

複数の誤り制御手法による階層型ストリーミングの品質制御機構の実現

長尾 寛行[†] 中村 豊^{††} 藤川 和利^{††} 砂原 秀樹^{††}

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

^{††} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学センター 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †hiroy-na@is.aist-nara.ac.jp, ††{yutaka-n,fujikawa,suna}@itc.aist-nara.ac.jp

あらまし インターネットでの映像配信サービスでは、高い品質とリアルタイム性が要求される。そのため品質を保証する階層符号化技術や誤り制御技術が用いられることが多い。しかしながら、これらの技術を用いることで品質を保証する代わりにリアルタイム性を損なう恐れもある。本研究ではリアルタイム性を確保した映像配信サービスを実現するため、Forward Error Correction (FEC) と Automatic Repeat reQuest (ARQ) の誤り制御方式を併用し、ネットワーク遅延の状況に応じてこれらの制御方式を適用する手法を提案する。この遅延を求めるため、FEC と ARQ の損失率ごとのパケット到着時間をシミュレーション実験により示す。また、この結果から FEC と ARQ の有効範囲を遅延と損失率に対して示し、考察する。

キーワード 映像配信サービス, リアルタイム性, FEC, ARQ, 遅延, パケット到着時間

Quality Control of Layered Streaming Using Multiple Error Correction Methods

Hiroyuki NAGAO[†], Yutaka NAKAMURA^{††}, Kazutoshi FUJIKAWA^{††}, and Hideki SUNAHARA^{††}

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology
Takayama-cho 8916-5, Ikoma-shi, Nara, 630-0101 Japan

^{††} Information Technology Center, Nara Institute of Science and Technology
Takayama-cho 8916-5, Ikoma-shi, Nara, 630-0101 Japan

E-mail: †hiroy-na@is.aist-nara.ac.jp, ††{yutaka-n,fujikawa,suna}@itc.aist-nara.ac.jp

Abstract In the video streaming service over the Internet, since high quality of the contents and real-time delivery are required, the layered encoding technology and error control technology of guaranteeing quality are used in many cases. However, there is also a possibility of spoiling real-time, instead of guaranteeing quality by using such technology. In this paper, to realize video streaming service which real-time capability, we propose a new technique which apply Forward Error Correction (FEC) and Automatic Repeat reQuest (ARQ) We have done experiments to investigate the effectiveness of FEC and ARQ. From the result, the effective usage of FEC and ARQ is determined according to the network delay and the packet loss rate.

Key words Streaming service, Real-time, FEC, ARQ, Delay, Packet arrival time

1. はじめに

インターネットの利用者数は増加し、またインターネット上で利用できるサービスも多様化している。このようなサービスの多様化が進むにつれインターネット上を流れる情報もテレビ電話や蓄積型動画データなど映像と音声を含むマルチメディアデータへと多様化している。

現在のインターネットの通信はベストエフォート型である。この方式は、十分な帯域が確保されていても、常に変化するト

ラフィックによってパケット損失や遅延が起り、ネットワークの品質が保証されない。特に、動画や音声のようなマルチメディアデータは、リアルタイム性や高速性が要求されるため UDP (User Datagram Protocol) が用いられることが多い。そのため、信頼性は保証されず、先に述べたような、パケット損失や遅延による品質への影響が大きくなる。

このような品質への影響を改善するため、階層符号化や誤り制御技術が用いられることが多い。階層符号化技術は、マルチメディアデータを階層化することで受信者の環境に適したマル

チメディアデータを受信する技術である。また、誤り制御技術は損失したパケットを復号化することでマルチメディアデータの信頼性を確保することができる技術である。誤り制御技術では、データの信頼性に着目しているため、リアルタイム性を損なう場合があり、品質とリアルタイム性はトレードオフの関係となる。マルチメディアデータを取り扱うサービスでは、リアルタイム性と高い品質が要求されるものも存在する。

