

モバイルコンテンツ配信用 パケット欠損補償ライブラリの開発

上田雅巳*・山下剛・森田哲郎

Development of FEC Libraries for Compensation of Packet Loss in Mobile Content Delivery — by Masami Ueda, Tsuyoshi Yamashita and Tetsuo Morita — Due to the spread of mobile phones and the evolution of broadband networks, the mobile content delivery market is growing. In the case where a single content data is transmitted simultaneously to many user terminals, it is difficult to retransmit all lost data packets because the packet loss pattern varies from one user to another. The FEC technology is an effective means of restoring original data without retransmitting the lost data packets. The authors have developed the FEC libraries (encoder and decoder) incorporating the DF Raptor technology for use in mobile contents delivery applications. The experimental results using the developed FEC libraries were consistent with theoretical expectations, showing that data packet transmission using the FEC technology is more efficient than the conventional transmission method.

1. 緒言

携帯電話の普及とネットワークの高速化に伴い、モバイル端末向けの楽曲や動画などのコンテンツ配信の市場が拡大している。同一コンテンツ*1を複数端末に配信する場合、マルチキャスト*2（一斉同報）配信が効率的であるが、モバイル端末向けの無線通信ネットワークでは、ノイズの混入や電波状況の変化などにより伝送中にデータパケット*3の欠損が生じることが多い。従来では、欠損パケットだけを再送する手法が良く用いられているが、マルチキャスト配信の場合には、再送すべき欠損データパケットはユーザー毎に異なるため、それらを全て再送するのが難しくなる。そこで、再送することなく元のデータを復元するアプリケーション層FEC*4技術が効果的となる。これは、送信側で予めコンテンツをエンコードした上で伝送し、受信側で受信したデータをデコード処理することにより、元のデータを再送なしで復元するものである。今回、アプリケーション層FECであるDF Raptor*5符号技術を用いたモバイルコンテンツ配信用FECライブラリ*6（エンコーダおよびデコーダ）を開発した。本稿では、その概要を紹介した上で、FECを用いることにより配信効率が向上することを実験により確認できたので、その結果を報告する。

る楽曲コンテンツ、もしくはニュースや動画クリップなどのコンテンツを携帯端末に配信するモバイルコンテンツの市場が、携帯電話台数の伸び率に勝る勢いで拡大しており、約4000億円の市場規模となっている（図1）。

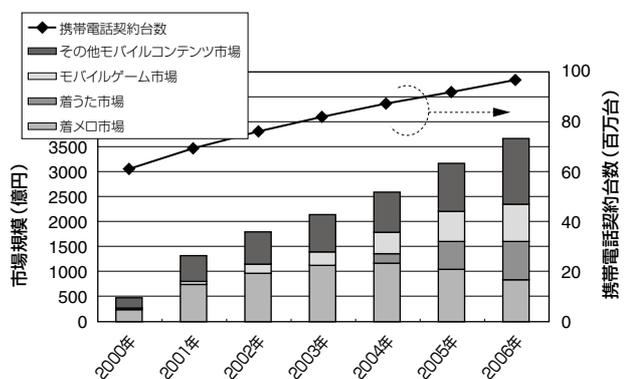


図1 モバイルコンテンツ配信市場の拡大

2. コンテンツ配信技術

2-1 コンテンツ配信市場の拡大

携帯電話を中心とするモバイル端末が近年急速に普及している。また携帯端末が高性能化および高機能化されてきていること、および、ネットワークの大容量化（高速化）が急速に進んでいることに伴い、いわゆる「着うた*7」などに代表され

2-2 コンテンツ配信方式

コンテンツの配信方式としては、3つに分類することができる。まずはユーザーの起動操作によりサーバ側にリクエストが送られ、オンデマンド的にコンテンツをダウンロードしてくる方式で、プル型とも呼ばれる。「着うた」のダウンロードなどがこれに該当する。次に、プル型に対してプッシュ型があり、これは、ある決まった時刻になった時、あるいは、何らかのイ

