

前方誤り訂正による損失パケット回復の インターネットマルチメディア転送への応用

東邦大学理学部情報科学科 山内 長承
〒274--8510 船橋市三山 2-2-1
東邦大学理学部情報科学科
TEL: (047) 472-1176 FAX: (047) 474-6821
email: yamanouc@HyperResearch.com

概要

本論文では、インターネット上のデータ転送で生ずるパケット損失を前方誤り訂正(FEC)によって回復する技術を取上げ、輻輳の変動によるパケット損失率の変動に対する対策、具体的には、マルチメディアデータを優先度に応じて複数の層に分割し、各層に優先度に応じた冗長度を持たせることにより、パケット損失率に対して適応的に転送・再生する方法について検討する。狭帯域のTV電話を例として、遅延制約下で傾斜優先度付きFECの設計値が存在することを示すとともに、回復性能の評価を試みる。ランダム損失に基づく二項分布モデルと実測値を比較し、回復性能の値、両者の差の評価、今後のモデリング作業について触れる。

Internet Multimedia Transmission with Packet Recovery by Using Forward Error Correction

Nagatsugu Yamanouchi

Department of Information Science, Toho University

This paper discusses packet recovery by using forward error correction (FEC). We propose a method of assigning different redundancy according to the priority of the layered transmission of multimedia data, in order to avoid the problem of recovery failure due to the packet loss rate variation caused by congestion. An example configuration of the layers and redundancy assignment is introduced to show its feasibility, and discusses its recovery capability. The recovery rate based on the binomial packet loss model and real loss patterns obtained from a measurement are compared and future modeling directions are discussed.

1. はじめに

近年インターネットにおいて、TV 会議や中継など、動画・音声を含むマルチメディアデータをリアルタイム転送・再生するアプリケーションが利用されている。TV 会議では CUSeeMe¹、Vic/Vat²、NetMeeting³など、またライブ・アーカイブビデオの中継では RealVideo⁴や IP-TV⁵など、さまざまなシステムが使われているが、これらは輻輳などの理由によりパケットが紛失すると、音質・画質が劣化して集中して視聴することができなくなる場合

が多い。

これに対して、本論文では RSVP 等の帯域専有を用いてパケット損失をほぼ0にするのではなく、ある程度のパケット損失を許す環境で前方誤り訂正 (FEC, Forward Error Correction) を用いて損失パケットを回復し、更に FEC での問題となる冗長度を越えるパケット損失が時々発生しても音声・動画を滑らかに再生するために、階層符号化を施した結果に傾斜冗長度を付けて転送する手法を提案し、評価したい。

パケット損失の回復手段を大別すると、紛失したパケットを再送信する再送法 (ARQ, Automatic Repeat ReQuest, TCP[2]で用いられている)、誤り訂正符号により冗長データを付加して送出することによって受信側で欠落部分を回復する前方誤り訂正法 (FEC, Forward

¹ <http://www.whitepine.com>

² <http://www.lbl.gov>

³ <http://www.microsoft.com>

⁴ <http://www.realnetworks.com>

⁵ <http://www.cisco.com>

Error Correction)[3]があるが、両者を比較すると、

- 再送による回復は遅延が大きい。再送回復では受信側で損失検出、再送要求、送信側で再送、の手順を踏むため、パケット往復時間(RTT)が余分に必要となり、電話などの対話型のアプリケーションではこの遅延が許容できない。FEC 法ではこの遅延は発生しない。
- 再送による回復は、受信側から送信側に再送要求を示す応答が送られるため、受信端末数の大きい 1 対多通信の場合に応答が送信側をあふれさせる[1]。FEC による回復では、この溢れ問題は発生しない。
- 他方、FEC による回復は、輻輳の変動によりパケットの損失率が変化した場合に回復限界を越える可能性がある。FEC は送信側で決める冗長度によって回復可能なパケット損失率の上限が決まり、これを越える損失が発生すると回復できなくなる。

要するに、転送遅延の制約がある電話などの対話アプリケーションや、受信端末数の大きい 1 対多マルチキャスト配信では再送法では損失パケット回復が困難であり、FEC による回復によって可能になるが、FEC 法は輻輳の変動により回復限界を超えてしまう欠点がある。本論文では、輻輳によるパケット損失率の変動を分析するとともに、変動に対する 1 つの解決法として、階層符号化したマルチメディアデータの傾斜優先度付き転送[4][5]の考えを、FEC によるパケット回復に援用する場合の回復性能について検討する。

