

FECの損失回復に最適な冗長度を決定するためのパケットの損失傾向分析

田沢 力 山内長承

東邦大学理学部情報科学科

概要

インターネット上で高信頼性のリアルタイム転送を実現するためには、データ転送で生じるパケット損失を Forward Error Correction (前方誤り訂正、FEC) によって回復する方法が有効である。本研究では、この FEC の性能を評価するにあたって、インターネット上の一般的な通信路を用いた際のパケット損失数状況を実測し、その実測値からパケット損失にどのような傾向が見られるか、またその傾向のもとで FEC がどれだけの性能を発揮するかを分析する。

キーワード リアルタイム転送、損失パケット回復、Forward Error Correction
インターリーブング、バースト性

Analysis of the packet loss pattern for determining the redundancy for loss packets recovery with FEC

Tsutomu Tazawa
Nagatsugu Yamanouchi

Dept. Information Science, Toho University

In order to realize the high reliability real-time transmission in the Internet, the way Forward Error Correction (FEC) recovers the packet loss produced in data transmission is effective. In evaluating the performance of FEC, we measured the number of packet losses on a common communication path on the Internet, and analyze the packet loss pattern and FEC recovery performance.

1. リアルタイム転送

近年、アナログの音声や画像をデジタル化する技術が飛躍的に進歩し、それらを、TCP/IP を用いたインターネットと併用することで、デジタル音声の配信やデジタル映像のストリーミングなど、今までに無い通信の有り様が示されつつある。その中でも多くの注目を集めているのがリアルタイム転送であるが、通信基盤の確立が充分でないなどの理由から、その普及の進度は低い。その障害の最たるものは、転送時に生ずるパケット損失である。このパケット損失を回復する手段として、TCP[1]では再送 (ARQ: Automatic Repeat Request) の他、誤り訂正符号を用いた前方誤り訂正 (FEC:

Forward Error Correction) が提案されている [2]。

リアルタイム転送は、音声・動画等の再生と転送を並行して行うことによって転送開始の待ち時間を減らし、また受信端での大きなバッファリングを不要とするが、受信端でバッファしないために、転送時の遅延変動に弱い。遅延が大きく増加すると、再生上のタイミングに対して間に合わなくなり、再生上の欠落が発生する。ARQ 法を用いた損失パケットの回復の特徴としては、Ack と呼ばれる受信側からの応答を用いることと、再送という手段によってほぼ 100%の損失回復を実現することであるが、もし損失が発生したとき、受信側から Ack 応答の往復するのにかかる時間と再送の処理、および再

送にかかる時間とで、大きな遅延となる可能性がある。例えば、電話で自然な会話が成立するためには往復遅延が 300ms 程度以下である必要があるが、片道の遅延が 100ms 程度の転送路では、通常は往復遅延が 200ms 程度であるが、再送発生時には追加の遅延により 400ms 程度になり、不自然さが目立つようになる。また、1 対多通信の際に損失パケットの回復手段として ARQ を用いた場合、多数の受信端からの ACK 応答が集中し、戻りの通信路や送信端に過大な負荷をかける原因となる。ARQ 法の持つこれらの問題を回避する手段として、誤り訂正符号を用いて損失パケットを回復する FEC が提案されている[2]。FEC の原理は、送信端で送信データに冗長符号を付加し、転送路中でパケット損失によって情報の一部が失われても、冗長符号により回復しようというものである。FEC は本質的に、再送の手続きを踏まないで、それによる RTT 分の追加遅延がなく、また受信端から送信端への応答情報が不要なので、応答集中の問題も発生しない。

2. Forward Error Correction の性能モデル

FEC による損失パケット回復の性能は、複数のパケットを単位とする冗長符号処理ブロックの中で、全パケット数 n の中から冗長パケット数 r までの損失に対して回復可能である。全体のブロックで見ると、 n パケットからなる処理区間 (ブロック) の中で、パケット損失数が冗長パケット数を超えなければ、そのブロックに含まれるもとのデータが回復できるが、それを超えれば回復できない。これは、単純に見ると、平均パケット損失発生率 p 、ブロック長 n に対して、ブロック内で発生する損失パケット数の期待値は np であるから、冗長パケット数 r を np にとればすべて回復できるように考えられるが、これは正しくない。これは、ネットワーク上でパケット損失に見られるバースト性に起因する。インターネットにおいて、パケット損失の発生は、そのほとんどがネットワーク上で起こる輻輳という現象に起因すると考えられる。輻輳時のパケット損失は一時的なバッファあふれによるもので、このあふれはある期間の中に集中すると言われている (バースト性)。パケット全体が抜け落ちるパケット損失の場合、バースト長がたとえば 1000 バイト

