

特別研究報告書

複数経路を活用したバーストパケットロスに 強いストリーミングシステム

指導教官 美濃 導彦 教授

京都大学工学部情報学科

渡部 郁恵

平成 17 年 2 月 10 日

複数経路を活用したバーストパケットロスに強いストリーミングシステム

目次

1	はじめに	1
2	既存手法と関連研究	2
2.1	障害の発生	2
2.2	既存の手法	3
2.2.1	バッファリングと再送	3
2.2.2	冗長符号化	3
2.2.3	Packet Path Diversity	4
2.3	Robst(Robst Streaming Tools)	5
2.4	Path Diversity EMON	5
2.5	既存の手法と関連研究の問題点の整理	7
3	システムの提案と設計	8
3.1	システムの概要	8
3.2	RTP over RTP	9
3.3	Packet Path Diversity における Relay ホストの活用	10
3.4	経路ごとの動的パラメータ変更	11
3.4.1	パラメータと参考となる統計情報	11
3.4.2	パラメータの設定	11
3.5	システムの実装	12
3.5.1	システムの構成	12
3.5.2	システムの実現	14
	参考文献	17

1 はじめに

近年、インターネットの普及と広帯域化により、音声や映像のようなマルチメディアコンテンツのインターネット上での利用が盛んに行われるようになってきた。これに伴い、遠隔講義システムや遠隔会議システムのように、インタラクティブな処理を行うリアルタイム・アプリケーションも増加している。このようなアプリケーションは、音声と映像の両方を同時に伝送するため大きな帯域を必要とする。さらに、円滑なコミュニケーションを行うためには遅延時間を一定以下に抑えなければならない。

しかし、現在のインターネットは Best-Effort であり、任意の end-to-end 間で QoS 制御を行う技術が確立されていないため、ネットワークの状況によってはパケットロスが発生してしまう。これは音声や映像の乱れや途切れといった品質の低下を引き起こし、コミュニケーションに重大な影響を及ぼす。このような品質の低下を抑える手法としてバッファリングと再送、冗長符号化、Packet Path Diversity などが提案されている。バッファリングと再送は大きな遅延を許容しないシステムには効果的でない。また、冗長符号化は遅延への影響は少ないが、トラフィックを増加させるため、帯域が不足している場合にはさらに品質を低下させてしまう。そこで、本論文では冗長符号化と Packet Path Diversity、冗長配送、負荷分散という、遅延をあまり伴わずに信頼性を向上できる 4 つの手法に着目する。

冗長符号化と Packet Path Diversity を組み合わせたシステムは従来も存在したが、伝送が始まると設定を変更できないという問題があった。帯域を他のアプリケーションが大きく消費する、回線が断線するなど、ネットワークの状況は急変しうる。また、ネットワークの状況に応じて適切な設定は異なる。そこで、本論文で提案するシステムでは、ネットワークの統計情報を受信者からフィードバックし、回線の状況の応じて使用する手法や冗長度を送信者が動的に変化させられる仕組みを取り入れる。これを実現したシステムとして Path Diversity EMON があるが、経路ごとに冗長符号化をすることができない、送信者または受信者が複数の IP アドレスを持っていないと使えない、他のシステムとの互換性がないなどの問題があった。これらの問題を解決するため、本システムでは Relay ホストと RTP over RTP を使用する。

本システムでは、経路ごとに細かくパラメータを設定できる。また、1 組し

か IP アドレスを持たない送受信者間でも複数の経路を用いたり、より重複の少ない効率的な経路を設定できるようになる。さらに、他のシステムとの併用も可能である。つまり、本手法により、どのような送受信者間でも複数の経路を用いた伝送が可能となるうえ、Path Diversity EMON よりも効率的にメディアストリームの信頼性を向上させることができる。

ここで、章立てについて説明する。第 2 章で既存手法と関連研究について述べる。第 3 章でシステムの提案と設計を行い、さらに適切なパラメータの設定方法について考察する。第 4 章では評価実験を行い、結果について考察する。最後に、第 5 章で本研究のまとめと結果、今後の課題について書く。

2 既存手法と関連研究

本章では、ストリーミングにおいて映像や音声の途切れの原因となるパケットロスを抑える、または回復するために利用される手法について概観する。また、これらの手法を用いて設計された既存のシステムとして、Robust と Path Diversity EMON を紹介する。

2.1 障害の発生

インターネット上で映像や音声のストリームを伝送する場合、ネットワークの状況に品質が左右される。これはインターネットが Best-Effort であり、任意の end-to-end 間で帯域を確保して品質を保証する技術がまだ確立されておらず、乱れや途切れのような障害を避けられないからである。

インターネット上でのストリーミングにおいて、障害は主にパケットロスによって生じる。パケットロスは、断線や混雑、ジッターなど様々な原因によって起こる。このようなパケットロスに対処する方法には次のようなものがある。

1. ロスがあったことを送信者に通知し、再送してもらう
2. 受信者側でパケットロスに対処する方法を用意する
 - (a) 冗長符号を付加する
 - (b) 冗長にパケットを送る
3. パケットロスが生じる原因そのものを取り除く

