

FECの冗長度動的変更による動画像伝送の損失率制御

近堂徹[†] 西村浩二[‡] 相原玲二[†]

[†] 広島大学大学院工学研究科

[‡] 広島大学情報メディア教育研究センター

あらし

光ファイバやADSLなどの急速な普及により広帯域ネットワークの整備が進み、動画像伝送の本格的利用が期待されている。しかし、ベストエフォート型のネットワークを利用して動画像伝送を行おうとする場合、伝送路上で常に変化するトラフィックがネットワーク品質にも影響を与えるため、リアルタイム性を重視する映像や音声の品質の低下をもたらす。このような環境下では、ネットワークの状態に応じて動的にデータ損失への耐性を変化させることで、伝送路上の損失率の変化に適応した動画像伝送が可能になると考えられる。本稿では、FECの冗長度動的変更による動画像伝送の損失率制御方式について示す。さらに、これを筆者らが開発しているMPEG2動画像伝送システムmpeg2tsに適用し評価実験を行うことで、パケット損失率が変化するような環境下においてシステムが効果的に機能することを示す。

Loss Recovery Control for Video Streams Using Dynamic Redundancy of FEC

Tohru KONDO[†] Kouji NISHIMURA[‡] Reiji AIBARA[†]

[‡] Graduate School of Engineering, Hiroshima University

[†] Information Media Center, Hiroshima University

Abstract

Motion picture increases the Internet traffic because of the wide spread deployment of high-speed applications over the Internet as typified by ADSL and FTTH. Nevertheless, current best-effort networks do not provide guaranteed resources such as bandwidth or guaranteed performance measures such as packet loss rate. In consequence, it has much negative effects on the quality of picture. To resolve these problems, we design and implement loss rate control mechanism for video streams using dynamic redundancy of Forward Error Correction, and integrate it to our developed MPEG2 over IP Transfer system "mpeg2ts". In this paper, we show the effectiveness of the system with results of an experiment.

1 はじめに

近年のネットワークのブロードバンド化に伴い、インターネット上を流れる情報は映像、音声を含むマルチメディア情報がその多くを占めるようになってきた。これまでは、通信帯域が十分に確保できないために低品質な動画像を利用せざるを得なかったが、今後より一層の高速通信網の普及、整備が進むにつれ、クオリティを重視した動画像伝送の要求が高まってくると考えられる。

これまで、筆者らはインターネットを伝送路として利用した動画像伝送を行うために、パケット損失対策として前方誤り訂正機能FEC(Forward Error Correction)を実現するRS(Reed-Solomon)符号方式を導入したMPEG2動画像伝送システムmpeg2ts[1]の開発を行い、様々な実証実験を通してその有効性の検証を行ってきた[2][3]。

しかしベストエフォート型のインターネットでは、伝送路上には多くのルータが存在し、さらに伝送路も他のトラフィックと共有する形が一般的である。このような

環境下では、常に変化するトラフィックがネットワーク品質にも影響を与え、それがリアルタイム性を重視する映像や音声の品質の低下をもたらす。FECを用いることでパケット損失に対する耐性を強化することは可能だが、必要以上に耐性の高いFECを用いると通信帯域を無駄に消費する。また、FEC回復後のパケット損失率は伝送路自体の損失率に依存するため、伝送路上で損失率が時間的に変化するような場合に脆いという側面を持つ。

このような背景から、ネットワークの状態に応じて冗長度を動的に変更しFEC回復後のパケット損失率を一定以下に保つような制御を行うことで、通信帯域の最適化が可能になる。本稿では、冗長度の動的変更による動画画像伝送の損失率制御方式を提案する。さらに、この制御方式をmpeg2ts上に実装し評価実験を行うことで、パケット損失率が変化するようなネットワーク環境下においてシステムが効果的に機能することを示す。

2 動画画像伝送における再生品質保証

リアルタイム性を重視するマルチメディアデータ伝送では、ネットワーク上で発生するパケット損失や伝送遅延時間の揺らぎなどの影響を強く受けるため、このような環境下でのメディアの再生品質保証を目的とした制御が必要とされ、さまざまな手法が提案されている。一般的に、これらの技術には、ネットワークの負荷状態に応じて転送レートや符号化レートを動的に調整するなどのレート制御 [4] や、階層化したメディアストリームを受信者が受信状況に合わせて選択/受信する階層化マルチキャストを用いた制御 [5] がある。これらの制御方式では、輻輳状態における制御方式として、伝送帯域を下げることでパケット損失率が低減することを期待しているが、その保証はない。

