

FEC とパケットインタリーブによるストリーミングサービス用動的低エラー転送

栗本 昌和[†] 笠原 正治^{††a)}

Packet Scheduling with FEC and Interleaving for Video Streaming Services

Masakazu KURIMOTO[†] and Shoji KASAHARA^{††a)}

あらまし ビデオストリーミング配信における映像品質劣化の原因の一つにパケットのバーストロスが挙げられる。本論文ではこのバーストロスに対処するため、Forward Error Correction (FEC) を用いながらかつパケットロスの状況に応じてインタリーブ長を動的に変更することにより、バーストロスの分散とロスパケットの回復を効果的に行うトランスポート層レベルでの転送方式を提案する。性能評価としてパケットレベルのロス間隔及び複数のパケットより構成されるマクロブロックレベルの棄却に着目し、シミュレーションにより提案手法の有効性を検証する。シミュレーションの結果から本手法は従来手法よりもロスパケットの回復性能が高く、かつ効果的にバーストロスを分散できることが確認された。

キーワード ビデオストリーミング, QoS 保証, バーストロス, FEC, インタリーブ

1. ま え が き

ビデオストリーミング配信における映像品質劣化の原因の一つにパケットロスが挙げられる。一般的に、パケットロスはランダムロスとバーストロスに大別される。ランダムロスはパケットロスの発生に相関がなく、全くランダムに起こるパケット棄却である。一方バーストロスは、一度パケットロスが発生すると、後続のパケットも連続して棄却されるものである。このバーストロスは動画においては連続したコマ落ちを生じさせ、最悪の場合再生が中断し、大きな映像品質劣化が生じる原因となる。

ビデオストリーミングにおける映像品質劣化を防ぐため、特に上位レイヤでバーストロスに対処する手法として、Automatic Repeat Request (ARQ) によるロスパケットの再送、バーストロスを分散させるパケットインタリーブによる送信、受信側でロスパケットを回復させる Forward Error Correction (FEC) 等の

手法が過去に研究されてきた [1], [4], [9], [10], [12]。

ARQ ではパケットロスが発生した場合、受信ノードが送信ノードに対して棄却されたパケットの再送要求を行う。しかしながら、ストリーミング配信では即時性が要求されるため、パケットロスの検知、送信ノードへの再送要求、棄却パケットの再送といった処理に要する時間が問題となる [1]。そのため、ストリーミング配信では FEC が多く用いられている。FEC ではデータが収納されたパケット列に冗長パケットを付加して転送を行い、パケットロスが生じた場合は冗長パケットを用いてパケットの回復を行う。冗長パケットを多く付加すれば復元できるパケット数も増加できるが、冗長度も増加するため、転送効率が悪化しデコーダでのオーバーヘッドが増大する [3]。

FEC は誤り訂正符号を用いてロスパケットの復元を行う。一般に、誤り訂正符号はデータの通信時や記憶媒体からの読取り時に発生する雑音等によるビット誤りを訂正するために用いられている。ロスパケットを誤り訂正符号を用いて復元する場合には多大な計算コストがかかるため、計算量を低減するためにビットレベルでのインタリーブが行われている。これによりビットレベルのバースト誤りを分散し、パケット単位の誤り訂正を行うことができる。FEC を考慮したバ

[†](株)ドッドウエル ビー・エム・エス, 東京都
DODWELL BMS, Ltd., Tokyo, 103-0005 Japan

^{††} 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Sakyo-ku,
Kyoto-shi, 606-8501 Japan

a) E-mail: kasahara@ieee.org

ケット転送方式の研究としては、マルチキャスト転送への適用を目指した [2], [8], Wireless 1394 における FEC を用いた動画通信方式の提案 [11] などがある。

パケットインタリーブはパケットの送信順を変更することでバーストロスを分散させる手法であり、FEC と比べてアルゴリズムが単純で冗長データが不必要といった利点がある [6], [7], [12]。しかしながら、長期間継続するバーストロスに対応するためにはインタリーブ長を大きくする必要があり、インタリーブ長を大きくすると送受信時のパケット順序変更処理も増大し、結果として遅延が増大する。[6], [7] では、許容遅延より最適なインタリーブ長を決定するパケットスケジューリングを提案している。

上述の FEC とパケットインタリーブを組み合わせることで、パケットのバーストロスに対処する転送方式も検討されている。[5] は mpeg2ts と呼ばれるビデオ転送システムを提案している。mpeg2ts では、FEC としてリードソロモン符号が採用され、かつ転送方式にパケットインタリーブ機能が実装されており、実ネットワーク実験において提案システムの有効性が検証されている。

近年無線ネットワーク技術の発展により、移動端末に対するマルチメディア通信の需要が高まってきている。一般に無線系ではフェージングによって伝送チャネルの帯域が劣化し、端末の移動速度や無線環境によってはパケットのバーストロスが発生することが知られている [11]。ここで注意しなければならないのは、無線伝送チャネルの状態は不特定の時間スケールで変動するという点である。このため、パケットのバーストロス期間も伝送チャネルの状態に応じて変動するため、結果として無線系で映像通信を行うときにあらかじめ FEC の冗長度やパケットインタリーブを適切に設定することができない。将来の無線ネットワーク環境として Beyond 3G や Beyond IMT-2000 を目指した開発目標では、高速移動環境で 100 Mbit/s、低速移動環境では 1 Gbit/s の回線スピードの達成が挙げられており [13]、このような高速回線環境においてはパケットバーストロスの上位層に対する影響は極めて深刻なものになると予想される。

そこで本論文では、回線状況の変動で生じるビットレベルの FEC では対応できないパケットのバーストロスに対処するため、FEC とパケットインタリーブを組み合わせた動的パケットスケジューリング方式を提案する。具体的には、FEC においては冗長度を、パ

ケットインタリーブにおいてはインタリーブ長をネットワークの状態に応じて動的に変更することで、時間スケールの異なるバーストロスに動的に対処する。本手法では指数荷重平均を用いてパケットロス率の推定を定期的に行い、推定したパケットロス率をもとに FEC 冗長度とインタリーブ長の変更を動的に行う。インタリーブ長決定にあたっては、パケットインタリーブによって生じる再生遅延やリンク間で生じる転送遅延も考慮する。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では従来用いられてきた FEC とパケットインタリーブの特徴について説明する。3. では提案手法の詳細を述べ、4. でシミュレーションによる数値例を示す。最後に結論を述べる。

2. FEC とパケットインタリーブの特徴

2.1 FEC

FEC では動画の情報で構成される情報パケットに、冗長符号で構成される冗長パケットを付加して転送が行われる。本論文では誤り訂正符号としてリードソロモン符号を考える。

