

## 双方向映像通信における誤り訂正方式の提案

吉村 康彦<sup>†</sup> 望月 このみ<sup>†</sup>  
植松 芳彦<sup>†</sup> 鈴木 亮一<sup>††</sup>

IP ネットワーク上での双方向映像通信は実時間性への要求条件が厳しく、パケット損失や遅延といったネットワーク品質の劣化が映像品質に与える影響が大きい。実時間性の厳しいアプリケーションに対してネットワーク中でのパケット損失への耐性を向上させる方法として誤り訂正方式があり、すでに多くのシステムで利用されている。一方、双方向映像通信では MPEG4 のような可変長パケット、可変レートを特徴とするコーデックが一般的に使用されており、従来の固定長パケット、固定レートを対象とする誤り訂正方式を用いた場合、遅延や使用帯域を増加させてしまい、映像品質の劣化要因になるという問題がある。本論文では、可変長パケット、可変レートに対応した新たな誤り訂正方式を提案するとともに、提案方式をプロトタイプシステムとして実装を行い、評価検証を通じてその効果を明確化することで提案方式の有効性を示す。

### A Proposal of Forward Error Correction Method for Visual Communication Systems

YASUHIKO YOSHIMURA,<sup>†</sup> KONOMI MOCHIZUKI,<sup>†</sup>  
YOSHIHIKO UEMATSU<sup>†</sup> and RYOICHI SUZUKI<sup>††</sup>

Packet loss and delay cause degradation in the quality of real-time, interactive applications such as visual communication. Forward error correction (FEC) schemes for such applications have been proposed to make the applications more resilient to packet loss. On the other hand, the codec generally used in visual communication systems like MPEG4 has the feature that the sending bit rate and the packet size of the traffic vary significantly according to the motion of an object in a video. If the traditional FEC coding, which is calculated on the basis of a fixed-size block, is applied to such applications, a waste of bandwidth and a delay variation are caused and the quality is degraded. In this paper, we propose suitable FEC schemes for visual communication systems using variable bit-rate codec and evaluate the effectiveness of these schemes using our prototype implementation and experimental network.

#### 1. はじめに

近年のアクセス回線の高速化にともない、IP ネットワーク上で双方向映像通信の利用が拡大している。双方向映像通信では、IP ネットワーク上でのパケット損失・遅延がそのサービス品質に大きな影響を与える。アプリケーション (APL) において安定した品質を確保するためにもできるだけ低遅延でパケット損失を回避・修復する手段を確立することが重要である。一般的にネットワーク中でのパケット損失による転

送誤りを訂正する手段として、再送制御 (Automatic Repeat reQuest, ARQ), 前方誤り訂正 (Forward Error Correction, FEC) が利用されている。特に、実時間性が求められる通信に関しては、復号のための符号化ブロック受信時間程度の遅延しか発生しない FEC 方式の利用が有効とされている<sup>1),2)</sup>。

本論文では、IP ネットワーク上での双方向映像通信を対象とし、低遅延でパケット損失を低減化させる安定した FEC 方式を実現することを目的とする。具体的には、双方向映像通信に FEC を適用する際の課題として、VBR トラヒックによる遅延変動と可変長パケット通信時の使用帯域増加に着目し、その解決策としてレート適応型 FEC 方式、RS パケット生成方式について提案する。レート適応型 FEC 方式は APL の送出レートを契機に動的に FEC パラメータを制御することで遅延変動を制御し、RS パケット生成方式

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT ネットワークサービスシステム研究所

NTT Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation

<sup>††</sup> NTT ソフトウェア株式会社

NTT Software Corporation

は可変長パケットを考慮し、効率的な RS パケットを生成することで使用帯域の低減化を実現する。また、これらの提案方式をプロトタイプとして実装し、それぞれの方式について遅延、損失耐力、処理負荷について評価することで効果を明確化し、提案方式の有効性を示す。

## 2. 従来方式の問題点

誤り訂正には複数の方式が提案されており、適用される分野や対象とする誤りに応じて使い分けられている。本論文では、ベストエフォートである IP ネットワークにおける損失を対象とし、バースト損失に対する耐性の高い Reed-Solomon (RS) 符号<sup>3)</sup>を適用する。RS 符号では、シンボル単位の誤り訂正を並列処理することでパケット単位の損失を修復することができる。図 1 に RS 符号を用いた従来の FEC 方式の概要を示す。図 1 に示すように、送信側では  $k$  個の情報パケットに対し、 $n - k$  個の冗長パケットを付与して送信する（以下、 $RS(n, k)$  符号化という）。このとき、符号化の計算単位となる  $n$  パケットのデータ系列を FEC ブロックと呼ぶ。受信側では、パケットに付与されたシーケンス番号により損失位置を特定することで、1FEC ブロック中の任意の  $n - k$  個のパケット損失を完全に修復することが可能である。

従来の FEC 方式では MPEG2-TS のような固定長パケット、固定レート (Constant Bit Rate, CBR) トラフィックを特徴とするコーデックを利用した映像配信システムを対象としている<sup>4)</sup>。FEC 方式を改良し、双方向映像通信の分野へ適用するためには、より厳しい実時間性 (遅延条件) に対応すること、および近年一般的に用いられている H.263 や MPEG4 のようなコーデックの特徴である、可変長パケット、VBR トラフィックへの対応を実現することが重要であり、以下の 2 つの問題点を解決する必要がある。