したがって、本稿ではこれらの技術を用いてリアルタイム性を確保しつつ、高い品質を保てるような制御機構の実現を目指す。

2節では、マルチメディアデータの品質を維持するための関連技術について、それぞれの特徴を述べる。3節では、関連技術に関する既存研究について紹介するとともに、本研究の位置づけを比較する形で明らかにする。また、既存研究を踏まえた上でリアルタイム性を重視したシステムについて提案する。4節では、提案システムの設計について述べ、採用した誤り制御技術の実装方法について述べる。5節では、シミュレーション環境について述べ、誤り制御部分のシミュレーション結果について紹介する。また、リアルタイム性を確保したパケット損失率と遅延に対する誤り制御技術の有効範囲を示す。6節では、本稿をまとめ、今後の課題を挙げる。

2. 関連技術

2.1 階層符号化

階層符号化技術は画像データを最低限の画質を得るための基本階層と基本階層より画質を向上させるための拡張階層に階層化する技術である(図1)。画像データを複数の階層化し、階層が上がるにつれて元画像に近づく。このような技術はインターネットでの映像配信サービスにおいて、様々な受信者の環境に対応するために不可欠である。

階層化の手法としては

- サンプリング密度によるもの
- 周波数成分によるもの

が一般的である。

サンプリング密度とは、画質のことであり、画像に対してどれだけの信号をサンプリングするかで決まる。サンプリング個数を増やせば高画質な画像が得られ、逆にサンプリング個数を減らすことで低画質な画像を得ることができる。

周波数成分によるものでは、画像を離散コサイン変換(Discrete Cosine Transform : DCT)などにより周波数領域に変換し、低周波数成分から順番に階層を構成する。

2.2 誤り制御

インターネット上での通信では、伝送路や伝送機器などで情報の誤りを生じる可能性がある。そのため通信されるデータに信頼性をもたせる誤り制御技術が利用されている[1]。誤り制御技術は以下の2方式に分けられる。

- 誤り訂正方式 (Forward Error Correction)
- 誤り検出再送方式 (Automatic Repeat reQuest)

以下にそれぞれの特徴について述べる。

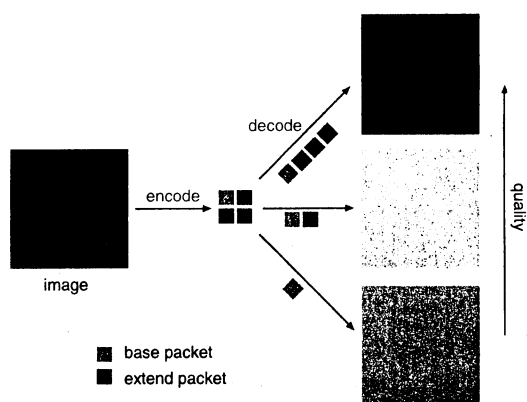


図1 階層符号の画像品質

2.2.1 Forward Error Correction: FEC

誤り訂正方式 (Forward Error Correction:FEC)は情報を伝送する前の段階で誤り訂正能力のある符号化を行う方式である。伝送時の符号誤りが受信ホストでの復号時に訂正され、正確で遅延の小さな伝送が可能となる。しかし、符号の誤り訂正能力は符号に加えられる冗長性に密接に関連し、高い誤り訂正能力を持たせるためには冗長性を高める必要がある。しかし、冗長性を高めると伝送効率を犠牲にすることもある。FECは、ARQのような再送を必要とせず、遅延を抑えることができるため、リアルタイム性を要するデータ転送に用いられる。ただし、サーバ/クライアントで符号化/復号化に要する演算処理が増加することや、バーストエラーが発生したときには符号回復性能が低下する欠点もある。

誤り訂正方式で用いる符号方式は多様である。最も基本的な誤り訂正符号は Hamming 符号である。しかし、IETF (Internet Engineering Task Force) の RMT WG (Reliable Multicast Transport Working Group) では、インターネットでのデータ転送に適した FEC 符号として Tornado 符号や Reed-Solomon 符号を推奨している [2]。

