QoSマルチキャストルータを用いたインターネット放送システムの設計と実装

外池昌嗣* 古村隆明† 藤川賢治* 岡部寿男* 池田克夫‡
*京都大学 †京都高度技術研究所 ‡大阪工業大学

本研究では、QoS マルチキャストルータを用いたインターネット放送システムを設計し実装する。このルータは本研究プロジェクトの一環として開発され，資源予約とマルチキャストを実現するためのプロトコルとして SRSVP を用いる。今回実装するシステムでは、単独で放送するだけでなく、他の放送局の放送を中継し、加工して放送することを目指す。これにより、他国の放送に自国の音声を付加して放送することができる。また、他国から受信した動画像を再編集して放送することも考慮している。本稿では、放送の受信に必要な情報を記述するための ibcast URI を定義し、インターネット放送の外観を示し、システムの設計と実装及び行った実験について述べる。

Design and Implementation of an Internet Broadcasting System using QoS Multicast Router

TONOIKE Masatsugu* KOMURA Takaaki† FUJIKAWA Kenji*
OKABE Yasuo* IKEDA Katsuo‡
*Kyoto University †ASTEM RI ‡Osaka Institute of Technology

We design and implement an Internet broadcasting system using QoS multicast router. This router was developed form a part of this research project and use SRSVP as a resource reservation and multicast signaling protocol. We aim not only to broadcast streams solely but also to relay and edit other broadcast streams. This enables adding a voice of the mother tongue to the broadcast of another country. Editing and broadcasting the video streams received from another country is also considered. We define ibcast URI, which describes information for receiving broadcasts, outline an Internet broadcasting system, and describe the design and implementation of the system and experiments.

1 はじめに

RealPlayer や MediaPlayer の普及が示すように，近年放送がインターネットに移行してきている．現在のインターネット放送システムの問題点は，まずストリームの送信がユニキャストであるため，膨大な受信者数に対応できない点が挙げられる．したがって，放送局は受信者数に比例してサーバを用意しなければならない．次に，QoS 保証が行われていない点が挙げられる．このためストリームを安定して受信できない．さらに，アナログ電話や ISDN などの低速のアクセス網を想定しているため，低品質の放送をせざるを得ないという問題がある．

一方，近年のインターネットは，光ファイバなどアクセス網が高速化されつつある．そして，本研究プロジェクトでは，マルチキャストと QoS 保証を同時に実現するルータをハードウェアに実装し，完成間近である．また，資源予約とマルチキャストを実現するためのプロトコルとして，やはり本研究プロジェクトの一環として開発された SRSVP[1][2] を用いる．これにより，TV 品質で膨大な受信者数に対応できるインターネット放送システムのインフラが整いつつある．

そこで本研究では，このルータと SRSVP を用いて膨大な受信者数に対応できるインターネット放送システムを設計し実装する．このシステムは，マルチキャスト対応なので，膨大な数の受信者に対して，PC クラスの計算機が 1 台あれば，個人でも容易に放送できるようになる．そして QoS 保証対応なので，他のフローの影響を受けず，安定して放送を受信できる．

以下では，2 章でインターネット放送実現のための要件について，3 章では QoS マルチキャストルータと資源予約と SRSVP について，4 章で設計について，5 章で実装について，6 章で実験についてそれぞれ述べ，7 章をまとめと今後の課題とする．

2　インターネット放送実現のための要件

本章ではインターネット放送実現のための要件について述べる．

2.1　マルチキャスト

マルチキャストは，パケットを必要なときだけルータでコピーして数多くの受信者に送信する技術である．送信者はマルチキャストアドレスあてにパケットを 1 回送信するだけでよい．この技術を使えば送信者は同じストリームを大量に同時に送信する必要がなくなり，放送サーバの負荷もユニキャストストリームを一組送信するのと同程度まで軽減される．したがって，マルチキャストは放送という形態に適した送信方法と言える．

しかし，マルチキャストは現行の TV 放送と同様に不特定多数に対してストリームを送信しているという性格上，パケットが一部届かなかった受信者に対して個別にパケットの再送を行うことはできない．パケットの喪失はストリームの再生を乱す．したがって，高品質なインターネット放送を行うには，パケットが失われないようにするための仕組みも同時に用意する必要がある．この例として，エラー訂正符合や，後述する QoS 保証の技術があげられる．

