

## ブロードバンド・モバイルネットワーク での動画伝送・変換技術

Video Transmission and Conversion for Broadband/Mobile Networks

中島康之



### Abstract

IP ネットワークについては、固定ブロードバンドから無線 LAN や携帯電話まで様々なネットワークの利用が可能になったが、これらのネットワーク環境で、リアルタイム性が要求されるマルチメディアコンテンツを最適の QoS で伝送するためには、利用可能な帯域、帯域変動、エラー環境への適応が不可欠となっている。ここでは、MPEG に代表されるマルチメディアコンテンツの伝送について、帯域に応じて静的・動的に符号化方式や符号化ビットレートを変換する手段やパケット損へ適応するためのエラー耐性技術について解説する。

キーワード：ストリーミング，QoS，帯域変動，符号化スケーラビリティ，MPEG

#### 1. はじめに

xDSL や FTTH を利用したブロードバンドネットワークや、第 3 世代携帯電話や PHS を利用したモバイルネットワークでのネットワーク帯域のブロードバンド化に伴い、IP ネットワーク上で映像や音楽のダウンロードやストリーミング再生を始め、テレビ電話や映像監視など様々なマルチメディアアプリケーションが展開されている。しかしながら、IP 上では、様々な Web アプリケーション、電子メール転送、P2P 型のファイルダウンロードなどのトラフィックも急増しており、帯域が拡大したからといって利用帯域や伝送品質を安定的に確保できる環境にあるとはいえず、ネットワーク特性の変動により映像の乱れ、こま落ち、音声途切れ、雑音などが発生する可能性がある。

このため、映像のストリーミングや TV 会議のようなリアルタイムで連続的なデータ伝送を実現するために、伝送プロトコルレベルやアプリケーションレベルでの品質保証技術が駆使されている。本稿では IP ネットワーク上での映像伝送において、エンド・エンド間で品質保証を確保するための伝送・変換技術について説明する。

以下、2. ではブロードバンド・モバイルネットワークでの映像符号化、伝送技術について説明し、3. ではマルチメディア伝送における QoS 保証技術の概要及び

QoS 保証のための三つのコア技術について説明する。

#### 2. ブロードバンド・モバイル用 ビデオ圧縮・伝送技術

ブロードバンドやモバイルネットワークでのマルチメディア伝送に用いられる映像の符号化方式としては、WindowsMedia や RealVideo などの独自方式に基づくものと、例えば国内の携帯電話で用いられている MPEG-4 のように国際標準方式に基づくものに大別される。前者については、HD-DVD 用の符号化方式として昨年技術仕様が公開された WindowsMedia9 を除いて非公開のため、詳細の符号化構造については不明であるが、空間解像度が 1,920×1,080 画素の HDTV クラスから 160×120 程度のモバイル用コンテンツまで広範囲な符号化に対応しているものが多い。

一方、後者については MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.264/MPEG-4 AVC などが主な国際標準方式として挙げられる。これらの符号化方式では、画面を正方ブロックに分割し、周波数変換して画面内で符号化するモードと、前後の画面との動き補償予測処理を行って画面間の差分情報を周波数変換して符号化するモードを組み合わせている。このため、後述するように伝送パケット損により発生したエラーの影響が、予測符号化処理を用いている後続の画面まで及ぶ可能性がある。

マルチメディアコンテンツの伝送プロトコルとしては、TCP (Transmission Control Protocol) ベース及び UDP (User Datagram Protocol) ベースの 2 種類のプロト

中島康之 正員 (株) KDDI 研究所  
E-mail nakajima@kddilabs.jp  
Yasuyuki NAKAJIMA, Member (KDDI R&D Laboratories, Inc., Kamifukuoka-shi, 356-8502 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.88 No.8 pp.666-671 2005 年 8 月