また FEC には送信方法として Proactive 型 FEC と Reactive 型 FEC の 2 通りがある。Proactive 型 FEC は第 1 回目のオリジナルパケットの送信時に FEC の冗長パケットを追加するものであり、特定範囲のランダムな誤り率変動に対して有効である。しかし、バースト的に生じた大きな誤り率変動には対処できない。Reactive 型 FEC はクライアント端末からの再送要求に基づいて冗長パケットを再送するものであり、ランダムな誤り率変動と特にバースト的な誤り率変動に対して優れた誤り回復を期待できる。なお、一般的に FEC として用いられているのは Proactive 型である。

2.2.2 Automatic Repeat reQuest: ARQ

誤り検出再送要求方式 (Automatic Repeat reQuest: ARQ) で伝送される情報は誤り検出能力のある符号を用いて符号化を行う方式である。データ受信ホストでは、受信したパケットの誤りを検出し、受信情報の正誤を ACK (Acknowledgement) としてデータ受信ホストに返送する。誤った場合には再送を要

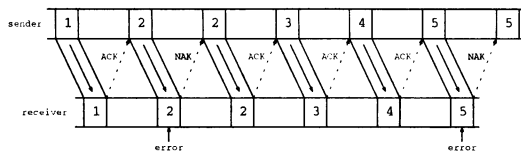


図 2 Stop-and-wait ARQ

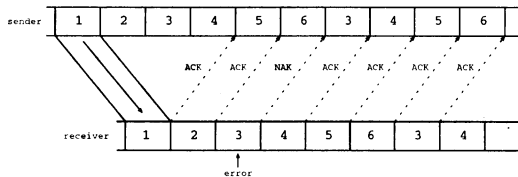


図 3 Go-back-N ARQ with $N = 4$

求する。符号や伝送制御プロトコルが簡易であり、データ受信ホストに過度の情報処理機能を要しないため、現在広く用いられている方式である。RTT による影響が大きくリアルタイム性を損ない易い欠点をもつ。

ARQ については基本的なものとして以下の 3 方式に分けられる。

- Stop-and-wait ARQ
- Go-back-N ARQ
- Selective-repeat ARQ

Stop-and-wait ARQ

Stop-and-wait 方式を図 2 に示す。最も基本的な再送方式である。送信待ちになるパケットは最大でも 1 つであり ACK を受信してから次のパケットを送信するためエラーが起きなくてもデータの送信レートは低くなる。

Go-back-N ARQ

Go-back-N 方式を図 3 に示す。Stop-and-wait 方式と比較すると連続してパケットが送信できるためネットワークの利用効率は上がる。しかし、Window size (N) の決め方やエラーが発生したときに Window 中の N 個は再送しなければならないため送信側にバッファを用意する必要がある。また ACK が返ってこない場合、Window 中にあるデータすべてを再送しなければならないためエラーレートが高い状況では適さない。逆にエラーレートが高い場合は、1 つずつデータを送信する Stop-and-wait 方式の方が効率は良い。

Selective-repeat ARQ

Selective-repeat 方式を図 4 に示す。基本的には Go-back-N 方式と同様の Window 方式を用い、NAK が返ってきたパケットのみを再送する。また同様に送信側にバッファが必要となり、その大きさは Window size の 3 倍必要となる。

3. 既存研究を考慮したシステムの提案

3.1 既存研究

ここでは、関連技術を用いた既存研究について、その有効性と問題点を挙げる。

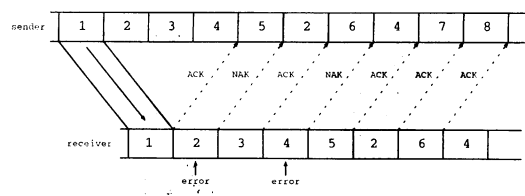


図 4 Selective-repeat ARQ

3.1.1 階層符号化に関する既存研究

階層符号化技術を用いたマルチメディアデータの配信について研究されている。

パケット送信順序制御に関する研究 [3] では、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、優先順位を有効に利用できないことを指摘している。そのため、階層符号化したデータに対して、パケット送信順序制御することを提案している。この提案により、経路上のルータで転送すべきデータとそうでないデータを適切に選択し、ネットワーク資源の利用効率が上がることをシミュレーションにより確認している。また、送信順序を決定するアルゴリズムを提案し、比較・検討している。