2.2　QoS 保証と PPQ

QoS(Quality of Service) 保証とは，帯域，遅延，パケットロス率などの通信品質を保証する技術で，この機能はルータに実装される．ルータはキューを持っており，受信したパケットをキューに格納し，スケジューリングアルゴリズムにしたがって送信処理を行っていく．このときキューがあふれるとパケットが失われる．一般的な QoS 保証技術ではフロー毎にキューを用意し，他のフローからの影響を排除することによって QoS を保証している．しかしながら，保証できる遅延が大きい，フロー毎にバッファを用意しなければならず，コストがかかり実装が難しいという問題点がある．

本研究では，PPQ(Policed Priority Queuing)[3][4] の機能を持つルータを使用する．PPQ は QoS 保証のためスケジューリングアルゴリズムの技術の一つで，フロー毎にキューを用意せず，インターフェイス毎にベストエフォート用と QoS 保証用の二つのキューを用意している．そしてフローを監視し帯域違反したパケットをキューに格納する前に廃棄する．特徴として，バースト性の低いトラフィックを対象としていて，あらかじめ予約した帯域幅以下での利用に対して，パケットロス率が 10^{-5} 以下になることを保証するものである．予約帯域以上のパケットが送信されたときは，ルータでパケットが破棄されるので，予約帯域を守って送信されているストリームは保護されることになる．保証できる遅延は，フロー毎にキューを用意する手法に比べると小さく，フロー毎にバッファを用意せずに済むという利点がある．

PPQ を採用することにより，1Gbps の高速リンクでマルチキャストフローを 1000 フローを扱うことが可能となった．

3　QoS マルチキャストルータと資源予約プロトコル SRSVP

3.1　QoS マルチキャストルータ

本研究プロジェクトの一環として開発された，QoS マルチキャストルータについて説明する．このルータは，前節で述べた PPQ により QoS 保証を実現している．また，資源予約及びマルチキャストのプロトコルとして，次節で述べる SRSVP を用いる．

3.2　SRSVP の概要

SRSVP(Simple Resource ReSerVation Protocol) [1] [2] は本研究の一環として開発されたインターネット上でマルチキャスト，資源予約，課金を実現するためのプロトコルである．SRSVP で資源予約するには，ルータが SRSVP 対応である必要がある．SRSVP は RSVP[5] と PIM[6] の機能を併せ持ち，不要な機能は削られ，かつ必要な機能が追加されている．資源を予約すれば，帯域，遅延，パケットロス率といった QoS が一定の値に保証される．SRSVP ではフローを個別に管理しているのでマルチキャストに対応できる．

SRSVP では PIM と同様にランデブーポイントがマルチキャスト木の根となる．ランデブーポイントは，送信者からストリームを受信し，これをマルチキャスト送信するためのものである．送信者自身がランデブーポイントとなってもよい．資源予約は受信者主導で動的に行われる．ただし，SRSVP では QoS 情報は送信者もしくはランデブーポイントが指定するものであり，受信者はそれに従わなければならない．

3.3　ランデブーポイント

ランデブーポイントは，送信者からストリームを受信し，これをマルチキャスト送信するためのものである．また，受信者からの資源予約メッセージに対して応答する．PIM のランデブーポイントはルータであるのに対し，SRSVP ではランデブーポイントはアプリケーションゲートウェイである．このため，送信者の認証や，ストリーム転送の開始及び停止，ストリーム送信先に対する資源予約，遠隔操作など，様々な機能を目的に応じて付加することができる．本研究でも，この特徴を利用し，ランデブーポイントを遠隔操作し，送信先の IP アドレスとポート番号の指定と，放送サーバの IP アドレスとポート番号の指定と，送信の開始及び停止を行う．

3.4　資源予約方法

SRSVP の資源予約は受信者主導である．資源予約とストリームの受信の様子を図 1 に示す．資源予約は受信者がランデブーポイント宛に資源予約メッセージを送信する

ことにより始まる（図 1①）．この図では，送信者は直接マルチキャストアドレスに対してストリームを送信するのではなく，ランデブーポイントに対して送信している（図 1②)．送信者よりストリームを受信しているランデブーポイントは，受け取ったストリームをマルチキャストアドレス宛に転送している（図 1③）．さらに別の受信者が資源予約を行うと（図 1④），ルータで予約がマージされ，この受信者にもストリームが届くようになる（図 1⑤）．この例では T1，T3 間に予約できる帯域が残っていなかったので，この経路は使わず，T1，T2 間の経路が選択された．これは SRSVP が QoS ルーティング機能を持つことによる．

