

## FEC と Path-Diversity を利用した回復可能なストリーミング

川 西 智 也<sup>†</sup> 中 村 素 典<sup>††</sup>  
岡 部 寿 男<sup>††</sup> 美 濃 導 彦<sup>††</sup>

映像伝送をインターネット上の損失の多いネットワークで行うと、映像の乱れや途切れがしばしば発生する。これは少しの乱れや遅延を許容できない双方向性のある遠隔講義のような場合は、問題となる。信頼性を高める手法としては、バッファリングと再送によるアプローチがあるが、これは遅延を大きく伴う。本稿では、インターネット上では送信者と受信者の間に複数の経路を設けることが比較的容易であることに着目し、特定の経路に起因する障害を回避するための複数経路への分散配送と、パケットの重複配送や冗長符号化を組み合わせ、ネットワークの状況に応じて配送や符号化に関するパラメータを調節することで、品質を高く維持する手法を提案する。

### Resilient Streaming with FEC and Path-Diversity

TOMOYA KAWANISHI,<sup>†</sup> MOTONORI NAKAMURA,<sup>††</sup> YASUO OKABE<sup>††</sup>  
and MICHHIKO MINOH <sup>††</sup>

Multimedia streaming over lossy network frequently involves cutting-off and disorder. Interactive application can not allow this problem and delay. ARQ is one approach to make streaming more resilient. ARQ is very effective but involves too long delay. We propose a method of combination of FEC and Path-Diversity — to utilize multiple paths between transmitter and receiver. Our method enables operators to observe network statistics and fit a way how to mix duplicate delivery of packets ,load-balance and FEC to network condition so as to keep quality of streaming high.

#### 1. はじめに

近年、インターネットの普及に伴いマルチメディアコンテンツをインターネット上でも利用し、安価に映像・音声の伝送システムを構築したいという要求が高まってきている。

しかしながら、インターネットは、Best-Effort であるため、ネットワークの状況変化に伴って、パケットロスなどに伴う映像・音声の乱れや途切れが発生してしまう。

本稿では、特に遅延に対しての要求が強いアプリケーションを対象に映像・音声の乱れや途切れを軽減するための手法を提案する。本手法では送信者受信者間に複数経路用意できる状況を想定し、それを活用する。本手法によって、例えば、遠隔地点間で学生同士が相互にインタラクションする遠隔講義のような場合に、映像・音声を途切れさせないことで、より円滑に双方向のコミュニケーションができるようにする。

#### 2. 関連研究

本章では、ストリーミングにおいて映像・音声の途切れを軽減するために利用される技術について概観する。

映像・音声の途切れは主に受信者に伝送する途中でパケットが一部ロスしてしまうことよって生じる。このロスに対する対応するためにさまざまな手法がある。

##### 2.1 バッファリングと再送

バッファリングと再送は信頼性を獲得するために非常にしばしば用いられる強力な手法である。これは、受信者側である程度バッファを持って受信し、受信できなかったパケットを送信者に知らせ再送してもらうことによって、パケットロスに対処する方法である。

バッファリングのため、遅延が一定量生じる。遅延が問題とならない映画や放送大学のような一方型のコンテンツではよく利用される。Windows Media Player や、Real Player のような商用のメディアプレイヤーでも採用されている。また、ストリーミングの分野とは異なるが、TCP で用いられている手法でもある。

<sup>†</sup> 京都大学情報学研究所

<sup>††</sup> 京都大学学術情報メディアセンター

単純な再送ではない方法として、文献 1) のような手法もある。

バッファリングと再送という手法によって大幅に品質を向上させることができる。しかしながら、大きな遅延が伴い、遅延の存在が致命的となるアプリケーションには向かない。

## 2.2 FEC の利用

FEC というのは、誤りが起きたときに訂正するための冗長符号を元のデータにあらかじめ付加して送信することで、受信者側でパケットロスがあった部分を回復できるようにする機構である。受信者が再送要求を行い、再送を待つための時間を必要としないために、遅延をあまりともなわずに品質を向上できる。

FEC を利用した手法として、MPEG2+TS<sup>2)</sup> がある。MPEG2 ストリーム伝送を IP の上で行えるようにしたシステムで、実環境での実験を成功させている。