リードソロモン符号ではデータ列（ビット列）を n ビットのブロック単位に分け、ブロック単位で誤りを訂正する（図 1）。一般に、1 ブロックを訂正するためには 2 ブロック分の冗長符号が必要となる。しかしながら、パケット単位の誤りを復元する場合、連続する誤りブロックを回復するために大量の冗長符号ブロックが必要となり、計算コストが高くなる。そのため、パケット単位の復元を行うときにはビット（ブロック）レベルでのインタリーブを行い、バースト誤りを分散することで冗長符号ブロック数の低減を図っている。

本論文で想定するビットレベルのインタリーブを以下に示す。今 m 個の連続するパケットで 1 個のマクロブロック（MBL）が構成されていると仮定する。図 2 は $m = 4$ のときの、1 MBL 当り 1 個のパケットを復元する場合のビットレベルでのインタリーブを示している。まず MBL 中の情報パケット（Packet data）

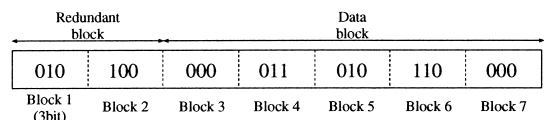


図 1 リードソロモン符号におけるブロック ($n = 3$ の場合)

Fig. 1 Block structure based on Reed-Solomon code.

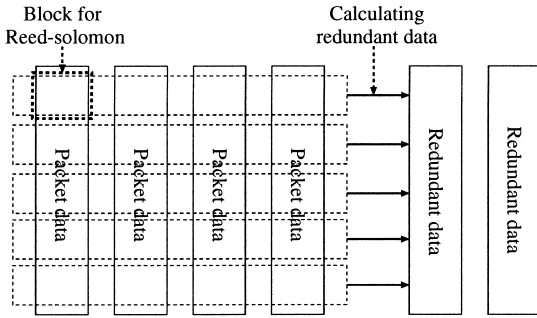


図 2 ビットレベルでのインタリーブ
Fig. 2 Bit-level interleaving.

を図のように並べる．次に行方向に冗長符号を計算し，その行に対応する冗長符号を並べる．このとき，1 情報パケットデータ中の行方向における計算単位を，誤り訂正を行うときのブロックサイズとする．これを列方向に順次行うことにより冗長パケットを生成する．パケットが 1 個棄却された場合，行方向に見れば 1 ブロックのバースト誤りになっているため，冗長パケット中に含まれる冗長ブロック情報を用いて該当ブロックを復元することで，ロスパケット全体を復元することができる．

本論文ではビットレベルの誤り訂正を回復できるような冗長度を考える^(注1)．このとき， m 個のパケットから構成される一つの MBL において復元できるパケット数を j とすると，冗長パケット数は $2j$ 個必要となる．ここで情報パケットが MBL に占める割合を符号化率と呼び，冗長度を示す値として次式で定義される．

$$\xi = \frac{m - 2j}{m} \tag{1}$$

2.2 パケットインタリーブ

パケットインタリーブはパケットのバーストロスを分散するパケットスケジューリングである．以下では MBL が m 個のパケットから構成されていると仮定する．パケットインタリーブでは，図 3 のように MBL を縦に d 個並べる（図中では $d = 3$ ）．この d をインタリーブ長と呼ぶ．また，連続した d 個の MBL をスーパーマクロブロック（SMBL）という単位で呼ぶ．図 3 は $d = 3$ ， $m = 5$ ，合計 15 個のパケットからなる SMBL の転送の様子を示している．この場合，パケットの送信は 1, 6, 11, 2, 7, 12, ... という順番で行われる．

ここで SMBL 当りのパケット棄却数を B とし，か

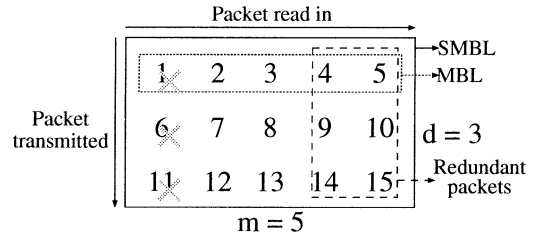


図 3 パケットインタリーブにおけるパケットの構成
Fig. 3 Packet transmission order for packet interleaving.

つ B 個のパケットが連続して失われるという，バーストロスとして最悪のケースを想定する．このとき MBL 単位での損失パケット数は $\lceil B/d \rceil$ で与えられる．ここで $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を表す．冗長パケット数が $2\lceil B/d \rceil$ 未満のときは MBL 全体を回復できないことに注意する．

例えば，ネットワークでの棄却率が 20%，棄却の発生はバースト的で，棄却が発生するときは 3 個程度が連続して棄却される場合を考える．仮に 15 個のパケット中 3 個のパケットがバーストロスで失われた場合（図 3 中の 1, 6, 11），パケットインタリーブでは各 MBL 当り 1 個のパケットしか失われておらず，1 個のパケット損失を回復する冗長度で MBL 全体を回復することができる．このようにしてパケットインタリーブはパケットレベルのバーストロスを分散する．

2.3 パケットインタリーブと遅延

MBL 当りの送出遅延 D_{MBL} を，MBL の先頭パケットをネットワークに送出してから，MBL の最後尾パケットを送出するまでの時間と定義する．1 個のパケットの送出にかかる時間を単位時間とすると， D_{MBL} は次式で与えられる．

$$D_{MBL} = d \cdot (m - 1) + 1. \tag{2}$$

受信ノードにおける MBL レベルの再生遅延の特徴を図 4 に示す．ここで，受信ノードが接続されているアクセスネットワークの回線速度は送信ノードが接続されているものと同じであると仮定する．図 4 の横軸は時刻を，縦軸は受信ノードにおける累積 MBL

(注1): MBL レベルでパケットの位置情報がある場合，1 個のパケット消失につき 1 個の冗長パケットで復元できる．このときの符号化率は

$$\xi = \frac{m - j}{m}$$

となる．

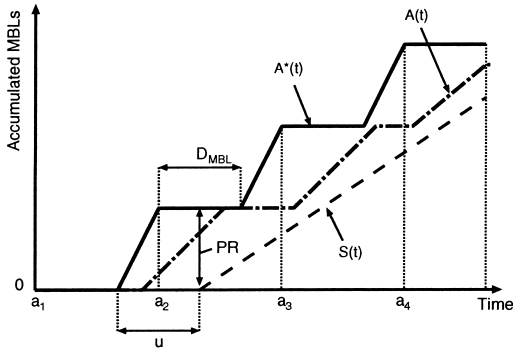


図 4 MBL における再生遅延の特徴
Fig.4 Playback delay of an MBL.