これらの手法について次節で説明する。

2.2 既存の手法

既存の手法としてバッファリングと再送、冗長符号化、Packet Path Diversity、冗長配送、負荷分散の5つに着目する。

2.2.1 バッファリングと再送

バッファリングと再送は、パケットを受信したときに受信者側でバッファを確保し、受信できなかったパケットについて、受信者が送信者に再送を要求する手法である。

この手法は、Windows Media Player や Real Player のような商用のメディアプレイヤーでも使われており、パケットロスをはば100%回復できるが、受信者が損失発生を送信者に対して通知し、再送してもらうため、最低でも往復時間 (Round Trip Time) 程度の遅延が発生する。したがって、本研究で想定するような、遅延に敏感なリアルタイム型のアプリケーションでは使用できない。

2.2.2 冗長符号化

受信者側で誤り訂正できるような符号化方式を、本論文では冗長符号化と呼ぶ。冗長符号化は、データブロックから冗長なデータを生成し、もとのデータと冗長なデータの両方を伝送することで、データブロックのビット誤りや欠損を冗長なデータを用いて復元する機能である。

この冗長符号化は、磁気媒体やコンパクトディスクの記録再生誤りなどに広く用いられており、XOR-Parity 符号、ハミング符号、Reed-Solomon 符号といった様々な手法がある。XOR-Parity 符号やハミング符号は回復効率は悪いが、回復時の計算が比較的容易である。反対に、Reed-Solomon 符号はオリジナルのデータを維持して冗長符号を付加することができ、回復効率が良い一方、回復のための計算が複雑になる。したがって、データを圧縮せずに送信したり、パケットロスが大量に発生したりする場合には、Reed-Solomon 符号では回復のための計算が再生に間に合わなくなるので、XOR-Parity 符号やハミング符号の方が回復効率がよくなる。しかしながら、本論文ではデータを圧縮して伝送することを想定しており、パケットロスが大量に発生する場合には他の手法を用いるので、Reed-Solomon 符号を採用する。

Reed-Solomon 符号では、同じ長さの K 個のデータに対し、 R 個の冗長なデータを生成し、 $K+R$ 個のデータのうち任意の K 個のデータを受信すれば $K+R$ 個すべてのデータを復元できる。しかし、 $K+R$ 個のデータの内、 $R+1$ 個以上のデータが損失してしまうと、データの復元が不可能になる。つまり、この手法

は短時間に大量のロスが発生するバーストロスの弱い。

冗長符号化を使ってバーストロスに対処するためには、冗長化のブロックの長さを長くしなければならない。冗長化のブロックを長くすると、そのブロック全体を受信してからでないと復号化できないので、その分だけ遅延が発生してしまう。つまり、冗長符号化で対処できるバーストロスの規模と遅延時間はトレード・オフの関係にある。

また、冗長符号化は冗長なデータを伝送することで伝送量を増やすため、低帯域が原因で十分な伝送ができずにパケットロスが発生している場合に使用すると、帯域をさらに圧迫してしまい、かえってパケットロスが増加し、品質を低下させてしまう。

このように、冗長符号化で対処できるバーストロスには限界がある。また、すべてのネットワーク状況においてこの手法が有効というわけではない。

2.2.3 Packet Path Diversity

Packet Path Diversity は送信者・受信者間の複数の経路に同時にデータを送信する手法である。

この手法は低帯域な経路やバーストロスにも有効である。低帯域な経路に対しては、すべてのパケットを全経路に配送するのではなく、パケットを複数の経路に分散して配送する負荷分散を行うことで、帯域の不足に伴うパケットロスを発生させずすむ。また、パケットを複数の経路に対して冗長に送信する冗長配送を行うことで、一部の経路が突然の断絶したり、バーストロスが生じたときにも、受信者側で取りこぼしなく受信できる。このような手法を用いることで、同程度冗長符号化した FEC よりも遅延が減少し、品質も向上することが確かめられている。

Packet Path Diversity は送信者・受信者間に複数の上流回線があるような場合に利用できる。大学や企業などの大規模組織では、複数の上流回線があるネットワーク構成、すなわち、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ことが一般的であるため、この手法を利用するのに追加的コストが比較的少なくすむ。このような場合、各経路が疎であればより効果的となる。疎な経路とは、物理回線の重複が少ない経路のことである。

図 1 に物理的な複数の上流回線がある場合の例を示す。この例で 4 は、送信ホストと受信ホストが IP アドレスをそれぞれ 3 個ずつ持ち、帯域の広い 2 本の経路と帯域の狭い 1 本の経路を確保している。