FEC は優れた手法であるが、ネットワークの状況によっては使用が向かない。その理由は、FEC による冗長化は伝送量を増やすからである。そのため、低帯域であるために、十分に伝送できずにパケットロスが発生してしまっている場面では逆効果となってしまう。冗長化したことで帯域をさらに圧迫してしまい、かえってパケットロス率が上昇し、品質が下がる。

## 2.3 Path-Diversity の利用

Path-Diversity とは、ホスト間に複数の経路がある状態を指す。

Path-Diversity は Ad Hoc Network においてしばしば言及され、文献 3) などがある。

とくに、Liang らは、Path-Diversity を活用して、ストリーミング配送すると、FEC と比較してどのような特性が得られるのかについて、実環境で実験している<sup>4)</sup>。その結果として、同程度冗長化した FEC と比較して、複数経路を利用する冗長化は遅延が全般的に減少し、品質も向上するという結果を得ている。とくに互いに疎な経路が複数ある場合は、非常に有効であるという結果を導いている。

## 2.4 組み合わせ

Path-Diversity と他の 2 手法との組み合わせを行っているような研究もある。

例えば、文献 5) は選択的 ARQ と Path-Diversity を組み合わせた手法である。さらに、階層化エンコーディングと呼ばれる階層に分けたストリームを利用し、急激な品質の低下を防ぐ技術も採用している。

PDF システム<sup>6)</sup> は、Path-Diversity と FEC を組み合わせて利用した場合の結果について理論的に検証し、シミュレーションによって検証している。

これらのシステムは特定のネットワークの状況においては効果的だが、状況が変化するネットワークにおいては、そのときの状況に応じて品質を向上させるのに適切なパラメータ・手法が異なるため、逐次ネットワークの変化に追従しきれない問題があった。

## 3. 提案手法

本稿では、FEC と Path-Diversity を組み合わせることで、回復可能なストリーミングを実現するシステムを構築する。このシステムによって、オペレータがネットワークの状況を逐次把握することを可能にし、さらにその把握した統計情報に従って品質を維持するための手法や使用する経路の組を適切に選択・変更可能にする機構を提案する。

本手法によって、遅延を少なく保ったまま、品質を落とさずストリーミングできるようにする。

### 3.1 Path-Diversity の実現手法

Path-Diversity は受信ホストや送信ホストに複数の IP アドレスが存在するかまたは、Relay ホストがあれば実現できる。

受信ホストに複数の IP アドレスが存在し、それらに対して送信ホストから到達できる場合、それによって複数の経路を利用できる。これは、受信ホストまでの経路が疎であればより効果的になる。また、送信ホスト側でアドレスごとに送信ホストの上流経路を異なるように経路表を書くことによって、送信ホストの上流経路を選択できる。

また、送信ホストに複数の IP アドレスがある場合には複数インタフェースがある状況と SABR(Source Address Based Routing) を利用する状況がある。複数インタフェースがあり、経路表をインタフェースごとに持たせられれば、受信ホストのアドレスが 1 つだけの場合でも、複数の経路を利用できる。SABR は、送信ホストの IP アドレスによって、上流経路を選択する手法であり、1 つのインタフェースに複数アドレスがある。

Relay ホストは、送信ホストからのパケットを受け転送することによって、送信ホストと受信ホスト間の直接の経路とは異なる Relay ホストが仲介する経路を実現する。Relay ホストは、送信ホストや受信ホストが複数の IP アドレスを持たなくても利用できる。また、Relay ホストがインターネット上に多数ある場合や、1 つの Relay ホストが多数の上流回線とつながり多数の IP アドレスを持っている場合は、Relay ホストが 1 台存在するだけで疎な経路を多数構築できる。

これらの組み合わせによってさらに多くの経路を得

ることができる。得られた多くの経路の中から使用回線の重複の少ない疎な経路の組を選択するとより効果的に Path-Diversity を利用できる。

### 3.2 品質向上の手法

本稿では、品質を向上させるために FEC と Path-Diversity を組み合わせて利用する。

本手法では品質を低下させる要因として、次のようなものを想定する。パケットの散発的なロス、パースト的なロス、帯域の不足である。それぞれ適切な対処の方法が違う。

そのため、品質を低下させるどのような要因があるのかを把握し、適切に対処する必要がある。

#### 3.2.1 品質低下の要因の把握

それでは、品質低下の要因をどのように把握し、どのように対処していくとよいのであろうか。

本稿では、パラメータの変更を支援するためにネットワークの状況をフィードバックする機構を考える。

ストリーム中の統計情報の中でも本手法で有益なものとして、経路ごとのパケットロス率および連続パケットロス数、遅延時間がある。

パースト的なロスでない低確率の散発的なロスであると分かると、FEC を用いて品質の低下を防ぐことができる。パースト的にパケットがロスしやすい場合やパケットロス率が非常に高い場合には、FEC は向かない。帯域の不足によりパースト的にロスしている場合は、負荷分散を行うことにより負荷を軽減し問題を回避できる。