数を表す。 $A(t)$ は遅延揺らぎが発生している場合の累積 MBL 数を、 $A^*(t)$ はネットワーク内で遅延揺らぎが発生しない場合の累積 MBL 数を示している。また $S(t)$ は再生で消費される MBL の累積数を表している。

累積 MBL 数は、MBL を構成する最後尾パケットの到着時点で 1 ずつ増加する（図中では簡単のため、増加の様子を直線で表している）。点 a_i ($i = 1, 2, \dots$) は遅延揺らぎのない場合における i 番目に到着した SMBL 内先頭パケットの到着時刻である。また、PR は再生開始時点における MBL プリロード量を、 u はネットワーク内遅延揺らぎを吸収するための時間を表す。

遅延揺らぎが発生しない $A^*(t)$ において、各 SMBL の先頭パケットが到着した時点から再生遅延 D_{MBL} の間、累積パケット数は増加しない。そして、SMBL 中最初の MBL の最後尾パケットが到着してから、SMBL 内最後尾パケットが到着するまで累積 MBL 数が増加する。累積到着 MBL 数と累積消費 MBL 数の増加率は等しいことに注意する。つまり、転送レートと再生レートが等しくなっている。 D_{MBL} の値が大きくなると、実線と破線が交わることになり、MBL 単位のバッファアンダフローが生じることが分かる。

一般に、ネットワーク内では遅延揺らぎが発生し、それが原因でバッファアンダフローが発生する。これは遅延揺らぎ吸収時間 u を適切に設定することによって対応できる。図のように

$$S(t) < A(t) < A^*(t), \tag{3}$$

が満足されているとき、バッファのアンダフローによる映像品質の劣化が発生しないことに注意する。本論

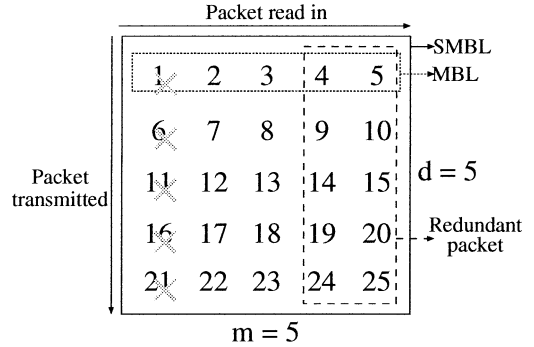


図 5 SMBL 内のパケット数が可変である場合のペケットインタリーブの構成

Fig.5 The case where the number of packets in an SMBL is variable.

文では (3) を満足するような u が存在することを仮定する。

ここでプリロードの量を PR (IP パケット数) とし、1 個の IP パケット処理時間が単位時間になっていることに注意すると、バッファアンダフローを防ぐためには次式が成立する必要がある。

$$D_{MBL} + u \leq PR. \tag{4}$$

2.4 パケットインタリーブと FEC の関係

最後に、インタリーブ長 d と FEC の冗長度について考察する。図 5 と図 6 は連続するバーストロス数が 5 のときの SMBL の構成を表している。どちらの場合も $d = 5$ となっている。

図 5 は $m = 5$ の場合で、SMBL におけるパケット棄却率は 20% となっており、FEC の冗長度は図 3 と同じである。すなわち、符号化率 ξ は両者の場合とも 60% と等しい。しかしながら、SMBL を構成するパケット数が 25 個、送出遅延は $D_{MBL} = 21$ であり、図 3 の $D_{MBL} = 13$ よりも増大することに注意する。

図 6 は $m = 3$ の場合で、SMBL におけるパケット棄却率は 33% であり、そのため FEC の冗長度は図 3 や図 5 の場合よりも増大している。結果として符号化率 ξ は 33% となり、SMBL に含まれる情報量は減少する。しかしながら SMBL を構成するパケット数は図 3 と同じ 15 個であり、送出遅延は $D_{MBL} = 11$ と図 3 のときよりも小さくなる。

以上の結果を表 1 に示す。本論文ではパケットインタリーブの構成において、再生遅延を保障するため、SMBL 内のパケット数を一定とする。理由として、映像品質においては多少情報量が少なく粗い画質になっ

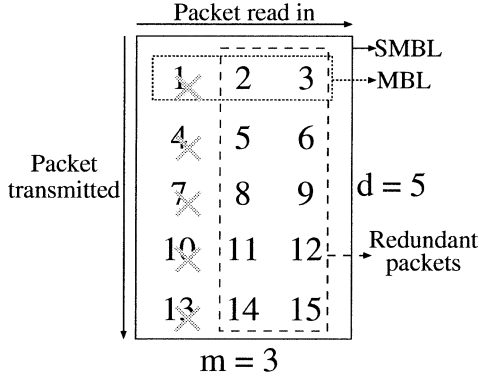


図 6 SMBL 内のパケット数が一定である場合のパケットインタリーブの構成
Fig. 6 The case where the number of packets in an SMBL is fixed.

表 1 SMBL 単位の QoS 特性
Table 1 QoS characteristics of an SMBL.

図番号	(d, m, j)	D_{MBL}	棄却率	ξ
3	(3, 5, 1)	13	0.20	0.60
5	(5, 5, 1)	21	0.20	0.60
6	(5, 3, 1)	11	0.33	0.33

たとしても連続して再生し続けることの方が、パケットロスによって生じる動画の乱れよりもよいと考えられるためである。

3. 提案手法

本手法ではパケットロス率を定期的に推定し、それをもとにインタリーブ長を動的に変更することで、ロスパケットの回復とパーストロスの分散を行う。インタリーブ長を動的に変更する手順を以下に示す。ここで 2.4 で仮定したように、転送する SMBL 内のパケット数は一定とする。

(1) 転送開始時において、リンクで想定されるパケットロス率を初期値としてインタリーブ長及び MBL のパケット数を決定し、パケットインタリーブにおける基準値を定める。

(2) 指数荷重平均を用いて SMBL ごとのパケットロス率を推定する。

(3) 推定したパケットロス率が初期値のパケットロス率より大きいとき、インタリーブ長 d と MBL のパケット数 m を変更する。

(4) 以下(2),(3)を繰り返す。

以下ではパケットロス率の推定とインタリーブ長の決定について詳細を述べる。

3.1 パケットロス率の推定

パケットロス率の推定のため、受信ノード側では SMBL の受信完了時点でその SMBL 内でのパケットロス率と、返信パケットを用いてサーバ側に通知する。パケットロス率の推定値 $\hat{P}_{loss}^{(i)}$ は指数荷重平均を用いて次式で与えられる。

$$\hat{P}_{loss}^{(i)} = \begin{cases} (1 - \beta)\hat{P}_{loss}^{(i-1)} + \beta P_{loss}^{(i-2)}, & i \geq 2 \\ P_{loss}^{(0)}, & i = 0, 1. \end{cases} \quad (5)$$