程度あり、既存の応用に比較して非常に長いので、誤りを分散させる工夫が必要となる。誤り (または損失) の分散には、例えばインターリーブ法[3]がよく用いられる。その手法としては、複数のパケットをまとめて 1 つのブロックとしパケットを縦において並べる。横の行に対して冗長符号を計算して対応する行に置く。最後に冗長符号のための列をパケットとして送出する。これによって、1 個のパケットの損失が各冗長計算単位 (横の行) では 1 個の誤り (損失) として扱うことができる。

ブロック内の損失数を十分にカバーできるだけの冗長を加えれば、回復率を 100% に近づけることもできるが、通信コストの面で現実的ではない。従って、冗長数と回復性能を論ずるには、ブロック内でのパケット損失発生の分布モデルが必要である。

本研究を進めるにあたって、FEC の冗長度を決める指標として、パケットの損失率を用いた。ただし、FEC の機能モデルから、損失率を 0 にすることはできない。そこで、ビデオストリームのリアルタイム転送において、仮に、0.1 秒間続けてパケット損失が生じた場合、人間がエラーを不快に感じてしまうとして、FEC によるパケット回復によって 0.1 秒以上パケット損失が起こる時間を全体の 1% に抑えるための、冗長度と損失率との関係について分析を行った。

3. パケット損失の実測データとパケット損失の傾向分析

パケット損失がどのように起こるかその傾向を見るために、パケット損失の発生状況を測定した。インターネット上の 2 地点をそれぞれ送信端、受信端と定め、送信端から等間隔に等サイズのパケットを UDP により転送し、受信端での到着時刻、およびパケット損失状況を測定した (到着時刻は損失モデルには直接関係ないが、時間帯ごとのパケット損失状況を比較するために測定したものである)。送信端、受信端は、SINET を通してつながっている。送信端は学内ネットワークで直接バックボーンに接続され、受信端は 1.5Mbps のアクセス回線でバックボーンに接続されている転送はパケット長が UDP ペイロード 130 バイト 10ms 間隔で送したが、これは、約 128kbps の低速ビデオトラ

フィックを想定したものである。実測は、転送中に失われたパケットのシーケンス番号を記録することにより、どの時間に損失が起きたかを測定した。送出したパケット数はいずれも720000(2時間)である。また、0.1秒以上の損失がどのような分布であるかを推定するため、パケットの損失間隔について平均と標準偏差を調べた。

標本	測定日	総数	損失総数
1	2001/10/09 13:30	720000	
2	2001/10/10 14:00	720000	
3	2001/10/11 15:30	720000	
5	2001/10/15-1 13:00	720000	
6	2001/10/15-2 15:00	720000	
7	2001/10/17-1 13:00	720000	
8	2001/10/17-2 15:00	720000	
9	2001/10/17-3 17:00	720000	
10	2001/10/18-1 13:00	720000	
11	2001/10/18-2 15:00	720000	

表1 UDPパケット送受信の実測データ

得られたパケットの損失確率が一定であれば、損失総数とパケットの総数から損失率を求め、それによって最適な冗長度が得られると言えそうだが、実際は、トラフィックのパケット損失の傾向はバースト性を有しているため、損失確率は一定であるとは限らず、全区間に対して同じ冗長度を付加して回復を試みても、要求した回復率を実現できない。パケット損失のパターンがバースト性を有していることを示す例を、図1に挙げる。

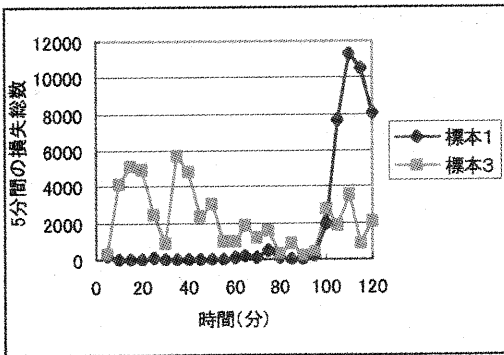


図1 5分ごとの損失数の遷移

図1は、得られた標本の中から損失総数が近い

ものを抜き出し、5分ごとにパケット損失数がどのように変化するかを図示したものである。二つの標本は、損失総数が近いにも関わらず、その損失数の傾向にはかなりの差が見られる。また、それぞれの標本についても、時間ごとの損失数には変動がみられ、一定とは言い難い。よって、損失率と冗長度との関係性を調べるには、バースト性の影響がより小さい時間間隔で調べる必要がある。そこで、それぞれの標本について5分間隔で区切り、その損失数と損失間隔を調べた。