イベントに連動して、サーバ側がトリガとなって起動し、コンテンツをユーザ端末に送り込む形で配信する。最後に、放送的にコンテンツデータが一定時間あるいは常時流されていて、ユーザが欲しいデータが流れている時に、ユーザ端末側の操作により、コンテンツの受信操作を行う放送型が考えられる。

プル型（オンデマンド型）は、各ユーザが非同期に異なるコンテンツのダウンロードを行うため、サーバと端末間の通信は1対1のユニキャスト^{*8}となる。一方、プッシュ型では、ユニキャストでも可能であるが、同一のコンテンツを一斉に複数のユーザ端末にマルチキャスト配信することも可能であり、サーバの送信負荷の軽減と、ネットワーク帯域の有効利用につながる。放送型（ブロードキャスト型）は、サーバ側から全てのユーザ端末に一方通行で配信される。

2-3 パケット欠損への対策 一般にネットワークを介してのデータ伝送において、雑音の混入などに起因するデータのビット誤りが生じることがある。これに関する対策としては、各伝送方式の物理層レベルにおいて、リードソロモン符号やトレリス符号など種々の誤り訂正符号技術（FEC = Forward Error Correction）が採用されている。これらは、送信側で冗長ビットを付加しておくことにより、伝送中の物理層レベルのビット誤りを受信側での演算処理により訂正する技術である。

しかしながら、モバイル端末向けの無線通信ネットワークでは、ビットレベルの誤りに加えて、通信中の無線通信状態の変化が生じることにより、最悪の場合には一時的に電波途切れが生じるなど、パケットの単位でデータが欠損（消失）することがある。

従来は、欠損パケットだけを再送する手法であるARQ^{*9}が良く用いられているが、複数ユーザに同時に送信するマルチキャスト配信の場合には、各ユーザそれぞれの欠損したパケットが異なるため、各ユーザ端末それぞれが独自に再送要求を出すと再送制御をするのが難しくなる。また放送型の場合は、一方通行であるため、再送自体が出来ない。そこでこれまでは、カルーセル^{*10}と呼ばれる配信方式が用いられてきた。カルーセル配信では、データを一通り送信し終わった後に、同一データを繰り返し送信し、1回目の配信で一部のデータが欠損した場合、その欠損したデータを2回目の配信で補う。しかし、**図2**に示すように、1回目に欠損したデータと同じデータが2回目にも欠損すると、さらにもう1回データを受信する必要がある。このようにカルーセル配信では、パケット欠損率が大きいネットワークの場合、全パケットが受信できるまで、何回も繰り返しを待たないといけない確率が增大し、配信効率が悪いという欠点がある。

このような場合、FEC技術が効果的となる。前述の物理層レベルのビット誤りを訂正するFECと区別して、こちらの方はアプリケーション層FECと呼ばれることもある。原理自体は、どちらのFECも同じであり、送信側で予めコン

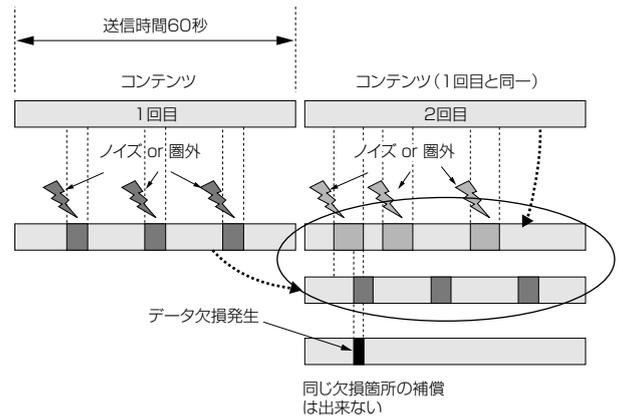


図2 カルーセル方式でのコンテンツデータ配信

텐츠をエンコードした上で伝送し、受信側で受信したデータをデコード処理することにより、伝送中に多少のパケット欠損があっても、再送することなく元のデータを復元するものである。

3. Raptorの概要

欠損したパケットを復元するアプリケーション層FEC技術としては、米国Digital Fountain社が開発したDF Raptorが良く知られており、コンテンツダウンロード配信、および、映像ストリーミング^{*11}配信の両方のアプリケーションに用いることができる。