まず、最初の問題点は、FEC 方式として RS 符号を用いる際の遅延である。遅延の要因は大きく 2 つある。1 つは符号化、復号化の演算にかかる遅延でこれを処

理遅延とする。処理遅延は主に計算機の CPU 処理能力に依存するが、2~3 GHz の CPU を用いた場合、ミリ秒もしくはマイクロ秒のオーダーである。もう 1 つは復号の際に発生する 1FEC ブロックのパケット受信時間で、これを方式遅延と呼ぶ。方式遅延は、APL の送出レートや FEC パラメータ  $n, k$  に依存するため、これらを適切に選択することで遅延を短くすることができる。しかし、MPEG4 のようなコーデックでは、被写体の動きに依存して送出レートが大きく変動するという特性を持つ。このような APL に FEC を適用した場合、誤り訂正時に生じる遅延の支配要素である方式遅延が APL の送出レートに応じて変動する。双方向映像通信では、実時間性を考慮し、受信側 APL で許容できるバッファ容量が限られているため、遅延が変動するとバッファリング処理で吸収できずに、再生品質が劣化する。このような問題を解決するためには APL の特性を考慮し、適応的に FEC 制御を行う必要がある。従来、適応的な FEC 制御として、パケット損失への耐性を考慮し、ネットワークの輻輳状態に応じて FEC パラメータを動的に変更する方式<sup>5)-9)</sup>は検討されているが、遅延を考慮した方式を検討している例はない。

2 つ目の問題点は、可変長パケットへの対応に關してである。RS 符号化は複数の固定長の情報パケットに対し冗長パケットを生成するための演算 (RS 演算) を行うため、図 1 の送信側において APL からの受信パケットサイズが情報パケットサイズと異なる場合、すなわち可変長パケットの場合はパディング処理やフラグメント処理を施し、適切なサイズの情報パケットを生成する必要がある。しかし、パディング処理を施すことは使用帯域を必要以上に増加させることになり、ネットワーク中でのパケット損失率を増加させてしまう可能性がある。また、RS 演算処理は処理負荷が高いという特徴があり、パディング処理やフラグメント処理によって必要数以上の RS パケットを生成することで RS 演算処理回数が増加し、CPU 処理負荷が高くなる可能性もある<sup>10)</sup>。

そこで本論文では、上記問題点を解決するために、レート適応型 FEC 方式および RS パケット生成方式に着目し、それぞれ 2 つの提案方式に関する検討を行う。各方式に対し、遅延、損失耐力、処理負荷に関して評価することで双方向映像通信に FEC を適用する際の最適方式について考察する。

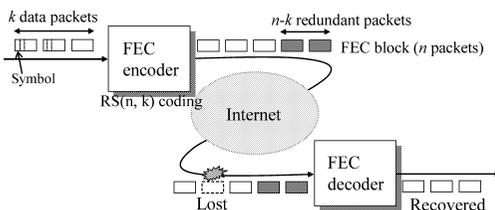


図 1 FEC 方式概要

Fig. 1 FEC scheme.

### 3. 提案方式

#### 3.1 提案方式の概要

提案方式は次の2つの方式より構成される。

- レート適応型 FEC 方式 … APL の送信レートを監視し、送信レートに応じて動的に FEC パラメータを決定し、RS 演算処理を行う。
- RS パケット生成方式 … アプリケーションから受信した画像/音声の可変長パケットを効率良く固定長パケットに分割し、RS 演算が行えるようにする。このとき生成したパケットを RS パケット(情報パケット, 冗長パケット)と呼ぶ。

図2に提案方式の機能ブロックを示す。また、それぞれの方式についての詳細を以下に述べる。

#### 3.2 レート適応型 FEC 方式

図2に示すように、送信側ではレート監視機能が APL の送出レートやフレームの区切りを監視し、その監視結果に基づき、パラメータ決定機能が FEC パラメータを適応的に決定し、RS 演算機能により FEC エンコードを行う。つねに変化する FEC パラメータは、パラメータ通知機能によって、冗長パケットのヘッダに付与され、受信側プロキシに通知される。受信側では、パラメータ監視機能が、冗長パケットに付与された FEC パラメータを認識し、RS 演算機能が FEC デコードを行う。冗長パケットをすべて損失してしまった場合や、FEC ブロック中で冗長パケット数以上の損失が発生した場合は、FEC デコードを行わずに、当該 FEC ブロックをそのまま受信側 APL へと送信する。図3に示すように、従来方式(図3(a))では APL の送出レートの変動にかかわらず、固定の FEC パラメータで FEC エンコードを行うため、APL の送出レートに応じて1FEC ブロックのパケット受信時間が

変動してしまい、特に低レート時に大きな遅延時間を生じてしまう。一方、提案方式(図3(b))では、たとえば低レート時に FEC ブロック長  $n$  を小さくすることにより、遅延の変動を抑えることが可能である。

次に、提案するレート適応型 FEC 方式の核となるレート監視機能とパラメータ決定機能について述べる。まず、レート監視機能を図4に示す。図4より、以下の3つの方式が考えられる。

