

## 推薦論文

無線網における高信頼マルチキャストの  
ハイブリッド誤り回復方式の性能解析

鈴木 偉 元<sup>†</sup> 上野 英俊<sup>†</sup> 石川 憲 洋<sup>†</sup>  
高橋 修<sup>††</sup> 佐藤 文明<sup>†††</sup> 水野 忠 則<sup>†††</sup>

ARQ は予測できない大きな誤り率変動に対して誤り回復する場合に必要である。FEC はランダムなエラー発生に適し、誤り回復処理の遅延時間を小さくすることができる。一般に、このように相反する特徴を持つ誤り回復技術を組み合わせることによって、誤りパターンに対して万能的な回復力を得られる反面、FEC の符号化パラメータ： $(n, k)$  を一意に決定することは難しい。本論文では、無線網でのマルチキャストによる高信頼なパルクデータの一斉同報配布を対象に、ARQ と FEC をハイブリッドに組み合わせた誤り回復方式の必要性を述べる。さらに前述した符号化パラメータが一意に決まらない問題を解決するために通信コストに関する評価関数として送信時間と送信パケット数の積を定義し、この評価関数を用いたコスト比較によって符号化パラメータの最適値を導く方法を提案する。初めに、既存の誤り回復技術について送信パケット数と送信時間に関する理論解析を行い、ARQ、Pro-active FEC、Reactive FEC を組み合わせたハイブリッド方式の構成について検討する。無線 LAN を用いた実験によって、ハイブリッド方式が ARQ のみの場合と比較してどれだけの改善効果が得られるかを示す。数値例を用いた理論解析結果とプロトタイプを用いた実験結果から、提案の評価関数によってハイブリッド方式の通信コストを最小にする符号化パラメータを導くことができることを示す。

Performance Analysis of Hybrid Error Recovery Methods  
for Reliable Multicast in Wireless Networks

HIDEHARU SUZUKI,<sup>†</sup> HIDETOSHI UENO,<sup>†</sup> NORIHIRO ISHIKAWA,<sup>†</sup>  
OSAMU TAKAHASHI,<sup>††</sup> FUMIAKI SATOH<sup>†††</sup> and TADANORI MIZUNO<sup>†††</sup>

Automatic Repeat Request (ARQ) is necessary for recovering a burst error that has a large fluctuation of error rate. Forward Error Correction (FEC) is suitable for a random error and can reduce delay time caused by the error recovery process. In general, the combination of ARQ and FEC that has symmetrical features aforementioned gives an almighty faculty for error recovery, but it is hard to determine an optimal parameter value, such as FEC's code parameter:  $(n, k)$ . This paper describes that the hybrid error recovery method combined ARQ and FEC is necessary for a reliable multicast, which is utilized for bulk-data transfer in wireless networks. In order to solve the aforementioned FEC's code parameter issue, this paper defines a performance function that does multiplication processing time and number of packets and proposes how to work out an answer of the value by minimizing a whole communication cost calculated by using the proposed function. The configuration of the hybrid method is examined through a theoretical analysis of existing error recovery techniques such as ARQ, Pro-active FEC and Reactive FEC concerning a total number of packets and a total processing time until finishing a whole bulk-data transfer. An experiment using a wireless-LAN shows an improvement impact of multicast communication performance in comparison between the hybrid method and an ordinary ARQ method. This paper shows that the proposed function is able to reach a conclusion by making use of a theoretical analysis with numerical examples and an experimental value obtained from a prototype system.

<sup>†</sup> 株式会社 NTT ドコモネットワークマネジメント開発部  
Network Management Development Department, NTT  
DoCoMo, Inc.

<sup>††</sup> 公立はこだて未来大学システム情報科学部

School of Systems Information Science, Future University-Hakodate

<sup>†††</sup> 静岡大学情報学部

Faculty of Information, Shizuoka University

## 1. はじめに

モバイル端末の普及によって、インターネット接続による情報閲覧やメール等の情報発信が個人レベルにまで広まりつつある。その結果、利用者端末数の爆発的な増加が見込まれる。今後、位置情報に基づくコンテンツ配信や端末アプリケーションのアップデート等、多数の端末を対象とした有料コンテンツ配信の需要が高まることが予想される。マルチキャストは一度の送信で同時に多数の端末に対してコンテンツの配信が可能であり、ネットワークの利用効率の向上とサーバの負荷低減の意味から有望な技術である<sup>1)</sup>。一般に、無線網は有線網に比べて誤り率が高く、遅延ジッタが大きいという特徴があり、モバイル端末に対するマルチキャスト配信では誤り耐性の向上は重要な課題の1つである。とりわけ有料コンテンツ配信では、パケットロスのない高信頼な配信が必要である。

代表的な誤り回復技術には、誤り部分を再送して回復する自動再送要求 (ARQ: Automatic Repeat Request) と、送信側から符号化による冗長データを付加して受信側で誤りを訂正する前方誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction), およびデータのコピーを繰り返し送信する連送がある<sup>1),2)</sup>。これら誤り回復技術は組み合わせることができ、特に ARQ と FEC は誤り回復特性にそれぞれの特徴があるため、組み合わせた場合の誤り回復効果は大きいことが知られている<sup>3)~5)</sup>。マルチキャストにおいて、複数の受信端末がそれぞれ異なるデータパケットをロスしていても同じ FEC の冗長データを共通に使用できるため、FEC はマルチキャストに適した誤り回復技術である。一方、無線網では誤り率の変動量が大きいいため、FEC を用いてすべての端末で生じるパケットロスを回復することは FEC の冗長率をあらかじめ大きく設定する必要があり現実的ではない。無線網におけるマルチキャストでは、誤り率が大きく変動した場合に FEC の冗長率だけでは誤り回復できない可能性がある。このような FEC では回復できない誤りを ARQ によって回復するといった FEC と ARQ の組合せが有効である。

FEC の符号化パラメータ (符号長:  $n$ , 情報ブロック数:  $k$ ) は通信網の特性やアプリケーションの要求条件に合わせて決定する必要がある。なお、ARQ と FEC のように相反する特徴を持つ両者を組み合わせ

る場合には、符号化パラメータを一意に決定することは難しい。ARQ は再送要求に基づいてデータを再送するため、送信データ量は必要最低限であるが、送信を開始してからすべての送信処理が完了するまでの時間が再送待ちタイマの分だけ増加する。一方、FEC は符号化、復号化の処理時間を含めた送信処理に要する時間は ARQ の再送処理と比べて短いが、冗長データの付加によって送信データ量が増加する。以上のように、ARQ と FEC は送信時間と送信データ量に関して異なる特徴を持つことから、両者を組み合わせる場合の FEC の符号化パラメータ ( $n, k$ ) は送信完了までに要する送信時間を最小にする値と送信パケット数を最小にする値が通常は異なる。つまり、FEC の符号化パラメータ ( $n, k$ ) を一意に決めることが難しいという問題がある。

そこで、本論文では ARQ と FEC の組み合わせ方式における符号化パラメータの導出を目的として、送信時間と送信パケット数を用いた評価関数を定義し、この評価関数から算出される値を最小にするような符号化パラメータ値を導く方法を提案する。符号化パラメータ値の導出方法を確立することによって、従来ではフィールド実験や運用データを用いた評価検証を必要としていたシステム設計を容易に実現できる。また、異種無線網を利用した端末が混在する場合には適切なパラメータ値へと調整する必要があり、このパラメータ調整に利用できるメリットがある。