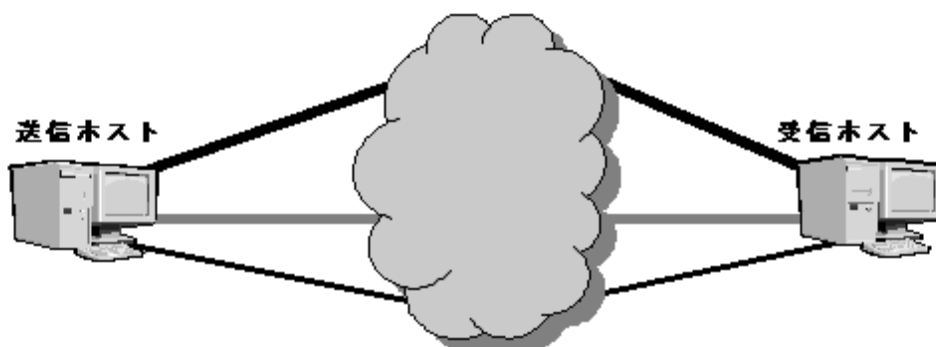


図 1: Packet Path Diversity の例

2.3 Robst(Robst Streaming Tools)

Robst は広島大学で開発された、高品質動画をインターネット上で送受信するソフトウェアである。IPv4/v6、IP マルチキャスト等にも対応し、MPEG2-TS SD(Standard Definition) では4Mbps-6Mbps の帯域でTV 品質並み、MPEG2-HD(High Definition) では 20-40Mbps の帯域でハイビジョン品質、DV(Digital Video) 形式のフォーマットでは 30Mbps で低遅延、高品質の動画伝送が可能である。

ネットワーク上で発生するパケットロスへの対策として前方誤り訂正符号(FEC)を用いた伝送を実現しており、パケットロスによる映像/音声への影響を抑制することができる。FEC には Reed-Solomon 符号を採用している。また、RTCP を利用して送信者にネットワークの統計情報をフィードバックする機能も備えており、送信者側でネットワーク状況を監視することが可能である。図 2 に Robst システムの概略を示す。

Robst は起動時に FEC の冗長度や RTCP 使用の是非を指定できる。また、FEC 冗長度の動的変更を指定することもできるが、冗長度を変更するアルゴリズムの実装が未完成であり、伝送中に手動で修正することもできないため、実用は難しい状況である。

2.4 Path Diversity EMON

Path Diversity EMON は、Robst と同様にインターネット上で動画を送受信するソフトウェアである。このシステムではパケットロスへの対策として、冗

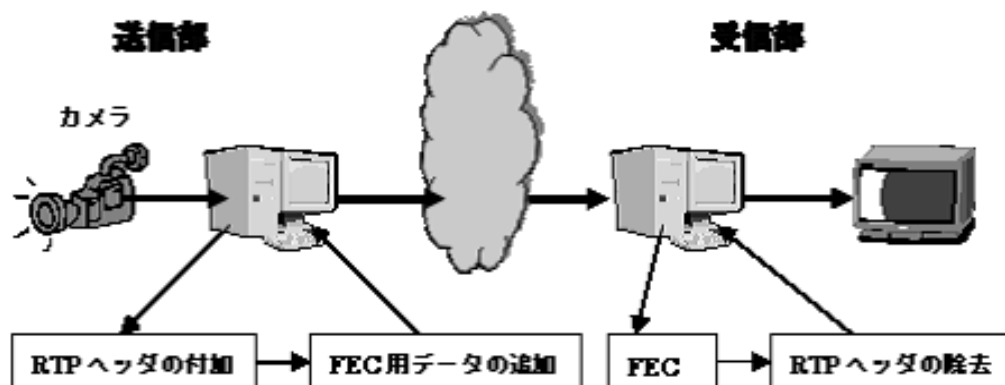


図 2: Robst システムの概略

長符号化 (FEC) と Packet Path Diversity、冗長配送、負荷分散を組み合わせる。FEC には Reed-Solomon 符号を採用している。

また、ストリーム伝送中に各経路への配送率や FEC の冗長度 (パラメータ) を変更できないという従来の問題を解決するため、経路に関する統計情報を受信者からフィードバックし、それに基づいてパラメータを手動で変更できるシステムを導入している。

さらに、単方向経路についての情報を得るために RTCP を拡張して、利用可能な全ての経路の情報を送信者にフィードバックする。また、バーストロスを検出するために、RTP を拡張して経路のシーケンス番号を加える、平均連続パケットロス率を受信者側で計算して RTCP に入れるなどの拡張も行われている。

しかし、このシステムには、RTCP を定期的にやり取りする仕組みがないため、パラメータ変更のタイミングや値の決定が困難である。また、送信者・受信者が持つ複数の IP アドレスを利用して経路を確保するため、送信者・受信者が 1 つしか IP アドレスを持っていない場合には Path Diversity を使えない、ルートを指定できないため、途中の経路はルータ任せとなり、必ずしも最適な (最も疎な) 経路を通るとは限らないという問題がある。さらに、複数の経路を用意した場合、経路ごとに帯域、パケットロス率などの特性が異なるにもかかわらず、経路ごとに設定できるパラメータが配送率だけであり、経路ごとに冗長符号化ができないという問題もある。