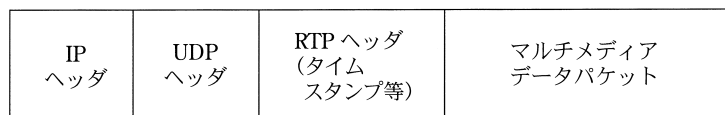


図1 RTP パケット構造 RTP ヘッダにタイムスタンプ、パケット番号、パケットタイプ (符号化方式) 等が挿入されている。

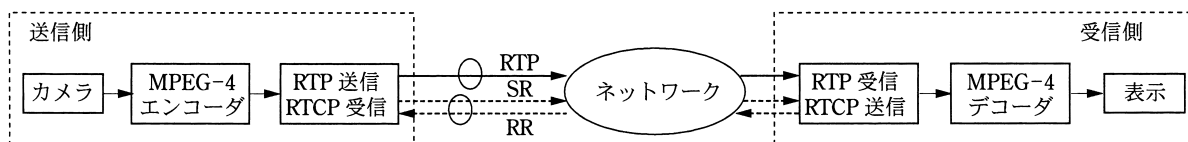


図2 RTP/RTCP ベースのライブカメラアプリケーション構成例

コルが利用されている。前者の場合、パケット損が発生しても再送要求が自動的に行われ、エラーフリーでの伝送が可能になる。しかしながら、伝送遅延に対する保証がないため、ネットワーク帯域が大幅に低下した場合や、パケット損が頻発するような環境では再送に非常に時間がかかり、映像再生が一時的に停止するなどの問題が生じる可能性がある。また、ふくそう制御により送信パケットレートが決定されるため、符号化レートも適応的に変化させない限り映像再生が停止する可能性がある。ただし、Web ブラウジングで用いている HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) は TCP ベースで構築されており、通常ファイアウォールを通過するため、UDP が利用できないようなネットワーク環境において、映像ストリーミング用に HTTP が利用されることも多い。

一方、後者の場合は、データパケット化の際に時刻情報等を付加し、フロー制御や再送制御のない RTP (Real-time Transport Protocol) <sup>(用語)</sup> パケットとして UDP を用いて伝

### ■ 用語解説

**RTP (Real-time Transport Protocol)** 音声や映像をリアルタイム再生するための伝送プロトコルで、パケット損や伝送時間に対する保証はない。UDP タイプのプロトコルで、RTCP による通信状態レポートを用いて転送レート制御を行うことが多い。

**RTCP (RTP Control Protocol)** RTP 伝送において送受信情報を送るための制御プロトコルで、送信側の情報 (SR) と受信側の情報 (RR) などがある。また、RR に含まれるジッタ情報は、RTP パケットのタイムスタンプと受信時刻の統計処理により算出される。

**RTT (Round Trip Time)** パケットの往復遅延時間を示し、RTCP では SR と RR の差分として取得することができる。

**B-, I-, P- ピクチャ** MPEG で符号化する各画面の符号化モードを示す。B-ピクチャは時間的に前後する画面を利用した画面間符号化モード、I-ピクチャは画面内で符号化するモード、P-ピクチャは時間的に過去の画面を予測画面として用いた画面間符号化モード。

**VBV (Video Buffer Verifier)** MPEG 方式でのビデオ符号化における符号化データバッファ量を示すもので、このバッファ量がオーバーフロー、アンダーフローしないように符号化制御を行う。

送する。図1に RTP パケット構造を示す。これにより、TCP ベースのようにパケットの伝送を保証することはないため、リアルタイム性を確保することが可能となる。しかしながら、パケット損や帯域変動への制御はアプリケーションにゆだねられており、後述するような RTCP (Real-Time Transport Control Protocol) <sup>(用語)</sup> による受信情報を用いてアプリケーション側で品質制御することが多い。図2に、RTP/RTCP をベースとしたライブカメラアプリケーション構成例を示す。

### 3. マルチメディア伝送における QoS 保証技術

図3は、実際の ADSL 回線において、固定ビットレート、RTP ベースで映像伝送した場合のパケット損率の変化を示したものである。図から、長期的にはインターネットアクセスが集中する夜間帯に急激にパケット損率が上昇して、明け方に低下していることが分かる。また短期的には、瞬時変動が常時発生していることが分かる。

このようなネットワーク環境において、双方向あるいは片方向でリアルタイム性が要求されるマルチメディアアプリケーションを安定的に実現するためには、QoS (Quality of Service) の保証機能が非常に重要なファクタとなる。ここでいう品質としては、帯域が大幅に変動した場合に、利用可能な帯域に最適な画質や解像度に符号化条件を適応させて常に連続して映像を伝送する技術