2章では、サーバ・クライアント間のマルチキャストにおける End-to-End の誤り回復方式を対象に無線区間で生じる変動の大きな誤り発生に適用可能な誤り回復方式を検討する。対象とするアプリケーションはバルクデータの一回報配布であり、すべての端末において全送信データを受信完了することを前提とする。まずはじめに、検討対象とする ARQ と FEC を組み合わせたハイブリッド方式の構成を導くため、既存の誤り回復技術について定性的な特徴を比較する。さらに、送信パケット数および送信時間に関する理論解析を行い、既存の誤り回復技術の適用範囲について考察する。これらの考察結果から無線網におけるマルチキャストに適するハイブリッド方式の構成を検討する。

3章では、性能評価のために試作したプロトタイプソフトウェアにおける誤り回復の処理内容について述べる。無線 LAN (IEEE802.11b) を用いた性能評価実験から得られた実験データを用いてハイブリッド方式による性能改善効果を確認する。また、FEC の符号化パラメータ ( $n, k$ ) を変えた場合の送信パケット数と送信時間に対する影響について考察する。

本論文の内容は 2003 年 6 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウムにて報告され、DICOMO2003 プログラム委員会委員により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

4章では、FECの符号化パラメータを決定するため、送信パケット数と送信時間を用いた評価関数を定義し、この評価関数の値を最小にするような符号化パラメータ値を導く方法を提案する。数値例による机上評価結果と実験データのそれぞれから算出した評価関数値を比較することによって、提案の評価関数が理論的にも実験的にも妥当な最適値を導くことができることを示す。

5章では、ARQおよびFECを組み合わせたハイブリッド方式の提案やその性能評価に関する関連研究について紹介するとともに、本研究の位置付けを明らかにする。

## 2. ハイブリッド方式の設計

### 2.1 既存の誤り回復技術の定性的な比較

既存の誤り回復技術について、誤り回復に必要な送信データ量、ネットワークの通信品質（誤り率、誤り率変動量）、端末数に対する特性の観点から比較した結果を表1に示す。ARQはロスした部分を検出して再送するため、誤り率の変動に対して柔軟に対応できる。ただし、パケットロスの生じた端末が複数ある場合には、ARQは個別の再送をロスの生じた端末数だけ繰り返すため、後述するFECと比べて送信データ量が多い。ARQは再送処理において応答待ちタイムの遅延時間が生じるため、誤り率が大きい場合には再送の多発によって遅延時間が増大する欠点がある。また、マルチキャストのように端末数が多い場合は、再送処理の負荷がサーバ側に集中する問題がある。FECを用いた誤り回復技術にはPro-active FECとReactive FECの2通りがある<sup>2),6)-9)</sup>。Pro-active FECは第1回目のオリジナルパケットの送信時に冗長パケットを付加する方法である。マルチキャストにおいて、複数の端末間で異なるパケットをロスしても同じ冗長パケットで回復できることから、FECは端末全体として誤り回復に必要な送信データ量を少なくできる。

表1 誤り回復技術の比較

Table 1 Comparison of error recovery techniques.

誤り回復技術	ARQ	Pro-active FEC	Reactive FEC	速送
送信データ量	多い	少ない	最も少ない	最も多い
適用可能な誤り率	小	小～大	小～大	小
適用可能な誤り変動量	小～大	小	小～大	小
適用可能な端末数	小	小～大	小～大	特になし

Pro-active FECは誤り率の大きさに合わせて冗長率を設計することによって、誤り率の大小には影響なく回復できる。ただし、バースト誤りのような大きな誤り率変動が生じる場合は冗長率の変更が間に合わない。誤り率の変動量を考慮すると冗長率をあらかじめ大きくしなければならない欠点がある。Reactive FECは端末からの再送要求に基づいて冗長パケットを送信する方法である。これはARQと同様に誤り率変動量の大小にかかわらず優れた誤り回復効果が期待できる。連送は衛星通信等の片方向通信で使われ、再送手順やFEC符号化処理がなく送受信の処理負荷が軽い。その反面、繰返し送信によるデータ量の増大や誤り率の変動に柔軟に対応することが難しい。また、誤り率に比例してデータのコピー数が増大するため誤り率の大きな網には向かない。

### 2.2 既存の誤り回復技術の定量的な比較

#### 2.2.1 送信パケット数

前述した誤り回復技術について、送信パケット数に関する理論解析モデルを作成して机上比較を行う。以下では、パケットロスはすべてのパケットに対して同一の確率  $e$  で発生すると仮定する。ARQについて、全端末において送信完了するまでに必要な送信パケット数の期待値  $W_{arq}$  は以下の式で表される<sup>10)</sup>。ARQの再送手順は文献10)と同じく、Selective-Repeat型のマルチキャストによる。

$$W_{arq} = x_0 + \sum_{i=1}^{K_{arq}} Q_i, \tag{1}$$

$$Q_i = \{1 - (1 - e)^{e^{i-1} x_0 N_0 / Q_{i-1}}\} Q_{i-1}, \quad Q_0 = x_0, \tag{2}$$

なお、初回のオリジナルパケット数を  $x_0$ 、ARQの再送回数を  $K_{arq}$  とする。 $Q_i$  は第  $i$  回目の再送の対象となる、1つ以上の未受信端末のあるパケット数の期待値であり、 $N_0$  は送信を開始したときの受信端末数である。Reactive FECについて、FECの情報ブロック数を  $k$  とし、オリジナルパケットを  $k$  個ずつ分割した単位を符号化ブロックと呼ぶ。送信データから符号化ブロックへの分割数を  $B = \lfloor a/k \rfloor$  ( $\lfloor a/b \rfloor$  は  $a$  を  $b$  で割った値の切上げ整数化を表す)、Reactive FECの再送回数を  $K_{rea}$  とすると、送信完了に必要な送信パケット数の期待値  $W_{rea}$  は以下の式で表される<sup>8)</sup>。

$$W_{rea} = \sum_{b=1}^B \left( x_0 + \sum_{i=1}^{K_{rea}} R_i \right) = B \left( x_0 + \sum_{i=1}^{K_{rea}} R_i \right), \tag{3}$$

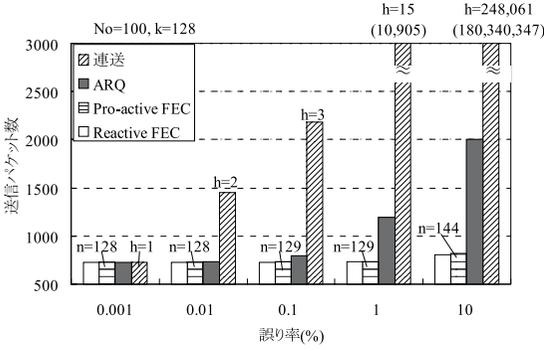


図 1 理論解析による送信パケット数

Fig. 1 Theoretical analysis of number of packets.

$$R_i = \sum_{j=1}^{R_{i-1}} j \binom{R_{i-1}}{j} (1-e)^{R_{i-1}-j} e^j, \quad R_0 = k, \quad (4)$$