問題点	有効性
順序制御による遅延の増加	階層データに優先度

3.1.2 誤り制御による品質保証に関する既存研究

パケット損失のない高信頼な配信サービスの提供を目指すため誤り制御技術が用いられている。

無線 LAN での誤り回復方式の比較評価 [4] では、既存研究として FEC と ARQ を組み合わせたハイブリッド方式の提案 (Nikaein ら [5]) を紹介している。この研究では高信頼化によるオーバーヘッドである、再送パケット数や送信時間に関する評価がなされていないと指摘し、送信時間と送信パケット数を評価指標とするハイブリッド方式を提案し、比較している。

この研究では ARQ と Reactive 型 FEC を組み合わせたタイプを基本として、Proactive 型 FEC の有無を変えた場合との比較のために ARQ のみの場合について検討している。実験結果から ARQ のみと比べ FEC を加えることで送信時間が減少することが示されている。しかし、無線 LAN の品質劣化が生じたと思われる部分では送信時間が延びており、これは ARQ による再送のためであると思われる。

問題点	有効性
ARQ による遅延の増加	ハイブリッド方式による誤り訂正

これまでの既存研究では、マルチメディア配信サービスの信頼性を目指す研究が多く、リアルタイム性に関しては軽視されがちであった。マルチメディア配信サービスにおいて、リアルタイム性は信頼性と同等に重要な指標となる。

以上の理由から、本研究ではリアルタイム性を重視した信頼性のあるストリーミングシステムを目指す。これらの既存研究を踏まえ、本研究が目指すべき位置づけを図 5 に示す。

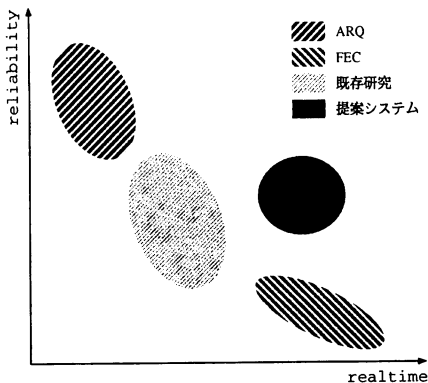


図5 本研究の位置づけ

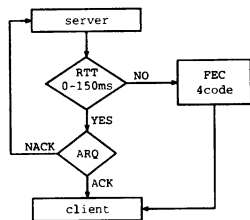


図6 基本階層データの処理内容

3.2 リアルタイム性を重視したストリーミングシステムの提案

提案システムにはマルチメディアデータの到着性を考慮し、誤り訂正技術として FEC と ARQ を採用する。関連技術で述べたように、FEC はリアルタイム性を要するデータ転送には適している。しかし、その訂正能力からパケットの信頼性という点では心許ない。また、ARQ は再送機構を持つことからパケットの信頼性は保証されやすい。しかし、リアルタイム性を損ないやすい欠点を持つ。これらの互いの欠点を補うために Nikaen ら [5] のように FEC と ARQ のハイブリッド方式が提案されている。この方式はパケットの信頼性を重視した方式である。

提案システムでは、リアルタイム性を重視したシステムを目指すため、リアルタイム性に長けた独立切り替え方式とする。この方式では、リアルタイム性の指標として RTT および遅延を用い、その値によって FEC と ARQ の処理を切り替える。また、この方式では、誤り制御をリアルタイム性の方向に傾けたため、ハイブリッド方式と比べ信頼性が劣る。そのため、階層符号化技術を用いてマルチメディアデータを階層化し、ネットワーク品質の状況に応じた映像の配信を目指す。階層符号化による基本階層データは、画像の元となるデータであるので拡張階層データと比較して信頼性を重視した処理を施す。それぞれのデータに対する処理内容を図 6、図 7 に示す。