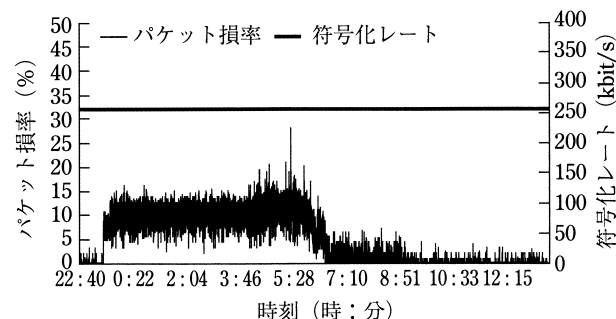


図3 ADSL 回線でのパケット損率変動 図から帯域の変動には瞬時的な変動と長期的な変動があることが分かる。これにより、QoS の保証についても、両者の特性に合わせた制御が必要となる。

と、瞬間的に伝送状態が悪化してパケット損等が発生しても元の画質、解像度をなるべく保つように品質を制御する技術との二つの種類に分類される。図3において、比較的長期変動への対策が前者、瞬時的な変動への対策が後者に当たる。以下、3.1及び3.2では主に長期的な変動への対策として利用可能な帯域変動適応技術と、変動後の帯域での符号化ビットレートへの変換方法について述べる。更に3.3では、主に瞬時的な変動に伴うパケット損への対策方法について述べる。

### 3.1 帯域変動適応技術

帯域が変動して低下しても、符号化ビットレートが一定の場合、パケットが送り切れずにパケット損が大量に発生する。また、逆に帯域が向上しても符号化ビットレートが一定の場合、画質が向上しないという問題が生じる。このため、帯域の変動を観測して適応的に符号化レートを変更する必要がある。帯域を予測する方法としてはパケット損率、パケット遅延ジッタ、受信バッファ占有率などを利用する方法が挙げられる。

例えば文献(1)では、パケット損率と伝送遅延ジッタを利用した帯域変動予測方法として、RTCPにより受信側から送信側に送られるRR(Receiver Report)情報を用いて周期的に帯域の変動を予測している。まず、ネットワークのふくそう状態を「ふくそうなし」(レベル1)から「極度のふくそう状態」(レベル4)まで四つのレベルに分類し、伝送遅延ジッタとパケット損率から図4のような判定マップを用いて現在の状態を判定する。

次に、それぞれに状態に応じて符号化ビットレートをどのように変更するかを決定する。例えば、レベル1ならばしばらく観察した後符号化レートを上げ、またレベル4ならパケット損率に応じた符号化レート変更を行う。これにより、利用可能な帯域が変動しても適応的に

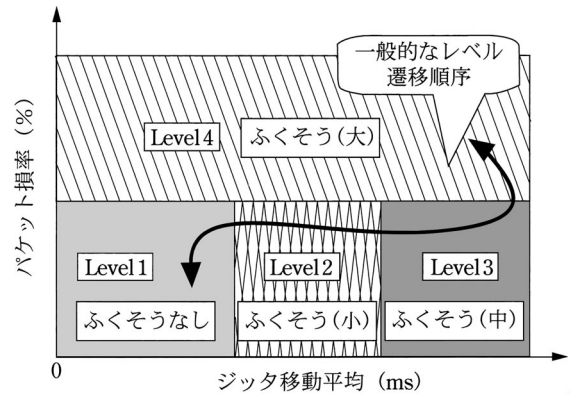


図4 ネットワークの状態の判定 RRで得られる伝送遅延ジッタ量の移動平均(横軸)とパケット損率(縦軸)を用いて四つの状態に分類した例。

符号化ビットレートを変更することが可能となる。図5に、800kbit/sと400kbit/sとの間で上下に帯域変動させたときの、符号化ビットレートの適応実験を行った例を示す。図から、帯域が上下に変動してもおおよそ80~90%程度の帯域利用率で符号化ビットレートが追随していることが分かる。

また他の方法としては、例えば文献(2)ではパケット損率とRTT(Round Trip Time)<sup>(用語)</sup>を用いて帯域変動を予測しているが、これらの統計量について時間的に重み付けすることにより、スムーズかつ迅速に帯域変動に対応する方法が提案されている。

### 3.2 符号化ビットレート変換技術

上記で述べたような帯域変動を監視する方法を用いることにより、最適な符号化ビットレートを求めることが可能になる。この場合、テレビ会議のように双方向でのリアルタイム伝送アプリケーションでは、常に送信側で最適な符号化レートに変更することで対応が可能である