$\binom{a}{b}$  は  $a$  と  $b$  の組合せ数を表す．なお， $R_i$  は  $R_{i-1}$  個のパケットを Reactive FEC で送信したときの平均パケットロス数である．Pro-active FEC について，FEC の情報ブロック数を  $k$ ，FEC の符号長を  $n$  ( $n$  はオリジナルパケット  $k$  個に冗長パケットを加えた全送信パケット数に等しい) とすると，送信パケット数の期待値  $W_{pro}$  は以下の式で表される．

$$W_{pro} = B \cdot n, \quad (5)$$

文献 8) より Pro-active FEC のパケットロス数の期待値  $M_{pro}$  は以下で表され，FEC の符号長  $n$  は  $M_{pro} = 0$  となる条件から導かれる．

$$M_{pro} = \sum_{i=1}^k i \binom{n}{n-k+i} (1-e)^{k-i} e^{n-k+i}, \quad (6)$$

連送について，連送回数を  $h$  とすると送信パケット数の期待値  $W_{ren}$  は以下の式で表される．

$$W_{ren} = h \cdot x_0, \quad (7)$$

なお，連送のパケットロス数の期待値  $M_{ren}$  は以下で表され， $h$  はパケットロス数  $M_{ren} = 0$  となる条件から導かれる．

$$M_{ren} = x_0 \{1 - (1-e)^{N_0}\}^h, \quad (8)$$

以上の解析モデルへ数値例を代入し，すべての端末において全送信データの受信が完了することを条件として送信処理が完了するまでに必要な送信パケット数を求めた結果を図 1 に示す．計算に用いた数値例は 1 メガバイトのファイル転送を想定し，送信パケットサイズは 1,500 バイト，うち UDP/IP ヘッダは 28 バイト，誤り回復のためのプロトコルヘッダは

29 バイト，データサイズは 1,443 バイト（すべての解析モデルでデータサイズは等しい）であり，オリジナルデータのパケット総数は  $x_0 = 727$  である．端末数は  $N_0 = 100$  とした．FEC の符号化アルゴリズムには Reed-Solomon 符号<sup>4),5)</sup> の 8 ビットベクトル（符号長の最大値： $255 = 2^8 - 1$ ）とした．冗長パケットの半数を Reactive FEC の再送に使用する分として残すものとし，情報ブロック数は  $k=128$  とした． $x_0/k$  で端数が生じるため，最後の符号化ブロックを構成するパケット数は端数のままとして，冗長率に比例するだけの冗長パケットを付加した．

図 1 において，横軸に誤り率 ( $e$ ) を 0.001~10%まで変えた場合をとり，縦軸に各方式の総送信パケット数を示す．図 1 より，連送は他の誤り回復技術と比べて送信パケット数が非常に多いことが分かる．ARQ は  $Q_i$  の算出式からも分かるように，端末数  $N_0$  に応じてパケットロスの発生数が増加する．数値例として端末数を 100 台と仮定した場合であっても，ARQ は誤り率が 0.1% よりも大きくなると送信パケット数が FEC と比べて多い．端末数が増加するほど，この傾向は顕著になると考えられる．Pro-active FEC と Reactive FEC を比べると，誤り率の大きい場合に Pro-active FEC の方がわずかに送信パケット数が多いが，ほぼ同じ結果であった．実際の網では誤り率が変動するため，Reactive FEC の方が優れる場合が現れるはずである．

## 2.2.2 送信時間

ARQ の送信時間の期待値  $T_{arq}$  は以下の式で表される<sup>11)</sup>．応答シーケンスは ACK ベースのモデルである．

$$T_{arq} = C + \sum_{i=0}^{K_{arq}} (Q_i/v + T + \delta N_i + \alpha + U_i/v + (T + \beta)P(N_i) + V_i/v + (T + \gamma)P(U_i) + \varepsilon), \quad (9)$$

$$C = 1/v + T + \delta N_0 + \alpha + U_0/v + (T + \beta)P(N_0) + V_0/v + (T + \gamma)P(U_0) + \varepsilon, \quad (10)$$

$$P(z) = 1 - (1-e)^z + (1-e)^z F(z)/z, \quad (11)$$

$$F(z) = \sum \left\{ (1-\delta\mu)^j \sum_{a=0}^{i-j-1} \binom{a+j-2}{j-2} (\delta\mu)^a \right\}, \quad (12)$$

$$U_i = eN_i + (1-e)F(N_i),$$

$$V_i = eU_i + (1-e)F(U_i), \quad (13)$$

式 (9) の右辺第 1 項  $C$  はコネクション確立処理時間の期待値，第 2 項はデータパケットの送信，再送お

よび未応答端末への応答問合せ処理時間の和の期待値である。\$Q\_i\$ は第 \$i\$ 回目の再送のための送信パケット数の期待値である。\$N\_i\$ は第 \$i\$ 回目の再送の対象となる端末数の期待値、\$U\_i\$ は第 \$i\$ 回目の再送において \$N\_i\$ 台の端末からの応答 (ACK/NACK) がパケットロスあるいはサーバ側の受信バッファオーバーフローによって正しく受信できない数の期待値である。\$U\_i\$ は第 \$i\$ 回目の再送における第 1 回目の問合せパケット数と等しい。同様に、\$V\_i\$ は第 \$i\$ 回目の再送における第 2 回目の問合せパケット数の期待値である。\$v\$ は 1 秒あたりの送信パケット数、\$T\$ はコネクション確立パケットやデータパケット、問合せパケットの送信に要するターンアラウンドタイム、\$\delta\$ は端末が ACK を返すまでのバックオフ時間、\$\alpha\$ はサーバ側のデータパケットに対する応答待ちタイマの冗長時間である。つまり、\$T + \delta N\_i + \alpha\$ はサーバ側のタイマ値に等しい。\$\beta\$ および \$\gamma\$ は第 1 回目と第 2 回目の問合せパケットに対する応答待ちタイマの冗長時間である。\$\epsilon\$ は第 3 回目以降の問合せパケットの送信に要する時間であるが、この問合せが生じる確率は十分に小さいため、以下の数値計算では省略する。式 (9) の右辺第 2 項の内訳について、第 1 項～第 4 項はコネクション確立のためのパケット送信およびその応答待ち時間、第 5 項および第 6 項は第 1 回目の問合せパケットの送信およびその応答待ち時間、第 7 項および第 8 項は第 2 回目の問合せパケットの送信およびその応答待ち時間である。\$P(z)\$ は端末数 \$z\$ のときに問合せ処理が生じる確率、\$F(z)\$ は \$z\$ 台の端末からの応答がサーバ側の受信バッファでオーバーフローする確率を表す。\$\mu\$ はサーバの応答パケットの受信処理速度である。同様に、Reactive FEC の送信時間の期待値 \$T\_{rea}\$ を以下に示す。

$$T_{rea} = C + \sum_{b=1}^B \sum_{i=0}^{K_{rea}} (R_i/v + T + \delta N_i + \alpha + U_i/v + (T + \beta)P(N_i) + V_i/v + (T + \gamma)P(U_i) + \epsilon), \quad (14)$$

$$R_0 = x_0,$$

Pro-active FEC の送信時間の期待値 \$T\_{pro}\$ を以下に示す。

$$T_{pro} = B \cdot n/v, \quad (15)$$

連送の送信時間の期待値 \$T\_{ren}\$ を以下に示す。

$$T_{ren} = h \cdot x_0/v, \quad (16)$$

なお、Pro-active FEC および連送は下り片方向通信であり、端末からの応答は存在しないモデルである。Reed-Solomon 符号の符号化および復号化のソフトウェア処理性能について実験結果が報告されてい

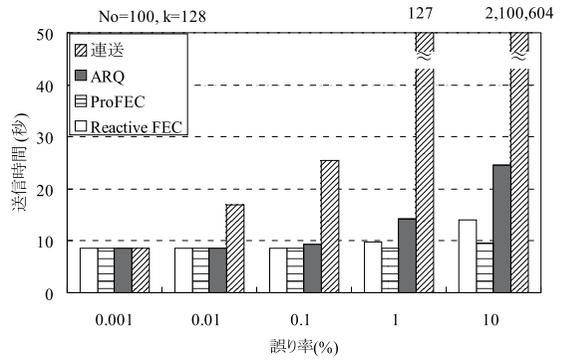


図 2 理論解析による送信時間  
Fig. 2 Theoretical analysis of transmission time.