ここで $P_{loss}^{(0)}$ はパケットロス率の初期値、 $P_{loss}^{(i)}$ は i 番目の SMBL で観測されたパケットロス率である。パケットロス率のサンプル値を 2 回前に転送された SMBL から得ているのは、受信ノードからの返信パケットをもとにパケットロス率の推定を行っているためである。 β は $0 < \beta < 1$ を満たすパラメータで、小さい β は前回の推定値を重視した推定を行う。一方大きい β では最新のパケットロス率の情報を重視して推定を行う。

3.2 インタリーブ長の決定

一つの SMBL に含まれるパケット数を N とする。本論文では簡単のため、 $N = \alpha^n$ (ただし α は 2 以上の整数) とおく。インタリーブ長 d を $d = \alpha^k$ とおくと、一つの MBL に含まれるパケット数 m は α^{n-k} となる。誤り訂正については 2 パケットに対して 1 パケットを復元する冗長度を考え、一つの MBL における冗長パケット数を 2 とする。このときパケットインタリーブ長の最大値が最も大きくなることに注意する。以下では一つのマクロブロック当たりたかだか 1 個のパケットロスしか起こらないようなインタリーブ長 d の設定を考える(図 7)。

i 番目の SMBL を送信する際のインタリーブ長は推定パケットロス率 $\hat{P}_{loss}^{(i)}$ をもとに決定される。 i 番目の SMBL で予想されるパケットロス数 $N_{loss}^{(i)}$ は次式で与えられる。

$$N_{loss}^{(i)} = \lceil \alpha^n \times \hat{P}_{loss}^{(i)} \rceil. \quad (6)$$

変更されるインタリーブ長 α^k は $N_{loss}^{(i)}$ 個のパケットロス数を含むように決定する。今 i 番目に送信する SMBL の符号化率を $\xi^{(i)}$ とすると

$$\xi^{(i)} = \frac{N - 2N_{loss}^{(i)}}{N}, \quad (7)$$

となる(パケットの消失復元の場合については付録に示す)。一つの MBL での冗長パケット数が 2 で

あるから、MBL 単位での符号化率は $d = \alpha^k$ のとき、 $(\alpha^{n-k} - 2)/\alpha^{n-k}$ となる。これより

$$\frac{\alpha^{n-k} - 2}{\alpha^{n-k}} < \xi^{(i)} \leq \frac{\alpha^{n-k+1} - 2}{\alpha^{n-k+1}}, \quad (8)$$

を満足するように k を決定すればよい。これより

$$k > n - \frac{1 - \log_2(1 - \xi^{(i)})}{\log_2 \alpha}$$

$$\text{かつ } k \leq n + 1 - \frac{1 - \log_2(1 - \xi^{(i)})}{\log_2 \alpha}, \quad (9)$$

を得る。

次に送出遅延 D_{MBL} の制約条件について考える。式 (2) より D_{MBL} は次式で与えられる。

$$D_{MBL} = \alpha^n - \alpha^k + 1. \quad (10)$$

式 (4) より α^k における k は次式を満足する必要がある。

$$k \geq \frac{\log(\alpha^n - PR + u + 1)}{\log \alpha}. \quad (11)$$

本手法では MBL における冗長パケット数を 2 と仮定する。このとき MBL の最小パケット数は 3 となる。そのため、インタリーブ長の上限を考慮すると、 α, k, n は以下の関係も満たさなければならない。

$$\alpha = 2, k \leq n - 2, \text{ または } \alpha \geq 3, k \leq n - 1. \quad (12)$$

最終的には、(9), (11), (12) を満足する最小の k を用いてインタリーブ長を決定する。これらを満たす k が存在しない場合には

$$\alpha^k \leq \frac{\alpha^n}{3}, \quad (13)$$

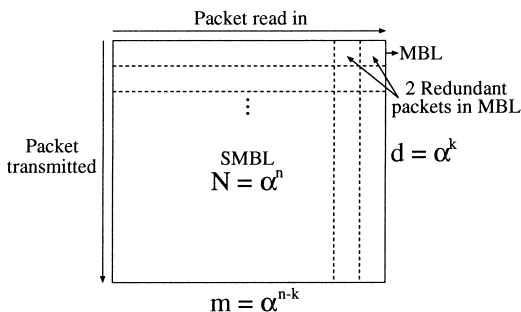


図 7 動的なパケットインタリーブにおけるパケットの構成

Fig. 7 SMBL for dynamic packet-interleaving.

を満足する最大の $k = k_{max}$ でインタリーブ長を決定する。 $\alpha^{k_{max}}$ は α^n 個のパケットから構成される SMBL に対する最大のパケットインタリーブ長になることに注意する。

SMBL 内のパケット数は一定であるため、インタリーブ長の動的な変更に伴って符号化率が変化し、情報パケット数も変化する。これによる SMBL 当りの情報量の変化は、上位レイヤで動画像の圧縮率を変更することによって対応することを想定する。このとき、動画の再生時間は SMBL によらず一定となる。

4. 性能評価

パケットインタリーブによるバーストロスの分散効果と MBL 単位のロスについてシミュレーションにより評価を行った。シミュレーション環境はネットワークシミュレータである ns-2 を用いた。バーストロスに対する提案手法の基本特性を調べるため、ネットワークのトポロジーは 1 組の送信ノードと受信ノードからなる単一リンクモデルを考え、リンク容量は 100 Mbit/s、パケットサイズは 1000 Byte とした (図 8)。

SMBL のパケット数は 1024 個 ($\alpha^n = 2^{10}$)、パケットの転送間隔は $100 \mu\text{s}$ とした。このときの SMBL 当りの転送時間は 0.1024 秒、平均の転送レートは 80 Mbit/s である。またプリロード量 PR は一つの SMBL 分 (パケット 1024 個) とし、遅延揺らぎはないもの ($u = 0$) とした。このとき (11) は $k \geq 0$ となる。

パケットロスの発生は Good State と Bad State からなる 2 状態マルコフ遷移モデルを用い、Good State におけるパケットロス率を 0.0001、Bad State では 0.99 とした。また Good 期間と Bad 期間の和の平均が SMBL における転送時間と等しくなるように設定し、パケットロス率に用いる初期値 $P_{loss}^{(0)}$ を 0.1 とした。

4.1 バーストロスの分散効果

本論文ではバーストロスの分散を表す尺度として、棄却されたパケットの番号間隔の標準偏差を考える。図 9 はリンクのパケットロス率に対するパケットロ

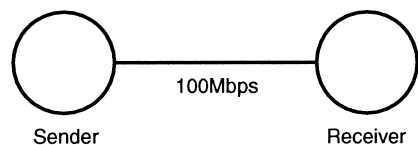


図 8 ネットワークトポロジー

Fig. 8 Network topology.