3-1 標準化状況 Raptorは、モバイル分野でのコンテンツダウンロード配信、および、IPTV^{*12}分野での映像ストリーミング配信の両方の分野において、標準規格としても採用されている。

モバイル分野では、第3世代携帯電話3GPP^{*13}仕様TS 26.346のマルチメディア配信サービス規格であるMBMS^{*14}(1)、および、欧州の携帯端末向けデジタル放送規格であるDVB-H^{*15}(2)などの標準規格でRaptorが採用されている。また、映像ストリーミングの分野では、全米映画テレビジョン技術者協会SMPTE^{*16}仕様2022-1(3)で規定されているパケットベースのインターリーブ付パリティ符号ProMPEG COP3-1DとRaptorとのハイブリッド符号が、欧州のIPTV規格であるDVB-IPSI^{*17}標準仕様(4)のAnnex Eに規定されている。また同じ方式が、北米標準ATIS IIF^{*18, 19}でのIPTV規格でも採用されており、さらに電気通信関連の国際標準化機関であるITU-T^{*20, 21}において、IPTVでの推奨FECとして文書化(5)されている。

3-2 Raptorを用いたコンテンツ配信 Raptorを用いてコンテンツを配信する場合は、まずRaptorエンコーダにより、元のデータから符号化データを生成し、それをパケット化した上で、ネットワークへ送信する。受信側で

は、受信パケットのデータが合計で一定割合の量（元のデータの約105%相当の受信パケット量）以上を集めることができれば、受信順序やどの符号化データを受信したかに関わらず、極めて低い失敗率で元のデータに復元することが可能となる。

Raptorを用いたコンテンツ配信の例を図3に示す。エンコードなしで配信する場合に60秒間の送信時間が必要なサイズのコンテンツデータを、2倍のサイズにエンコードし、120秒かけて配信する場合の例である。前述のカルーセル方式では、同一データが繰り返し欠損すると元のコンテンツを復元することができないが、Raptorを用いると、圏外等の欠損時間が最大57秒間あっても、元のコンテンツを復元することが可能になる。欠損データは、符号化された配信データのどこでも良く、合計63秒間、正常にデータを受信できれば、元のコンテンツを復元することができる。これは、カルーセル方式との大きな違いである。図3の例では、50%近くのデータが欠損する受信環境の悪い状況でもRaptorは威力を発揮することが分かる。また、図3の例では、2倍のサイズにエンコードしたが、さらに通信環境が悪い、あるいは、受信の信頼性を上げたい場合には、任意の大きなサイズにエンコードすることが可能である。

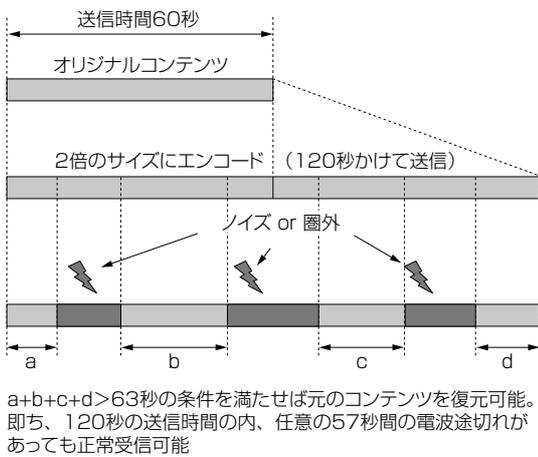


図3 Raptorを用いたコンテンツデータ配信

3-3 Raptorとカルーセルとの配信効率の理論比較

これまでに概要を紹介したRaptorとカルーセルとの配信効率を理論的に比較してみる。元データはK個のパケットで構成され、伝送路での（ランダム）パケット欠損率をLとする。受信完了までに送信されるパケット個数をR個とするとき、相対転送時間*i*を、 $i = R/K$ と定義する。相対転送時間は、元データをそのまま送信する時間を1として、それに対して何倍の送信時間を要するかを表している。カルーセル配信の場合には、*i*はカルーセル送信回数に等しい。以