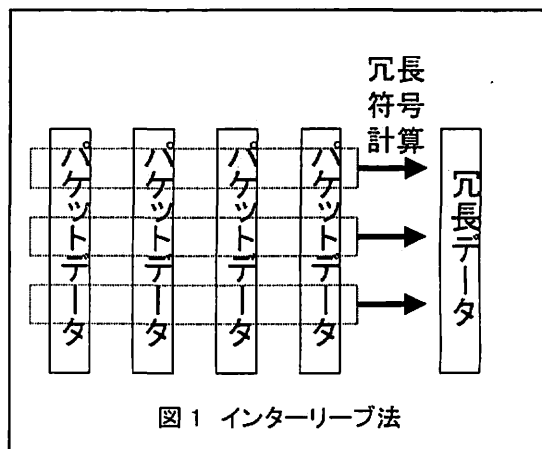
階層符号化されたデータの傾斜優先度付き転送とは、音声・動画などのストリームデータを再生時の重要度が異なる複数のストリーム(層)に分解し、重要度に応じた優先度をもって転送するという技術である。たとえば画像の場合、解像度の粗い部分のデータとその粗い画像を補間して細かい部分を再現するデータに分解すると、細かい部分のデータが失われても粗い部分のデータだけでおおよその画面が再生できる。粗い部分を

優先度高く転送すれば、パケット損失が発生しても粗い部分が優先的に転送され、受信側では粗い部分のデータを用いておおよその画像が再生できる。

傾斜優先度付き転送の考え方は、パケットに記された優先度に応じてルーターで選択的な転送を行なう方法[4]や、マルチキャストにおいてはグループへの参加離脱を受信端末が制御できることを利用して、優先度別の複数の転送グループを準備しておき、受信端末が高優先度側からパケット到着状況に応じた範囲のグループに受信参加することにより輻輳制御する Layered Multicast[5]の形で提案されてきた。本論文ではFEC に対して同様の考え方を適用することにより、パケット損失率の変化に対応する手法を検討する。

2. FEC の損失パケット回復への適用

FEC は、通信路の雑音や磁気記録の誤りを訂正する目的に広く使われているが、多数のビット誤りが連続したバースト誤りの訂正は冗長符号だけでは難しい。パケットの紛失は、数 1000 から 10000 ビットを越える非常に長いバースト誤りに相当するので、たとえばインターリーブ法[6]を用いた対策が用いられることが多い。インターリーブ法は誤りを分散させてしまう手法で、損失パケット回復に適用すると図 1 のようになる。複数のパケットをまとめて 1 つのブロックとし、パケットを縦に置いて並べる。横の行に対して冗長符号を計算し対応する行に置く。送出は、列毎に元のパケットのとおりに送出し、最後に冗長符号のための列をパケットとして送出する。



誤り回復の限界は、横の行に対して付加する冗長データの量に依存する。雑音などによるビット誤りの訂正では、回復個数の2倍以上の冗長データを加えなければならないとするが、ここでは誤り位置が事前にわかるため、回復個数と同数の冗長データを加えればよい(消失誤り)。また、誤り訂正符号として効率がよいとされるリードソロモン符号などを用いる場合、データ長と冗長符号量の組合せに制約が出るが、短縮型(shortened)コードを用いることにより、任意長のデータを扱うことができるものとする。

3. パケット損失の分散

前節で紹介したインターリーブを用いた FEC によるパケット回復の性能について考察してみよう。この方式では、図1に示す1つのインターリーブ処理区間(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ブロック全体が回復できるが、超えれば全体が回復できない。すなわち区間内でパケット損失がいくつ発生するかによる。パケット損失発生のもっとも単純なモデルとして、パケット損失がお互いに独立でランダムに発生するモデルを考えると、区間内での損失発生確率は確率過程の理論により二項分布で表せる。具体的には個々のパケットの損失率 p 、区間長 N とすると、 x 個の損失が発生する確率 P_x は ${}_n C_x p^x (1-p)^{(n-x)}$ のように分布し、冗長パケット数 d に対して回復できる確率は $\sum_{i=0}^d P_x$ となる。この損