基本階層データは FEC の冗長度を固定する。しかし、拡張階層データは RTT によって冗長度を増減させる。これは、一般に、FEC における冗長度を大きくすると誤り訂正能力が上

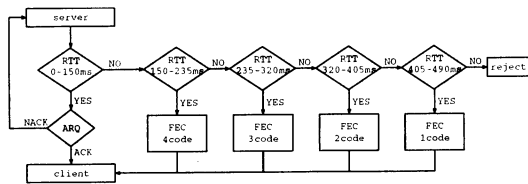


図7 拡張階層データの処理内容

がり、処理時間は増える。また、冗長度を小さくすると誤り訂正能力は下がり、処理時間は減ることを踏まえている。また、RTT が大きくなり過ぎた場合には拡張データを送らないことも考える。

4. 提案システムの設計

4.1 提案システムの概要

提案するストリーミング機構についてデータフォーマットや転送方式、誤り制御の利用などについては以下の通りである。

4.1.1 データフォーマット

提案システムに汎用性を持たせるため、階層符号化技術をもつ画像フォーマット全般を対象とすることを最終的に目指している。

4.1.2 転送方式

ストリーミングの配信例としては、リアルタイム性と配送方式の面からそれぞれ以下の方式が考えられる。

- リアルタイム性
 - 中継型
 - ビデオオンデマンド型
- 配送方式
 - サーバ/クライアント型
 - 双方向型

本研究では、他の方式より比較的簡易なサーバ/クライアント型の配信システムとすることで、配信システムにおけるインターネット上のリアルタイム性およびパケット損失耐性に焦点をあてる。

4.1.3 誤り制御方式

インターネットでは様々な影響を受けて数パーセントのパケット損失が頻繁に発生している。そのため、パケット損失によってマルチメディアデータが復号不可能とならないためにパケット損失の影響を最小限に抑える必要がある。パケット損失の影響を最小限に抑えるための技術については、様々な研究がなされており、本研究では前述の誤り制御技術を利用する。

- 誤り訂正方式 (FEC)
- 誤り検出再送方式 (ARQ)

誤り訂正方式と誤り検出再送方式については現在広く利用されている。また、この2方式は誤り制御アルゴリズムが大きく異なるため、ネットワークの状況により誤り制御の効率が変化することが予想される。配信システム上での機能を検証/比較するためにも、2つの機能をともに組み込むこととする。

4.1.4 リアルタイム転送

リアルタイム転送は音声・動画等の再生と転送を平行するこ

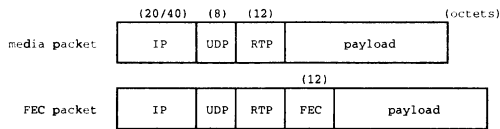


図 8 パケットフォーマット

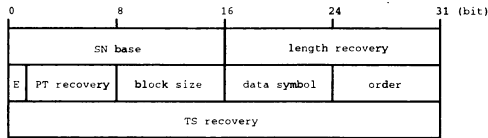


図 9 FEC ヘッダフィールド

とで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。しかし、受信端でバッファリングしないために転送時の遅延変動に弱い。遅延が大きくなると再生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。特に ARQ を用いた場合、パケット損失が発生すると再送されたパケットは、最低でもパケットの往復時間 (round trip time: RTT) 程度の遅延を余分に発生する。RTT が比較的最長環境ではパケット損失時に遅延が RTT の分だけ増加する。これが再生上の欠落発生の原因となるので、受信端で遅延変動を吸収するためのバッファリングが必要となり、転送開始待ち時間が長くなる。

4.2 FEC の実装

提案システムの FEC のパケットフォーマットを図 8、ヘッダフィールドを図 9 に示す。

FEC パケットの RTP/FEC ヘッダの length recovery, PT (payload type) recovery, TS (time stamp) recovery はメディアパケットの冗長化されたデータが付加される。SN base は FEC 処理によって保護されたメディアパケットの最小シーケンス番号を付加し、block size, data symbol は RS 符号による FEC パッケージの (N, K) コードに対応している。