下にカルーセル方式、Raptor方式それぞれの場合について、相対転送時間*i*を求める。

①カルーセル方式の場合

1回のカルーセル送信を行った場合、K個の内*j*個の受信に成功する確率は、

$$S_{1,j} = {}_K C_j L^{Kj} (1-L)^j \dots\dots\dots (1)$$

である。従って、すべてのパケットを受信できる確率は、

$$S_{1,K} = (1-L)^K \dots\dots\dots (2)$$

となる。カルーセル方式で*i*回送信した場合、同一のパケットを*i*回送信しているため、各パケットの欠損率が*Lⁱ*に低下し、すべてのパケットを受信できる確率は、以下のようなになる。

$$S_{i,K} = (1-L^i)^K \dots\dots\dots (3)$$

すべてのパケットを受信できる確率*S_{i,K}*が1/2（50%値）の場合のカルーセル回数*i*を求めると、以下の式で与えられる。

$$i = \frac{\log\left(1 - \frac{1}{2^{1/K}}\right)}{\log L} \dots\dots\dots (4)$$

②Raptor方式の場合

Raptor方式の場合には、カルーセル方式の場合とは異なり、同一のパケットを複数回送出することはないため、単純にKの105%分のパケットを受信すれば、元のデータを復元することができる。よって、Raptor方式の場合の相対転送時間*i*は以下の式で表される。

$$i = \frac{1.05}{1-L} \dots\dots\dots (5)$$

以上の結果を用いて、K=1000の場合のカルーセルとRaptorそれぞれの方式での配信効率の理論値を図4に示す。横軸にはパケット欠損率L、縦軸には相対転送時間*i*をそれぞれ対数軸でとっている。

図4において、パケット欠損率が例えば3%の場合、カルーセル方式では約2回かかっているところが、Raptor方式では約1.1回であり、元のデータサイズよりも10%余分なパケットを送信するだけで、元のデータを復元することができることがわかる。また、パケット欠損率20%付近では、3倍もの差があり、パケット欠損率が大きいほど、カルーセル方式に対してRaptor方式の配信効率の優位性が顕著に現れることが分かる。

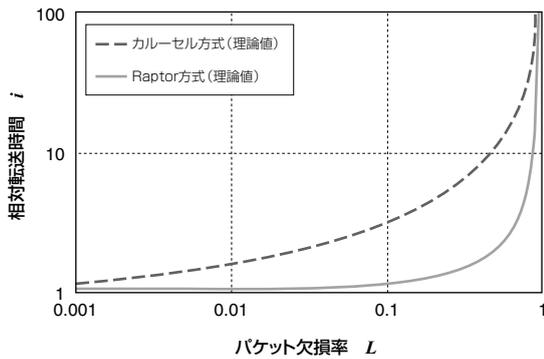


図4 カルーセルとRaptorとの配信効率比較（理論値）

4. FEC ライブラリの開発

4-1 FEC ライブラリの概要 今回、Digital Fountain 社の DF Raptor コアエンジンを用い、モバイルコンテンツ配信用のパケット欠損を補償する FEC エンコード/デコード機能を持つソフトウェアをライブラリ形式で開発した。本 FEC ライブラリは、汎用的にコンテンツダウンロード配信用アプリケーションプログラムから利用できるように、C 言語のアプリケーションインターフェース (API) ※22 を有している。

4-2 エンコード/デコード処理 本 FEC ライブラリを用いて Raptor エンコードを行う場合のデータ処理の様子を図5に示す。Raptor エンコードを行う際には、オリジナルコンテンツをソースブロック (SB) と呼ぶデータ単位に分割する。このソースブロックが、Raptor エンコード/デコードの処理データ単位となる。この時、オリジナルデータ最後のブロックのサイズがソースブロックサイズ未満であれば末尾にパディング※23データの付加を行う。ひとつのソースブロックに対して Raptor エンコードを行うと、エンコーディングユニットと呼ばれる符号化されたデータ