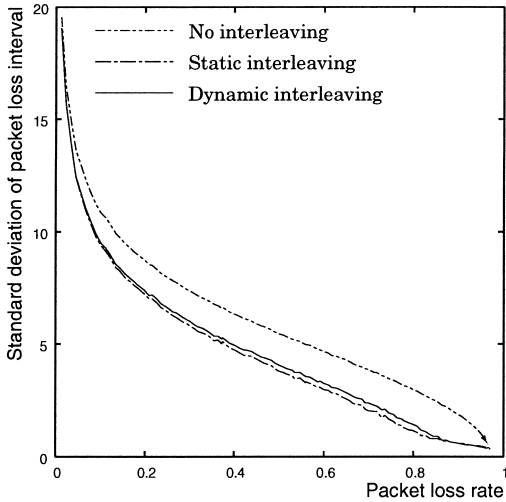


図 9 パーストロスの分散効果
Fig. 9 Standard deviation of packet-loss interval.

ス間隔の標準偏差を示している。図の横軸はリンク全体の棄却率を、縦軸はパケットロス間隔の標準偏差を表す。図では動的なパケットインタリーブ、初期値 $P_{loss}^{(0)} = 0.1$ から決定したインタリーブ長 128 で固定した静的なパケットインタリーブ、インタリーブを行わない場合の 3 種類に対してパケットロス間隔の標準偏差を比較している。パケットロス推定の指数加重平均パラメータ β は 0.9 とした。

図 9 から、リンクのパケットロス率が増加するにつれ、いずれの場合でもパケットロス間隔の標準偏差が単調に減少する傾向が観察される。リンクのパケットロス率が小さいときはパケットロス自体がまれな事象であるため、パケットのロス間隔には大きなばらつきが発生する。このため、パケットロス率が小さいときは大きな標準偏差値となる。反対にパケットロス率が増加するとパケットロスが頻繁に起こるようになり、結果としてロス間隔にばらつきが少なくなってくる。

リンクのパケットロス率が上がるにつれ、動的なパケットインタリーブと静的なパケットインタリーブがインタリーブを行わない場合よりもパケットロス間隔の標準偏差が小さくなっていることが観察される。また動的なパケットインタリーブと静的なパケットインタリーブはほぼ同じ標準偏差となっている。これより、パケットインタリーブを行う方が行わない場合と比べてパケットのバーストロスを分散させる効果が高いことが分かる。

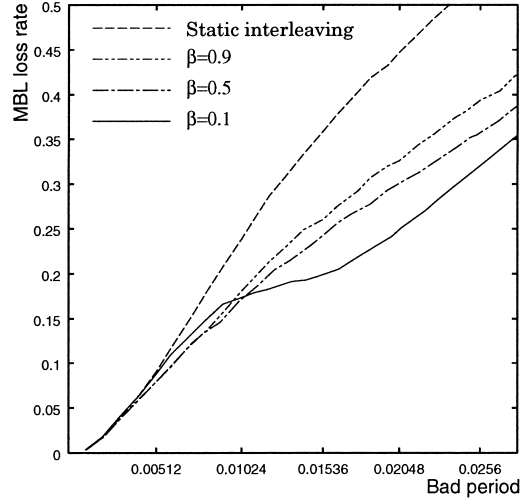


図 10 SMBL 中で平均 1 回のバーストロスが起こる場合の MBL のロス率

Fig. 10 MBL loss rate when a burst-loss event occurs within an SMBL.

表 2 Bad 期間が 0.02048 秒における MBL ロス率の 95%信頼区間

Table 2 95% confidence interval of MBL loss rate when Bad period equals 0.02048s.

インタリーブ設定	MBL ロス率
Static interleaving	0.447324 ± 0.008356
$\beta = 0.9$	0.329029 ± 0.004859
$\beta = 0.5$	0.303275 ± 0.005610
$\beta = 0.1$	0.255426 ± 0.005711

4.2 MBL のロス率

一つの MBL を構成するパケットの中で復元できないものがある場合、その MBL は棄却されたとみなすことにする。このとき MBL のロス率を

$$\frac{\text{SMBL 中で棄却された MBL 数}}{\text{SMBL に含まれる MBL 数}}$$

の平均と定義する。

図 10 はパケットロス率の推定におけるパラメータ β の値を 0.1, 0.5, 0.9 と変えたときの MBL のロス率を示している。横軸は Bad 期間の長さ (秒単位) を、縦軸は MBL の平均ロス率を表している。参考のため、表 2 に Bad 期間が 0.02048 秒における MBL ロス率の 95%信頼区間を示す。この図より、本手法が静的なパケットインタリーブよりも MBL のロス率が低いことが観察される。

動的インタリーブにおいて、Bad 期間が 0.01024 秒付近までは $\beta = 0.9$ のときに MBL ロス率が最も低く、 $\beta = 0.1$ が最も高い値となっている。一方 Bad 期

間が 0.01024 秒よりも大きくなると、 $\beta = 0.9$ のときが最も高く、 $\beta = 0.1$ が最も低い値となっている。

式 (5) から、 β の値が大きいときは最新のネットワーク状態がパケットロス率推定に反映され、小さいときは推定値が長期間の平均的な値になることに注意する。図の結果より、Bad 期間が 0.01024 秒付近までは長い時間スケールにおける平均のパケットロス率よりも瞬間的なパケットロスの変動の方が MBL ロス率に対して大きな影響を与えていることが分かる。一方 Bad 期間が 0.01024 秒を超えると大きい時間スケールにおける平均のパケットロス率が MBL 棄却率に大きな影響を与えている。

提案手法では、パケットロス率の推定に 2SMBL 以前のサンプル値を用いているため、パケットインタリーブ長の変更は 2SMBL 転送時間以前のネットワーク状態が反映されることに注意する。そのため瞬間的なパケットロスの変動が大きいときには、1SMBL の転送時間が大きいほど提案手法の性能が劣化する。これに関しては β の値を小さくすることに加え、SMBL のサイズを小さくすることである程度の改善を図ることができる。

4.3 バーストロス発生過程の影響

本節では、一つの SMBL 転送中に発生するバーストロスの発生過程が MBL のロス率に与える影響を評価する。動的パケットインタリーブは連続的に失われるパケット群を分散させる効果をもっているが、反対にランダムなパケットロス過程に対しては、発生するロスパケットを集中化してしまう危険性が考えられる。本節ではパケットのロス過程がバースト的な性質からランダムな性質に変化するにつれて、提案手法がどの程度有効に機能するのかを検証する。