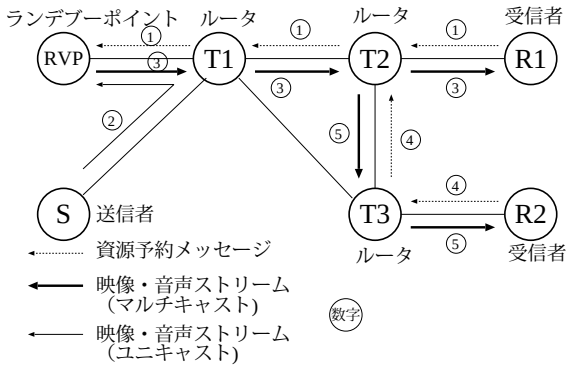

図 1: SRSVP マルチキャスト資源予約

4　インターネット放送システムの設計

4.1　全体像

インターネット放送の例を図 2 に示し，それについて解説する．

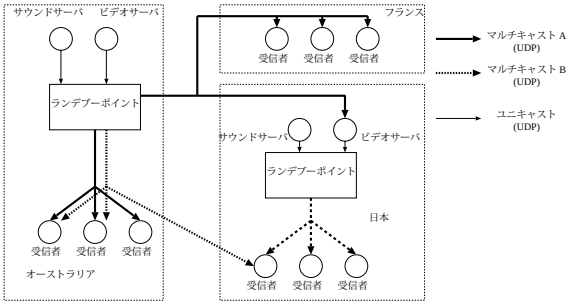

図 2: インターネット放送システムの全体像

図 2 は全体の様子の例であり，オーストラリアからオリンピックのサッカーの生中継を想定している．まず，オーストラリアの放送局はオーストラリアの視聴者にマルチキャスト放送し，同時に，他の放送局にもストリームをマルチキャストで送信する．日本にある放送局は，オーストラリアの放送局からストリームを受信し，日本語の音声による解説を付け，日本語のテロップを受信した試合の映像に付加し，日本の視聴者に放送すると同時に，国内の他の放送局にもストリームを送信する．視聴者は最寄りの放送局だけでなく，好きな放送局からの放送を受信できる．

上の図でこのモデルの全体の様子を提示したが，以下ではまず放送に必要となる情報を記述する ibcast URI を定義し，次に視聴者が見たい番組を見るまでの操作と，受信アプリケーションが行うべき動作を明らかにし，最後に放送局の詳細な構成と個々の構成要素の果たすべき役割とその動作を明らかにする．

4.2　ibcast URI

本節では，放送の受信に必要な情報を記述する ibcast URI(Internet BroadCAST Uniform Resourse Identifier) を設計する．使用できる帯域や目的などによって，様々なフォーマットや品質で放送は行われる．また，放送の開始時刻，終了時刻を知らないと，番組の録画予約をすることができない．したがって，放送を受信するためには，受信アプリケーションにそれらの情報を渡す必要がある．その手段として，SAP[7] という手法が提案されていたが，放送数に対するスケーラビリティーに問題がある．放送の受信に必要な情報を定期的に広告する必要はない点，放送を受信したい人だけが情報を受け取ればよい点を考慮すると，ウェブのように，見たい人が見るシステムによって情報を受け渡しするのがもっともよい方法であると考えられる．

本研究では，SDP[7] の項目を参考に.「セッションの責任者の連絡先」など不要な項目を削除し，かつ SRSVP の手続きに必要な項目を付加する形で，ibcast URI を設計した．URI に記載される情報としては，マルチキャストアドレス，ポート番号，放送の開始及び終了時刻，繰り返し間隔，繰り返し回数，ストリームのフォーマット，パラメータ及び QoS となる．その構文は図 3 のようになる．ただし，[ ] は省略可能を表し，*は直前の項目の 0 回以上の繰り返しを，+は 1 回以上の繰り返しを表す．

```
ibcast://<IP アドレス>/[t=<開始時刻>:<終了時刻
>&[r=<繰り返し間隔>:<繰り返し回数>&]*] [m=rtp:<ポー
ト番号>:<ペイロードタイプ>:<エンコーディング名>:<ク
ロックレート>[:<パラメータ>]*]+
```