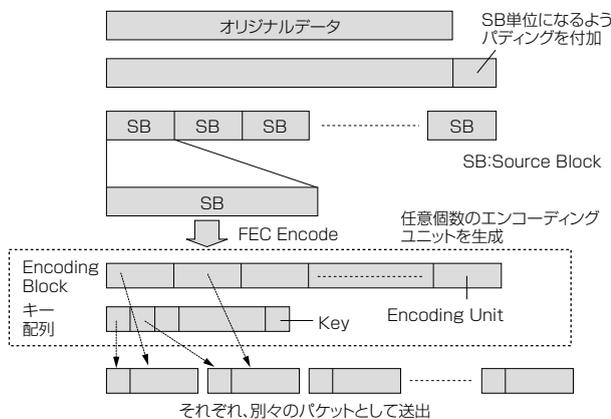


図5 FEC エンコードのデータ処理概要

単位とそれに対応するキー情報のペアが複数個作成される。通常、このエンコーディングユニットと対応するキーの対を一組、あるいは、数組をひとつのパケットとして、ネットワークに送信する。元のソースブロックのサイズに対して、エンコードにより生成されるデータ量 (エンコーディングユニットのトータルサイズ) の割合 (冗長度) は任意に設定が可能である。

デコーダ側では、エンコーダ側とほぼ逆の処理となる。即ち、ある特定のソースブロックから作成されたエンコーディングユニットとキーを必要個数集めた上で、Raptor デコードを行うことにより、オリジナルのソースブロックを復元することができる。この作業を全てのソースブロックについて実施した上で、これらのソースブロックを結合し、最後のブロックの末尾のパディング分を除去することにより、オリジナルコンテンツを復元することができる。

4-3 ライブラリ呼び出しフロー 図6にFECライブラリ (デコーダ側の場合) の呼び出し処理フロー概要を示す。最初にデコーダオブジェクトの生成や各種パラメー

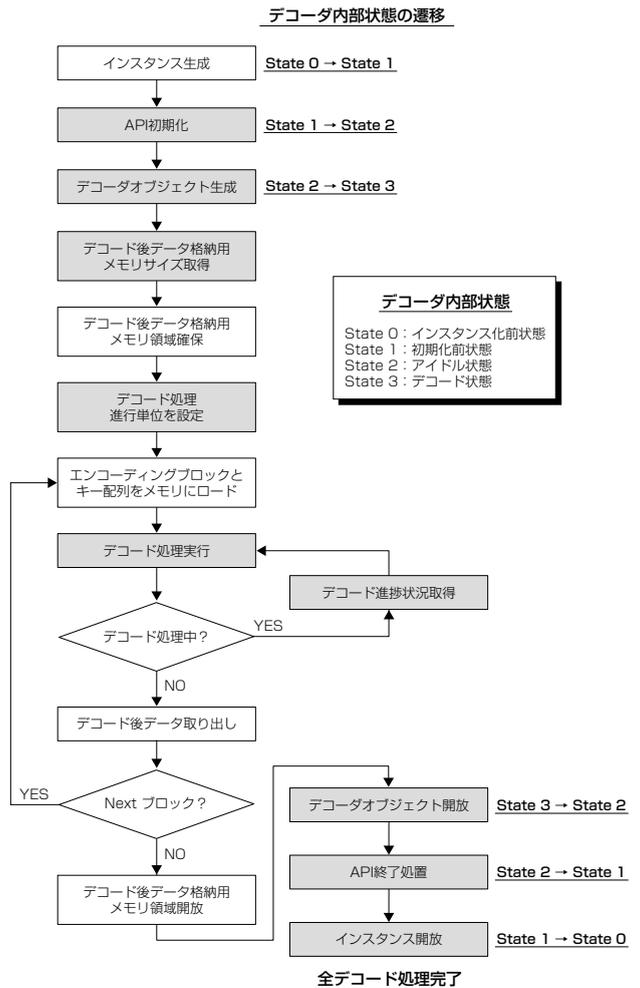


図6 FEC ライブラリ (デコーダ) の処理フロー概要

タ設定などの初期化を行った上で、ソースブロック単位でデコード処理を繰り返し、全てのデコード処理が終われば、最後に終了処理を行う、という手順となり、アプリケーションソフト開発者にとって分かり易い呼び出し手順となるようなAPIを提供している。