- 方式 a-1 固定パラメータ方式(従来方式): あらかじめ設定された FEC パラメータ  $n, k$  を用いて FEC エンコードを行う。APL の送出レートに応じてエンドエンド遅延が変動する。
- 方式 a-2 タイムアウト方式: FEC ブロックの最初の情報パケットを受信してから時間があらかじめ設定されたタイムアウト時間に達した時点で FEC エンコードを行う。APL の送出レートに依存せず、エンドエンド遅延を一定に保つことができ、サービスの要求条件に応じて、遅延設計や APL のバッファ容量設計を行う際に FEC 方式の影響を低減化することが可能となる。

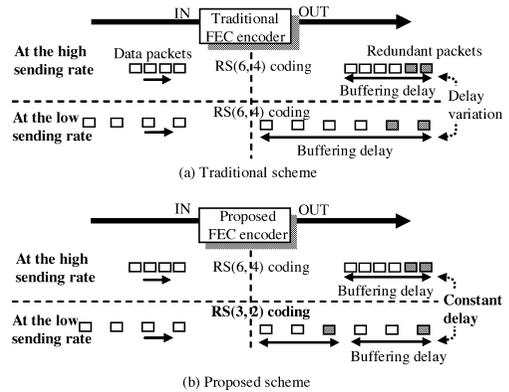


図3 従来方式と提案方式

Fig. 3 Traditional and proposed FEC schemes.

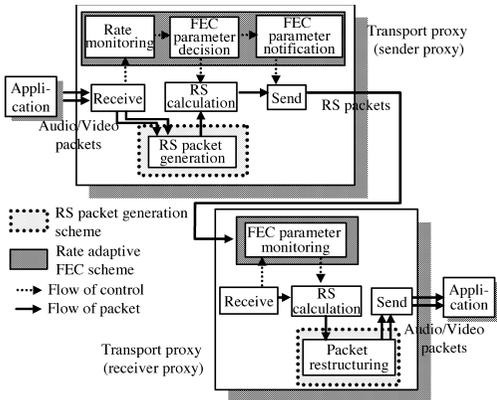
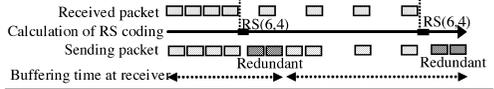


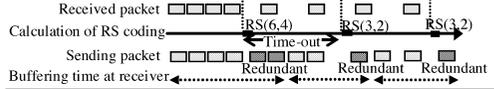
図2 提案方式の機能ブロック

Fig. 2 Functional blocks of proposed schemes.

#### a-1: Fixed-parameter scheme (traditional scheme)



#### a-2: Time-out scheme



#### a-3: M-bit scheme

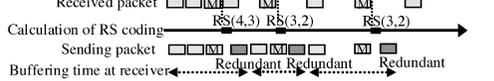


図4 レート適応型 FEC 方式

Fig. 4 Rate adaptive FEC schemes.

- 方式 a-3 M ビット方式：RTP を用いて転送される MPEG4 や H.263 において有効な映像フレームの最後の packets を意味するマーカビットが 1 に設定された RTP パケット<sup>11)</sup>を受信した時点で FEC エンコードを行う。双方向映像通信に用いられる APL では、エンコードが終了した映像フレームごとに packets をバースト的に送信することが多く、マーカビットを利用することでフレームごとの FEC 処理が可能となり、送出レートに依存せずに、エンドエンド遅延を低減化することが可能となる。

上記提案方式 a-2 および a-3 では、条件に達した時点で受信した当該 FEC ブロックの情報 packets 数  $k$  と、あらかじめ設定された冗長度  $R$  を用いてパラメータ決定機能が  $n$  (整数) を決定する。 $n$  は次式で算出され、割り切れない場合は繰り上げとする。

$$n = \frac{k}{1-R} \tag{1}$$

### 3.3 RS packets 生成方式

図 2 に示すように、送信側では APL より受信した packets から RS packets を生成する機能を持つ。可変長 packets を用いた通信に対して、FEC 方式による損失耐性を向上させるためには、packets 長のばらつきを考慮し、RS packets 生成時の分割損を最小化し、FEC プロキシ間の使用帯域を最小化することが重要である。ここで、従来の RS packets 生成方式と提案方式である可変長 RS packets 方式および RS packets 多重化方式を図 5 に示す。また、図 5 における各方式の概要を以下に説明する。

- 方式 b-1 固定長 RS packets 方式 (従来方式)：RS 演算は固定長 packets を用いて処理されるため、受信 packets は RS packets サイズに応じて 0 padding, もしくはフラグメント処理が施さ

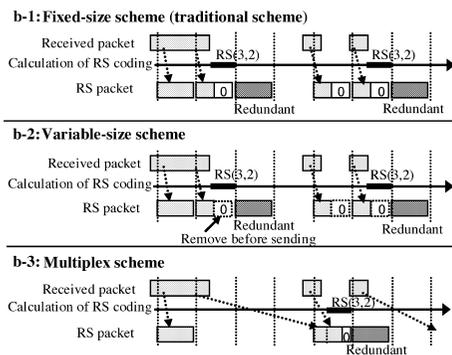


図 5 RS packets 生成方式の概要

Fig. 5 RS packet generation schemes.