一方、ネットワーク伝送でのパケット損失に対する対策としてARQ(Auto Repeat ReQuest)によるパケット再送制御 [6] と、FECによるエラー訂正技術がある。

ARQでは、受信側で検知した損失パケットを再送することで損失回復を行うものである。この場合に問題となるのが再送遅延であり、この遅延がリアルタイム性を重視するアプリケーションでは致命的となる恐れがある。またFECを用いてパケット損失に対する耐性を実現するエラー訂正技術に関しても、冗長度を越えるパケット損失が発生した場合に回復限界を越える可能性がある。

パケット損失率の変動に適応した転送・再生する方法として、階層符号化を施したデータに傾斜冗長度を付加して伝送する方法が提案されている [7]。これは、音声や映像を重要度に応じて階層化し、それぞれの階層毎に異なった冗長度でFECを付加することで、パケット損失率の変動にも適応させるものである。しかし、この場合もFEC回復後のメディアの損失率を予測することはできない。

本稿では、あらかじめ動画画像が伝送できる程度の帯域が確保でき、かつ他のトラフィックとも共存するようなネットワークを想定し、データに施すFECの冗長度をネットワークの状態に応じて動的に変更することで、最終的なFEC回復後の損失率をあらかじめ定めた目標値以下とする制御方式を提案する。

3 Reed-Solomon 符号のための RTP ヘッダ

パリティ符号を用いるFECのためのRTPフォーマットがRFC2733[9]として標準化されている。RTP(Real-time Transport Protocol)はリアルタイム性が要求されるマルチメディアデータ伝送には一般的に用いられるプロトコルである。RFC2733ではRTPヘッダの特定フィールドについても冗長度化され、可変長データにも対応している。また、データパケットと冗長パケットは別ストリームとして伝送され、後方互換性を提供する。しかし、パリティ符号はRS符号に比べ、冗長度に対する誤り訂正能力は低い [3]。そこで本稿では、RFC2733にて標準化された冗長度化手法を取り入れたRS符号によるFECのためのRTPヘッダフォーマットを取り入れる。

3.1 パケットフォーマット

パケットフォーマットを図1に示す。メディアパケット(media packet)は送信元から伝送されるユーザデータで、FECパケット(FEC packet)はFEC処理によって新しく生成したパケットである。2つのパケットはそれぞれ別ストリームとして伝送し、後方互換性を提供する。つまり、メディアパケットのみを受信することで、FECに対応していないノードでも正常に動作することが可能になる。FECフィールドを図2に示す。FECパケットのRTP/FECヘッダの一部はRFC2733で定義されたprotection operationにより生成され、length recovery, PT(payload type) recovery, TS(time stamp) recoveryにそれぞれ冗長度化されたデータが付加される。SN baseはFEC処理によって保護されたメディアパケットの最小シーケンス番号を付加し、block size, data symbolはReed-Solomon符号によるFECパッケージの(N, K)コード(一般にdata symbol(K)個のデータパケットを冗長度化し、block size(N)個のパケットを生成する方法)に対応している。

3.2 Protection operationによるFEC

FECのエンコード/デコード処理には、protection operationを用いることでRTPヘッダの特定のフィールドも冗長度化を行う。protection operationによる冗長パケットの生成方法を図3に示す。FECエンコード処理では、メディアパケットのRTPヘッダから特定のフィールド

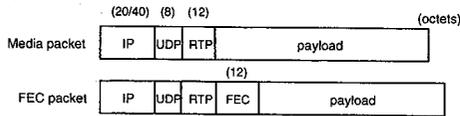


図 1: パケットフォーマット.

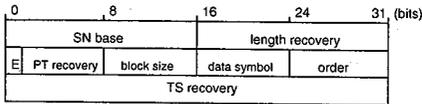


図 2: FEC フィールドフォーマット.