このフォーマットは、RFC2733^(注1) で標準化されたフィールドを一部 RS 符号のパラメータ用に置き換えたものであり、これにより冗長化手法による FEC データの生成が可能となる。RFC2733 ではパリティ符号による FEC のための RTP ヘッダを提供している。しかし、RS 符号と比較すると冗長度に対する誤り訂正能力は低いため、RS 符号のための RTP ヘッダを新たに定めることで耐性を強化している。

これの利点は以下の通りである。

- RTP ヘッダを含むペイロードの冗長化が可能。これにより同期情報などの重要フィールドの保護が可能
- 可変ペイロード長に対応することで様々なストリームタイプのメディアに対して適用可能
- FEC の冗長度の動的変更が可能

また、RS 符号は処理速度、処理遅延を考慮してシンボル長 4 ビットの (15, K) コードを用いた。これにより FEC 処理

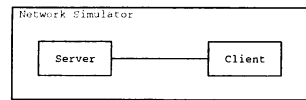


図 10 シミュレーションモデル

を付加した送信では、15 個のパケットを 1 個のブロックとして送信する。

FEC は 損失したパケットを再送する ARQ と比較すると誤り訂正能力は劣る。したがって、FEC を用いる場合は階層符号化された基本階層データと拡張階層データにそれぞれ異なる付加機能を持たせ、リアルタイム性を考慮しつつ誤りを訂正する。

4.3 ARQ の実装

提案システムでは、Selective-repeat 方式の ARQ を採用した。この方式は前述した 2 つの方式と比較して伝送効率に優れるので最も一般的に用いられる ARQ 方式である。しかし、この方式では送信側にバッファを必要とする。この送信側のバッファサイズを決定するための要因は様々であり、一意の決定手法はない。提案システムでは FEC での送信時を考慮し、このバッファサイズを 3 ブロック (45 個のパケット) 分とする。

ARQ によって損失パケットを再送する場合、RTT の影響を大きく受ける。そのためサーバ/クライアント間の RTT がある閾値を超えると再生画像にノイズが現れたり、リアルタイム性を満たすことができなくなる。しかし、ARQ は前述のようにパケットが到着するまで再送をするため強力な誤り訂正能力を持つ。したがって、RTT がある閾値以下の場合に ARQ で再送する。ここではその閾値を動画の再生に支障をきたすと言われている RTT150[ms] とする。これは、13fps に相当し、一般的な動画再生のフレームレートの約半分である。

5. 結 果

5.1 シミュレーション環境

提案システムを Network simulator (NS) [6] 上に実装し、シミュレーションにより評価する。シミュレーションモデルは基本的なサーバ/クライアントモデル (図 10) であり、送信レートや遅延を任意に与えてシミュレーションする。

5.2 FEC の冗長度とパケット損失率、復元率

FEC の冗長コード数とパケット損失率、復元率の関係は図 11 の通りである。冗長コードを増やすことでパケット損失に対する復元率の向上は見られる。しかし、パケット損失率の増加に伴い、FEC による損失パケットの復元率が急激に下がることがわかる。

5.3 FEC のパケット到着時間

リアルタイム性の指標としてパケットの到着時間は一つの目安となる。ここではパケット損失率が 2% から 10% の時の FEC パケットの到着時間を表 1 に示す。損失率が増加するにつれて到着時間が増えているのは、パケット損失によるタイムアウトが生じたためである。この結果から、FEC による処理遅延に冗長度の差がほとんどないことがわかる。また、前述した基本階層データと拡張階層データの冗長度を切り替える値が求まる。