4-4 プラットフォームと処理速度 エンコーダ側／デコーダ側共に、汎用Linux^{※24}系プラットフォーム上で開発した上で、デコーダ側は、あるモバイル端末向けのプラットフォームOS上に移植を行った。デコーダ側のFECライブラリはモバイル端末上で動作させることになるため、デコードの計算処理負荷がシステム設計上の重要な指標となることが多い。実際にモバイル向けプラットフォーム上でデコード処理を走らせて、処理負荷を評価した結果を図7に示す。横軸はソースブロックサイズ、縦軸はソースブロックサイズをデコード処理時間で割って算出したデコード処理速度である。ランダムなパターンで欠損を起こし100回デコードを行って測定した平均値をプロットした。なお、測定を行ったモバイル端末のCPUの動作クロックは400MHzである。本測定結果より、5MBのファイルをデコード処理するのに要する時間は2秒以下であり、モバイル端末向けダウンロード配信用途としては実用上十分な性能を有していることが分かる。

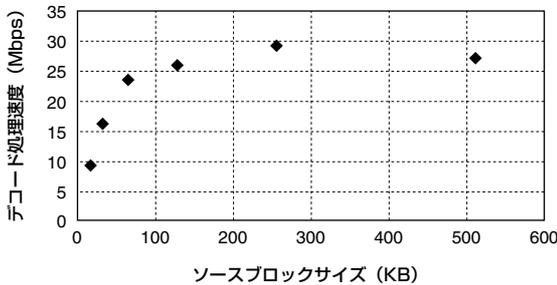


図7 モバイル端末上におけるFECデコード処理速度

5. FECライブラリを用いた配信効率の評価

カルーセルとRaptorとの配信効率の理論検討を3-3で行ったが、実際に4章で紹介したFECライブラリを用いて、テストプログラムを作成し、シミュレーションおよび無線を用いた実験の両方により、配信効率の検証を行った。

5-1 シミュレーション 1台のPC内で、Raptorエンコーダ（送信側）とデコーダ（受信側）を動作させ、エンコードされたデータに対して、擬似的にランダムパターンでパケット欠損を起こさせた上で、受信側のデコード処

理を行った。用いたオリジナルコンテンツのサイズは10MB（732パケット）で、同じ条件でのカルーセル配信でのシミュレーション結果との比較を行った。

5-2 実験系と実験方法 Raptorを用いたデータ配信の効果を実際にネットワーク上で評価した実験系を図8に示す。実サービスの無線網を実験で利用することはできないため、ここでは無線LAN（802.11g）を用いて評価を行った。

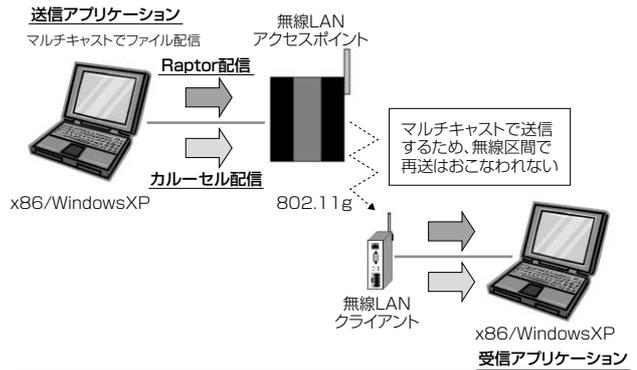


図8 配信効率評価実験系

まず、送信側のPCからは、Raptorエンコードしたデータの送信と、オリジナルコンテンツのカルーセルの送信を同時に、それぞれマルチキャスト配信する。受信側のPCでは、Raptorとカルーセルのパケットそれぞれを別々に受信して、オリジナルコンテンツを復元する。送受信のPC間に、無線LANアクセスポイントと無線LANクライアントを設置しており、無線LANアクセスポイントの設置場所は固定し、無線LANクライアントの設置場所を変えて、異なる無線状況を作り出すことによりパケット欠損率を変化させて測定を行った。なお、一般的に無線LANは独自の再送メカニズムを有しており、低レイヤにおける再送でパケット欠損を補償することができるが、マルチキャスト方式でデータを流す場合にはこの再送メカニズムは機能しないため、本実験における無線LAN区間では、欠損したパケットが再送されることはない。