れ固定長の RS packets が生成される。基本的に 1 つの受信 packets から 1 つ以上の RS packets が生成される。padding により必要以上に使用帯域を増加させることや、RS packets 数が多くなることから、処理負荷への影響が大きくなる。

- 方式 b-2 可変長 RS packets 方式：RS packets 生成時に 0 padding を施した情報 packets の 0 padding 部を削除することでプロキシ間の通信に関する RS packets 長を可変とする。padding 部はネットワーク中に送信されないため、使用帯域の低減化が可能となる。
- 方式 b-3 RS packets 多重化方式：受信 packets サイズに応じて多重化/フラグメント処理を行い、RS packets を生成する (packets 多重化/分離機能)。ただし、フラグメントの最終 packets を多重化する際は、再度フラグメント処理を施さないこととする。基本的に複数の受信 packets から 1 つの RS packets を生成することができる。多重化を行うことで RS packets サイズに応じた最適な RS packets が生成され、他方式と比較して RS packets 数も少ないことから使用帯域および RS 演算処理負荷の低減化が可能となる。

### 4. 有効性評価

2 章で述べたように、双方向映像通信はストリーミングなどの片方向映像通信と比較して遅延に対する要求条件が厳しい。本章では各提案方式における片方向通信時のエンドエンド遅延に対する評価を行うことで双方向映像通信への適用性を明確化するとともに、損失耐力、処理負荷についても評価することで提案方式の効果を明確化する。図 6 に本評価実験における評価モデルを示す。前章で述べた提案方式はたとえばホームゲートウェイやエッジルータといったユーザ近傍のネットワーク機器、もしくは、ユーザ端末など、ネットワーク中で packets 損失の発生する任意の区間での利

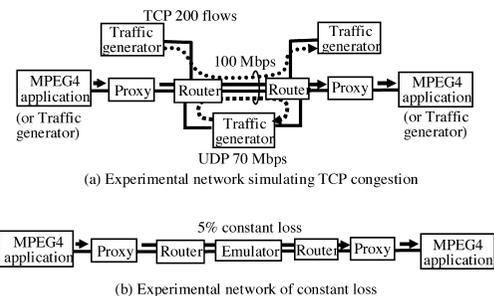


図 6 評価モデル

Fig. 6 Experimental network model.

用が想定される．本論文では，機能の有効性を評価するため，送信側・受信側トランスポートプロキシにソフトウェアとして実装することとする．図 6 (a) のモデルでは，ネットワークを 2 つのルータで模擬し，ルータ間の 100 Mbps のリンクに 70 Mbps の UDP トラヒック (1,500 byte, CBR) と 200 本の TCP フローを背景負荷として混在させ，輻輳状態を模擬している．また，図 6 (b) のモデルではエミュレータを用いてプロキシ間の通信に関して 5% の固定パケット損失を発生させる．なお，本評価に用いたプロキシは CPU が PentiumIV (3.4 GHz)，メモリが 1 GHz の汎用 PC を用いている．

#### 4.1 レート適応型 FEC 方式の評価

##### 4.1.1 遅延評価

図 6 (b) の評価モデルを用いて，従来方式および提案方式の遅延評価を行った．FEC の対象となる試験トラヒックは動きの激しいシーンと少ないシーンから構成される特定の映像シーンを映像約 2 Mbps, 30 frames/sec, 音声約 64 kbps でエンコードした MPEG4 ストリームを用い，各方式におけるエンドエンドでのネットワーク遅延を測定した．冗長度  $R$  は 10% とし，従来方式では，RS (37, 33) で FEC エンコードを行い，タイムアウト方式では 80 msec 間隔で FEC エンコードを行う．双方向映像通信では，利用者の許容エンドエンド遅延が 250 ~ 500 msec といわれており<sup>12)</sup>，その中で FEC 処理に起因する遅延の目標値を 100 msec 程度と仮定し，RS 演算処理時間を考慮しタイムアウト時間を 80 msec とした．なお，本評価ではレート適応型 FEC 方式の効果を明確化するために，RS パケット生成方式は従来方式である固定長 RS パケット方式を用いる．

図 7 に 3 方式のエンドエンド遅延の測定結果を示す．ここでのエンドエンド遅延は送信側 APL と受信側 APL の間に測定器を設置し，通過する IP パケットの 1 秒平均の遅延時間を測定した．図 7 より，従来方式では，遅延変動幅が約 250 msec あるのに対し，提案方式ではそれぞれが 100 msec 以内に抑えられていることが分かる．本検証で用いた再生 APL では，従来方式のように遅延変動幅が大きい場合，映像が途切れ途切れとなったり，音声の再生スピードが安定しないという品質劣化現象を生じ，利用者の体感品質にも悪影響を及ぼす．この現象を回避するためには，再生 APL のバッファ容量を大きくすることが有効であるが，バッファ容量と再生遅延は比例関係であるため，双方向映像通信においては，実時間性を高めるためにも遅延と遅延変動幅を低減化できる提案方式が有効で

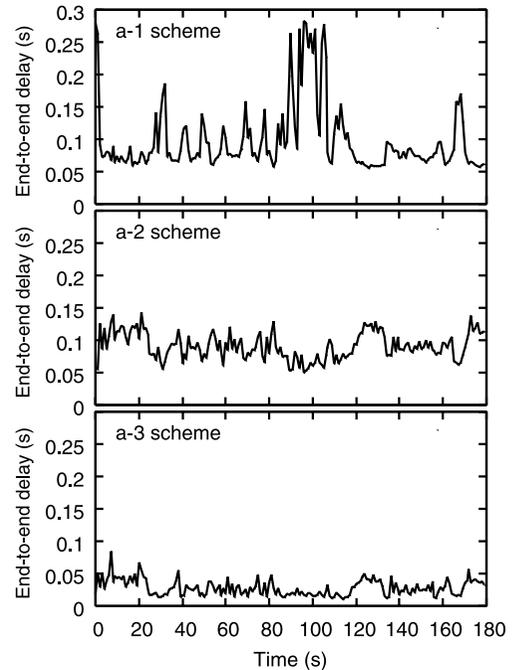


図 7 エンドエンド遅延  
Fig. 7 End-to-end delay.