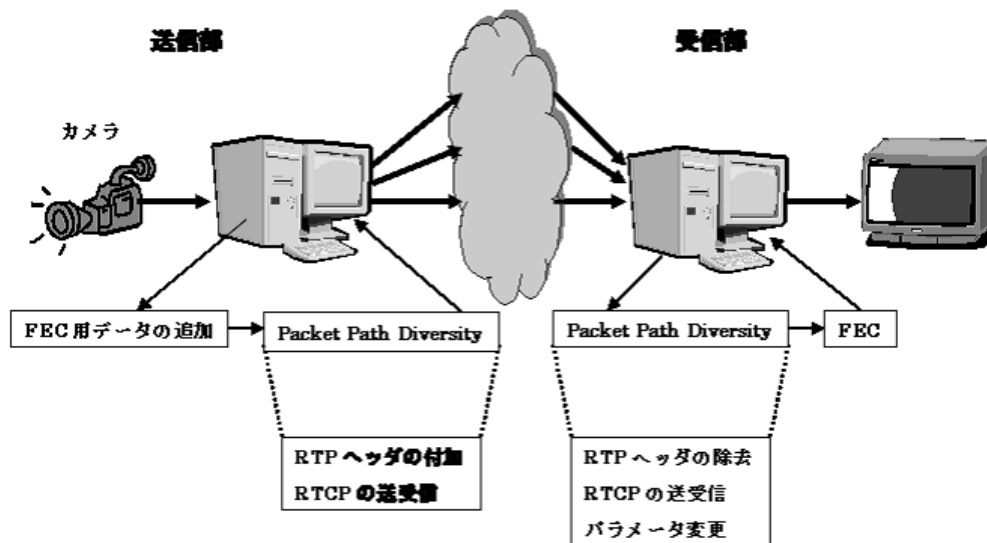


図 3: Path Diversity EMON の概略

2.5 既存の手法と関連研究の問題点の整理

Packet Path Diversity や冗長配送、負荷分散は遅延が少なく、冗長符号化は遅延を小さくすることができるため、リアルタイム型のアプリケーションには大変有効である。しかし、これらの手法では、ストリーム伝送中に設定を変更できないため、ネットワークの状況が変化したときには十分に対応できないという問題があった。

実環境では、帯域を他のアプリケーションが大きく消費する、回線が断線するなど、ネットワークの状況は急変しうる。したがって、高信頼で安定した伝送を実現するには、ストリーム伝送中のパラメータ変更が必要不可欠である。

ストリーム伝送中のパラメータ変更が可能なシステムとして Robst と Path Diversity EMON の 2 つを挙げた。Robst にはパラメータを手動で変更できる仕組みがないため、実用が困難である。Path Diversity EMON は任意の時間に、任意の値にパラメータを変更できるが、次のような問題がある。

1. RTCP を定期的にやり取りする仕組みがないため、パラメータ変更のタイミングや値の決定が困難である
2. FEC を経路ごとに行うことができず、経路ごとに設定できるパラメータが配送率だけである
3. 送信者・受信者が 1 つしか IP アドレスを持っていない場合には Path Di-

iversity を使えない

4. ルートを指定できないため必ずしも最適な (最も疎な) 経路を通るとは限らない

これらの問題を解決するための手法とシステムの設計を次章で述べる。

3 システムの提案と設計

本章ではシステムの概要を述べ、Path Diversity EMON の問題を解決するための手法について説明する。さらに、パラメータ決定方法の考察を行い、最後に、提案するシステムの実装について述べる。

3.1 システムの概要

ストリーミングを行うときに必ずしも十分な帯域の高信頼な回線が用意できるとは限らない。また、そのような回線が用意できたとしても、何らかの原因で突然、断線やバーストロスが起こってしまうこともある。

本論文では、十分な帯域の回線が用意できない場合や、バーストロスや断線などが起こる信頼度の低い回線を使用しなければならない場合などでも、遅延を一定以下に抑えつつ品質の低下を防ぎ、安定した高信頼なリアルタイム・ストリーミングが行えるシステムを提案する。

本システムでは、品質低下の主な原因となるパケットロスを抑える手法として、遅延が大きならない Packet Path Diversity と冗長配送、負荷分散、冗長符号化 (FEC) を組み合わせて用いる。FEC には回復効率の良い Reed-Solomon 符号を採用する。

Path Diversity EMON の問題を解決するため、各経路ごとに FEC を行えるようにする。また、全体での FEC の冗長度、各経路ごとの FEC の冗長度、各経路ごとの配送率をパラメータとして、送信者側で任意に変更できるようにする。さらに、パラメータの設定を容易にするために、定期的に RTCP を送受信し、送信者側に統計情報を逐次表示する。

パラメータ変更の参考となる統計情報を得るために、Path Diversity EMON のように RTP や RTCP を拡張するのではなく、RTP over RTP という手法を用いる。RTP over RTP については 3.2 節で述べる。さらに、複数の IP アドレスを持っていない場合にも Packet Path Diversity を利用したり、疎な経路を確保するために Relay ホストを導入する。Relay ホストについては 3.3 節で説明