5-3 シミュレーションおよび実験の結果 図9にRaptor方式、カルーセル方式それぞれについての、シミュレーション結果、および、実験結果を示す。なお、前述の図4と同様に、横軸にはパケット欠損率を、縦軸には相対転送時間を、それぞれ対数軸でとっている。シミュレーション、実験ともに、理論値に沿った形の結果が得られており、例えばパケット欠損率5%の場合、カルーセルに比べRaptorの配信効率は2倍以上であり、Raptor方式の効果を実験によって検証することができた。

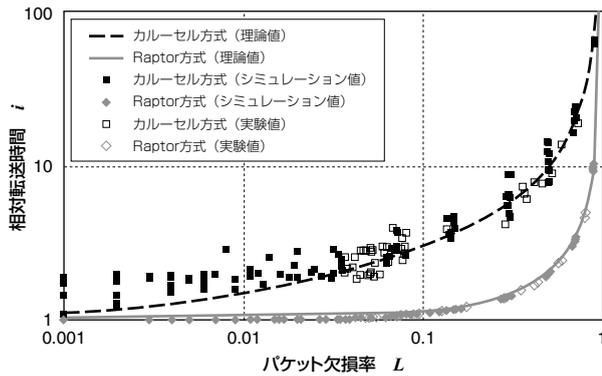


図9 配信効率評価の実験結果

6. 結 言

今回、DF Raptor 技術を用いたモバイルコンテンツ配信用 FEC ライブラリ（エンコーダおよびデコーダ）を開発した。それを用いて行ったデータ配信実験により、従来の配信方式と比べて、FEC を用いた方式での配信効率が大幅に向上することが確認でき、理論的に予想した結果とも良い一致が得られた。

今後さらに拡大していくモバイル向けコンテンツ配信の分野で、本技術はサービス品質の向上およびネットワーク使用帯域の効率化に効果的であるため、様々なサービスへの適用可能性が期待でき、さらなる市場拡大に貢献することが出来るものと確信する。

用語集

※1 コンテンツ

Contents：特に、メディアによって提供される、ニュースなどの情報や音楽・映画・漫画・アニメ・ゲームなど各種の創作物を指す。書籍、ウェブページにおいても同様である。

※2 マルチキャスト

Multicast：コンピュータネットワークにおいて、決められた複数のネットワーク端末（ノード）に対して、同時にパケット（データ）を送信する事。一対多で通信を行う場合、ユニキャストを使用するよりもネットワーク負荷を軽減することが出来る為、情報配信などで多用される。

※3 パケット

Packet：通信方式における情報の伝送単位。大きい情報を送受信する際に、小さなデータに分割し、各々に発信元と送信先のアドレスやパケットの種類、通し番号などの制御情報を付加したものである。

※4 FEC

Forward Error Correction：データの伝送途中で発生するビットエラーを訂正する技術。広義には、パケット等のデータ欠損を補償する技術（消失訂正技術）も含む。

※5 DF Raptor

米国の数学者である M. Luby ならびに A. Shokrollahi によって発明された。

・米国 Digital Fountain 社の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

※6 ライブラリ

Library：汎用性の高い複数のプログラムを、再利用可能な形でひとまとまりにしたものである。一般にライブラリは、それ単体ではプログラムとして動作させることはできないので実行ファイルではない。ライブラリは他のプログラムに何らかの機能を提供するコードの集まりとすることができる。

※7 着うた

ちやくうた：携帯電話の着信音を MP3 や AAC などのフォーマットで符号化された 30 秒程度の長さの楽曲にするサービス。

・株式会社ソニー・ミュージックエンタテインメントの登録商標です。

※8 ユニキャスト

Unicast：コンピュータネットワークにおいて、単一の送信相手を指定して、データを送信する方式。最も頻繁に使用される送信方法であり、ブロードキャストやマルチキャストなどの用語との対比で使われる。