あるといえる．

また，タイムアウト方式では平均遅延が 91 msec であるが，これは遅延の目標値とバースト損失への耐性を考慮し，タイムアウト時間を 80 msec と設定したことにより起因する．タイムアウト時間は，小さく設定することで遅延も小さくすることが可能であるが，同時に FEC パラメータ ( $n, k$ ) も小さくなりバースト損失への耐性も弱くなるため，遅延目標値とパケット損失特性を考慮し適切に設定することが重要である．一方で，M ビット方式では遅延はフレームレートに依存し，対象とするストリームのフレームレートが平均 30 fps であり，APL の実装にも依存するが，約 33 msec ごとに M ビットパケットが発生することから，平均遅延が 29 msec となる．なお，タイムアウト方式においても，遅延を優先しタイムアウト時間を 33 msec と設定することで M ビット方式とほぼ同等の結果が得られる．

##### 4.1.2 損失耐力評価

図 6 (a) の評価モデルを用いて，従来方式および提案方式の損失耐力の評価を行う．パケット損失は，外部負荷以外に試験トラヒック自身の送出レートやバースト性といったトラヒック特性にも大きく依存するため，試験トラヒックはトラヒック発生器を用いて 388 byte のパケットを一定間隔で送出し，1 分ごとに送出レー

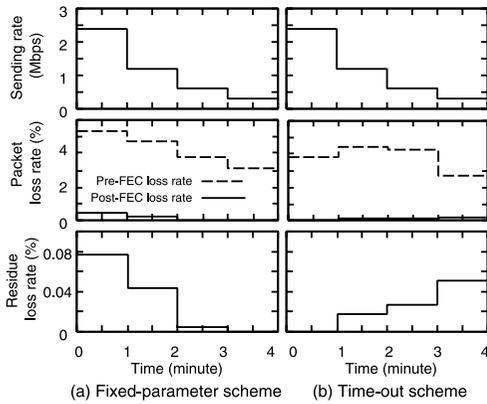


図 8 各方式における損失耐力  
Fig. 8 Lost capacity.

トを 2.4 Mbps, 1.2 Mbps, 0.6 Mbps, 0.3 Mbps と変化させる．受信側プロキシにおいて，FEC 前損失および FEC 後損失を測定した．ここで，FEC 前損失とはネットワーク上で実際に発生した損失とし，FEC 後損失とは FEC デコード後も修復できなかった損失とする．FEC デコード後に修復できた損失の FEC 前損失に対する割合を修復率とし  $(1 - \text{修復率})$  を残留損失率とする．試験トラフィックとして CBR トラフィックを用いていることで提案方式 a-2 と a-3 の結果は同様となるため，従来方式と提案方式 a-2 について FEC 前損失，FEC 後損失を測定した．冗長度  $R$  は 15% とし，FEC パラメータは従来方式は RS (39, 33) で固定，提案方式ではレートの変動に応じ，RS (101, 85)，RS (46, 38)，RS (22, 18)，RS (11, 9) と変化させた．また，提案方式 a-2 のタイムアウト時間は 80 msec とした．

図 8 に測定結果を示す．図 8(a) が従来方式 a-1，図 8(b) が提案方式 a-2 における測定結果を示し，上から順に送出レート，損失率，残留損失率を示す．ここで損失率と残留損失率は各送信レートにおける 1 分間の平均値である．従来方式，提案方式ともに TCP の輻輳により，3~5% の FEC 前損失が発生している．FEC 前損失は，外部負荷以外に自トラフィックのトラフィック特性に大きく依存するため，FEC パラメータや送出レートによって，異なることが分かっている．FEC 後損失は，従来方式，提案方式とも，0.5% 以下に抑えられ，FEC により，損失がほぼ修復できているといえるが，FEC 後損失率と残留損失率は，従来方式と提案方式とでは，逆の振舞いを示していることが分かる．まず，従来方式では，高レート時も RS (39, 33) という小さな FEC パラメータで処理が行われるため，損失耐力が低く，FEC 後損失が発生してい

る．低レート時には，FEC 前損失に対して，FEC パラメータが比較的大きいので，損失を完全に修復できる．しかし，このとき，平均遅延は 200 ms を超え，高レート時の遅延との差は 140 ms に及ぶため，たとえ損失が修復できても映像の劣化につながる．一方，提案方式では，高レート時には，RS (101, 85) といった大きな FEC パラメータを適応的に採用することができるので，損失を完全に修復することができ，FEC 後損失率と残留損失率は 0 である．低レート時には，遅延を抑えるために，RS (11, 9) といった小さな値を採用するため，損失耐力が低く，FEC 後損失が発生してしまう．しかし，遅延は，タイムアウト時間程度に抑えられる．これらの結果から，全体として，提案方式の映像の劣化要因は，従来方式に比べて少ないといえる．