する。

3.2 RTP over RTP

RTP over RTP とは、RTP パケットを単なるデータとみなし、もうひとつの RTP パケットのペイロードに格納して送信する手法である。

Packet Path Diversity を行うとき、経路ごとにパラメータを設定するためには経路ごとの統計情報が必要となるため、経路ごとのシーケンス番号を何らかの形でデータに付加して送信しなければならない。また、受信者側で正しくデータを再生するためには、全体のシーケンス番号も必要である。しかしながら、既存の RTP ヘッダに入れられるシーケンス番号は1つだけである。

Path Diversity EMON では経路ごとのシーケンス番号を RTP ヘッダに入れるために、図4の2段目の図に示すように RTP を拡張している。しかし、このような拡張は他のシステムとの互換性を損なうため、望ましくない。RTCP の拡張についても同様である。

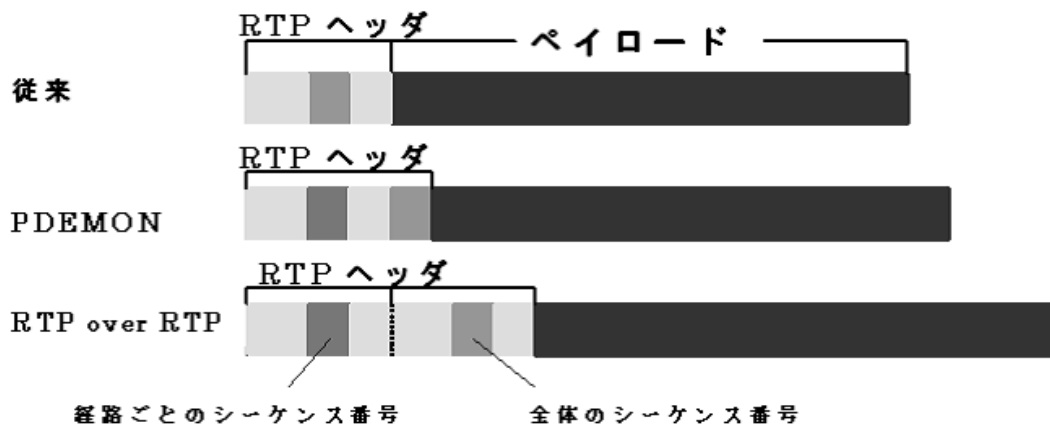


図4: 使用する RTP パケット

そこで、本システムでは図4の3段目のように、全体のシーケンス番号をヘッダに持つ RTP パケットを、経路ごとのシーケンス番号をヘッダに持つ RTP パケットのペイロードに入れて送信する。この手法を用いると、再帰的に何度でも Path Diversity を行うことができる。また、各経路ごとだけでなく、全体でも RTCP を送受信するので、経路ごとの統計情報と、各経路のパケットを全て集めた統計情報の両方を得ることができる。この情報は、各経路の配送率を決

定するのに役立つ。さらに、RTP を拡張せずに使用することにより、Windows Media Player など、このシステムを使用しない他のアプリケーションと併用することも可能となる。

3.3 Packet Path Diversity における Relay ホストの活用

Relay ホストとは、UDP データグラムを受け取り、それを転送するホストのことである。送信者が Relay ホストに UDP データグラムを送信すると、Relay ホストは、あらかじめ設定してある送信先にその UDP データグラムを転送する。

図 5 は送信者・受信者が 1 つしか IP アドレスを持っていない場合の例である。送信者が Relay ホストにデータを送信することにより、送信者・受信者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ことができる。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

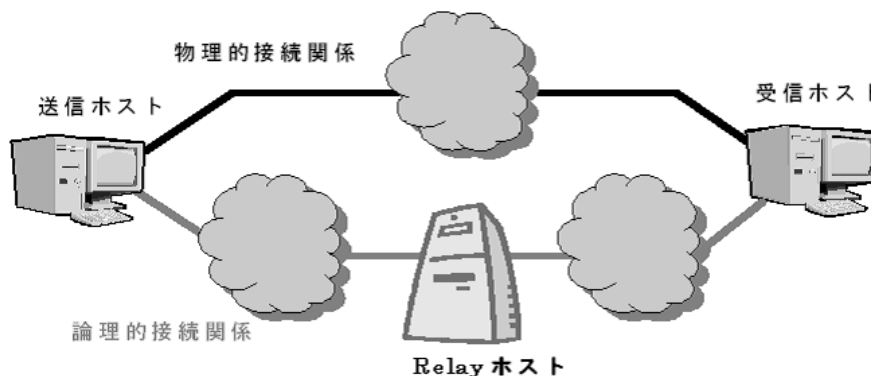


図 5: Relay ホストの使用例

ストが複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、これらを活用することにより、疎な経路を多数構築することができる。このように、Relay ホスを組み合わせることによって多くの経路を得ることができるので、得られた多数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ことで、より効果的に Packet Path Diversity を利用できる。