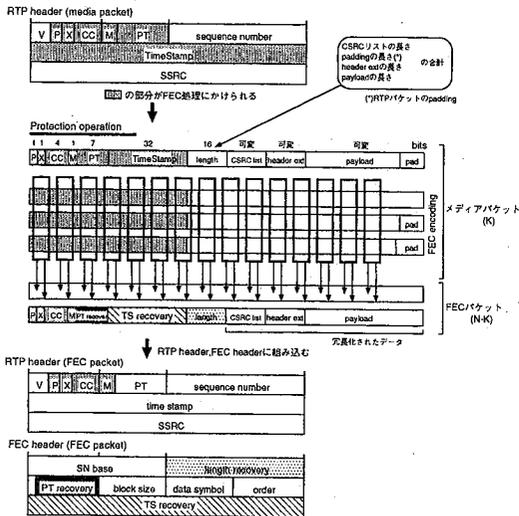


図 3: Protection operation.

を連結したビットストリング複数パケット分を1つのユニットとし、それに対し垂直方向にFECエンコーディングを行い、冗長データを作成する。これによって生成されたビットストリングを冗長パケットの RTP/FECヘッダの特定フィールド、ペイロードに埋めることでヘッダを含むパケットの冗長化が可能となる。

デコード処理では、エンコード処理の逆の処理を辿る。冗長パケットの SN base と block size フィールドから自身のユニット内のメディアパケットを取り出し、FEC デコード処理が必要ならば、図 3 と同様の方法で各パケットからビットストリングを生成し、デコード処理を行って損失パケットの回復を行う。その回復性能は、ユニット内の block size (N) に対する data symbol (K) の組合せで決まり、損失したパケット数が (N-K) 以下であるならば、FEC により回復可能である。

4 動画像伝送の損失率制御

4.1 処理概要

本システムにおける処理概要を図 4 に示す。冗長度の変更は、送信側で受信側のフィードバック情報を基に算出したメディアパケットの損失率と FEC 回復後のメディアパケット損失率の目標値 (任意に指定可能) を比較することで決定される。送受信間でのフィードバック情報などのやりとりは IETF 標準プロトコルである RTCP (Real-Time Transport Control Protocol) [8] をベースにしている。RTCP は先述した RTP を利用して送受信者間のセッションの制御をするプロトコルとして標準化されており、受信者が RTCP パケットを送信者側に定期的に送信することで、ネットワーク上で損失したパケット数や伝送時間の揺らぎなどの検出を可能にする。

RS 符号を用いた場合のパケット損失回復性能は文献 [3] に示されており、本稿ではこの理論式から算出される値を理論値として用いる。データパケット数の組合せを (N, K)、各パケットの損失は独立であり個々のパケットの損失率を p とする。メディアパケット K 個の中から FEC 復元後に i 個損失しているとすると、パケット損失率 P[X] は次のようになる。

$N - K < i \leq K$ の場合

$$P[X] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K i_K C_i p^i (1-p)^{K-i} \quad (1)$$

$0 \leq i \leq N - K$ の場合

$$P[X] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K i_K C_i p^i (1-p)^{K-i} + \sum_{j=N-K-i+1}^{N-K} N-K C_j p^j (1-p)^{N-K-j} \quad (2)$$

これよりデータパケット数の組合せを (15,8) から (15,13) まで変化させた場合の上式より求めた RS 符号のパケット損失回復性能を図 5 に示す。なお、横軸は FEC 回復前、縦軸は FEC 回復後のパケット損失率である。

本システムではこの理論値を用いて、フィードバック情報から求めた損失率と回復後の目標値を比較して冗長

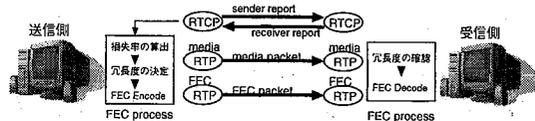


図 4: RTCP による冗長度の変更機構.

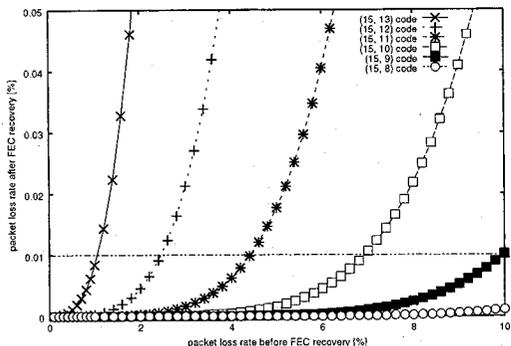


図 5: パケット損失回復性能の理論値。

度を決定する。例えばパケット損失率 10% 以内のネットワークを対象とし、回復後の目標値を 0.01% 以下に設定する場合、損失率と冗長度および帯域増加量の関係は表 1 のようになる。

