偏差				
		階層 0~4	階層 0~3	階層 0~2	階層 0~1	階層 0
提案方式 1	01324532453244320132453245324432/ 01324532453245320134555455545542	0.6	1.3	1.9	6.9	1.3
提案方式 2	02345124532453024531452345234502/ 34523451245304523245314523452345	0.5	0.9	1.2	2.4	1.9

タ J を以下のように定義する。

$J = \text{最大遅延} - \text{最小遅延}$

また平均転送レートを r とすると、 J 時間内に到着する平均データ量 d は $d = rJ$ と表わせる。

システム動作中は、ジッタによってバッファ内のデータ量が変動する。この変動の幅は d である。そのため、バッファサイズを d とすれば良いように考えられるが、これは間違いである。

実際に受信ホストに必要とされるバッファサイズは $2d$ である。そして、受信を開始すると、バッファの半分までデータが溜まるのを待ってからデコードなどの処理（バッファからの出力）を開始する。

バッファサイズが d では不十分な理由は、最初に貯めるデータがどの程度の遅延で届くかが分からないからである。最悪の場合には、最初に貯めるデータが最大遅延もしくは最小遅延で届くことが考えられる。最初に貯めたデータが最大遅延で届いていた場合は、その後のバッファ内のデータ量は $d \sim 2d$ の範囲で変動する。また逆に、最初のデータが最小遅延で届いていた場合は、その後、バッファ内のデータ量は $0 \sim d$ の範囲で変動する。

よって、バッファサイズは最低 $2d$ が必要である。

8. 実 装

MPEG-1 データの階層伝送を実現するプログラムを実装した。現在は、階層数はフレームレートを基準にした 3 階層のみである。また、データはエンコード済みのものを利用している。送信ホストでの主な処理は以下の三つである。

- MPEG データの階層分割
- 送信順序制御
- パケットシェーピング

また、受信ホストでの主な処理は

- 受信データを元の順序に戻す
- パケットロスの検出とその処理

● デコード

となっている。バケットロスを検出した場合は、そのバケットが属するフレーム全体を破棄している。この処理で、不完全な画面の表示やデコーダの誤動作を防いでいる。

現在利用しているソフトウェアデコーダの処理速度の問題により、実験環境^{*}ではリアルタイムデコードができない。しかし、デコード処理が現在の 2 倍程度速くなれば、リアルタイムデコードが可能なレベルである。

9. おわりに

パケットの送信順序を制御することで、階層符号化されたデータの転送効率を高めることができることを示し、送信順序を制御するアルゴリズムを提案した。また、この提案をもとに動画像送受信システムの実装を行なった。

今後の課題は、優先度に対応したルータの実装である。現在は、送信ホストで特定のバケットを送信しないという処理を行なって、擬似的にバケットロスが起きた状況を作り出している。

参 考 文 献

- 1) Deering, S. and Hinden, R.: Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification (1998).
- 2) 酒澤茂之, 滝嶋康弘, 和田正裕: ネットワーク上でレート削減可能なパケットビデオ符号化方式の検討, 信学技報, Vol. IE96, No. 39, pp. 33-40 (1996).
- 3) 酒澤茂之, 滝嶋康弘, 和田正裕: フレキシブルなビデオストリーム配送方式の検討, 信学技報, Vol. MVE96, No. 64, pp. 27-33 (1997).

^{*} MMX Pentium 233MHz, FreeBSD