る<sup>5)</sup>。パケットサイズが 1,024 バイト、\$k = 32\$ の条件において PentiumPRO、200 MHz のパソコンで処理した場合、符号化および復号化の処理速度は約 30 M バイト/秒であった。後述する本論文の実験で用いた条件 (\$k = 128\$) で換算すると符号化と復号化の処理時間の合計は数十ミリ秒となり、パケットサイズの差はあるものの総送信時間と比べて十分に小さいため、本論文の解析モデルでは符号化および復号化の処理時間は省略する。

送信パケット数の場合と同じ数値例を代入して求めた送信時間を図 2 に示す。後述するプロトタイプソフトウェアで動作の確認された結果に基づき、サーバからの送信速度は 1 メガビット/秒、端末側で ACK を返すためのバックオフ時間を \$\delta = 0\$ 秒、サーバ側の応答待ち時間を \$T + \alpha = 0.2\$ 秒、\$T + \beta = 0.2\$ 秒、\$T + \gamma = 0.2\$ 秒、端末からの応答がオーバーフローする確率を \$F(z) = 0\$ とした。横軸に誤り率 (\$e\$) を 0.001 ~ 10% まで変えた場合をとり、縦軸に各方式の送信時間を示す。図 1 とほぼ同様な傾向が得られたが、図 1 には見られなかった傾向として、Reactive FEC は誤り率が大きくなると Pro-active FEC と比べて送信時間が増加する。これは再送ラウンドごとに生じる応答待ちタイマが原因である。

### 2.3 ハイブリッド方式

机上評価結果から誤りのある網では Pro-active FEC が有効であることが確認された。ただし、誤りの発生をランダムと仮定したため、Pro-active FEC に有利な結果となった。しかし、誤り率変動量の大きな無線網では、Pro-active FEC だけですべての端末において全送信データを受信完了するには大量の冗長データが必要であり現実的ではない。一般には、誤り率変動に対処するには Reactive FEC が必要であり、Pro-active FEC と Reactive FEC を組み合わせる必要が

ある．Pro-active FEC を使うことによって，再送要求のための応答爆発が軽減されるメリットもある．また，FEC の符号化アルゴリズムとして一般的に使われる Reed-Solomon 符号や Tornado 符号は符号化演算の時点で符号長 ( $n$ ) と情報ブロック数 ( $k$ ) をあらかじめ決める必要がある．そのため Reactive FEC の再送回数には限度があり，通信途中で大きなパケットロスが生じる場合には回復できない可能性がある．そこで，パルクデータ転送のようなすべての端末において全送信データを受信完了することを前提条件とする高信頼な配信サービスでは ARQ が必要である．また，連送は他の方式と比べてオーバーヘッドが非常に大きく，方式的なメリットも少ないためハイブリッド方式の構成からは外した．よって本論文では，ARQ，Reactive FEC および Pro-active FEC を組み合わせたハイブリッド方式を対象に評価検討を進めることとした．以下では，プロトタイプソフトウェアを作成し，無線 LAN を用いた評価実験によってハイブリッド方式の性能改善効果を検証した結果について述べる．

### 3. プロトタイプソフトウェアを用いた性能評価

#### 3.1 プロトタイプの処理内容

試作したプロトタイプソフトウェアにおけるサーバ側の誤り回復処理の内容を図 3 に示す<sup>12)</sup>．通信プロトコルとして UDP/IP の上位に誤り回復のための処理層を設けた．誤り回復処理は再送処理 (ARQ 部)<sup>10)</sup> と FEC 符号化処理 (Pro-ac/Reac FEC 部) を階層化した．ARQ 部は送信ファイルのセグメンテーションとこのセグメント化されたオリジナルデータパケットに対する送達確認 (ACK/NACK) と再送制御を行う．Pro-ac/Reac FEC 部はオリジナルデータパケットから冗長パケットを生成してオリジナルデータパケットに付加して送信する．Reactive FEC は再送要求 (NACK) ベースの再送制御を行う．まず初めにサーバにおいて，ARQ 部は送信ファイルのセグメンテーションを行い，オリジナルデータパケットを生成し， $k$  個のデータパケットからなる符号化ブロックを構成する．さらに，ARQ 部は Pro-ac/Reac FEC 部へ送信ファイルを構成するすべての符号化ブロックの送信を一度に指示する．Pro-ac/Reac FEC 部はオリジナルデータパケットから符号化ブロックを単位として冗長パケットを生成し，オリジナルデータパケット ( $k$  個) に冗長パケットを加えて Pro-active FEC の符号長 ( $n$ ) に等しい数のパケットを送信する (Pro-active FEC)．端末は符号化ブロックを単位として復

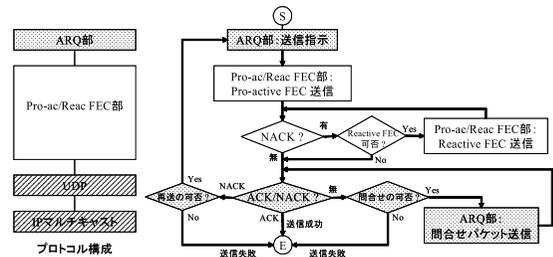


図 3 プロトタイプの誤り回復処理内容

Fig. 3 Error recovery process implemented in a prototype.

号化を行い，受信が完了すると 1 つの符号化ブロックの送信が完了する．もしも，冗長率以上のパケットロスが生じて回復できない場合，端末は Pro-ac/Reac FEC 部レベルで NACK を返し，必要な再送パケット数を通知する．サーバの Pro-ac/Reac FEC 部では，NACK に基づいて冗長パケットを再送する (Reactive FEC)．ただし，再送回数の上限 (5 回) に達した場合には，Pro-ac/Reac FEC 部の再送処理は打ち切られる．サーバでは，Pro-ac/Reac FEC 部のタイマ (200 ミリ秒) 待ちの間に端末からの応答が届かなければ Pro-ac/Reac FEC 部の処理は終了する．端末は ARQ 部と Pro-ac/Reac FEC 部のそれぞれに対するタイマ監視を行う．もしも，冗長パケットが届かずに Pro-ac/Reac FEC 部の応答パケット待ちタイマ (120 ミリ秒) がタイムアウトした場合には，端末は Pro-ac/Reac FEC 部に対する NACK を返す．さらにファイル受信が完了せずに ARQ 部の応答パケット待ちタイマ (5 秒) がタイムアウトした場合には，端末は ARQ 部に対する NACK を返し，受信できなかった符号化ブロックを通知する．サーバでは，ARQ 部のタイマ (5 秒) 待ちの間に端末からの応答がない場合には ARQ 部より問合せパケットを送信し，端末へ応答を催促する．ARQ 部において，規定回数 (5 回) の問合せパケットを送信しても端末からの応答がない場合 (問合せパケットに対する応答待ちタイマは 400 ミリ秒) には応答問合せの失敗である．当該端末は送信対象から外される．ARQ 部は NACK で通知された符号化ブロックを対象に Pro-ac/Reac FEC 部へ再送を指示する．ARQ 部の再送回数の上限 (10 回) に達した場合には，ARQ 部の再送処理は打ち切れ転送失敗である．