遅延時間は特徴が似た経路が複数ある場合は、遅延の短い方を選ぶというように利用できる。

また、ストリームの統計情報ではないが経路ごとの実効帯域が分かれば、オペレータはそれを用いて負荷分散をどのように行うかを決定できる。

オペレータはこれらの統計情報を観察し、それに合わせて、ストリームを流す経路を変更したり品質向上のためのパラメータを変化させる。

#### 3.2.2 パラメータの設定と変更

ネットワークの状況を見て受信者に映像の乱れや途切れを見せないようにパラメータを設定する。

このとき、ネットワークの状況の変化に合わせて、パラメータを変更すればストリームの品質の低下を抑えられる。

例えば、ストリーム中に急にパースト的なパケットロスが増えた場合に、帯域が足りないと推測して負荷分散を行うというような対処を可能にする。

帯域が足りないことが原因でパースト的なロスの多い経路がある場合は、配送率を低く設定していき、

パースト的なロスが減るかどうかが確認するといった手続きを行えば、安定してストリーム伝送できる。このとき、組み合わせられる経路がパケットロス率が高く帯域に余裕があれば、FEC や冗長配送と組み合わせるといようなこともできる。

配送率を減らしてもパースト的なロスが減らない場合は、ほかの経路の使用を検討する必要もある。

#### 3.2.3 伝送経路の選択と変更

パースト的なロスに対処するために、伝送経路の選択と変更を行うためには、何が必要であろうか。

まず、本手法で経路は、送信元アドレスと受信先アドレスの組のことを指す。

送信ホストに複数の送信元アドレスがあり、受信ホストに複数の受信先アドレスがあれば、それらによるすべての組を経路として捉えることができる。しかしながら、そのすべての経路が実際に伝送可能な経路というわけではない。到達できない経路・単方向の経路・帯域の不足などがあるかもしれない。

そのため、どの経路が実際に伝送可能な経路でどの経路が使用できないのかを調べる機構が必要となる。また、伝送経路を途中で変更するにあたって、どの経路が実際に使える経路でどの経路が使えないか程度を把握しておきたい。

また、ストリーミング中にアドレスが増える場合も考えられる。それに対応するためにストリーミング中にアドレスが増え、利用可能な経路が増える場合は、それを互いに通知しあう必要がある。

## 4. システム

本章では提案するシステムの仕組みの詳細について述べる。

### 4.1 設定するパラメータ

設定できるパラメータとしては、FEC に関するパラメータと Path-Diversity に関するパラメータがある。

本手法では FEC の中でも Reed-Solomon を用いる。Reed-Solomon による FEC では、どれだけの冗長化を行うかのパラメータがあり、それによって全体のうちどれだけの割合までパケットロスしても回復可能かが決まる。

Path-Diversity に関するパラメータは、経路ごとの配送率である。配送率はメディアストリーム全体に対して何%をその経路に対して送信するのかわすパラメータである。配送率が0%の場合は、その経路にストリームを流さないということの意味しており、100%の場合は、その経路にストリームをすべて流すということになる。

#### 4.2 統計情報の取得・パラメータの設定

本システムを介して、送信者はストリーム伝送の統計情報の取得およびその統計情報を利用してよりよいパラメータを設定できる。

統計情報の取得およびパラメータの設定のために本システムはアプリケーションレイヤの独自のプロトコルを実装している。

#### 4.3 使用するプロトコル

本手法では、RTP/RTCP<sup>7)</sup>を利用して、ストリーミングの伝送・フィードバックを行う。

Path-Diversity を利用する場合は、RTP のストリームが経路ごとに流れ、それを受信ホストで統合する。このとき、元のストリームとの対応関係を知らせるために、Path-Diversity の利用後も元のストリームの RTP シーケンス番号をパケットに付加して送信する。