3.4 経路ごとの動的パラメータ変更

本節では、ストリームを伝送する際のパラメータの設定について考察する。ネットワークの状況に応じてパラメータを変更することにより、受信者に映像の乱れや途切れをできる限り見せないようにすることが本節の目的である。

3.4.1 パラメータと参考となる統計情報

本システムでユーザがストリーム伝送中に変更できるパラメータは、使用する経路・各経路への配送率・経路ごとの冗長符号化強度・全体の冗長符号化強度である。

設定変更の参考になる情報はパケット喪失率・累積喪失パケット数・パケット間隔ジッタ・最大受信シーケンス番号・最新送信レポート時刻・送信レポート経過時間である。これらの項目には次のような値がセットされている。

パケット喪失率 最後に受信状況を報告する RTCP メッセージ (受信者レポート) を送信してから現時点までに、受信できなかったパケットの割合

累積喪失パケット数 データの受信を開始してから現時点までに受信できなかったパケットの総数

パケット間隔ジッタ 連続して送信されたパケットの間隔の、送信時と受信時の平均偏差

最大受信シーケンス番号 これまでに受信したパケットの中で、最大のシーケンス番号

最新送信レポート時間 送信者からの最新の送信レポートを受信した時刻

送信レポート経過時間 送信者からの最新の送信レポートを受信した時刻から、現在の時刻までの経過時間

Path Diversity EMON では、冗長符号化を適用するかどうかを決定するために平均連続パケットロス数を使っている。しかし、平均連続パケットロス数を用いるためには RTCP を拡張しなければならず、これは他のシステムとの互換性を考慮した場合に望ましくない。このため、本システムでは設定変更の参考情報として平均連続パケットロス数は用いないものとする。

3.4.2 パラメータの設定

ネットワークの状況は、帯域に余裕があるときと、ないときの2つに大きく分けることができる。帯域そのものは統計情報として得られないので、オペレータが元から持っている知識を利用するか、配送率とパケット喪失率から推測する。すなわち、ある経路の配送率を大きくしてもパケット喪失率が増加しない

場合は帯域に余裕があり、パケット喪失率が増加する場合は帯域に余裕がないと推測する。次に、パケットロス率は統計情報のパケット喪失率と累積パケット喪失数から、ジッタはパケット間隔ジッタから直接得ることができる。最後に、遅延は統計情報から直接得ることができないので、帯域と同様に、オペレータの知識か、最大受信シーケンス番号・最新送信レポート時間・送信レポート経過時間から推測する。すなわち、受信者レポートが送信された時刻と現在の時刻、最大受信シーケンス番号と最大送信シーケンス番号(最も最近送信したパケットのシーケンス番号)を比較し、受信者レポートの送信時刻と現在の時刻の差が大きくないにもかかわらず、最大受信シーケンス番号と最大送信シーケンス番号の差が大きい場合には遅延が大きいと推測する。

全ての経路の帯域に余裕がないときは負荷分散を行う。各経路の帯域に余裕はないが、全ての帯域を足すと余裕があるような場合は、冗長配送や冗長符号化を併用すると効果的である。2章で述べたように、冗長符号化には回復に時間がかかる、パケットロスが多いと回復できないという欠点があるので、パケットロスが多い経路や遅延・ジッタが大きい経路に対しては冗長符号化ではなく冗長配送を用いるべきである。また、経路ごとに遅延やパケットロス率が大幅に違うような場合には、全体の冗長符号化ではなく、冗長配送と経路ごとの冗長符号化を組み合わせ、経路の特性に応じたパラメータ設定をしなければならない。

帯域に余裕がある場合は冗長符号化と冗長配送を組み合わせる。この場合も上と同様に、全ての経路の特性がほぼ同じで、遅延やジッタ、パケットロス率が小さい場合は全体の冗長符号化が有効だが、経路ごとに特性が大きく異なる場合は、遅延やパケットロス率の大きい経路には冗長配送を、そうでない経路には経路ごとの冗長符号化を適用するのが良い。どの程度のパケットロス率や遅延になれば使用する手法を変えるのが効果的であるかについては、4章で述べる。

3.5 システムの実装

3.5.1 システムの構成

本論文のシステムは、EMONシステムを拡張し、RTCPの送受信、RTP over RTP、Packet Path Diversity、Relayホスト、パラメータの動的変更に対応した機能を付け加えて実現した。

EMON システムとは、単機能に分割されたプロセスを組み合わせることで映像・音声などのマルチメディア・データのストリーミングを行うシステムである。図 6 は映像伝送の例であり、映像キャプチャ部、送信部、受信部、映像再生部の 4 つのプロセスをパイプラインでつなげることで映像伝送を実現している。冗長符号化を行う場合は、映像キャプチャ部と送信部の間に冗長符号化プロセスを、受信部と映像再生部の間に冗長復号化プロセスを挟むことで実現できる。