図 11 から図 14 は Good 期間と Bad 期間の和の平均が SMBL の転送時間と同じ (1 Burst loss), 1/2 (2 Burst losses), 1/4 (4 Burst losses), 言い換えると、一つの SMBL 転送中に平均 1 回, 2 回, 4 回のバーストロスを発生させたときの MBL のロス率を示している。いずれの場合に対しても SMBL 当りのパケット棄却率は等しくしている。このとき、バーストロスが 1 回しか起こらないときが最も連続してパケットが棄却されやすく、4 回のバーストロスが発生する場合はロス間隔のばらつきが少ないことに注意する。

図の横軸は SMBL 当りの平均 Bad 期間^(注2)(秒単位)を、縦軸は MBL ロス率を表している。図 11 は静的なパケットインタリーブのときであり、図 12 か

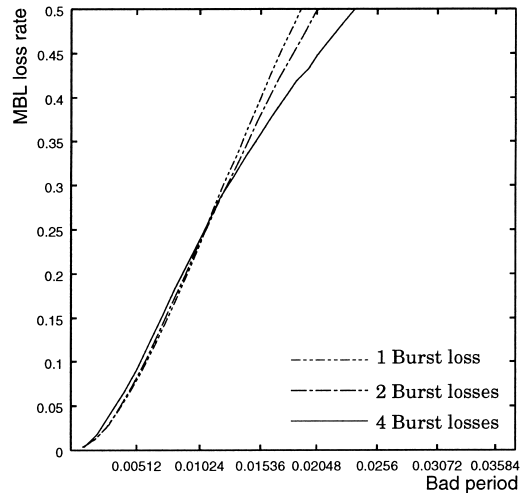


図 11 バーストロス回数の影響：静的なパケットインタリーブ

Fig. 11 The impact of the number of burst-loss events on MBL loss rate: Static interleaving.

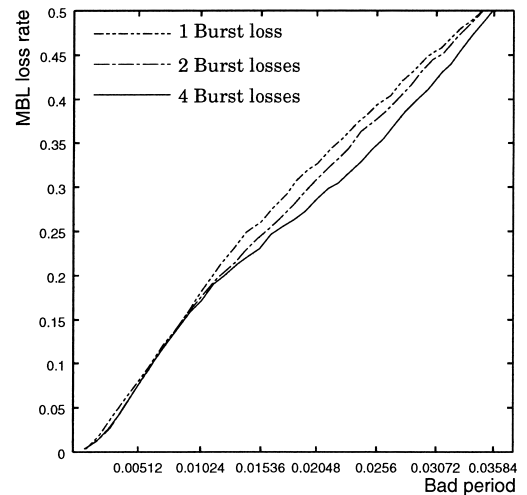


図 12 バーストロス回数の影響： $\beta = 0.9$

Fig. 12 The impact of the number of burst-loss events on MBL loss rate: $\beta = 0.9$.

ら図 14 はそれぞれ $\beta = 0.1, 0.5, 0.9$ のときの動的パケットインタリーブの場合である。

図 11 から図 14 を通して各バーストロス回数における MBL 棄却率を比較すると、静的なパケットインタリーブの結果である図 11 が他の図よりも大きい結

(注2): 横軸の平均 Bad 期間は一つの SMBL における Bad 期間の総和となっている。例えば Bad 期間が 0.01024 秒で 2 Burst losses の場合には、一つの SMBL を転送する間に平均 0.00512 秒の Bad 期間が 2 回発生する。

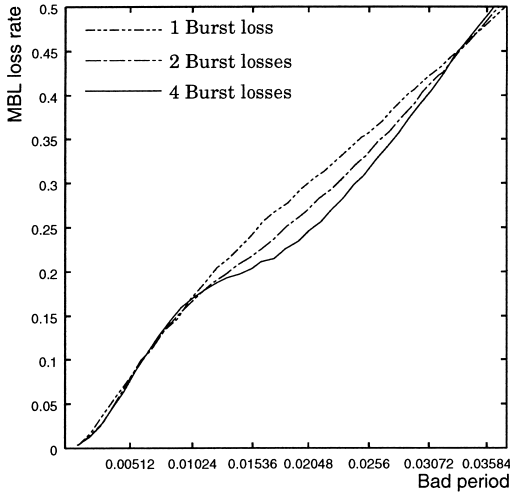


図 13 パーストロス回数の影響 : $\beta = 0.5$
 Fig. 13 The impact of the number of burst-loss events on MBL loss rate: $\beta = 0.5$.

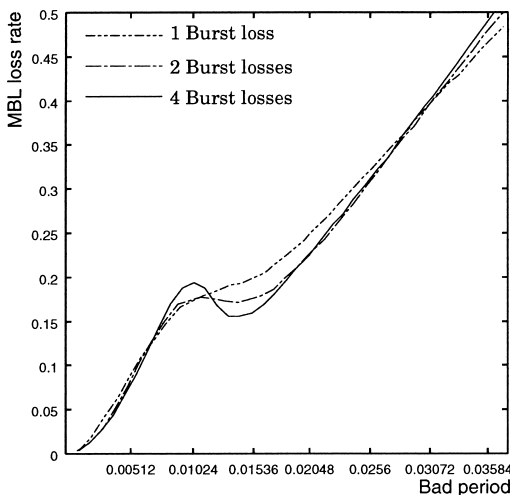


図 14 パーストロス回数の影響 : $\beta = 0.1$
 Fig. 14 The impact of the number of burst-loss events on MBL loss rate: $\beta = 0.1$.