RTCP は、統計情報の送信および、伝送可能性の調査、使用アドレスの追加の通知のために利用する。パケットロスについての情報および遅延時間に関する情報を受信ホストから送信ホストに返すために RTCP RR (Receiver's Report: 受信者レポート) を利用する。RR を拡張してパースト的なパケットロスに関する情報も返す。また、使用アドレスの追加の通知についても、RTCP を利用する。これは、新しい形式のフォーマットを定義して行う。

また、FEC や Path-Diversity の設定を変化させるために独自のアプリケーションレイヤのプロトコルを実装する。

#### 4.4 システムの動作

本節ではシステムが持つ機能および具体的な動作について述べる。

##### 4.4.1 経路の伝送可能性の調査

伝送可能な経路を経路を調査するには、RTCP SR (Sender's Report: 送信者レポート) および RR を利用する。

送信ホストはストリーミング中送信パケット数や送信時の NTP タイムスタンプを SR という形式に従って受信ホストに対して送信する。この SR を使用していない経路に対しても定期的に送信することによって、経路の伝送可能性を調査する。受信ホストは、その SR を受信すると、送信ホストにその経路を受信した時刻を RR で送信ホストに送信する。送信ホストはその RR を受信することで、その経路が使っていたことと、その経路の遅延時間を知る。

##### 4.4.2 受信者レポートの送信経路

受信ホストは送信ホストに対して定期的に RR (受信者レポート) の形式でパケットロス率・遅延時間に

関する情報を送信する。

受信ホストは複数の経路に関する RR をまとめて送信ホストに対して送信する。RR の送信経路をストリームの流れる経路と独立にすることによって、単方向の伝送可能性しかないネットワークでも本システムを利用できる。また、RR をまとめて送信することによって、オーバーヘッドが少なくなり、効率的になる。

RR は、考えられる経路の中から、ラウンドロビンで選択した経路を用いて定期的に送信する。これによって、どれか使える経路があれば、RR を送信ホストは受けとることができる。こうすることで、ネットワークの変化に対してロバストになる。

#### 4.5 既存システムの拡張

本システムは、通常の RTP を使用した既存のコーデックを利用したストリーミングにも適用できる。

それは、送信ホストと受信ホストの間に本手法の Relay ホストを 2 台挟むことによってできる。

送信ホストからのストリームを送信側 Relay ホストが受信し、それがネットワークの状況に適した FEC、冗長配送、負荷分散を行って、受信側 Relay ホストに対して送信する。受信側 Relay ホストはそれを元のストリームに復元して、受信ホストに対して送信する。

これによって、ネットワークの状態の変化に対応でき、パケットロスに耐えられるようにできる。

## 5. 実 験

ネットワークの状況に応じて FEC と Path-Diversity の適切な組み合わせ方に違いがあることを確認するために実験し、その結果を評価する。

### 5.1 実験に用いた環境

実装としては、EMON を拡張して Path-Diversity を実現した。EMON とは、古村ら<sup>8)</sup>が開発した FEC によるエンコードデコードが可能なマルチメディアストリームの伝送システムである。EMON は単機能のプロセスが明確に分かれており、拡張が容易である。

実験環境は送信用マシン 1 台と受信用マシン 1 台の 2 台を用いて構築した。帯域制御のために受信用マシンで DUMMYNET を用いた。受信用マシンのハードウェアは Pentium4 1GHz メモリ 256MB で、送信用マシンは Pentium4 1.5GHz メモリ 384MB である。ともに 100BaseTX の NIC を用いている。ソフトウェアは、受信用マシンに FreeBSD 4.8-RELEASE、送信用マシンに FREEBSD 5.1 RELEASE を用いた。

### 5.2 Path-Diversity のみの実験

本節では、Path-Diversity のみを利用して実験した結果を示す。

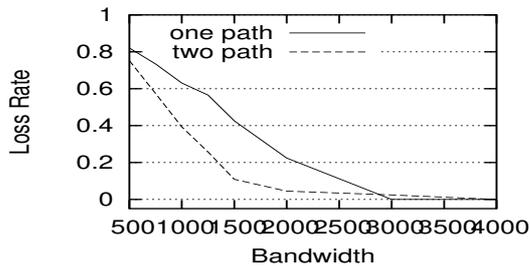


図 1 負荷分散とパケットロス率

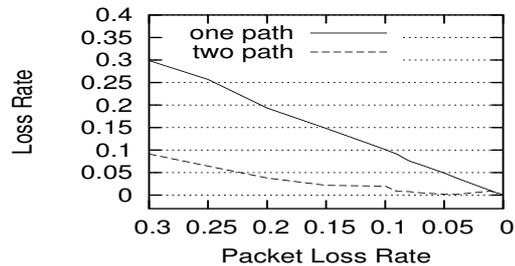


図 2 パケットロス率と冗長配送

### 5.2.1 負荷分散の効果

帯域の狭いネットワークに対して、本システムを適用した．2.7Mbpsの帯域を使用する映像を帯域を変化させながら、1本の経路と2本の経路に対して伝送した場合の結果を図1に示す．