失個数の二項分布は平均値が Np 、分散が $Np(1-p)$ 、標準偏差が $\sqrt{Np(1-p)}$ となる。

FEC を設計する上で、インターリーブ処理区間 N と冗長パケット数 d を選択する必要がある。たとえば $N = 10$ 、 $d = 1$ とすると、10 パケットのうち 1 パケットを紛失しても回復できることになり、これはパケットの平均損失率 p が 10% であることに対応すると思いがちであるが、上記モデルを用いると、この区間で回復できる確率すなわちパケット損失が 0 または 1 である確率は 0.74 程度になる。この回復率をいろいろな場合について示したのが図2である。ただし、この回復率は回復不能区間のパケットを一切切り捨てた場合であって、回復不能区間であっても正常に受信できたパケットはそのまま利用することができるので、最終的に受信できるのは 0.96 程度になる。図3はこの修正を施した後の最終回復率を示している。

ところで、パケットの回復率はブロック内に対する冗長パケットの数 d/N で決まる、言い換えると (N, d) の組合せが $(10, 1)$ であっても $(20, 2)$ であっても同様に回復できる、と考えがちであるが、 p を一定としたとき d/N が同じであってもインターリーブ区間長 N が大きいと(ランダム紛失の場合)大数の法則により分布が平均値の周りに集まってくるので、回復率は高くなる。たとえば $(10, 1)$ の回復率が 0.74 であったのに比べ、 $(20, 2)$ での回復率は 0.92 となる。他方、インターリーブ区間長を大きくするとそれだけ遅延が大きくなり、短遅延を要

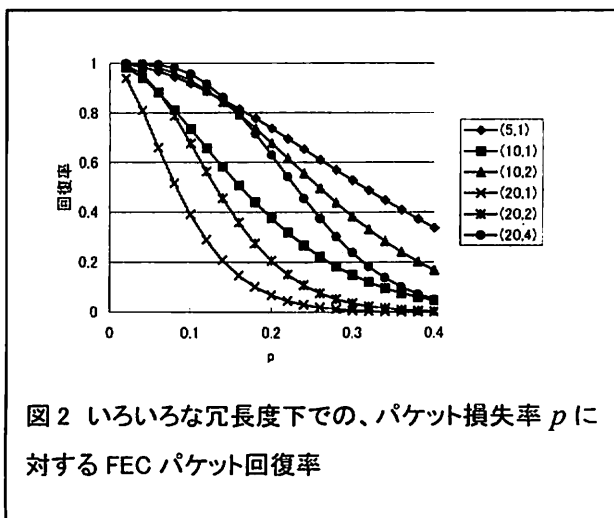


図2 いろいろな冗長度下での、パケット損失率 p に対する FEC パケット回復率

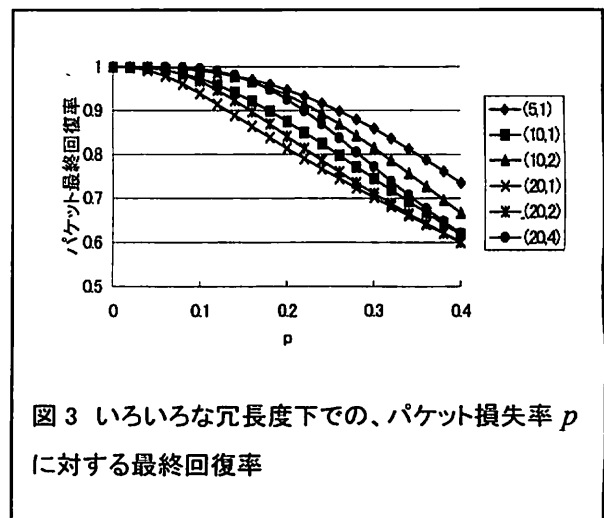
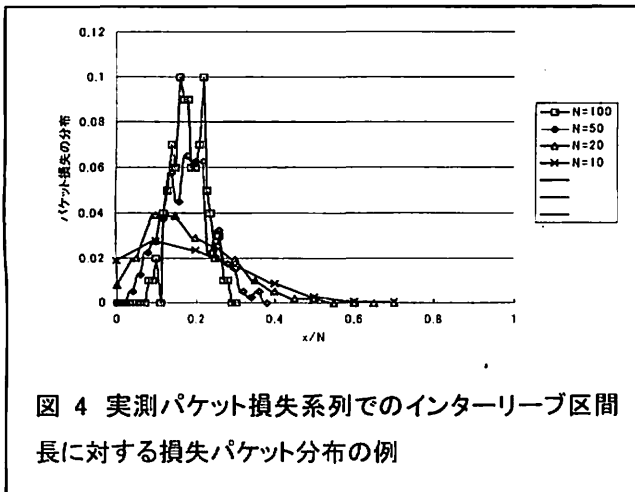