図 3: ibcast URI の構文

例として，マルチキャストアドレスが 224.130.54.22 で CD 音質 2ch の音声ストリームがポート番号 9000 番に，

30fps の JPEG ストリームがポート番号 9001 番に放送されていることを示す ibcast URI を図 4 に示す．

```
ibcast://224.130.54.22/m=rtp:9000:96:X-S16LE:
44100:2&m=rtp:9001:97:JPEG:30
```

図 4: ibcast URI の例

4.3 受信アプリケーション

受信アプリケーションの設計は，受信者に SRSVP を意識させずに，普通のテレビやビデオの感覚で使えるようにすることを重視する．ブラウザで番組表を見て，見たい番組や予約したい番組をクリックすると，受信アプリケーションが起動，もしくは予約される．放送の受信開始時に資源予約の確認メッセージを表示する．

図 5: 受信側

4.4 放送局

放送局はストリームを送信する．放送局は，サウンドサーバ，ビデオサーバ，ランデブーポイントで構成される．

サウンドサーバ及びビデオサーバがランデブーポイントに送信するコンテンツは，サーバがリアルタイムにキャプチャしたもの，サーバのディスク装置に蓄積されているもの，もしくは他の放送局からリアルタイムに受信したものなどである．ランデブーポイントは放送局からストリームを受け取り，指定されたマルチキャストアドレスとポート番号に対してストリームを送信する．また，受信者からの資源予約メッセージを受け取り，返答メッセージを受信者に返すことにより，資源予約を成立させる．

4.5 放送の中継

放送局が放送を受信，デコードして，それを加工し，再びエンコードして放送する機能を設計する．これにより，野球の二元中継のような複数ストリームの合成や，テロップの挿入や，画像サイズの縮小などの操作ができるようになる．

5 インターネット放送システムの実装

本章では，前章での設計を元にインターネット放送システムを実装する．

本研究では，放送を加工して再放送することを目指すので，フレーム単位の処理がしやすい JPEG を用いることとする．

5.1 仕様

- 動画
  - 320x240 の JPEG ストリームを毎秒 30 フレーム流す．消費する帯域は約 4Mbps である．
  - リアルタイム圧縮で上記の仕様を満たすようにする．
- 音声
  - 16bit，44100Hz，ステレオでサンプリングした音声を無圧縮で送信する．
  - 消費する帯域は，約 1400kbps である．

5.2 実装するもの

実装するものは表 1 の通りである．

表 1: 実装するモジュール

放送局側	受信者側
オーディオサーバ	オーディオクライアント
ビデオサーバ	ビデオクライアント
ランデブーポイント	ibcast URI パーサ

サーバ，クライアントは FreeBSD 4.2[8] 上に実装する．画面表示には SDL ライブラリ [9] を用いる．JPEG 圧縮には libjpeg[10] を用いる．

5.3 バーストの抑制

SRSVP 対応ルータは 2.2 節で述べた PPQ を行っている．帯域違反したフローがあるとキューがあふれる原因になるので，帯域違反しているパケットを検出し破棄する必要がある．これを行うのがポリサー (policer) である．帯域違反には短期的なバーストと長期的な違反のに種類があり，どちらもキューをあふれさせる原因となるので，違反として検出される．今回実装したビデオサーバは当初，動画をキャプチャして，その後圧縮してから，1 フレーム分まとめて送信していた．実際に放送を始めるとバーストした送信となり，ルータでパケットが破棄されてしまった．したがって，本研究で実装するインターネット放送では，送信がバーストしないようにする必要がある．

そこで，バーストしないように，パケットが等間隔に送信されるようにする，シェイパー (shaper) という機能をビデオサーバに実装した．

ビデオサーバがバーストしないように送っていても，ネットワークの遅延などの影響でランデブーポイントに到着するまでにバーストすることがある．このため，ランデブーポイントにも同様のシェイパー機能を付加した．

5.4 放送の中継

放送局が放送を受信，デコードして，それを加工し，再びエンコードして放送する．

5.4.1 libjpeg の調査

今回，実装に先だって，MMX 命令対応の libjpeg である MMX Jpeg 0.1.2[11] の圧縮速度の調査を行った．なお，この libjpeg は pgcc(Pentium GNU C Compiler) 2.95.2[12] を用いて，-O6 -march=pentiumpro オプションを付けてコンパイルした．調査方法はバッファに格納された 320x240 の RGB 形式で表された画像を圧縮し，結果が別のバッファに格納されるまでの時間を 1000 回測定し，その平均を求めた．その結果を表 2 に示す．