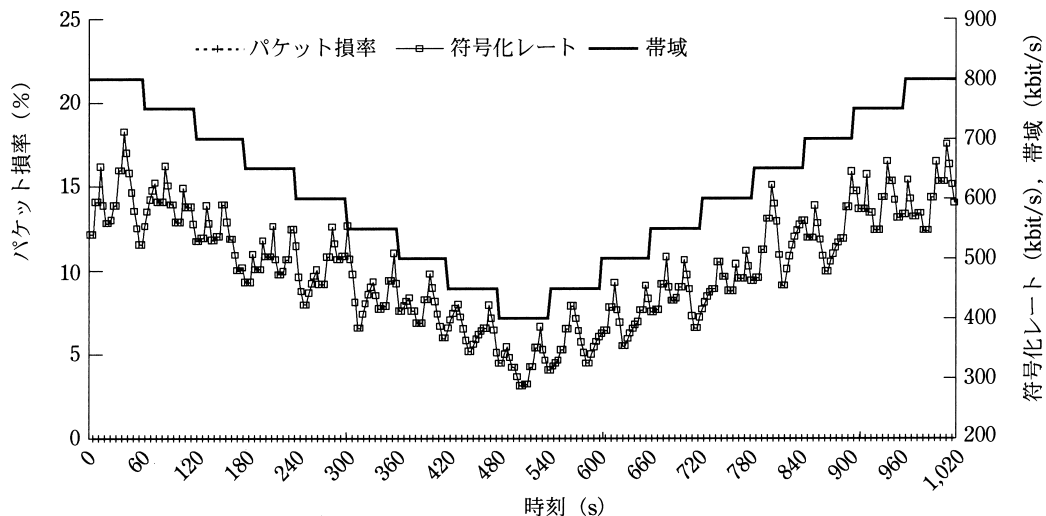


図5 帯域変動に対する符号化ビットレートの適応実験例 符号化ビットレートの適応状況。

800kbit/sと400kbit/sとの間で上下に帯域変動させたときの、

が、ビデオオンデマンドなどのストリーミングアプリケーションではあらかじめコンテンツを符号化しておくことが多く、このような場合は、以下に述べるように、

- (1) 符号化されたコンテンツを入力して、目的の符号化ビットレートに変換する方法
- (2) あらかじめ階層的に符号化しておいて、目的の符号化ビットレートで利用可能な階層を利用する方法
- (3) 複数の符号化ビットレートであらかじめ複数のコンテンツを作成しておく手法

が用いられている。

#### (1) 符号化ビットレートのスケーリング処理

あらかじめ符号化しておいたコンテンツの符号化ビットレートを変更するスケーリング処理については、ビットレート変更の要求があった時点で、送信側でいったん符号化コンテンツを復号してベースバンドに戻し、目的の符号化ビットレートに再符号化する方法も考えられるが、復号、再符号化の処理時間を考慮したストリーミングバッファを設ける必要があることや復号化と再符号化による処理負荷が高いこともあり、多数のストリームを処理するようなことを想定すると現実的とはいえない。

これに対し、符号化データ領域で変換する方法として、変換係数上でデータ数を間引く方法や変換係数を再量子化して新たな符号化レートに変換する方法がある<sup>(3)</sup>。いずれの場合も、符号化ビットレートを削減する手法のため、マスタとなるコンテンツはあらかじめ高い符号化レートで符号化しておく必要がある。また、例えばB-ピクチャ<sup>(H.264)</sup>のように、更に予測画像として用いない画像については、これらの画像を間引くことによって、更に符号化レートを削減することが可能である。なお、符号化データ上での解像度の変換も可能であるが、予測符号化データ誤差の補償回路等を挿入しない場合、誤差雑音が蓄積して大きな変換劣化が伴う可能性がある。

#### (2) 階層符号化処理

上記のような符号化レート変換を用いずに、階層符号化を用いて階層的なデータ構造を持たせる方法もある。例えば、MPEG-2で利用可能なモード（プロファイル）としてスケラブルプロファイルがあり、同一解像度での階層構造（SNR スケラビリティ）、空間的な階層構造（空間スケラビリティ）、時間的な階層構造（時間スケラビリティ）がある。いずれも図6のように、ベース層のみを伝送・復号すると基本的な品質の映像を復号でき、更にエンハンスメント層を含めて復号すると更に高い品質の映像を得ることができる。