#### 3.2 実験と考察

##### 3.2.1 実験システム

実験システムの構成を図 4 に示す<sup>12)</sup>．実験システムはマルチキャストの送信を行うワークステーション (Sun Ultra 10)，無線 LAN アクセスポイント

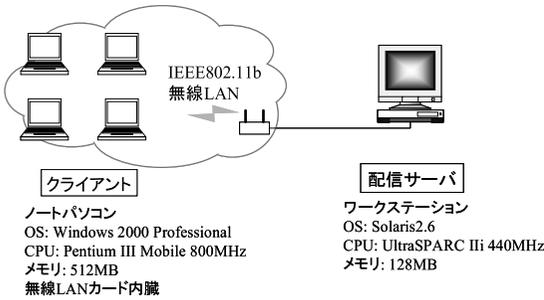


図 4 実験システムの構成  
Fig. 4 Experimental system configuration.

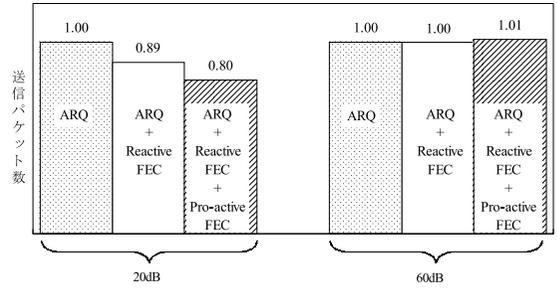


図 5 送信パケット数の比較 (実験結果)  
Fig. 5 Comparison of number of packets (experiment).

(ORiNOCO AP-2000, IEEE802.11b), および端末である 4 台のノート型パソコン (Toshiba Dynabook) で構成される。4 台の端末は無線 LAN の SNR (Signal to Noise Ratio) が同じ所に設置した。以下では、無線 LAN の SNR が 20 dB と 60 dB である場合について、1 メガバイトのファイルを 4 台の端末に対して送信し、すべての送信が完了するまでに要した送信時間と送信パケット数を測定した。無線 LAN は誤り率の変動量や誤り発生の変動量 (パスト発生) が大きいことや端末ごとの誤り率の違い等の特徴がある。そこで、誤り率の大きな場合のデータを得るために 120 回の測定 (1 パターンのパラメータ条件の測定時間にして約 25 分間) を実施した。本論文ではマルチキャストにおいてすべての端末が受信を完了することが要求条件であることから、端末ごとの測定結果のばらつきではなく、すべての端末の中で送信時間あるいは送信パケット数が最大となるケースの処理性能に着目して実験結果を評価した。また、文献 13) では端末の移動について、歩行程度の速度 (0.65 m/秒) であれば静止している場合と比べて誤り率の変動量には影響が見られないことが報告されていることから、本実験では端末を静止させて実験を行った。

### 3.2.2 送信パケット数

4 台の端末がすべて送信完了するまでに要した送信パケット数を図 5 に示す。測定結果は ARQ のみの場合を 1 として正規化した。SNR 20 dB (平均誤り率 2.7%) の場合には、ARQ のみと比べて ARQ+Reactive FEC は 0.89 まで減少し、さらに Pro-active FEC (符号化率  $k/n = 128/134$ ) を加えると 0.80 まで改善された。SNR 60 dB (平均誤り率 0.06%) の場合には、ARQ のみと比べて ARQ+Reactive FEC はほぼ同じ値であった。さらに Pro-active FEC (符号化率  $k/n = 128/130$ ) を加えた場合には 1.01 まで増加した。このとき、送信パケット数が増加する原因は Pro-active FEC の冗長率である。

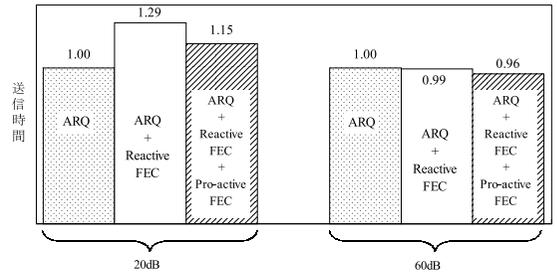


図 6 送信時間の比較 (実験結果)  
Fig. 6 Comparison of transmission time (experiment).

### 3.2.3 送信時間

4 台の端末がすべて送信完了するまでに要した時間を図 6 に示す。測定結果は、ARQ のみの場合を 1 として正規化した。SNR 20 dB の通信品質の悪い場合には、ARQ のみと比べて ARQ+Reactive FEC は 1.29 まで増加したが、さらに Pro-active FEC (符号化率  $k/n = 128/134$ ) を加えることで 1.15 まで増加率を短縮できた。図 2 の理論解析結果と異なり、ARQ のみの場合が良好であった理由は、端末数が 4 台と少なく FEC の効果が得られていないためである。これは送信ファイルを FEC の符号化ブロック数ごとに分割して処理するため、分割単位に生じる送達確認のための待ち時間が ARQ の再送処理による遅延時間よりも大きく、支配的であることが原因である。SNR 60 dB の場合には、ARQ +Reactive FEC +Pro-active FEC (符号化率  $k/n = 128/130$ ) は ARQ のみの場合と比べて 0.96 に減少した。これは誤り率の変動量が小さく、Pro-active FEC の回復力が十分に大きいためである。

### 3.2.4 符号化パラメータ (n, k) の影響

符号化パラメータ値の導出にあたっては、誤り率の平均値と変動量を考慮することが望ましいが、誤り率の変動量は無線網の特性上突然に乱れやすく特定することが難しい。一方、誤り率の平均値は測定によ

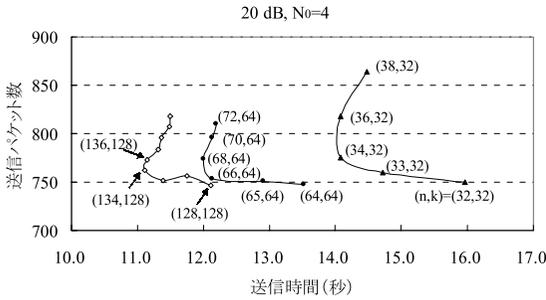


図 7  $(n, k)$  を変えた実験結果の比較

Fig. 7 Comparison of experimental results using several values of  $(n, k)$ .