2本の経路では、両方の経路が同じ帯域であるとし、パケット全体の50%ずつをそれぞれの経路に対して分配している．

縦軸はそれぞれパケット全体に対する受信できなかったパケットの割合を示している．小さければ小さいほどよい値である．横軸は経路の帯域を kbps 単位で示している．

この図を見ると経路が2本ある場合は、1500kbpsあたりまで帯域の増加とともにパケットロス率が減少しており、経路が1本の場合は、3000kbpsまでパケットロス率が減少している．

この実験で帯域が不足している場合は、負荷分散が有効であることが分かる．

### 5.2.2 冗長配送の効果

パケットロスの多いネットワークにおいて本方式が有効かどうかを確認した．

帯域は十分にあるが、パケットロスの多いネットワークに対して冗長配送を行い、冗長配送を行わない1本の経路の場合と比較する．

あるパケットロス率の経路が1本の場合と、経路が2本の場合を比較する．

縦軸はパケット全体に対する受信できなかったパケットの割合を示している．横軸は経路1本あたりのパケットロス率を示している．

経路1本の場合のパケットロス率は設定どおりの直線的な変化をしている一方、経路2本の場合は設定値の2乗程度つまり確率の積である値になっている．

### 5.3 FEC と Path-Diversity の組み合わせ

FEC と Path-Diversity を組み合わせて実験を行う．

#### 5.3.1 低帯域な経路とロス率の高い経路のペア

本節では、経路が2本ある場合の中でも特に低帯域

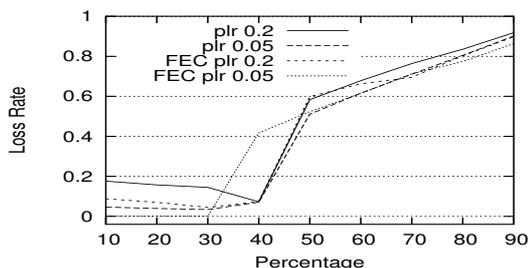


図 3 低帯域な経路とロス率の高い経路の組

の経路とロス率の高い経路があった場合に対して、冗長符号、冗長配送、負荷分散のさまざまな組み合わせに対して実験を行う．

図3は、帯域2Mbpsの経路と帯域は十分にあるが5%または20%のパケットをロスする経路の2本の経路がある場合に対して冗長配送のみで実験を行った結果である．

図3の横軸は低帯域の経路への配送率、縦軸はロス率である．図中の plr は広帯域の経路のパケットロス率を意味する．

plr が 0.2 のときは配送率が 40% のときが最もロス率が低い．広帯域の経路のパケットロス率が 0.05 のときは配送率が 30% のときが最もロス率が低く、3.3% 程度のロス率に抑えられている．パケットロス率 0.05 のとき、FEC を利用すると 0.1% 程度のロス率となり、FEC によって大きく結果が改善することが分かる．

また、低帯域の経路に多く配送すると、処理しきれなくなって、ほとんどすべてのパケットが落ちている．

図4は、図3と同じ条件で、広帯域な経路に対して冗長に1パケットを余分に送った場合である．

図の横軸、縦軸は図3と同じであり、同様の実験を行っている．

冗長配送の効果は非常に大きく、1桁以上結果が向上している．広帯域の経路でのパケットロス率が 0.2 で FEC をしない場合配送率が、40% のときに 7.2% 程度のロス率が最低であるのに対して、冗長配送を行うこ

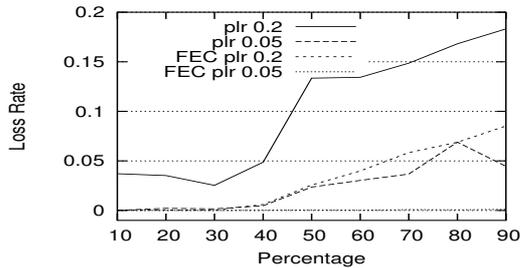


図4 低帯域な経路とパケットロス率の高い経路の組(冗長配送)