例えば、図の例では4Mbit/s以上の帯域があればエン

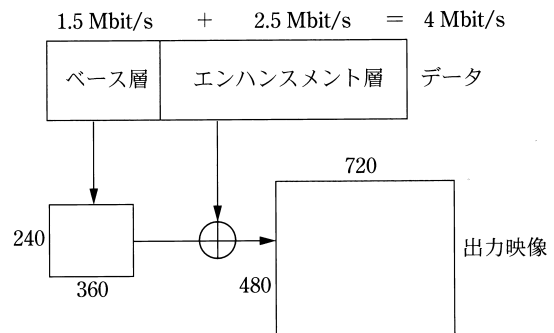


図6 空間スケラビリティ機能例 ベース層とエンハンスメント層により二つの階層を構築した例で、例えばベース層だけを用いると1.5Mbit/sで符号化された360×240画素の映像が得られる。

ハンスメント層も含め720×480画素の映像が得られ、2Mbit/s程度の帯域になればベース層のみを利用して360×240画素の映像が得られる。MPEG-2では最大三つの階層を利用することが可能である。この場合、符号化ビットレートの適応性は制限されるものの、コンテンツのファイルサイズは次に述べるサイマル符号化（複数のビットレートで符号化したコンテンツを用意する）の場合に比べて、全体のファイルサイズを削減することが可能である。ただし、符号化、復号側いずれも単一符号化ビットレートの場合に比べて処理が複雑になる可能性がある。

#### (3) サイマル符号化処理

サイマル符号化では、あらかじめ複数の符号化ビットレートでコンテンツを用意しておくもので、帯域変動により符号化ビットレート変更の要求があった時点で、最適な符号化ビットレートのコンテンツの送出に切り換えるとともに、現在の再生時刻までファイルをシークして継ぎ目が分からないようにタイミング調整を行って送信する。これにより、映像再生側では画質の変更やバッファリングによる遅延が伴うものの、再生はスムーズに持続することが可能となる。現在、ブロードバンドで展開されているストリーミングサービスではこのような方法で帯域変動への適応処理を行っているものが多い。

また、TCPベースのストリーミングについても、ネットワークの帯域に応じて適応的に異なった符号化ビットレートのストリームを選択するような制御を用いることにより、TCPを用いたストリーミングの問題であった伝送遅延保証を確保する方式も提案されている<sup>(4)</sup>。ただし、きめの細かい帯域適応処理を行うためには、多数の符号化ビットレートのコンテンツを用意する必要があり、その分ファイルサイズも増大化する。

また、一度に多数の同一コンテンツを異なった符号化ビットレートで符号化するため、コンテンツ制作処理負荷が大きくなる。このため、効率的に複数の符号化ビットレートでコンテンツ制作する方法も提案さ

れている。例えば、文献(5)ではマスタコンテンツをMPEG-4方式を用いて2.4Mbit/sで符号化し、動きベクトル情報を共有化するとともに、レート制御についてもマスタコンテンツのVBV(Video Buffer Verifier)<sup>(44)</sup>推移を反映した量子化制御を行い、1.2Mbit/sで符号化し、全く独立して同ビットレートに符号化する場合に比べて、ほぼ同一のPSNRを実現しつつ、40%の処理削減を達成している。

### 3.3 エラー耐性技術

伝送中のパケット廃棄や伝送帯域の急激な変化によりパケット損が発生するが、これにより符号化データが欠落し再生フレームドロップや画面内の一部が欠落する。これらのエラーへの対策としては、以下のようにFECによるエラー訂正、ARQによる再送制御、エラーの局在化、符号化データ情報を用いたエラー隠ぺいが利用できる。

#### (1) エラー訂正

データパケットの欠落に備えてエラー訂正情報を含めた冗長構成をとってエラー耐性を持たせる。例えば、IETF(The Internet Engineering Task Force)で規定されたRFC2733(An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction)ではRTP用のFEC(Forward Error Correction)が定義されており、複数のパケットに対してFECパケットを生成し、元のデータと冗長符号化パケットを別のパケットとして伝送する。なお、バースト的なパケット損に対応するために、連続したデータパケットに対してFECパケットを生成するのではなく、図7のように誤りが分散するようにFECパケットを構成する際にインタリーブをかけることが多い。