本評価において提案方式は，冗長度一定のもとで FEC パラメータを適応的に変化させているため，FEC パラメータが小さくなる低レート時は，原理的に損失耐力が低くなる．そこで，決定された FEC パラメータが小さい場合は，冗長度を割り増しし，損失耐力を向上させる方法が考えられる．図 8(b) の実験結果に基づいた数値計算では，最低レートの 0.3 Mbps において，冗長度を 40% まで上げ，RS (15, 9) で FEC 処理を行うことで完全に損失を修復できるという推定結果が得られている．冗長度が大きく設定されるのは，低レート時であるため，冗長パケットによる帯域の増加がネットワークの輻輳に与える影響は少ないと考えられる．このように，APL の送出レートによって FEC ブロックの大きさを変化させることで遅延を一定化し，さらに FEC ブロックの大きさによって冗長度も適応的に変化させることで，損失耐力をも一定化することが可能となる．

#### 4.1.3 処理遅延の評価

提案方式では，従来方式に比べ，送信側プロキシにおいて FEC ブロックごとに FEC パラメータを算出するための処理負荷が必要となる．提案方式において，つねに同じ FEC パラメータが決定されるようなトラフィックを発生させ，送信側プロキシの CPU 使用率を測定すると，同じトラフィックに対してあらかじめ FEC パラメータが設定されている従来方式の送信側プロキシの CPU 使用率の約 1.1 倍程度となり，増加量はそれほど大きくない．

#### 4.1.4 考察

これまでの遅延，損失耐力，処理負荷の評価結果から，従来方式および提案方式の比較を行った結果を総合評価として表 1 に示す．従来方式については，固

表 1 レート適応型 FEC 方式の総合評価

Table 1 Comprehensive evaluation of rate adaptive FEC scheme.

	遅延	損失耐力	処理負荷
a-1 従来方式 ( $n$ が小)		×	
a-1 従来方式 ( $n$ が大)	×		
a-2, 3 提案方式			

定パラメータである  $n$  が小さい場合と大きい場合を考え、提案方式については評価においてほとんど差がなかったことからタイムアウト方式と M ビット方式は特に区別せずに比較を行う。まず、 $n$  が小さい場合の従来方式は、遅延の変動は起こるものの、1FEC ブロックの packets 受信時間が短いため、低レート時もある程度の低遅延を保つことが可能であるが、1FEC ブロック中で許容される packets ロス数は小さく、特にバースト損失に対する耐性が低い。一方、 $n$  が大きい場合の従来方式は、損失耐力は高いが、低レート時の遅延の増大は著しい。次に提案方式では、パラメータの適応的な変更により、遅延の変動を抑え、平滑化することが可能である。損失耐力については、高レート時は、 $n$  が大きな値となるため、十分な耐性を持ち、 $n$  が小さな値となる低レート時は、耐性が低下するが、このような場合、適応的に冗長度を高くすることで、耐性を維持することが可能である。最後に処理負荷に関しては、適応的な制御により、提案方式の負荷が若干高いが、増加量はそれほど大きくない。したがって、遅延、損失耐力、処理負荷の観点から総合的に見て、提案方式が有効であるといえる。

4.2 RS パケット生成方式の評価

4.2.1 使用帯域およびパケット損失評価

各方式を評価するために、図 6 (a) の評価モデルを用いた。FEC の対象となる試験トラフィックは、4.1.1 項と同様の映像シーンを約 768 kbps の映像と 64 kbps の音声としてエンコードした MPEG4 ストリームを用いた。なお、本評価では、RS パケット生成方式の効果を明確化するために、レート適応型 FEC 方式としては従来方式である固定パラメータ方式 (a-1) を用い、冗長度  $R$  は 33% とした。

まず、図 9 に RS パケットサイズを 100 ~ 1,300 byte まで 100 byte 間隔で変更した場合の APL の使用帯域と、各方式での使用帯域の比を表す帯域増加率の測定結果を示す。図 9 より、RS パケットサイズを大きくするほど、可変長 RS パケット方式、RS パケット多重化方式とともに使用帯域の削減効果が大きくなること分かる。特に、可変長 RS パケット方式は、どの RS パケットサイズにおいても、最も使用帯域を小さ

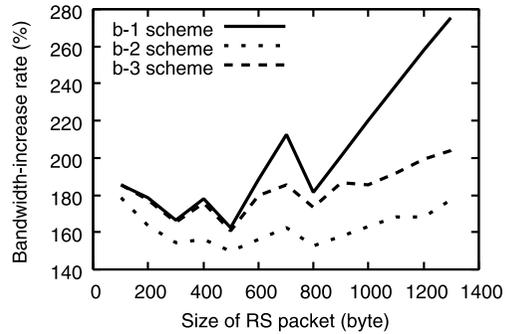


図 9 帯域増加率  
Fig. 9 Bandwidth-increase rate.