果になっていることが観察される。これは、提案手法がパケットロス過程によらず、静的インタリーブよりも提案手法が効果的であることを意味している。また β の値が小さい図 14 において、最もランダムなパケットロス過程であるパーストロス発生回数が 4 のときに、Bad 期間が 0.01024 付近で MBL 棄却率が極端に劣化していることに注意する。これはランダムに発生しているロスパケット群を MBL レベルで集中化してしまったことが原因と考えられる。

図 12 から図 14 では Bad 期間が 0.01024 付近まではほとんど同じ MBL ロス率となっているが、0.01024 から 0.03072 付近まではパーストロスが 4 回発生する場合が最も小さい MBL ロス率となっている。そして Bad 期間が 0.03072 以降では平均 1 回のパーストロスが発生する場合が最も小さくなる。この 4 回のパーストロスと 1 回のパーストロスが逆転する傾向は図 11 でも同様である。

SMBL 中のパケット数が 1024 のときの SMBL 中で回復可能な最大パケットロス率は 25%^(注3)であり、Bad 期間では 0.0256 付近となる。そのため、その近傍までは平均 4 回パーストロスが発生する場合が MBL 中に複数個のロスパケットを生じさせることが少ないと考えられる。一方 Bad 期間が 0.03702 付近以降では 4 回パーストロスが発生すると、1 個の MBL 中で複数個のパケットロスが発生する状況が多くなり、回復できないロスパケット数が増加して結果として MBL のロス率が増加すると考えられる。

4.4 静的なパケットインタリーブにおいて動的に冗長パケット数を変更させた場合

本節では静的なパケットインタリーブにおいて、SMBL 中から推定したパケットロス率に応じて動的に冗長パケット数を変更させた場合と本手法、パケットインタリーブを行わない場合とを比較する。

パケットインタリーブ長を固定して動的に冗長パケットを割り当てる手法では、インタリーブ長をパケットロス率 0.1 に対応できる 128 に固定し、パケットロス率の推定値 $\hat{P}_{loss}^{(i)}$ が $\hat{P}_{loss}^{(i)} \leq 0.125$ ならば 1 MBL 中の冗長パケット数を 2 として、 $\hat{P}_{loss}^{(i)} > 0.125$ ならば冗長パケット数を 4 として送信を行う。

図 15 から図 17 では各 β ($= 0.1, 0.5, 0.9$) の値について比較を行っている。それぞれの図の横軸は SMBL 当りの平均 Bad 期間 (秒単位) を、縦軸は MBL ロス率を表している。パーストロスの発生回数は一つの SMBL につき 1 回である。

各図において提案手法が最も低い MBL ロス率を提供することが観察される。本手法と動的に冗長パケット数を変更する手法では、互いにパケットロスに対応するときの冗長パケット数は同じであるためロスパケットの回復性能は同等である。しかし、本手法においてインタリーブ長を動的に変更した場合、インタ

(注3): $m = 4$ で冗長パケット 2 個の構成が、最も小さい m となり、このとき 1 個のパケットロスを回復できるので、回復可能最大パケットロス率は $1/4 = 25\%$ となる。

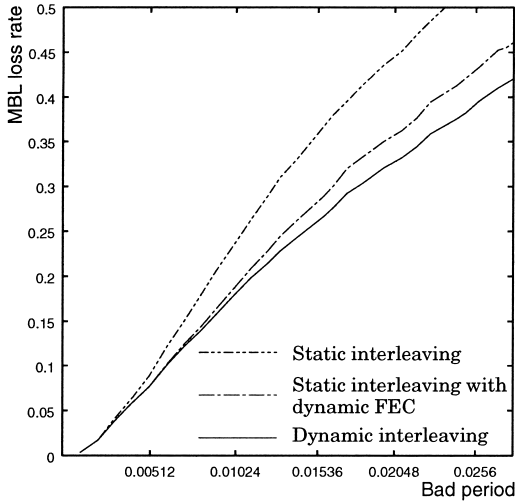


図 15 動的 FEC をもつ静的インタリーブとの比較：
 $\beta = 0.9$

Fig. 15 Dynamic interleaving vs. Static interleaving with dynamic FEC: $\beta = 0.9$.

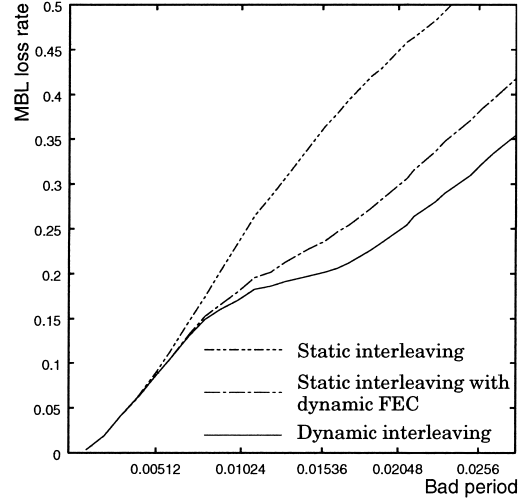


図 17 動的 FEC をもつ静的インタリーブとの比較：
 $\beta = 0.1$

Fig. 17 Dynamic interleaving vs. Static interleaving with dynamic FEC: $\beta = 0.1$.

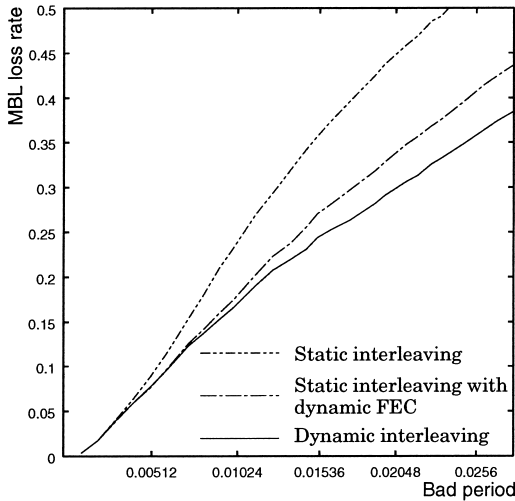


図 16 動的 FEC をもつ静的インタリーブとの比較：
 $\beta = 0.5$

Fig. 16 Dynamic interleaving vs. Static interleaving with dynamic FEC: $\beta = 0.5$.

リーブ長を長くするほど MBL 当りのパケット数が減少する。つまり、インタリーブ長を固定としているときよりも動的にインタリーブ長を変更する提案手法の方が、連続するロスパケットを効果的に分散でき、結果として MBL レベルで低いロス率を実現できることが分かる。

シミュレーションを通して本手法におけるパケット

ロスの推定はパラメータ β の値によって大きく影響することが観察された。これはバーストロス期間が一つの SMBL 転送期間の時間スケールの関係がパケットレベルのロスの分散効果に大きく影響を与えるためである。数値例から、 $\beta = 0.5$ が最も安定した棄却率を達成しているが、 β の適切な推奨値については SMBL のサイズやバーストロス発生過程について更に詳細な検討を行う必要がある。

5. むすび

本論文ではビデオストリーミング配信で問題となるパケットのバーストロスに対処するため、パケットロス率の状況に応じて動的にインタリーブ長を変更する手法を提案した。数値例においては本手法によってバーストロスが分散され、ロスパケットの回復においても従来法よりも高い回復能力があることを示した。バーストロスの分散については本手法と静的なパケットインタリーブを比較し、本手法の方がバーストロスを等間隔のロスに分散していることを示した。ロスパケットの回復においても本手法が静的なパケットインタリーブよりも優れていることを示し、本手法におけるパケットロス率の推定パラメータによってパケットロス率の回復性能が異なってくることも示した。また、トランスポート層とその上位層で連携してネットワーク状態に動的に対処する品質保証方式が、各層で単独