表 2: jpeg 圧縮及び解凍に要する時間

スペック	jpeg 圧縮	jpeg 解凍
PentiumIII 750MHz Dual	17932 usec	7864 usec
Athlon 850MHz	18591 usec	7852 usec
PentiumII 333MHz	33289 usec	18185 usec

秒間 30 フレームの圧縮を達成するためには，1 フレームあたり 33msec 以内で処理する必要があるが，高速な CPU を用いれば，リアルタイムでキャプチャして放送することが可能である．さらに，PentiumIII 750MHz DUAL のマシンでは，圧縮プロセスと解凍プロセスを同時に実行しても，それぞれ別に行ったときとほぼ同じ時間で終了した．これにより解凍と圧縮を別プロセスとして同一ホストで実行し，放送を受信しそれを加工して再放送することもできるようになることが確認された．

5.4.2 中継サーバの設計

今回は図 6 のように受信したストリームにテロップを挿入して再放送するサーバを設計する．実装次第で，野球の二元中継のような二つのストリームの合成もできるであろう．

ハードウェアは PentiumIII 750MHz DUAL のマシンを用いる．プロセスは図 7 のように二つ用いることとする．

一つは放送の受信及びデコード及びテロップの挿入を行う．もう一つは，エンコード及び送信を行う．テロップ挿入部をデコードのプロセスに含めたのは，エンコードよりデコードの方が処理時間が短いからである．二つのプロセスは，ソケットペアを用いてストリームの受け渡しを行う．

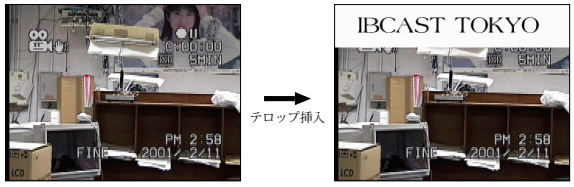

図 6: ストリームの流れ

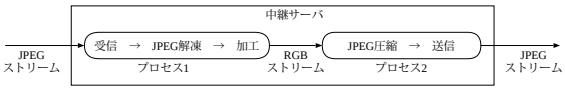

図 7: ストリームの流れ

6 実験と評価

6.1 実験環境

実験では，図 8 に示すようにストリームを送信する．なお，クライアントはどのエリアの放送も受信できる．京都のエリアでは，VOD のストリームをマルチキャスト送信する．東京のエリアでは，二種類の放送をする．一つは，東京の映像と音声を一つの放送としたものである．もう一つは，シドニーの放送を受信して動画を加工して，音声を別のものに差し替えて中継したものである．シドニーのエリアではシドニーの映像と音声のストリームを一つの放送とする．システム上の複数の送信者に帯域を違反させても，帯域を守って送信しているストリームは影響を受けないことも検証する．

6.2 実装したシステムの検証と評価

設計したものが有効に機能するかの実験である．まず放送局側で，コントローラを使ってビデオサーバ及びオーディオサーバを起動し，ランデブーポイントを制御して放送を始められることを確認する．

次に，受信者側で，ウェブの ibcast URL のアンカーをクリックすると受信アプリケーションが起動し，放送の受信が始まることを確認する．

さらに，放送の中継が機能するかどうかも確認する．図 8 のように，東京のビデオサーバがシドニーからの放送を受信し，これにテロップを挿入して再放送できることを確認する．