FECによるエラー訂正は、特にマルチキャスト伝送のように、あるマルチキャストアドレスを用いて一斉に配信するために、個別にフィードバックループを構築することが困難な場合に有効な手段といえる。なお、冗長度を増すに従い、エラー耐性強度を増加させることができるが、必要となる伝送帯域もその分増加する。

なお、マルチキャスト伝送については、信頼性のあるマルチキャスト伝送(リライラブルマルチキャストと呼

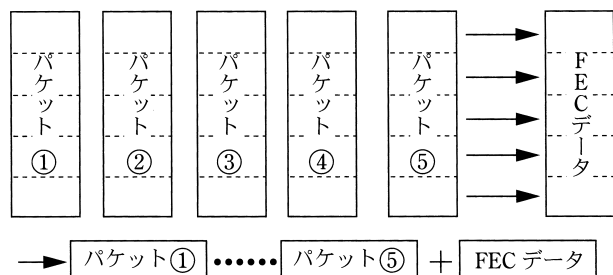


図7 インタリーブを用いたFEC データパケットに対してインタリーブをかけてFECデータパケットを生成することにより、バーストエラーへの耐性を持たせる。

ぶ)を実現する手法としては、上記のFECのほか、受信側からの回線(バックチャネル)を用意して、送達確認を求めたり、問題があったときだけレポートを戻して、必要に応じて再送する手段もあるが、受信者が多くなるに従い、このような個別対応は大幅なシステムコスト上昇を招く原因となる。このため、先に述べたFECについては、トルネードコードと呼ばれる冗長ビットを複数チャンネルに散りばめてデータパケットとともに伝送することで、多数のクライアントに映像データのような大容量データを、エラーフリーでマルチキャスト配信を可能とするプロトコルが提案されている<sup>(6)</sup>。本方式では、パケット損が発生した場合でも、ある一定量のパケットが到着すれば全データを回復できる仕組みとなっており、本処理に伴う遅延量の増加を許容できれば片方向伝送のストリーミング等で利用可能である。

#### (2) ARQによる再送制御

ARQ(Automatic Repeat Request)による再送制御では、パケット損が発生したパケット情報を送信側にRTCPなどのバックチャネルを用いて通知して、再送要求する。この場合、受信バッファにたまっている時間内に再送が間に合えばパケット損の影響を回避することが可能になる。また、(1)のエラー訂正と組み合わせることも可能なため、エラー訂正できなかったパケットのみを再送することも可能である。

ただし、TV会議などの双方向伝送では遅延に対する許容度は低いため、限定的な利用になることが多いが、ビデオオンデマンドなどの片方向伝送の場合には遅延に対する許容度は高いため、再送によるエラー耐性効果は高く、ストリーミングシステムではこのような制御を行っていることが多い。

#### (3) エラーの局在化

符号化方法を工夫することによって、伝送エラーが発生してもエラーを時空間的に局在化してエラーの影響範囲を最小限にすることができる。MPEGのように、時間的に前後に位置する画面と入力画面との差分を符号化するフレーム間符号化を用いた場合、I-ピクチャ<sup>(44)</sup>で発生したエラーが後続のP-ピクチャ<sup>(44)</sup>、B-ピクチャに伝搬する可能性がある。また、例えばMPEG-2では、動きベクトル情報は左側のブロックの動きベクトルとの差分情報として符号化されているため、あるブロックでのエラーが空間的に近隣のブロックに伝搬する可能性がある。

このため、時間的なエラーの局在化方法としては、入力画面内で独立して符号化するフレーム内符号化画面の頻度を高くし、また空間的なエラーの局在化方法としては、強制的にフレーム内符号化ブロックやデータパーティショニングによる再同期マーカーを挿入することが利用されている。また、MPEG-4では符号化されたデー

表1 動画伝送のための RFC

RFC 番号	内容
2032	RTP Payload format for H.261 Video Streams
2190	RTP Payload format for H.263 Video Streams
2250	RTP Payload format for MPEG-1/MPEG-2 Video
3016	RTP Payload format for MPEG-4 AV Streams