(注 1) : An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction

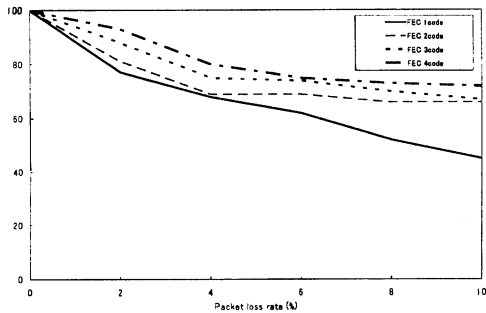


図 11 FEC の冗長度とパケット損失率、復元率

表 1 冗長度ごとの平均到着時間

損失率 (%)	2	4	6	8	10
平均到着時間 (冗長度 1) (ms)	40.7	40.8	40.9	41.3	41.8
平均到着時間 (冗長度 2) (ms)	40.6	40.7	40.8	41.1	41.5
平均到着時間 (冗長度 3) (ms)	40.7	40.8	40.9	41.1	41.4
平均到着時間 (冗長度 4) (ms)	40.7	40.8	41.0	41.1	41.5

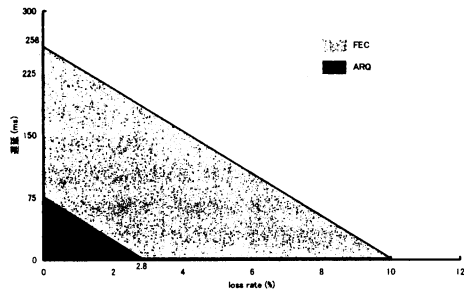


図 12 FEC と ARQ の有効範囲

5.4 ARQ のパケット到着時間

ここではパケット損失率が 2%から 10%の時の ARQ パケットの到着時間を表 2 に示す。損失率が増加するにつれ到着時間も増えている。これはパケット損失による再送機能によるものである。この結果から、パケット損失率が 3%を超えると ARQ による有効性はほとんどないことが予想される。

表 2 ARQ の平均到着時間

損失率 (%)	2	4	6	8	10
平均到着時間 (ms)	55	104	170	195	295

5.5 FEC と ARQ の有効範囲

これらの結果を踏まえて FEC と ARQ の有効範囲を図 12 に示す。図 12 から、パケット損失率と遅延により、FEC と ARQ の有効範囲が求まる。この有効範囲はリアルタイム性を確保するため、遅延の上限を定めて求めた。提案システムではこれをもとに、前述した基本階層データと拡張階層データを処理する。

6. おわりに

本稿では、リアルタイム性を重視した信頼性のあるストリーミングシステムを提案した。

提案システムでは階層符号化技術を用いるため、基本階層データと拡張階層データに分けて誤り訂正する。3 節、4 節では、それぞれの階層データの処理内容について考察し、5 節のシミュレーション結果から提案した処理内容が妥当であることを確認した。しかし、本稿では階層データに対するシミュレーションまでには至らなかった。

今後は、FEC と ARQ の有効範囲をさまざまな伝送遅延を与えた状況で求め、その結果をもとに提案システムを再構築する。提案システムの構築後、FEC や ARQ のような誤り訂正技術とリアルタイム性や信頼性を比較する。最終的にはシミュレーション結果と階層符号化機能をもつ画像フォーマットを関連づけし、定性的にも提案システムを評価することを目指す。

文 献

- [1] 岡田博美, “情報ネットワーク”, 電子・情報工学講座 16 倍風社
- [2] M. Luby, L. Vicisano, J. Gemmell, L. Rizzo, M. Handley, J. Crowcroft, “Forward Error Correction Building Block”, INTERNET-DRAFT, December 2002
- [3] 古村隆明, 藤川賢治, 池田克夫, “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”, 情報処理学会論文誌 Vol.41, No.2, pp.271-279, February 2000
- [4] 鈴木他, “無線 LAN でのマルチキャスト誤り回復方式の比較評価”, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2003 論文集, pp.229-232, 2003
- [5] N. Nikaein, H. Labiod and C. Bonnet, “MA-FEC: A Qos-Based Adaptive FEC for Multicast Communication in Wireless Networks”, IEEE Int. Conf. Commum. Vol.2000, No.2, pp.954-958, 2000
- [6] “The Network Simulator - ns-2”
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>