この結果，設計したものが，有効に機能することが確認できた．

6.3 ユニキャストの放送との比較実験

マルチキャストの放送はユニキャストの放送に比べてサーバに負荷がかからず，ネットワークの帯域も消費しな

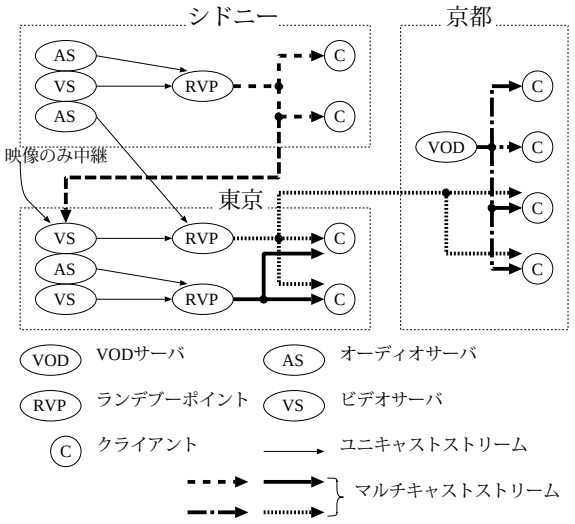

図 8: ネットワークの概要

いことを実証するための比較実験を行った．

この結果，従来のユニキャストの方式に比べて，マルチキャストの方式の方が優れていることが確認できた．

6.4 資源予約の有効性の検証実験

資源予約された放送は他のフローの影響を受けないことを，資源予約されていない放送と比較して検証する実験である．受信ホストを 2 台，放送局を 1 組．また大量のストリームを発生させる VOD サーバを 15 台用意する．放送局はマルチキャストで放送を始め，1 台の受信ホストは資源予約をして，もう 1 台のホストは資源予約をせずに放送を受信する．そして，両方の受信ホスト宛に，VOD サーバから大量の放送を送信する．

この結果，資源予約なしで放送を受信した場合，VOD サーバからの大量のストリームが送信されると，多数のコマ落ちや音飛びが発生した．一方資源予約をして放送を受信した場合は，VOD サーバからの大量のストリームが送信されても，同じ品質で受信することができた．したがって，放送のストリームが他のフローの影響を受けないことが確認できた．

7 おわりに

本研究では，柔軟な放送に対応できる高品質で数多くの受信者に対応できるインターネット放送システムを QoS マルチキャストルータを用いて設計し，実装した．このシステムを用いれば一般の PC で放送ができるため，個人が簡単に放送できるようになる．そして，マルチキャストと QoS 保証を前提としているので，高品質な放送を安定して送信することができる．さらに，放送を受信しこれを解凍し，加工を加え，再び圧縮して再放送する中継サーバを設計したことにより，柔軟な形態で放送することが可能となった．

受信者側では，ブラウザで番組表を開き，受信したい放送の ibcast URI をクリックすれば，受信アプリケーションが適切なパラメータで起動し，放送を受信することができた．したがって，設計したものは有効に機能した．

実験により，今回の設計した方法でインターネット放送を行えば，数多くの受信者に対する高品質な放送が，簡単な放送設備でできることが実証された．

今後の課題として，まず本研究で実装できなかった，放送サーバをコントロールするための GUI の実装があげられる．個人が容易に放送を行うためには，使いやすい GUI が必須である．次に，受信アプリケーションの精錬があげられる．そして，現在広く使われている OS である Windows に対応することがあげられる．これらのことを実現できたとき，このシステムが広く使われると確信する．

参考文献

[1] K. Fujikawa and K. Ikeda. Rsvp integrated multicast (rim). *INET'99*, June 1999.

[2] K. Fujikawa, M. Ohta, and K. Ikeda. Integration of multicast routing and qos routing. *Proc. of INET2000*, July 2000.

[3] K. Fujikawa, Y. Fujimoto, K. Ikeda, N. Matsufuru, and M. Ohata. Comfortable service: A new type of integrated services based on policed priority queuing. **情報処理学会研究報告** *2000-DPS-98*, pages pp.25–30, June 2000.

[4] 藤川 賢治, 藤本 義人, 太田 昌孝, 岡部 寿男, and 池田 克夫. Policed priority queuing (ppq) を用いたフローごとの qos 保証のための comfortable service (cs) の提案. *DICOMO2001*, June 2001.

[5] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. Resource reservation protocol (rsvp) – version 1 functional specification. *RFC2205*, 1997.

[6] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharma, and L. Wei. Protocol independent multicast-sparse mode (pim-sm): Protocol specification. *RFC2362*, 1998.

[7] M. Handley and V. Jacobson. Sdp: Session description protocol [rfc 2327], April 1998.

[8] The FreeBSD Project. (freebsd). *http://www.freebsd.org*.

[9] Sam Lantinga. Simple directmedia layer (sdl). *http://libsdl.org/*.

[10] Independent JPEG Group. (libjpeg). *http://www.ijg.org/*.

[11] The MJPEG/Linux square. (mmx jpeg). *http://sourceforge.net/projects/mjpeg/*.

[12] Pentium Compiler Group. (pgcc). *http://www.goof.com/pcg/*.