図3 いろいろな冗長度下での、パケット損失率 p に対する最終回復率

求される対話型のアプリケーションでは大きくすることができない。図 2, 3 の結果を次節で傾斜優先度の設計に用いる。

二項分布によるパケット損失モデルは損失がお互いに独立でランダムに発生するという仮定に立脚しているが、インターネット上の輻輳の発生状況はランダムでなく自己相似分布に従うという報告がいくつかなされている[7]。この点を、二項分布と実際のインターネット上でのパケット損失の測定結果を比較することによって、確認しておこう。実測は国内の A 大学から 10ms 間隔でペイロード 130 バイトの UDP パケットを送出し(占有帯域約 128Kbps)、B 大学を受信側として受信状況(パケットシーケンス番号、受信時刻)を観測して、トレースデータを作成した。送出間隔、ペイロード長は後述する FEC の設計データを参考にして定めた。インターネットから受信側 B 大学へ結ぶリンクは 1.5Mbps で、平日の午後はかなり輻輳が激しく、平均パケット損失は 15% を超えることも多い。

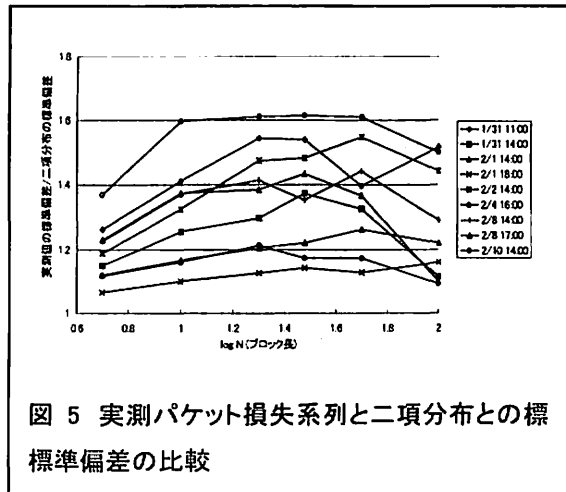
図 4 は、トレースデータを 4 種類の区間長 N で区切ったときのインターリーブ区間内の損失パケット数の分布を表したものである。縦軸は異なる N に対する分布を比較するため、密度(損失数/区間長)としている。図 4 に見られる通り、パケット損失率の分布は区間長 N が増加するとともに平均値の周りに集中しており、二項分布モデルで予測した性向が観測できる。なお、図 4 では分布のピークが、区間長の小さいときにやや小さいほうへ偏倚している。



また図 5 は、パケット損失分布の広がり、実測値と二項分布で比較するために、測定トレースデータにおける標準偏差と二項分布での標準偏差の比を表したものである。横軸は仮定したいいくつかのインターリーブ区間長(対数スケール)である。図 5 では、実測値と二項分布の標準偏差の比は 1.1 から 1.6 程度を示しており、実測値の標準偏差は二項分布よりやや大きいことがわかる。また、区間長の影響は今回の実測データからは明確な結果は読み取りにくい。損失分布が二項分布より大きくなることについて、インターネット上のトラフィックがランダム発生でなく自己相似の分布になるという主張[7]の傍証になっていると考えられる。

4. 傾斜優先度をもつ FEC の設計と性能予測

前述したように、FEC は送信時に与える冗長度によって損失回復の上限が決定されるので、損失率の変動に対して対応できない。トラフィック量の変動によるパケット損失の変動に対応するために、転送データが階層的エンコーディングを施されたマルチメディアデータである場合を対象として、その優先度により異なる冗長度を与える FEC を検討する。たとえば、優先度の異なる H, M, L 層からなるデータを転送とする。たとえば H 層を音声、M 層を MPEG 動画の I フレーム、L 層を P, B フレームとすることが考えられる。数値例として高優先度の H 層データに対して 25%、中間の M 層に対して 10% の冗長度を加え、低優先度の L 層に対しては冗長度を加えない構成を考える。これによって、10% 前後のパケット損失がある場合に H 層はほとんどの場合回