に機能する場合よりも有効であることが確認された。

数値例では MBL 単位の棄却率で評価を行ったが、アプリケーションによっては到着したパケット情報をできるだけ有効に活用するものが考えられるため、提案手法の適用においてはアプリケーションの QoS 情報を適切に反映させるように SMBL と MBL を構成をする必要がある。

本方式における今後の課題として、実際の FEC アルゴリズムに対する適用及び映像品質レベルの品質評価を行うことが挙げられる。また提案方式では SMBL 内パケット数と MBL 中の冗長パケット数を固定してインタリーブ長のみを変更するが、これの拡張として SMBL 内パケット数も変化させてバーストロスに対応する方式が考えられる。しかしながら SMBL 内パケット数を変化させると SMBL の送信遅延が変化するため、受信ノード側でオーバフローやアンダフローが発生しないような SMBL 単位の送信スケジューリングを検討する必要がある。

文 献

- [1] S. Aramvith, C. Lin, S. Roy, and M. Sun, "Wireless video transport using conditional retransmission and low-delay interleaving," Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and System, pp.101-104, April 2001.
- [2] 市川俊一, 浅谷耕一, 富永英義, "誤り訂正符号を用いた損失耐性のある階層化マルチキャストレート制御," 信学論 (B), vol.J86-B, no.2, pp.187-199, Feb. 2003.
- [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.
- [4] A. Jean-Marie, P. Dube, D. Artiges, and E. Altman, "Decreasing loss probabilities by redundancy and interleaving: A queuing analysis," Proc. ITC 18, pp.791-800, Berlin, Sept. 2003.
- [5] T. Kondo, K. Nishimura, and R. Aibara, "An efficient FEC method for high-quality video transmission on the broadband Internet," IEICE Trans. Commun., vol.E87-B, no.3, pp.643-650, March 2003.
- [6] Y.J. Liang, J.G. Apostolopoulos, and B. Girod, "Analysis of packet loss for compressed video: Does burst-length matter?," Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-2003), vol.5, pp.684-687, April 2003.
- [7] Y.J. Liang, J.G. Apostolopoulos, and B. Girod, "Model-based delay-distortion optimization for video streaming using packet interleaving," Proc. IEEE 36th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol.2, pp.1315-1319, Nov. 2002.
- [8] T. Noguchi and M. Yamamoto, "Reliable multicast protocol applying local FEC," IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.2, pp.690-698, Feb. 2003.
- [9] C. Perkins, O. Hodson, and V. Hardman, "A survey of packet loss recovery techniques for streaming audio," IEEE Netw. Mag., vol.12, no.5, pp.40-48, Sept. 1998.
- [10] L. Rizzo and L. Vicisano, "A reliable multicast data distribution protocol based on software FEC techniques," Proc. Fourth IEEE Workshop on High Performance Communication Systems (HPCS'97), pp.23-25, June 1997.
- [11] 宇都宮依子, 小森谷陽多, 萬代雅希, 宇田川智之, 笹瀬巖, "Wireless 1394 において符号化レート制御とコピーデータ送信を併用した動画像通信方式," 信学論 (B), vol.J86-B, no.3, pp.560-575, March 2003.
- [12] B.W. Wah, X. Si, and D. Lin, "A survey of error-concealment schemes for real-time audio and video transmission over the Internet," Proc. IEEE International Symposium on Multimedia Software Engineering, pp.17-24, Dec. 2000.
- [13] 渡辺文夫, 大橋正良, "モバイルネットワークの将来," 電子情報通信学会第二種研究会第 20 回情報ネットワーク・ネットワークシステム研究ワークショップ研究会資料, pp.53-73, March 2004.

付 録

消失復元の場合のパケットインタリーブ長

ここでは、パケットの消失復元のみにおけるパケットインタリーブ長の決定方法を示す。パケットの消失復元では 1 パケットの消失につき、1 冗長パケットで回復が可能であることに注意すると、 i 番目に送信する SMBL の符号化率を $\xi^{(i)}$ は

$$\xi^{(i)} = \frac{N - N_{\text{loss}}^{(i)}}{N}, \quad (\text{A}\cdot 1)$$

で与えられる。一つの MBL での冗長パケット数が 1 であるから、MBL 単位での符号化率は $d = \alpha^k$ のとき、 $(\alpha^{n-k} - 1)/\alpha^{n-k}$ となる。これより

$$\frac{\alpha^{n-k} - 1}{\alpha^{n-k}} < \xi^{(i)} \leq \frac{\alpha^{n-k+1} - 1}{\alpha^{n-k+1}}, \quad (\text{A}\cdot 2)$$

を満足するように k を決定すればよい。これより

$$n + \frac{\log(1 - \xi^{(i)})}{\log \alpha} < k \leq n + 1 + \frac{\log(1 - \xi^{(i)})}{\log \alpha}, \quad (\text{A}\cdot 3)$$

を得る。

送出遅延 D_{MBL} の制約条件は (11) で与えられる。

MBL における冗長パケット数が 1 のときの MBL の最小パケット数は 2 となる。そのため、インタリーブ長の上限を考慮すると、 k と n は以下の関係も満たさなければならない。

$$k \leq n - 1. \quad (\text{A}\cdot 4)$$

最終的には, (A·3), (11), (A·4) を満足する最小の k を用いてインタリーブ長を決定する. これらを満たす k が存在しない場合には

$$\alpha^k \leq \frac{\alpha^n}{2}, \quad (\text{A}\cdot 5)$$

を満足する最大の $k = k_{max}$ でインタリーブ長を決定する.

(平成 16 年 11 月 29 日受付, 17 年 2 月 11 日再受付)



栗本 昌和

平 14 大阪産大・工・情報システム卒. 平 16 奈良先端大・情報科学研究科修士課程了. 同年(株)ドッドウエル ビー・エム・エス入社. 在学中アプリケーションレベルの QoS 保証方式に関する研究に従事.



笠原 正治 (正員)

平元京大・工・数理卒. 平 3 同大大学院工学研究科修士課程了. 平 5 同大学院博士後期課程退学. 同年京大・情報処理教育センター・助手. 平 8 ノースカロライナ大学・客員研究員. 平 9 奈良先端大・情報科学研究科・助手. 平 10 同大助教授. 平 17 京大・大学院情報学研究科・助教授. 博士(工学). 待ち行列理論, ネットワークシステムの性能評価に関する研究に従事. IEEE, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 情報処理学会, システム制御情報学会各会員.