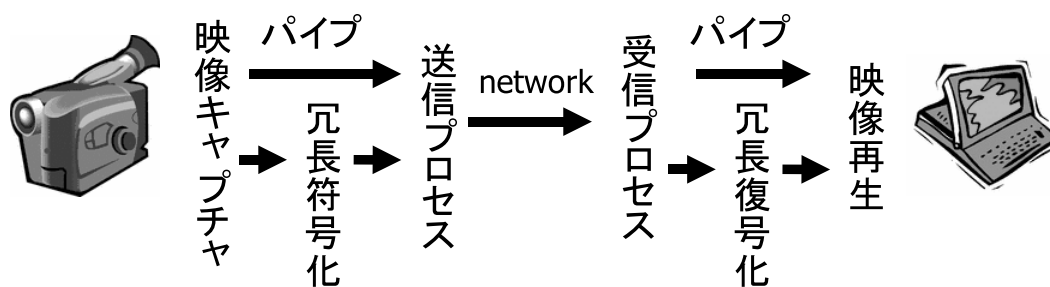


図 6: EMON システム

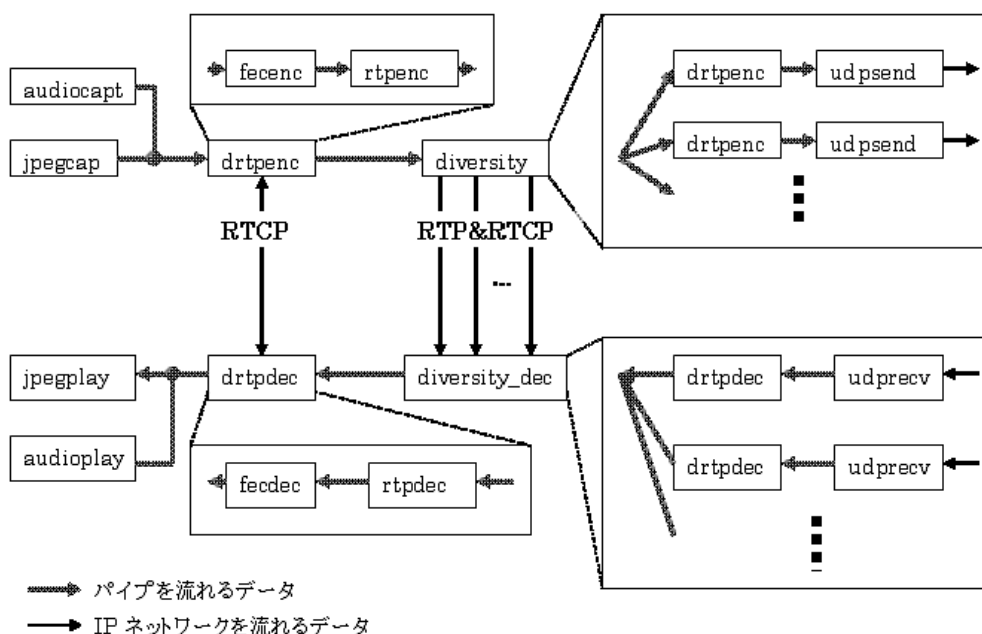


図 7: プログラムの接続関係

本研究で主に使う EMON のプログラムと、新たに追加したプログラムの機能を表 1 に、プログラムの接続関係を図 7 に示す。

プログラム名	機能
fecdec	FEC(Forward Error Correction:前方誤り訂正)を行う
fecenc	FEC 用の冗長なデータを追加する
udprecv	マルチキャスト及びユニキャストの UDP データグラムを受信する
udpsend	マルチキャスト及びユニキャストの UDP データグラムを送信する
drtpenc	FEC 用の冗長なデータの追加、RTP ヘッダの追加、RTCP の送受信を行う
drtpdec	FEC、RTP ヘッダの除去、RTCP の送受信を行う
diversity	経路ごとに FEC 用データと RTP ヘッダを追加し、データを複数の経路に送信する。経路ごとに RTCP を送受信する。
diversity_dec	複数の経路からデータを受信し、経路ごとに FEC と RTP ヘッダの除去を行う。経路ごとに RTCP を送受信する。

表 1: プログラムの機能

3.5.2 システムの実現

本論文では図 8 のようなシステムを想定して実装を行った。

EMON システムには jpegcapt、jpegplay という映像データの取り込み、再生を行うプログラムが用意されているが、使用できる形式が JPEG に限られているため、映像の取り込み、再生には使用する形式にあわせて専用のアプリケーションを用いる。

まず、送信側プロセスで Packet Path Diversity を行う方法を述べる。

```
% udprecv -A10.0.0.1 -P4812 | diversity -A10.0.0.2:4814,10.0.0.4:4814 -r1.0,1.5
```

とホスト B で実行すると、ホスト A からホスト B に送信されてきたカメラ画像を udprecv で受信し、経路ごとの FEC 用のデータと RTP ヘッダを追加して、ホ