復されるが M 層が損失の分布状況に応じて回復できたりできなかったりすることになる。

まず初めに、遅延制約の中でこのような傾斜優先度を持つ転送が設計できるかを検討する。遅延の制約の厳しい対話型アプリケーションとして、比較的低速の TV 電話を仮定する。文献[8]に示したように、具体的には 16Kbps の音声データ、64Kbps の動画データがあるものとし、さらに動画が粗い部分の 32Kbps と細かいところを補う部分の 32Kbps の 2 つに分割されるとする。また、FEC によって新たに発生する転送遅延を最大 50mS までにとどめることを条件とする。これによってインターリーブ区間へ滞留できるデータ量が 50mS 分に限定され、16Kbps 音声では 100B にあたる。

パケット送出間隔を 10mS に選ぶ。上記の 50mS 区間で発生する H 層の音声 100B を 4 パケットに分割し、4 データに対して 1 データの冗長度を加え、 $(N, d)=(5, 1)$ とする。このブロック長により音声は 50mS のインターリーブ遅延となる。中優先度の M 層の動画像部分は、冗長度 $(N, d)=(20, 2)$ つまり 18 データに対して 2 データの冗長度を加える。遅延は 200mS となり、画像と音声と同期(リップシンク)しない可能性があるが、音声と同じ遅延とするためにはブロックを 5 としなければならず $(5, 1)$ または $(5, 0)$ を選択せざるを得ない。ここでは動画層は遅延制約を満たすのをあきらめ、中間的な冗長度を選択してみた。低優先度の L 層は冗長度なしとする。

音声と動画データを別パケットとするのではなく、同一パケット内に入れ込んで送ることにより、パケットヘッダー(IP、UDP、RTP、FEC シーケンス番号ヘッダーを合わせて 44B)の相対的なオーバーヘッドを小さくする。これは必ずしも M、L 層の動画データに対して H 層と同じインターリーブ区間長を使うことを意味しない。パケットの送出時間間隔を同一にするという制約は付くが、インターリーブ区間長を層によって変えることはできる。ここでは H 層を $(5, 1)$ 、M 層を $(20, 2)$ とし、H 層の 4 区間に対して M 層を 1 区間とする。M 層区間の時間は 200mS となり、32Kbps の発生率の動画デ

ータに対して 800B、これを 18 パケットに分割すると 45B(小数点以下切り上げ)となる。L 層は冗長データを追加しないので、32Kbps の動画に対して単純に 10mS に対して 1 パケットを発生し、1 パケットは 40B となる。冗長データを含めた総転送量は、ヘッダーを除くと、全層とも冗長度なしの場合 80Kbps、傾斜優先度の場合 88Kbps、全層を $(5, 1)$ の冗長度にした場合 100Kbps になるが、ヘッダーを加えるとそれぞれ 113Kbps、123Kbps、135Kbps に相当する。

次に、傾斜優先度をもつ FEC の回復性能を評価する。既に図 4、図 5 に示した二項分布モデルによるパケット誤り率 p の変動に伴う回復後の受信パケット率(最終回復率)を参照すると、次のようなことが言える。H 層は冗長度 $(5, 1)$ 、M 層は $(20, 2)$ 、L 層は冗長度なしに対応し、各々の最終回復率を表したものが図 6 である。二項分布のグラフを比較すると、平均パケット損失率 p が 10% 付近までは L 層に比べて H、M 層ともに高い回復率を示し、10-20% 程度では M 層の回復率は L 層に近づいているが H 層は高い回復率を示している。これは期待した階層別回復を実現できると言えるだろう。

他方、実測トレースを用いた最終回復率は、二項分布をかなり下回ることがわかる。実測トレースに対して $(5, 1)$ 、 $(20, 2)$ の FEC を施した結果の最終回復率を、図 6 中に実測 H 層、M 層としてプロットした。これは、実測した 9 種のトレースについて平均損失率 p を求め、 p と最終回復率で表される座標点をプロットしたものである。実測値は二項分布の最終回復率をかなり下回って