表 1: パケット損失率と冗長度, 帯域増加量の関係。

パケット損失率	冗長度	帯域増加量 (倍)
1%未満	(15,13)	1.15
1%以上 2.4%未満	(15,12)	1.25
2.4%以上 4.4%未満	(15,11)	1.36
4.4%以上 6.8%未満	(15,10)	1.5
6.8%以上 9.8%未満	(15,9)	1.67
9.8%以上	(15,8)	1.86

これにより、送信側では表 1 で、フィードバック情報から求めた損失率に対応した冗長度を選択することで、FEC 回復後の損失率が目標の 0.01% 以下に抑えられることが可能になる。求められた冗長度 (blocksize, data symbol) を FEC ヘッダに埋め込み FEC エンコード処理を行って送信する。受信側は、この FEC ヘッダフィールドを参照することで送信側での冗長度変更を追従し、FEC ユニット毎に設定された冗長度で FEC デコードを行うことができる。

要求される最終的なメディアの損失率は、利用するストリームタイプやアプリケーションによって変化することが予想される。例えば、TV 会議のような音声と映像を使用するアプリケーションで各々を別ストリームとして伝送する場合、映像に関しては損失の許容範囲は比較的広いが、音声に関しては高品質な伝送が要求されると考えられる。提案する方式であれば、アプリケーション毎に要求する損失率に合わせて冗長度を動的に変化することも可能で、パケット損失への耐性を強化させ、消費帯域量を可能な限り抑えることができる。

4.2 mpeg2ts への適用

本稿で提案する冗長度変更による損失率制御方式は、標準化に従った RTP により伝送される様々なマルチメディアデータに対して適用することが可能である。本稿では、その一例として筆者らが開発している MPEG2 over IP 伝送システム mpeg2ts に適用する。MPEG2 のような時間軸方向に圧縮処理を施しているような動画圧縮方式では、1つのパケットが複数のフレームにわたって影響を及ぼす可能性があり、この冗長度変更による損失率制御が効果的に機能することが期待できる。

MPEG2 over IP 伝送システム mpeg2ts は、MPEG2 のトランスポートストリーム (以下 MPEG2-TS) フォーマットの動画データデータを IPv4/v6 ネットワーク上で伝送するソフトウェアであり、IP マルチキャスト、IPsec (IP security) にも対応している [13]。

システムの処理概要を図 6 に示す。本システムは送信と受信は 1 台の Linux PC で動作する。エンコーダおよびデコーダは PCI カードを使用している [10][11][12]。以下、送信側と受信側の動作を簡単に示す。

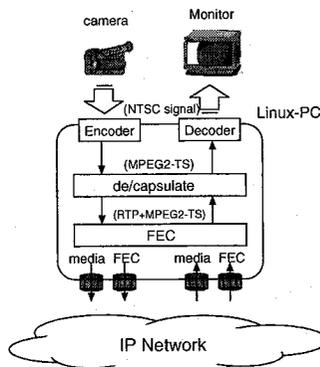


図 6: mpeg2ts の処理概要。

送信側では NTSC 信号をエンコーダにより MPEG2-TS へ変換し、TS パケット (MPEG2-TS を伝送する際の固定長最小基本構成単位) 複数個をカプセル化してメディアデータを作成し、RTP ヘッダを付加する。FEC 部においてメディアパケットから FEC パケットを生成し、別ストリームとして各々のキューに格納し、順にネットワークインターフェイスから IP ネットワークを介して受信ノードに転送する。受信処理は、送信処理の逆を行い、受信パケットから可能な限り損失パケットの復元 (誤り訂正) を行ない、メディアパケットを再構成する。この際、損失したメディアパケットがない場合や、損失が多く FEC 復元不可能である場合は受信したメディアパケットをそのまま出力する。

5 評価実験

FEC の冗長度動的変更によるパケット損失の時間的変化に対する有効性を評価するために、IP ネットワーク上でランダムな確率でパケット損失を発生、さらに発生させる損失率を任意で時間的に変化可能なパケット損失発生器を作成し、それを用いて冗長度変更を行う場合と行わない場合で、どの程度パケット損失への耐性に違いが見られるかを測定した。

図 7、表 2 に実験の構成図と使用した機器をそれぞれ示す。実験では SDTV MPEG2(TS レート 6Mbps) のストリームを使用し、送信ノードはパケット損失発生器を経由させて受信ノードへデータを伝送する。パケット損失発生器では、損失率を 0% から 10% まで 1 分毎に変化させ最後 1 分間 0% で推移するという疑似的な状況を作成し、その時の回復性能と送信側/受信側での FEC 処理による CPU 使用率について評価を行った。