とでFECなしで2.5%程度のロス率にまで軽減し、さらに冗長配送とFECを組み合わせることで0.03%程度にまでロス率が軽減している。

パケットロス率が0.05でFECをかけているときは、ほとんどずっと0に張り付いている。しかし、これは冗長に1パケット余分に送信しなくとも、配送率を適切に設定すれば0に近いロス率であったので冗長に送ることはこの場合は不必要であったとも言える。

#### 5.4 考察

前節までの実験によって、FECとPath-Diversityを組み合わせることによって、結果が大きく向上していることが分かる。特に、5.3.1の結果を見ると、帯域の小さい経路とロス率の高い経路の組み合わせの場合は広帯域だがロス率の高い経路に冗長にパケットを送りつつ、FECをかけると受信者側で元のストリームを高い確率で回復できる。

また、低帯域の経路に対する配送率の値は、他の経路に送るときのパケットロス率より、その経路でのパケットロス率が小さくなるように選ぶのときに意味があることが分かる。たとえばペアとなる経路のパケットロス率が高くても低帯域の経路に対して多く流しすぎて低帯域の経路のパケットロス率が高くなってしまうと、意味がない。FECによる冗長符号化はパケットロス率が小さいときにより効果的であり、パケットロス率が高い経路であれば、冗長配送を行うことなどによって、ある程度ロス率を下げてからFECを行う方がよい。

また、広帯域のパケットロス率が低いとき、広帯域の経路に配送率を大きく割り当てFECをかけると十分に元のストリームを回復できており、この状況下ではPath-Diversityを利用した負荷分散や冗長配送の利用はそれほど必要ではないことが分かる。

本実験によって、ネットワークの状況に合わせて適切なFEC、冗長配送、負荷分散の組み合わせが異なり、状況の変化に合わせて組み合わせ方を適切に変化させる必要があるということが分かった。

## 6. おわりに

本稿では、FECとPath-Diversityの組み合わせによって、受信側で遅延を少なく完全なストリームを得やすくするための手法を提案し、さらにネットワークの状況を逐次オペレータに報告し、オペレータがその情報を元にそのときの状況に合わせた冗長符号化、負荷分散、分散配送といった品質向上手法を選択できるようにするシステムを提案した。そして、実験で評価し、安定したマルチメディア伝送ができることを確認した。今後は実環境での性能評価を行うとともに、送信データ品質の動的な変更を含めた適応的手法について検討を行う。

## 参考文献

- 1) J. Byers, M. Luby, M. Mitzenmacher, A. Rege "A Digital Fountain Approach to Reliable Distribution of Bulk Data" Proc ACM SIGCOMM 98.
- 2) 相原玲二 大塚玉記 近藤徹 西村浩二 前田香織 「MPEG2 over IPv6 システムの開発と皆既日食中継実験」 広島大学情報メディアセンター
- 3) S. Mao\*, Y. Wang, S. Lin, and S. S. Panwar, "Video transport over ad hoc networks with path diversity," presented at the poster session of ACM MobiCom 2002, extended abstract is included in the SIGMOBILE 's Mobile Computing and Communications Review (MC2R) publication.
- 4) Yi J. Liang, Eckehard G. Steinbach, Bernd Girod "Multi-Stream Voice over IP Using Packet Path-Diversity" ACM Multimedia 2001
- 5) Shiwen Mao, Shunan Lin, Shivendra S. Panwar, and Yao Wang, "Video transport over ad hoc networks: Multistream coding with multipath transport," 2003, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Recent Advances in Wireless Multimedia.
- 6) T. Nguyen and A. Zakhor "Path-Diversity with Forward Error Correction (PDF) System for Packet Switched Networks " INFOCOM 2003, April 1-5, San Francisco CA, USA. EECS Department, UC Berkeley, Berkeley
- 7) RFC 3550 "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications" <http://ietf.org/rfc/rfc3550.txt>
- 8) 笠松健一 藤川賢治 岡部寿男 古村隆明 「EMON システム：コマンドパイプラインによるマルチメディアストリーム処理」 第64回情報全大，第3分冊，pp485-486(2002)