て比較的容易に得ることができ、ネットワーク設計の目標値として定められている場合もある。偏って大きな誤り率に基づいて冗長率を求めることは不要な冗長パケットを増大させることになる。そこで Pro-active FEC の符号化パラメータ  $(n, k)$  の設計では誤り率の平均値を用い、実際に生じる誤り率変動に対しては Reactive FEC および ARQ の手順によって回復することが現実的である。

無線 LAN を用いた実験において、符号化パラメータ  $(k, n)$  の値をそれぞれ少しずつ変えた場合の測定結果を図 7 に示す。図 7 において、横軸は送信完了までの時間、縦軸は送信完了までの総送信パケット数である。情報ブロック数は  $k = 32, 64, 128$  の 3 通りである。なお、すべての測定において、送信ファイルサイズは 1 メガバイト、送信パケットサイズは 1,500 バイト、うち UDP/IP ヘッダは 28 バイト、誤り回復のためのプロトコルヘッダは 29 バイト、データサイズは 1,443 バイトである。また、誤り率が大きく変動した場合の影響を小さくするために 120 回の測定を行って早く送信完了したものから 100 個分の測定データを用いて平均値を算出した。

図 7 において、異なる  $k$  について比較すると、送信パケット数は同じような分布幅を持ち、 $k$  を変えたことによる差が見られない。一方、送信時間については  $k$  を大きくするほど、短い時間で送信が完了する。 $k$  が大きいほど各送信サイクルに送信できるパケット数が多いため、送信サイクル数が少なくなる。各送信サイクルでは、再送待ちタイマの遅延時間が生じるため、送信サイクル数が少ないほど送信時間のオーバーヘッドが小さい。すなわち、 $k$  を大きくするほど送信時間が短いという結果が得られる。ただし、単に  $k$  を大きくとればよいというわけではない。一般には、大きな  $k$  はロバスト性が高い反面、符号化処理やメモリサイズといったコストが高くなる欠点があり、比較的小さ

な値が適当であるといった報告もある<sup>14)</sup>。本実験では、送信処理をシングルタスクで順次実行したが、複数の送信処理を並列に実行することが考えられる。処理の並列化によって  $k$  の大きさに依存した送信時間のオーバーヘッドを吸収できる。また、冗長パケット数は Reed-Solomon 符号のベクトル長から決まる上限があるため、Pro-active FEC の情報ブロック数 ( $k$ ) を大きくすることは Reactive FEC で使用可能な冗長パケット数や再送回数を制限することになる。つまり、Pro-active FEC の符号化パラメータは誤り回復能力に関する設計条件を考慮して決定する必要がある。よって、 $k$  値は設計条件に従って定められ、 $k$  に対する最適な  $n$  値の導出方法が重要である。

あらかじめ誤り発生が想定される環境では、Pro-active FEC を用いることで送信完了までの時間を短縮できることが実験的に確認された。 $n$  値をわずかに増やしたときには、冗長パケットの分だけ送信パケット数が増えるにもかかわらず送信時間の改善が見られた。この場合は冗長パケットによって再送遅延の発生を抑える効果が支配的である。さらに  $n$  値を増やすぎると必要以上に冗長となり、結果として送信時間と送信パケット数の増大につながる。このことから、 $n$  値には最適な値が存在すると考えられる。

#### 4. 符号化パラメータの最適化

##### 4.1 評価関数

以上の検討結果から、 $(n, k)$  の最適値を求めるためには、送信完了までに送信されるパケット総数の期待値  $M_h$  を最小にする条件と、送信完了までに要する時間の期待値  $T_h$  を最小にする条件を同時に満たす値を導く必要があるため、送信パケット総数と送信時間の積を評価関数として定義する。以下に提案の評価関数  $E(M_h, T_h)$  を示す。

$$E(M_h, T_h) = \frac{M_h}{M_{\min}} \cdot \frac{T_h}{T_{\min}}, \quad (17)$$

ここで、 $M_{\min}$  は送信完了までに送信されるパケット総数の理論最小値であり、 $T_{\min}$  は送信完了までに要する時間の理論最小値を表す。すなわちオリジナルデータのみを送信して再送が一度も発生しない場合の値である。2.2 節で述べた理論解析から以下を得る。

$$M_{\min} = B \cdot n,$$

$$T_{\min} = C + x_0/v + B(T + \delta N_0 + \alpha_{fec}), \quad (18)$$

$\alpha_{fec}$  はサーバ側の Pro-ac/Reac FEC 部でのデータパケットに対する応答待ちタイマの冗長時間である。ARQ 部は符号化ブロックを単位として Pro-ac/Reac FEC 部へ送信を指示した後、端末からの応答に対す

るタイムアウトを待って未応答の端末があれば問合せパケットを送信する．送信時間が理論的に最小となる場合には，パケットロスが発生せずすべての端末が ACK を返送して速やかに処理が完了する．そこで，式 (18) の  $T_{\min}$  はコネクション確立処理時間とデータ送信時間と Pro-ac/Reac FEC 部のタイマの合計である．Pro-ac/Reac FEC 部の再送回数を  $H_{fec}$ ，ARQ 部の再送回数を  $H_{arq}$  とすると  $M_h$  は以下の式で表される．

$$M_h = \sum_{b=1}^B \left( n + \sum_{i=0}^{H_{fec}} L_i + J_1(H_{arq}) \right), \quad (19)$$

$$L_0 = 0 \quad (i = 0),$$

$$L_1 = M_{pro} \quad (i = 1),$$

$$L_i = R_{i-1} \quad (i > 1),$$

ただし  $R_0 = M_{pro}$ ,

$$J_1(H_{arq}) = \sum_{j=0}^{H_{arq}} \left( n + \sum_{i=0}^{A_{fec}} L_i \right), \quad J_1(0) = 0, \quad (20)$$

$J_1(H_{arq})$  は ARQ 部で再送が生じたことによる送信パケット数の増加分であり， $A_{fec}$  は Pro-ac/Reac FEC 部に設定する最大再送回数である．また， $T_h$  は以下の式で表され， $J_2(H_{arq})$  は ARQ 部で再送が生じたことによる送信時間の増加分である．

$$T_h = C + \sum_{b=1}^B (D_{fec}(H_{fec}) + J_2(H_{arq})), \quad (21)$$

$$J_2(H_{arq}) = \sum_{j=0}^{H_{arq}} \left( \sum_{b=1}^B D_{fec}(A_{fec}) + T + \alpha_{arq} + l_1/v + (T + \beta_{arq})P(N_0) + l_2/v + (T + \gamma_{arq})P(l_1) + \varepsilon_{arq} \right), \quad (22)$$

$$l_2 = el_1 + (1 - e)F(l_1), \quad (23)$$

$\alpha_{arq}$  は ARQ 部でのデータパケットに対する応答待ちタイマの冗長時間である． $\beta_{arq}$  および  $\gamma_{arq}$  は ARQ 部での第 1 回目と第 2 回目の問合せパケットに対する応答待ちタイマの冗長時間である． $\varepsilon_{arq}$  は第 3 回目以降の問合せパケットの送信に要する時間である． $l_1$  および  $l_2$  は ARQ 部のデータパケット送信ごとの第 1 回目および第 2 回目の問合せパケット数である． $D_{fec}$  は Pro-ac/Reac FEC 部の NACK ベースの再送処理時間の期待値であり，Pro-ac/Reac FEC 部の再送回数を  $d$  として以下の式で表される．

SNR=20 dB,  $e=0.027$ ,  $N_0=4$

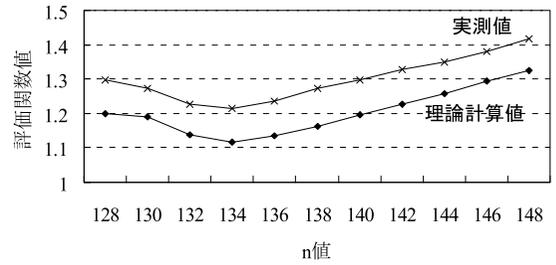


図 8 評価関数の値 ( $k = 128$  の場合)

Fig. 8 Distribution of the performance function ( $k = 128$ ).