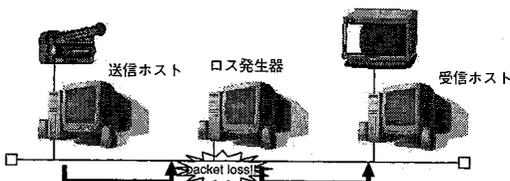


図 7: 実験構成図。

表 2: 使用機器。

	送信ホスト	受信ホスト	Loss generator
CPU	P4-2.5GHz	P3-2.0GHz	P3-750MHz
memory	1024Mbyte	128Mbyte	128Mbyte
OS	Vine-2.5 kernel 2.2.20	Vine-2.1.5 kernel 2.2.18	Vine-2.1 kernel 2.2.17
Encoder Decoder	BMK-Elektronik Kfir MPEG2 Encoder Card	Optibase VideoPlex Xpress Decoder Card	

図 8、図 9 に冗長度固定の場合と動的に変更させた場合におけるメディアパケットの損失回復性能を示す。横軸は FEC 処理の際のユニット番号 (IP パケット 15 個を 1 とする) であり 12 分間の測定結果で、縦軸は FEC 復元後のユニット内のメディアパケットの損失数である。以降、図中の各区間はパケット損失発生器で発生させた損失率を示している。これより、図 8 の場合では、冗長度が固定のため損失率の上昇に従い回復できない割合も多くなっているのに対して、図 9 の冗長度を動的に変更した場合ではその影響が回復性能に現れていないことが分かる。また、この測定時間中の映像・音声は、パケット損失が発生した箇所以外では正常に再生できているこ

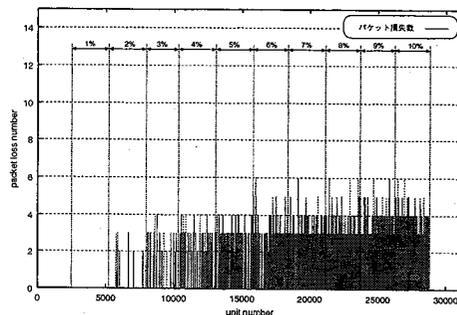


図 8: FEC 回復後のパケット損失数 (冗長度 (15,13)).

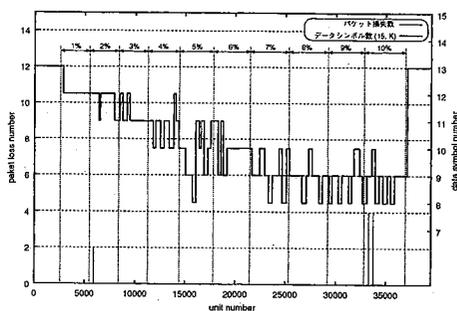


図 9: FEC 回復後のパケット損失数と冗長度の変化。

とを確認した。

図 9 には FEC の冗長度 (データシンボル数 K) の変更の様子を図中に合わせて示している。これより、パケット損失率の変化に追従して表 1 で定めた関係を基に冗長度が動的に変更している様子が分かる。

表 3 に、それぞれの測定時間中の受信メディアパケット数、損失メディアパケット数、FEC により回復できなかったメディアパケットの統計について示す。表 3 よりメディアパケットの損失率が冗長度固定の場合は 1.17% 程度であるのに対して、動的変更を行った場合 0.0025% と冗長度の動的変更による FEC が効果的に機能していることが分かる。

表 3: メディアパケットの受信統計。

冗長度	受信 パケット数	損失パケット数 / 損失率 [%]	
		FEC 前	FEC 後
(15,13)	388212	18935 / 4.65	4783 / 1.17
動的	388673	18478 / 4.54	10 / 0.0025

冗長度を動的に変更させた場合 (図 9) の測定におい

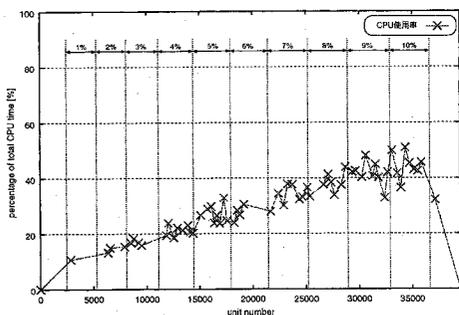


図 10: 受信ホストの CPU 利用率.