(a) エラーを含む画像



(b) エラー隠ぺい後

図8 エラー隠ぺいの例 適応的な時空間補間とポストフィルタリング処理によって効果的にエラー隠ぺいを実現した例。

タを双方向から復号可能なコードとして可逆 VLC (Variable Length Code) を利用することができる。これにより、エラーが存在してもエラー範囲をできる限り局在化させることが可能である。なお、IETF では各符号化方式に合わせて表1のような RTP ヘッダ拡張を規定している。例えば、RFC3016 では MPEG-4 ビデオについて、MPEG-4 データの中で再同期に必要なフレームヘッダは分割したパケットにならないように規定され、異なるビデオパケットは異なる RTP パケットで伝送することを推奨している。

#### (4) エラー隠ぺい

上記で述べた手法を用いても回復できないエラーに対して、後処理によってエラーを目立たなくさせる手法として、エラー隠ぺい処理を利用する方法がある。簡単な方法としては時間的に前の画面や空間的に近傍のブロックを使って補てんすることが考えられるが、シーンチェンジ、動きシーン、不連続物体などにより不自然な画像になることが多い。このため、正常に伝送された符号化

情報からエラー領域の符号化情報を予測して復元する手法が研究されている。

例えば文献(7)では、まずシーンチェンジを検出して適応的に空間的な補間を利用するか、時間的な補間を利用するか決定する。また、時間的な補間については、幾つかの近隣ブロックの動きベクトルの中から、最も信頼性の高い動きベクトルを利用してエラー隠ぺい処理に用いている。更に、ポストフィルタを利用することによって、画質改善を図っている。実験結果の一例を図8に示す。

## 4. む す び

ブロードバンド・モバイルネットワーク上でのストリーミングや、TV 会議などリアルタイム型の片方向/双方映像伝送の QoS 保証に必要となる伝送技術及び変換技術について述べた。最近では、デジタルシネマや遠隔手術などへの応用も想定した IP 上での HDTV クラスの映像伝送の試みも開始されており、帯域変動やパケット損に対する QoS 保証の仕組みはますます重要になってきている。また、通信キャリア自体も電話サービスを始め、オール IP 化する動きも出てきており、アプリケーションの特性に適応した IP 上での最適な伝送技術への期待は高まる一方といえる。

## 文 献

- (1) H. Yanagihara, A. Yoneyama, Y. Nakajima, and H. Furuya, "Dynamic rate-control method for real-time video streaming over the internet," Proc. of SPIE, vol.4861 (Multimedia Systems and Applications V), pp.145-152, July 2002.
- (2) Y-G. Kim, J.W. Kim, and C.-C. J. Kuo, "TCP-friendly internet video with smooth and fast rate adaptation and network-aware error control," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol.14, no.2, pp.256-268, Feb. 2004.
- (3) A. Vetro, C. Christopoulos, and H. Sun, "Video transcoding architectures and techniques: An overview," IEEE Signal Process Mag., vol.10, no.2, pp.18-29, March 2003.
- (4) 酒澤茂之, 宮地悟史, 滝嶋康弘, 中島康之, "TCP ストリーミングにおける網帯域変動高速適応方式," FIT2003, no.J-025, Sept. 2003.
- (5) 信太健司, 柳原宏昌, 米山暁男, 中島康之, "MPEG-4 ビデオの複数レート同時符号化方式に関する一検討," FIT2003, no.LJ-015, Sept. 2003.
- (6) J. Byers, M. Luby, M. Mitzenmacher, and A. Rege, "A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data," Proceedings of ACM Sigcomm '98, pp.56-67, Vancouver, Canada, Sept. 1998.
- (7) A. Yoneyama, H. Yanagihara, Y. Takishima, and Y. Nakajima, "Video error concealment by the combination of spatio-temporal recovery and post-filter for H.264," IEEE Proc. ICCE (International Conf. On Consumer Electorn.), no.9.3-2, Jan. 2005.



なかじま やすゆき  
中島 康之 (正員)

昭55 早大・理工・電子通信卒。昭57 同大学院修士課程了。同年国際電信電話(株)入社。マルチメディア符号化・変換方式及び検索方式の研究・開発に従事。現在、(株)KDDI 研究所執行役員。昭60~61 米国マサチューセッツ工科大学客員研究員。工博。IEEE 会員。