※9 ARQ

Automatic Repeat reQuest：自動再送要求。信頼性の高いデータ通信を達成するために、送達確認とタイムアウトを使う再送制御手法。

※10 カルーセル

Carrousel：デジタル・コンテンツを送信するときに、同じデータを一定周期ごとに繰り返し送信するデータ送信方式。これを回転木馬にたとえて名付けられた。テレビ放送波にデータを多重化する場合などに用いられる。

※11 ストリーミング

Streaming：主に音声や動画などのマルチメディアファイルを転送・再生する方式の一種。サーバからファイルをダウンロードした後に再生するのではなく、サーバから送られてきた動画データを視聴者側の端末にダウンロードしながら順次再生していく方式。

※12 IPTV

Internet Protocol TeleVision：IPネットワークを用いて行われるテレビ放送（多チャンネル放送や、他の放送の再送信を含む）およびビデオ・オン・デマンド（VOD）。

※13 3GPP

3rd Generation Partnership Project：第3世代（3G）移動体通信システムの標準化プロジェクト。また、同プロジェクトによる移動体通信システムの標準規格。

※14 MBMS

Multimedia Broadcast / Multicast Service：動画や音楽などのマルチメディアコンテンツを既存ネットワークや3G携帯電話網で効率よく配信するための技術。3GPP標準規格のRelease 6に含まれる。

※15 DVB-H

Digital Video Broadcasting - Handheld：日本や北アメリカ大陸などを除く世界の多くの地域で採用されているデジタルテレビ放送のための公開標準規格（DVB）のひとつで、移動体あるいは携帯可能な受信機のための放送サービスに関する標準規格。DVB-Hは、2004年11月、ETSI（European Telecommunications Standards Institute = 欧州電気通信標準化機構）が採用した。

※16 SMPTE

Society of Motion Picture and Television Engineers：米国映画テレビ技術者協会のこと。映画・テレビに関連する法人・団体及び個人会員で組織されている団体で、映像技術全般にわたる標準規格の策定、会誌の発行、及び会員に対する職の斡旋等を行っている。

※17 DVB-IP

Digital Video Broadcasting - Internet Protocol Infrastructure：DVBの標準規格のひとつであるIPTV標準規格

※18 ATIS

Alliance for Telecommunications Industry Solutions：米国の電気通信標準化アライアンスの名称。

※19 IIF

IPTV Interoperability Forum：北米ATIS配下にある標準化組織で、IPTVに必要な技術課題、運用課題を検討し、北米のIPTVに関する標準化を行っている。

※20 ITU

International Telecommunication Union：国際電気通信連合。国際連合（United Nation）の下位機関であり、電気通信に関する国際標準の策定を目的とする。本部はスイスのジュネーブ。

※21 ITU-T

ITU - Telecommunication standardization sector：国際電気通信連合（ITU）の部門のひとつで、電気通信に関する技術分野の標準化を行っている。

※22 API

Application Programming Interface：アプリケーションから利用できる、オペレーティングシステムやライブラリなどの機能の入り口となるもの。

※23 パディング

Padding：一定サイズのフォーマットとしてデータを構成する場合に、データ量が不足する場合に補填されるデータ。

※24 Linux

リナックス：UNIXライクなコンピュータ用オペレーティングシステム（OS）。

・Linus Torvalds氏の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 3GPP TS 26.346 V7.6.0 (2007-12)：“Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and codecs”.
- (2) ETSI TS 102 472 V1.2.1 (2006-12)：“IP Datacast over DVB-H：Content Delivery Protocols (CDP)”
- (3) SMPTE 2022-1 (2007)：“Forward Error Correction for Real-time Video/Audio Transport Over IP Networks”.
- (4) ETSI TS 102 034 V1.3.1 (2007-10)：“Transport of MPEG-2 TS based DVB Services over IP based networks”.
- (5) ITU-T FG IPTV-DOC-0186 (2007-12-18)：“Application layer error recovery mechanisms for IPTV Services”.

執 筆 者

上田 雅巳*：情報通信研究所 ネットワークシステム研究部 主席
部門スペシャリスト

山下 剛：情報通信研究所 ネットワークシステム研究部

森田 哲郎：情報通信研究所 ネットワークシステム研究部
プロジェクトリーダー 部門スペシャリスト（工学博士）

*主執筆者