て、受信側での FEC のデコード処理に伴う CPU 利用率の変化を図 10 に示す。CPU 利用率については 1 つ前に冗長度が変化した時から 1 秒間隔でサンプリングした平均値をプロットしている。図 10 より冗長度動的变化を適用することで、冗長度が上がるにつれて CPU の利用率も上昇する傾向にあることが分かる。しかし、受信側で最も高負荷と思われる (15, 8) の場合でも CPU 利用率も最大 50% 程度であり、同様に送信側でも測定した結果、最大 30% 程度であることが分かった。これより、ソフトウェア処理により動的に冗長度変更を行っても、現在主流となっているスペックの汎用 PC で十分実現可能であることが示された。

6 おわりに

本稿では、RFC2733 の冗長度化に従った Reed-Solomon 符号のための RTP ヘッダについて示した。この手法を取り入れることで、RTP ヘッダの冗長度化や可変ペイロード長に対して RS 符号による冗長度化が可能になる。また、FEC の冗長度動的变化による動画像伝送の損失率の制御方式について述べた。これは、ネットワークで発生/変化するパケット損失率に応じてメディアデータの損失耐性を動的に変更させ、FEC 回復後のパケット損失率を一定以下に抑えるような方式である。さらに、これを MPEG2 伝送システム mpeg2ts に実装し、実験室内ネットワークのみならず運用ネットワーク SINET を利用し大阪大学・広島大学間での評価実験を行った。評価実験では、提案した制御方式を用いることで、ネットワークのパケット損失率が動的に変化するような環境下においても冗長度固定の場合に比べメディアデータの損失率を抑えることができ、映像・音声の再生品質の向上が確認できた。

本稿では、処理速度や処理の簡素化を考慮し 1 シンボル 4 ビットで実験を行ったが、バースト的な損失に対応

するために 8 ビットシンボルでの実装も行っており、それを用いて動的に冗長度を変更することも可能である。

今後の課題としては、実環境での検証実験や、より信頼性のあるネットワーク状態検出方法の提案、冗長度変更に加え動的なレート制御の実現も今後検討する。

謝辞

本研究の一部は通信・放送機構ギガビットネットワーク活用研究開発制度 (JGN-P341005, JGN-G13013)、広島市立大学特定研究 (1803, 2206)、特定非営利活動法人中国・四国インターネット協議会 (CSI) の支援を受けて実施しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] mpeg2ts Website
<http://net.ipc.hiroshima-u.ac.jp/mpeg2ts>
- [2] 近堂徹, 大塚玉記, 西村浩二, 相原玲二: "MPEG2 over IP 伝送システム mpeg2ts の開発と性能評価", 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2002 論文集, pp.157-160, 2002
- [3] 大塚玉記, 西村浩二, 相原玲二, 前田香織: "FEC を用いた MPEG2 over IP システムの開発と性能評価", 情報処理学会 DSM 研究会, 2001 年 11 月
- [4] 奥村誠司, 福田和真, 鷹取功人, 大野次彦, 下間芳樹: "MPEG4 over RTP 配信システムと QoS 制御方式", マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2000 論文集, pp.433-438, 2000
- [5] X.Li, S. Paul, H. Ammar: "Multi-Session Rate Control for Layered Video Multicast", SPIE Proceedings Vol. 3654, pp.175-189, 1999
- [6] J.Ray, D.Leon, A.Miyazaki, V.Versa, R.Hakenberg: "RTP Retransmission Payload Format", Internet-draft draft-ietf-avt-rtp-retransmission-03.txt, November 2002.
- [7] 山内長承: "補償度クラス別前方誤り訂正を用いたインターネットマルチメディア転送", 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.2, pp.206-212, 2001
- [8] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick: "RTP: A Transport Protocol for Real-time Application", RFC 1889, January 1996.
- [9] J. Rosenberg, H. Schulzrinne: "An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction", RFC 2733, December 1999.
- [10] <http://www.linuxtv.org/>
- [11] <http://www.vela.com/>
- [12] <http://www.optibase.com/>
- [13] Kouji NISHIMURA, Reiji AIBARA, Tamaki OHT-SUKA, Tohru KONDO: "An MPEG2 Transfer System using IPv6 Multicast and IPsec", Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2001), pp.578-581, 2001