$$D_{fec}(d) = n/v + T + \alpha_{fec} + \delta w_0 + \sum_{i=1}^d (R_i/v + T + \alpha_{fec} + \delta w_i), \quad (24)$$

$$R_1 = M_{pro},$$

なお， $w_i$  は符号化ブロックの送信における第  $i$  回目の再送ラウンドの端末数の期待値であり，以下の式で表される．

$$w_0 = N_0, \quad w_1 = N_0 \sum_{i=n-k+1}^n \binom{n}{i} e^i (1 - e)^{n-i}, \quad (25)$$

$$w_i = w_{i-1} \{1 - (1 - e)^{R_{i-1}}\} \quad (i > 1),$$

#### 4.2 最適値の導出

式 (17) において，ネットワークのパケット誤り率および端末数の数値例を代入し，符号化パラメータ  $(n, k)$  を変数として与え，評価関数値を最小にする  $(n, k)$  を導く．図 8 は  $k = 128$  の場合の評価関数値を求めた結果であり，理論解析による値と無線 LAN を用いた実験結果から求めた値である．実験では ARQ 部の再送待ち時間は 1 回の送信あたり  $T + \alpha_{arq} = 5$  秒，問合せパケットの応答待ち時間は  $T + \beta_{arq} = 0.4$  秒， $T + \gamma_{arq} = 0.4$  秒，バックオフ時間は  $\delta = 0$ ，端末からの応答がオーバーフローする確率は  $V(z) = 0$  であった．Reactive FEC の送信待ち時間は 1 回の送信あたり  $T + \alpha_{fec} = 0.2$  秒，バックオフ時間は  $\delta = 0$  であった．また，理論解析では ARQ 部の再送は同じデータパケットの送信を繰り返し指示するだけであるため，理論解析モデルでは Pro-ac/Reac FEC 部において十分な回数の再送を実施できるものと仮定した．すなわち，ARQ 部の再送および応答問合せの処理は生じないものとして計算した ( $H_{arq} = 0$ ,  $J_1(H_{arq}) = 0$ ,  $J_2(H_{arq}) = 0$ )．

図 8 より評価関数  $E(M_h, T_h)$  の分布は理論値お

よび実験値とも下に凸の形状となり、評価関数値  $E(M_h, T_h)$  を最小にする  $(n, k) = (134, 128)$  が存在することが分かる。このとき、Pro-active FEC を用いなかった場合 ( $k = n = 128$ ) と比べて評価関数値で約 7% の改善が見られた。Pro-active FEC の符号長  $n$  を増やしていくに従って評価関数値が減少し、評価関数値を最小にする最適な  $(n, k)$  に至る。このような減少傾向は Pro-active FEC の誤り回復効果によると考えられる。最適な  $(n, k)$  を超えてさらに  $n$  を増やしていくと、Pro-active FEC の冗長パケットが過剰になり、評価関数値が増加していく。

図 8 から評価関数  $E(M_h, T_h)$  の分布は理論値、実験値がほぼ同じ分布傾向を示し、理論的にも実験的にも妥当な結果を示していることが分かる。実験結果が理論値と比較して  $(n, k)$  の値にかかわらずほぼ等間隔に大きい値を示している点について、実験では固定的な処理オーバーヘッドが生じていると考えられる。評価データの内訳を見ると、送信パケット数は実験結果と理論値でほぼ一致しているが、送信時間はすべての  $(n, k)$  において実験結果が理論値と比べて約 9% 程度大きい値であった。理論解析ではサーバや端末の内部処理時間やバッファオーバーフローをなしとした点が差分の生じた原因の 1 つである。

なお、図 7 より送信パケット数を最小にする符号化率は  $k/n = 128/128$  であることから、 $n$  値について送信時間を最小にする値と送信パケット数を最小にする値とは独立に存在することが分かる。どちらをどれだけ優先したいのかといった設計ポリシーに関する合理的な決定方法が課題として残る。たとえば、ストリーミングメディアのような実時間性の高いアプリケーションでは送信時間を最小にすることを優先し、移動体通信におけるファイルダウンロードのように通信パケット料金が重要になる場合には送信パケット数を最小とすることを優先するであろう。提案の評価関数は通信コストを送信時間と送信パケット数の両面からバランス良く最小にできる値を導出できるものと考えられる。

## 5. 関連研究

従来、FEC と ARQ を組み合わせたハイブリッド方式として Layered FEC と Integrated FEC が提案されている<sup>8)</sup>。Layered FEC は再送を行う高信頼層 (RM 層) と FEC の符号化層 (FEC 層) が上下に分かれた実装方式である。RM 層が出力したデータパケットは FEC 層において符号化され、オリジナルパケットに加えて冗長パケットが送信される。受信側の FEC

層では、オリジナルパケットに欠落があった場合には冗長パケットを用いて復号化し、オリジナルパケットを補完して RM 層へ渡す。もしも、受信パケット数がオリジナルパケット数に満たない場合、FEC 層は受信の成功したオリジナルパケットだけを RM 層へ渡す。RM 層は受信できなかったオリジナルパケットの再送を要求する。Integrated FEC は RM 層と FEC 層を同一の処理階層に実装した方式である。FEC 符号化時には冗長パケットを多めに作成しておき、受信パケット数がオリジナルパケット数に満たない場合には、あらかじめ多めに作成しておいた冗長パケットの残りの中から再送する。文献 8) では、数値例を用いた理論解析評価によって、受信端末数に対する送信パケット数に関する両者の比較を行った。比較の結果から Integrated FEC の方が優れていることが示されている。Layered FEC は本論文で取り扱った ARQ と Pro-active FEC を階層構成にしたものであり、Integrated FEC は本論文の Reactive FEC と同じである。本論文で取り扱ったハイブリッド構成の検討や評価はなされていない。

文献 9) では、計算機シミュレーションを用いたハイブリッド方式の性能評価結果が報告されている。無線網に FEC を適用する際には、無線網の誤り率変動量が大きいため情報ブロック数  $k$  と符号長  $n$  をただ 1 つに決定できないことから、誤り率と端末数が与えられた場合に最適な  $(n, k)$  の値へアダプティブに変更する必要があることを述べている。その際、最適値を算出する評価指標として、パケット再送回数の関数である Efficiency をあげている。通信品質の評価指標としてはパケット誤り率に関する目標値があり、それを満たす符号化パラメータの中で Efficiency が最大になるものが最適であることを述べている。しかし、高信頼化処理のオーバーヘッドである送信パケット数や送信時間に関する評価はなされていない。ARQ と FEC を組み合わせた方式の性能評価では、ARQ の再送待ちタイマによる遅延時間の増大と FEC の冗長符号化による送信パケット数の増加量について評価する必要がある。以上の理由から、本論文ではハイブリッド方式の符号化パラメータ値を導出するにあたり、送信時間と送信パケット数を評価指標とすることとした。

## 6. あとがき

本論文では、誤り率変動量の大きな無線網でのマルチキャストを用いたバルクデータの斉同報配布を対象とした誤り回復には、ARQ、Pro-active FEC および Reactive FEC を組み合わせたハイブリッド方式

が必要であることを述べた．従来から ARQ と FEC を組み合わせることの有効性について述べられているが，ハイブリッド方式では Pro-active FEC の符号化パラメータを定めることが難しいという問題があった．そこで，この問題を解決するため，送信時間と送信パケット数の積である評価関数を定義し，この評価関数から算出される通信コストを最小にするような符号化パラメータ値を導くことによって符号化パラメータの最適値を導出できることを示した．