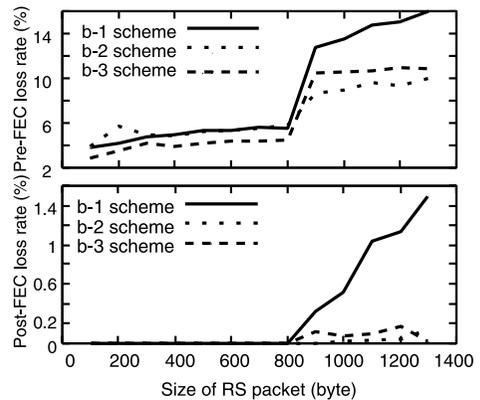


図 10 パケット損失率  
Fig. 10 Packet loss rate.

くすることが可能である。本実験では、RS 演算時の冗長度を 33% としたが、各提案方式において、帯域増加率が設定値 (133%) より大きくなるのはプロトコルオーバーヘッドによるものである。また、本検証で使用した MPEG4 ストリームでは、パケットサイズが 400 ~ 500 byte, 1,400 ~ 1,500 byte のパケットが全体の 75% を占めており、特に RS パケットサイズとして、1,500 byte のパケットに対する分割損の少ない 300, 500, 800 byte を選択した場合、使用帯域が小さくなる傾向がある。

次に、図 10 に受信側プロキシにおけるパケット損失率 (FEC 前損失率, FEC 後損失率) を示す。図 10 (a) の FEC 前損失率の測定結果より、ネットワーク中では RS パケットサイズが 800 byte 以下の場合 3 ~ 5% 程度の、900 byte 以上の場合、8 ~ 15% 程度のパケット損失が発生していることが分かる。900 byte を境にパケット損失率が上昇しているが、シミュレーション等別の手段により本評価環境ではこのようなパケット損失特性となることを確認している。全体的に従来方式が提案方式に比べ FEC 前損失率が高くなっており、

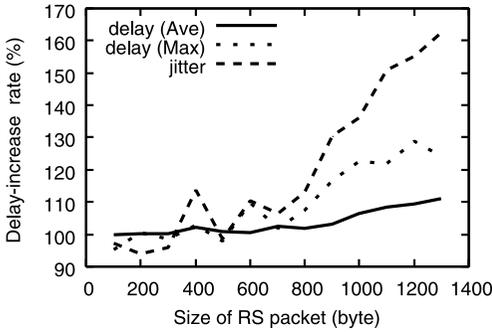


図 11 遅延増加率  
Fig. 11 Delay increase rate.

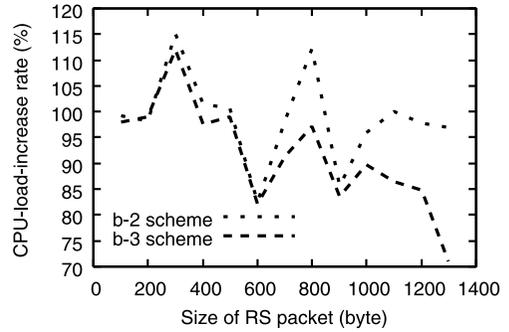


図 12 CPU 処理負荷増加率  
Fig. 12 CPU-load-increase rate.

提案方式では使用帯域を削減することでネットワーク中でのパケット損失率を低減化できていることが分かる。また、図 10(b) のグラフより、FEC 前損失率が上昇する 900 byte 以上で各方式において FEC 後損失が発生することが分かる。特に FEC 前損失の多い従来方式では 1%以上の FEC 後損失率となっているが、これは評価環境においてパースト損失が発生しやすいことを示している。一方、提案方式においてはネットワーク中でのパケット損失の影響を低減化することで FEC 後損失率に関しても 0.2%以下に保つことが可能である。

以上より、TCP トラヒックが輻輳した状態においても、提案方式を用いることで使用帯域を削減でき、かつ FEC を施した際のパケット損失率を 0.2%以下に抑えることが可能となる。

#### 4.2.2 遅延評価

各方式の遅延に関しては、従来方式と可変長 RS パケット方式は多重化を行わないため、同様の特性を持つ。一方で、RS パケット多重化方式では、多重化により RS 演算回数は低減できるが、エンドエンド遅延やジッタが大きくなる。そこで図 11 にエンドエンド遅延（平均値，最大値），ジッタに関して、前節の評価検証において RS パケット多重化方式を従来方式と比較した際の増加率を示す。図 11 より、RS パケット多重化方式では、遅延の平均値では最大 10%程度の増加となるが、RS パケットサイズが 800 byte 以上のとき、遅延の最大値、ジッタともに大きくなり、エンドエンド遅延の最大値では最大 30%増加し、ジッタは最大 60%増加していることが分かる。よって、RS パケット多重化方式では、遅延の変動幅が大きくなってしまい、他の方式と比較すると実時間性に課題があるといえる。

#### 4.2.3 処理負荷評価

4.2.1 項での検証における送信側プロキシの処理負

表 2 RS パケット生成方式の総合評価  
Table 2 Comprehensive evaluation of RS packet generation scheme.