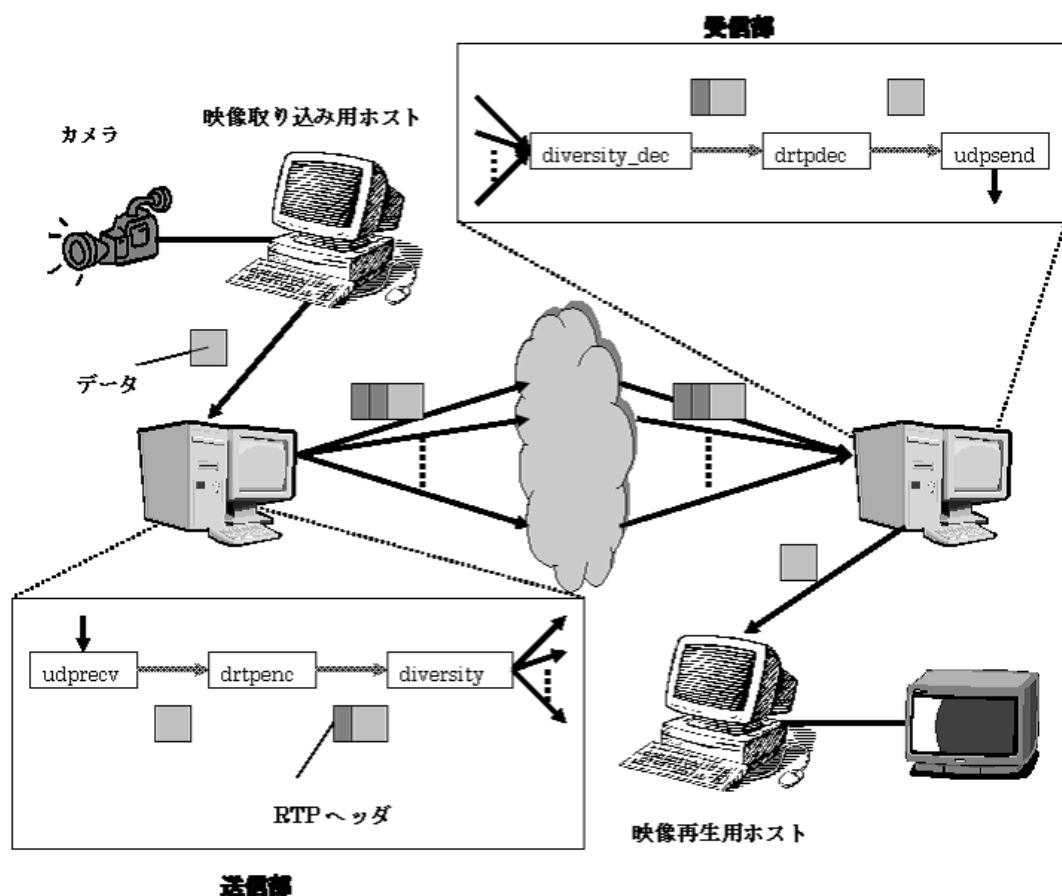


図 8: 想定するシステム

スト C のアドレス 10.0.0.2 と 10.0.0.3 の 4814 番のポートに配送率 1.0 と 1.5 でそれぞれ送信することができる。ここで、配送率 (r) とは送信するデータ数の元のデータ数に対する割合、または、あるデータをその経路に送信する確率を意味する。

- $r = 0$: その経路にデータを送信しない
- $0 < r < 1$: 負荷分散を行う
- $r = 1$: 全てのデータを送信する
- $r > 1$: 冗長配送を行う。整数部分の回数データを送信し、小数部分の確率でさらに 1 回送信する。

また、オプションで冗長符号化の強度を指定することもできる。オプションの M を 0 に設定すると経路ごとの冗長符号化は行わない。さらに全体の冗長符号化をしたり、全体の統計情報を得たい場合は、行いたい処理に応じて、**udprecv** と **diversity** の間に **fecenc** や **drtpenc** を追加すればよい。

次に、受信側プロセスについて述べる。

```
% diversity_dec -A10.0.0.2:4814,10.0.0.3:4814 | udpsend -A10.0.0.4  
-P4812
```

とホスト C で実行すると、ホスト B からアドレス 10.0.0.2 と 10.0.0.3 の 4814 番のポートに送信されてきたデータを経路ごとに受信して、RTP ヘッダを取り除き、FEC を行って、再生用のホスト D に送信する。送信側で fecenc や drtpenc を行っている場合は、受信側でも fecdec や drtpdec をを diversity_dec と udpsend の間に追加する。

ホスト A からホスト B に送信されるデータは RTP を使用しているため、diversity を用いることにより、RTP over RTP の形になる。さらに、全体の統計情報を得るために drtpenc を行くと、ホスト B からホスト C に送信されるデータは 3 つの RTP ヘッダを含むことになる。

最後に、relay ホストを用いる場合、relay ホストとなるホスト E で

```
% relay -A10.0.0.5 -P4814 -a10.0.0.6 -p4816 -r10.0.0.4 -l4812
```

と実行し、送信側のホスト B であて先を IP アドレス:10.0.0.5、ポート番号:4814 にして送信すればよい。