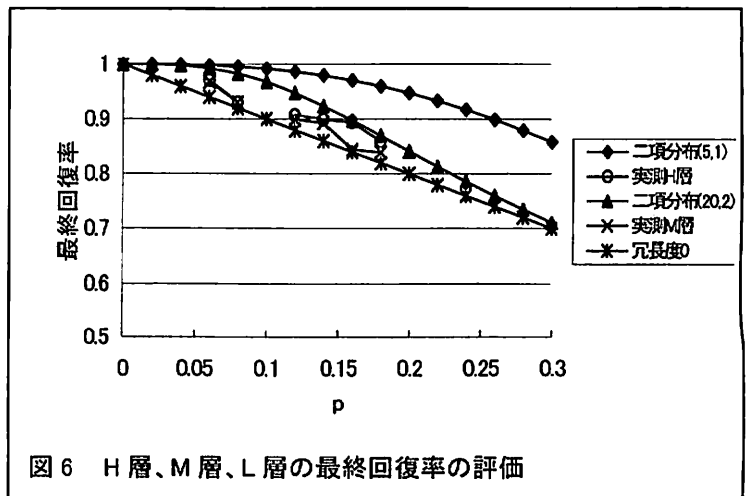


図 6 H 層、M 層、L 層の最終回復率の評価

るが、これは実測値の標準偏差が二項分布より大きく、回復できないパケットが多いことに対応している。傾斜優先度の観点からは、実測 H 層が実測 M 層をやや上回っている点では優先度に傾斜をつけた意味があるが、二項分布に見られるほどの差が出ていない。

6. まとめ

以上をまとめると、

- FEC による損失パケット回復において、輻輳変動によるパケット損失率変動に対応するために、転送データの階層の優先度に応じて異なる冗長度を割当てる傾斜型優先度付き FEC を設計することができた。
- FEC において冗長度 d とインターリーブ区間長 N の選択を考えると、回復率を評価するための単純なモデルとして、ランダム損失に基づく二項分布が考えられる。この場合、傾斜優先度機構は図 6 の二項分布の場合に示すように、当初期待した効果がモデルからも予想される。また性質として、同じ冗長率 d/N をもつ (N, d) の組について、パケット損失率 p が小さい範囲では区間長 N を大きく取るほど回復率が高い。
- 二項分布とインターネット上の 2 地点間でのパケット損失の実測値を比較すると、実測値の方では損失が偏在しており、回復性能が低い。これは、パケット損失が独立でなく自己相似型の分布をもつという既存の説から定性的に説明できるが、定量的な説明は更に検討が必要である。傾斜優先度機構は図 6 の実測の場合に示すように、層間での差はある程度出たものと二項分布で予想したほど大きくなかったものがあつた。

今回の報告は、傾斜優先度機構を FEC の冗長度に適用するというアイデアの妥当性について、設計可能な適切な設計数値が存在することと、その回復性能において適切な値を得られることを検証することを意図したものである。設計可能性については 1 例のみであつたが可能であるとの印象をもつことができたが、性

能評価においてはモデルの検討の第 1 歩をようやく踏み出した程度であり、今回の結果はランダム損失に基づく二項分布では不十分で自己相似など他のモデルを検討しなければならない。傾斜優先度付き FEC を適用する際、回線のパケット損失の測定結果から損失モデルのパラメータを抽出し、遅延の制約下で最適な冗長度とインターリーブ区間長の組合せを導くことができることが望まれる。

参考文献

- [1] 山内長承、城下輝治、佐野哲央、高橋修: 高信頼同報バルク転送機構. 情報処理学会論文誌, 39-6, pp.2009-2019. June, 1998.
- [2] Postel, J.: Transmission Control Protocol. RFC 793, Internet Society. (1981)
- [3] Rizzo, L.: Effective Erasure Codes for Reliable Computer communication Protocols. ACM Computer Communication Review, 27-2, pp. 24-36. (1997)
- [4] 尾上裕子: QoS に基づくマルチキャスト通信. 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会報告 63-7. pp. 49-56. (1994)
- [5] Vicisano, L. and Crowcroft, J.: One-to-many reliable bulk-data transfer in the mbone. HIPPARCH 1997. (1997)
- [6] 江藤良純、金子敏信: 誤り訂正符号とその応用. オーム社. 1996.
- [7] Leland, W. E., Taqqu, M., Willinger, W. and Wilson, D. V.: On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. IEEE/ACM Trans. On Networking. 2-1, pp. 1-15, 1994.
- [8] 篠原圭、山内長承: インターネットマルチメディア転送のための補償度クラス別前方誤り訂正方式. 情報処理学会第 60 回全国大会予稿集 1Q-01. (2000)
- [9] 山内長承: 前方誤り訂正による損失パケット回復のインターネットマルチメディア転送への応用. 情報処理学会第 61 回全国大会予稿集 4H-03. (2000)