	帯域	損失	遅延	処理負荷
従来方式	×	×		
可変長 RS パケット方式				
RS パケット多重化方式			×	

荷に関して、各提案方式の処理負荷を従来方式と比較した結果を図 12 に示す。図 12 より、RS パケット多重化方式が他の方式と比較して RS 演算処理回数が少ないことから、最大 30%程度の処理負荷低減化が可能であることが分かる。しかし、この差分は本検証で用いたプロキシの CPU 使用率上では 1%程度の差分であり、影響は少ないといえる。

#### 4.2.4 考察

以上の評価結果を表 2 に総合評価として示す。可変長 RS パケット方式および RS パケット多重化方式は、使用帯域、ネットワーク中でのパケット損失の低減化に効果があるが、RS パケット多重化方式が遅延に与える影響が大きいこと、処理負荷で大きな差分はないことを考慮すると、可変長パケットへの対応に関しては、可変長 RS パケット方式が最も有効であるといえる。

### 5. おわりに

実時間性が求められる双方向映像通信で用いられる可変長、VBR トラヒックを特徴とするコーデックに対しても低遅延で安定した FEC 方式を確立することを目的とし、レート適応型 FEC 方式、RS パケット生成方式に関して提案を行った。各提案方式に関して遅延、損失耐性、処理負荷を評価することで提案方式の有効性を明確化した。レート適応型 FEC 方式に関しては、エンドエンド遅延を低減するとともに、遅延変動幅も低減化できることを示した。遅延変動幅の

低減化は実時間性の厳しい APL のバッファ設計への応用も期待できる。また、RS パケット生成方式に関しては、使用帯域を低減化することでネットワーク中のパケット損失を低減化できることを示した。

本論文における 2 つの提案方式は併用することも可能であり、今後はそれぞれの提案方式を併用した際の効果や、利用者の体感品質への影響を明確化することで、双方向映像通信に関して最適な FEC 方式を確立していく。

### 参 考 文 献

- 1) Rizzo, L.: Effective erasure codes for reliable computer communication protocols, *ACM Comput. Commun. Rev.*, Vol.27, No.2, pp.24–36 (1997).
- 2) Shacham, N. and McKenney, P.: Packet recovery in high speed networks using coding and buffer management, *Proc. IEEE INFOCOM Conference*, Los Alamitos CA, Vol.1, pp.124–131 (1990).
- 3) Blahut, R.E.: *Digital transmission of information*, Addison-Wesley (1990).
- 4) Otsuka, T., Nishihara, K., Aibara, R. and Maeda, K.: Development and evaluation of an MPEG2 over IP transfer system using FEC, *IPSJ SIG Notes*, Vol.2001, No.119 (2001).
- 5) Bolot, J.-C. and Turetletti, T.: Adaptive error control for packet video in the internet, *Proc. IEEE ICIP*, Lausanne, Switzerland, pp.232–239 (1996).
- 6) Johanson, M.: Adaptive forward error correction for real-time Internet video, *Proc. PV2003*, Nantes, France (2003).
- 7) Padhye, C., Christensen, K. and Moreno, W.: A new adaptive FEC loss control algorithm for voice over IP applications, *Proc. IEEE International Performance, Computing and Communication Conference*, Phoenix, Arizona pp.307–313 (2000).
- 8) Park, K. and Wang, W.: QoS-Sensitive transport of real-time MPEG video using adaptive forward error correction, *Proc. IEEE Multimedia Systems*, pp.426–432 (1999).
- 9) Kondo, T., Nishihara, K. and Aibara, R.: An efficient FEC Method for high-quality video transmission on the broadband Internet, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E87-B, No.3, pp.643–650 (2004).
- 10) 吉村, 鎌田, 植松, 鈴木: 可変長パケット通信における FEC プロキシ間転送最適化方式の検討, 電子情報通信学会総合大会, B-7-62 (2005).
- 11) Kikuchi, Y., Nomura, T., Fukunaga, S., Matusi, Y. and Kimata H.: RTP payload format for MPEG-4 audio/visual streams, RFC3016 (2000).
- 12) Hardman, V., Sasse, M., Handly, M. and Watson, A.: Reliable audio for use over the Internet, *Proc. INET*, Honolulu, Hawaii (1995).

(平成 17 年 12 月 5 日受付)

(平成 18 年 5 月 9 日採録)



吉村 康彦 (正会員)

平成 11 年九州大学工学部情報工学科卒業。平成 13 年同大学大学院システム情報科学研究科修士課程修了。同年 NTT ネットワークサービスシステム研究所入社。以来、IP 網におけるブロードバンド映像通信サービスの品質管理、制御方式の研究実用化、サーバ高信頼化技術の研究実用化に従事。



望月このみ

平成 13 年東京理科大学理工学部物理学科卒業。平成 15 年東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程修了。同年 NTT ネットワークサービスシステム研究所入社。以来、IP 網におけるブロードバンド映像通信サービスの品質管理、制御方式の研究実用化、高信頼転送方式の研究実用化に従事。



植松 芳彦

昭和 63 年東京大学理学部物理学科卒業。平成 2 年同大学大学院修士課程修了。同年 NTT 伝送システム研究所入社。以来、超高速 SDH/ATM バックボーン網における高信頼同期・転送系設計技術の研究実用化に従事。現在、IP 網におけるブロードバンド映像通信サービスの品質・信頼性制御方式、ならびに高信頼メディアゲートウェイシステム構成技術の研究実用化に従事。博士 (情報工学)。



鈴木 亮一（正会員）

昭和 61 年電気通信大学計算機科学  
学科卒業．昭和 63 年同大学大学院計  
算機科学専攻修士課程修了．同年日  
本電信電話株式会社入社．以来，画  
像処理，ユーザインタフェース，情  
報検索，インターネット・ルーティング，エッジルー  
タシステムの研究実用化に従事．

---