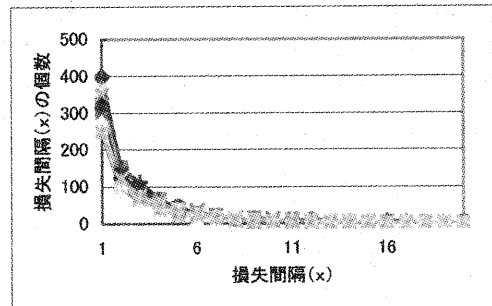


図2 損失間隔の分布(5分間の損失数が2001~3000の場合)

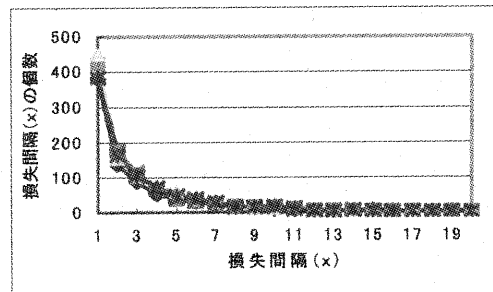


図3 損失間隔の分布(5分間の損失数が3001~4000の場合)

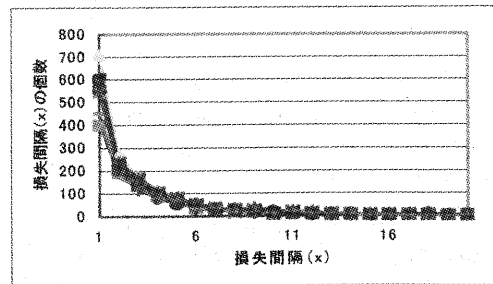


図4 損失間隔の分布(5分間の損失数が4001~5000の場合)

図 2~4 は、標本 1~10 について、5 分間の損失数がそれぞれ 2001~3000、3001~、~4000、4001~5000 の範囲にあるものについて整理し、その損失間隔の分布を図示したものである。これらの図から、5 分間の損失間隔の分布はほぼ一定になることがわかった。

5. 損失率と冗長度との関係

得られた標本について、5 分間ごとの FEC による損失回復のシミュレーションを行った。インターリーブ長を $n=50$ とし、0.1 秒間損失が続く時間を全体の 1% に抑えるという条件のもとで、損失率と冗長度との関係を分析すると、図 6 のような分布が得られた。

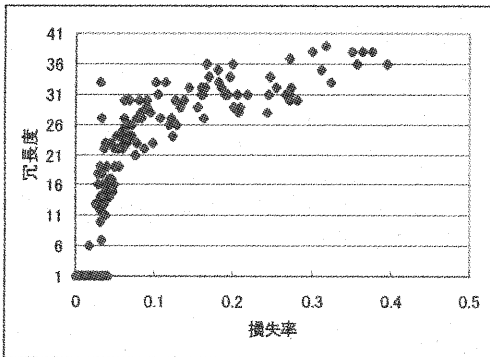


図 6 損失率と冗長度の関係

この図から、損失率と冗長度の関係について相加相乗平均 5 分間の損失率から冗長度を決定することで、0.1 秒間損失が続く時間を 5 分間のうちで 1% に抑えることができる。

6. 考察

以上の分析をまとめると

- ・パケットの損失の傾向を調べる際には、パケット損失のバースト性を考慮し、バースト性が影響のできるだけ小さい時間間隔で調べる必要がある。
- ・5 分ごとの損失間隔を調べると、パケットの損失数 (損失率) が同じ範囲にあるものであれば、損失数の分布がほぼ一定になっている。
- ・5 分間隔で FEC を用いると、0.1 秒間損失が続く時間を 5 分間のうちの 1% 以下に抑え

ようとした場合、損失率と冗長度との関係を示す分布は、ある曲線にそうように作られる。

6. 結論

今回、インターネット上での損失パケットを回復する手段としての FEC の性能について分析を行ったが、リアルタイム転送のビデオストリームに対して FEC を用いた場合、人間がパケット損失による画像の劣化を不快と感じない条件として損失が続く時間 0.1 秒以上である時間が全体の 1% に抑えれば良いと仮定したとき、5 分間の損失率から冗長度を決定することができる、という結論に達した。

今後の課題としては、バースト性の影響がより低くなる時間間隔を導くこと、また冗長度 r とインターリーブ区間 n の長さとの関係を調べ、FEC をより効率良く用いるための r 、 n を決定すること、さらに冗長度と損失率との関係についてより詳細な分析を行い、冗長度を決定するための式を導くことである。

参考文献

- [1] Postel, J: Transmission Control Protocol. RFC 793 Internet Society. (1981)
- [2] Rizzo, L: Effective Erasure Codes for Reliable Computer communication Protocols. ACM Computer Communication Review, 27-2, pp. 24-36. (1997)
- [3] 江藤良純、金子敏信: 誤り訂正符号とその応用. オーム社. 1996