無線 LAN を SNR 20 dB の比較的誤りの生じやすい状況で使用した場合，ハイブリッド方式は ARQ のみの場合と比較して，送信完了までの送信時間を 74% まで減少し，送信パケット数を 87% まで減少できることを確認した．また，提案の評価関数について，数値例を用いた理論解析結果と無線 LAN を用いた実験結果が同じ結果を示すことを確認し，提案の評価関数の有効性を示した．

今後は，マルチキャストのスケラビリティを考慮し，端末台数を数千台規模に増やした場合の評価関数の有効性を確認するため，計算機シミュレーションによる評価データを取得する予定である．そのためには，無線網の誤り特性等いくつか前提条件となるモデルの導出が課題である．また，モバイル端末を対象とする場合にはモビリティを考慮する必要があり，端末数の特定方法が課題の 1 つである．モビリティをサポートする場合にはアクセスポイントをまたがったときのハンドオーバーや無線 LAN のように周囲の環境変化による影響を受けて誤り特性が大きく変わることが想定されるため，符号化パラメータ  $(n, k)$  をアダプティブに調整するといった，より適応性のあるハイブリッド方式の検討を行う予定である．

謝辞 本研究を進めるにあたり，プロトタイプ的设计，試作とその評価測定等に関して多大なご協力をいただいた NTT アドバンステクノロジー株式会社の藤原廣則氏，三瓶史彦氏に心から感謝いたします．

### 参 考 文 献

- 1) 山内長承：高信頼マルチキャスト，情報処理，Vol.42, No.8, pp.754-759 (2001).
- 2) 木下真吾：リライアブルマルチキャスト技術の最新動向，信学論文誌，Vol.J85-B, No.11, pp.1819-1842 (2002).
- 3) Chumchu, P. and Seneviratne, A.: Adaptive Packet Level Redundancy Mechanisms for Reliable Mobile Multicast: Proposed Architecture and Performance Analysis, *ICITA2002*, 080-1 (2002).

- 4) McAuley, A.J.: Reliable Broadband Communication Using a Burst Erasure Correcting Code, *ACM SIGCOMM'90*, pp.297-306 (1990).
- 5) Rizzo, L.: Effective Erasure Codes for Reliable Computer Communication Protocols, *ACM Computer Communications Review*, Vol.27, No.2, pp.24-36 (1997).
- 6) Rubenstein, D., Kurose, J. and Towsley, D.: *A Study of Proactive Hybrid FEC/ARQ and Scalable Feedback Techniques for Reliable, Real-Time Multicast*, *Computer Communications* (2001).
- 7) Rubenstein, D., Kurose, J. and Twsley, D.: Real-Time Reliable Multicast Using Proactive Forward Error Correction, *Proc. NOSSDAV'98* (1998).
- 8) Nonnenmacher, J., Biersack, E. and Towsley, D.: Parity-Based Loss Recovery for Reliable Multicast Transmission, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.6, No.4, pp.349-361 (1998).
- 9) Nikaiein, N., Labiod, H. and Bonnet, C.: MA-FEC: A QoS-Based Adaptive FEC for Multicast Communication in Wireless Networks, *IEEE International Conference on Communication*, No.1, pp.954-958 (2000).
- 10) 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，Vol.39, No.6, pp.2009-2019 (1998) .
- 11) Shiroshita, T., Sano, T., Takahashi, O. and Yamanouchi, N.: Performance Evaluation of Bulk-Data Reliable Multicast Transport Protocol, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E82-D, No.4, pp.804-814 (1999).
- 12) 鈴木偉元，原下貴志，田中希世子，上野英俊，石川憲洋，高橋 修：無線 LAN でのマルチキャスト誤り回復方式の比較評価，*DICOMO2003*, No.58, pp.229-232 (2003).
- 13) Hoene, C., Günther, A. and Wolisz, A.: Measuring the Impact of Slow User Motion on Packet Loss and Delay over IEEE 802.11b Wireless Links, *3rd International Workshop on Wireless Local Networks (WLN) 2003*, Bonn, Germany (Oct. 2003).
- 14) Rizzo, L. and Vicisano, L.: RMDP: an FEC-based Reliable Multicast protocol for wireless environments, *ACM Mobile Computer and Communication Review*, Vol.2, No.2 (1998).

(平成 15 年 12 月 11 日受付)

(平成 16 年 9 月 3 日採録)

## 推薦文

本論文は IP マルチキャストを利用して比較的誤り率の高い網に信頼性を実現するための誤り回復方式として、ARQ とハイブリッド (ARQ+FEC) の比較評価を行い、ハイブリッド方式の優位性を定量的に示すとともに、ハイブリッド方式の方式パラメータ (FEC 符号化ブロック数等) の最適値を求めるための解析モデルを提案している。本論文の評価方式は、移動通信で検討されてブロードキャストサービスに適用でき、今後この分野の実用化にも大きく貢献するものと思われる、優秀な論文として推薦できる。

(DICO2003 プログラム委員会委員)

井手口哲夫)



鈴木 偉元

1966 年生。1989 年千葉大学工学部機械工学第二学科卒業。1991 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年 4 月 NTT 入社。ヒューマンインタフェース研究所でビデオオンデマンドシステムの研究開発に従事。1999 年 NTT ドコモに異動。マルチメディア研究所でモバイルインターネットの研究開発に従事。2004 年 3 月より NTT ドコモネットワークマネジメント開発部勤務。モバイルインターネットの研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



上野 英俊 (正会員)

1974 年生。1997 年筑波大学第三学群情報学類卒業。1999 年同大学大学院工学研究科電子・情報工学専攻修士課程単位取得退学。同年 NTT ドコモ入社。マルチメディア研究所でモバイルインターネットアプリケーションとプロトコルの研究に従事。2004 年 3 月より NTT ドコモネットワークマネジメント開発部勤務。モバイルインターネットの研究開発と国際標準化に従事。電子情報通信学会会員。



石川 憲洋 (正会員)

1978 年京都大学工学部情報工学科卒業。1980 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。現在、NTT ドコモネットワークマネジメント開発部に所属。モバイルインターネットの研究開発と国際標準化に従事。博士 (情報学)。電子情報通信学会会員。



高橋 修 (正会員)

1951 年生。1975 年 3 月北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月電電公社 (現 NTT) 入社。情報通信研究所でコンピュータネットワークアーキテクチャの研究開発、および OSI の標準化に従事。1999 年 NTT ドコモに異動。マルチメディア研究所でモバイルインターネットの研究開発に従事。2004 年 4 月より公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科教授。博士 (工学)。電子情報通信学会会員。



佐藤 文明 (正会員)

1962 年生。1986 年 3 月東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士前期課程修了。同年三菱電機 (株) 入社。通信ソフトウェアの研究開発に従事。1995 年 1 月より静岡大学工学部助教授。現在、静岡大学情報学部助教授。博士 (工学)。通信ソフトウェア、形式的記述、分散処理システムに関する研究に興味を持つ。IEEE Computer Society, ACM, 電子情報通信学会各会員。



水野 忠則 (フェロー)

1945 年生。1968 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機 (株) 入社。1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授。現在、情報学部情報科学科教授。工学博士。情報ネットワーク、モバイルコンピューティング、放送コンピューティングに関する研究に従事。著書としては『プロトコル言語』(カットシステム)、『コンピュータネットワーク概論』(ピアソン・エデュケーション) 等がある。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。