

## 無線ネットワーク環境における帯域幅の予測と マルチメディア・コンテンツの送出量制御

谷口 雅昭<sup>†</sup> 村尾 高秋<sup>†</sup> 串田 高幸<sup>†</sup>  
萩野 浩明<sup>††</sup> 安木 成比古<sup>††</sup> 稲村 浩<sup>††</sup>  
山内 長承<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所

<sup>††</sup>株式会社NTTドコモ マルチメディア研究所

<sup>†††</sup>東邦大学理学部情報科学科

無線ネットワーク環境でマルチメディア・コンテンツのストリーミングを行う場合、ネットワークの伝送帯域幅が安定していないため、利用可能なネットワークの帯域幅にあわせてコンテンツの伝送量を制御する必要がある。しかし、一般的な無線ネットワーク環境では帯域幅を直接得る方法は提供されていないため、送出量制御は、データの送出や受信の状況をモニタした結果から得られる間接的な情報を基に行わなくてはならない。本研究では、モニタの結果から得られる情報のうち、RTT(round trip time)とクライアントの受信データ量を基準として制御する方法に用いた場合に、これらの値の信頼性をプロトタイプ・システムと無線ネットワーク・シミュレータを用いて評価した。その結果、RTTによる方法では10サンプルの平均値を用いることによりネットワークの変動があっても信頼性のあるデータが得られることがわかった。一方、受信データ量による方法では10サンプルの平均値を用いても信頼性があまり改善しないことがわかった。

## Bandwidth estimation and multimedia contents transfer control in a wireless network environment

Masaaki Taniguchi<sup>†</sup> Takaaki Murao<sup>†</sup> Takayuki  
Kushida<sup>†</sup>

Hiroaki Hagino<sup>††</sup> Narihiko Yasuki<sup>††</sup> Hiroshi Inamura<sup>††</sup>  
Nagatsugu Yamanouchi<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>Tokyo Research Laboratory, IBM Japan

<sup>††</sup>Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.

<sup>†††</sup>Department of Information Science, Toho University

For multimedia content streaming over a wireless network environment, it is crucial to estimate available bandwidth, and to control transmission rate, since the wireless network bandwidth is unstable. Because the bandwidth is estimated based on feedback from the network, we cannot avoid estimation delays, and uncertainties, which may result in control errors. In this paper, we analyze these problems using our prototype video streaming system and wireless network simulator.

### 1. はじめに

我々は、携帯電話などを受信端末とした無線リンクを含むネットワークに動画といったマルチメディア・コンテンツのリアルタイム転送(ストリーム転送)を行うことを目的として、プロトタイプ・システムを構築し、コ

ンテンツのアダプテーション、データの送出量制御、データ転送プロトコル、サーバの負荷、クライアントの負荷といった考慮しなくてはならない問題について検討している。

本研究におけるストリーミングの目標は、マルチメディア・コンテンツを仲介するネットワークの変動の影

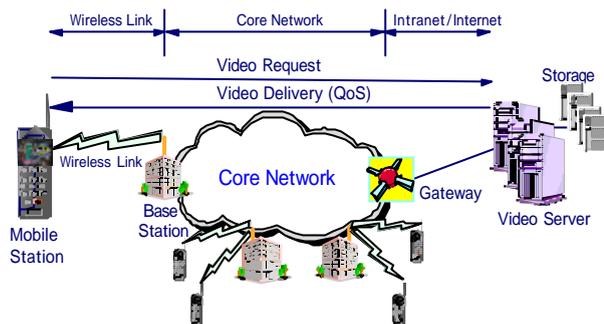


図 1 対象とするストリーミング・システムの基本構成

響を感じさせることなく、また同時に、最善の品質でクライアント上に再生することである。すなわち、再生画像の乱れ、再生停止などを避けながらも、ネットワークの帯域幅を十分に利用した映像を提供することを目指している。画像の乱れや、再生停止はパケット・ロスやクライアントへのデータ供給が再生に間に合わないことが主な原因であり、このようなことを避けるためには、サーバ側においてネットワークの帯域幅を予測し、それに応じたコンテンツの送出量を制御することが必要である。

図 1 は本研究が対象としている無線ネットワークを含むマルチメディア・コンテンツのストリーミングの基本構成概略を表したものである。ここに示すように、コンテンツは、ビデオ・サーバからイントラネットを通じて無線ネットワークのサービス提供者の内部ネットワーク(core network)へ送られ、無線端末が位置する基地局(base station)に送られる。ここまでの経路が有線ネットワークであったのに対し、基地局からは、無線リンク(wireless link)上の無線ネットワークによって、携帯端末に送られる。ここで、有線区間は、データ転送帯域幅も十分にあり、また、常に安定した性能が得られると仮定できるのに対し、無線区間の帯域幅は例えば最大 384Kbps 程であり、また、無線通信の SNR の時間変化などに伴って実効帯域幅が変化するのでその性質が異なっている。

このような事実から、我々は、無線ネットワークの性質がマルチメディア・コンテンツのストリーミングに対し最も影響を与えようと考え、これまで、[1]において、無線ネットワークにおける帯域幅の変動と転送遅延について分析し、[2][3]において、サービスの質を制御する為の QoS 制御フレームワークを定義し、[4]において、ストリーミング・サービスが一時的な無線ネットワークの切断によっても停止しないようにするためのプロトコル拡張について述べ、さらに、[5]において無線ネットワークの帯域変動に対応したビデオ・ストリームの制御方法について報告してきた。本稿で

はさらに、コンテンツの送出量制御に関して、特に重要なネットワーク帯域幅予測の方法について述べ、それがどのような性質を持つのかをネットワーク・シミュレータを用いて検証した。

## 2. 無線ネットワーク区間を含むマルチメディア・ストリーミング

図 2 はコンテンツの送出の観点から無線ネットワーク環境でのコンテンツの伝送過程を簡略モデルとして表したものである。まず、サーバはコンテンツを時刻に同期させて次々にストレージから読み込み、ネットワークの帯域幅情報に基づいてコンテンツのデータ・レートを調節し、ネットワークに IP/UDP パケットとして送出する。続くネットワーク区間は、データをコア・ネットワーク(core network)に代表される有線区間、無線リンク(wireless link)を経て、クライアントに転送する。クライアントは受信したデータを再生バッファ(playback buffer)に一時的に蓄え、時刻に同期して再生する。

無線リンクでは、パケットデータを SDU(service data unit)として、これを PDU(protocol data unit)に分割し、PDU 毎に再送機構(ARQ: auto-repeat request)により転送する。この方式では、SDU 転送は、SDU のすべての PDU 転送が成功することにより完了するので、PDU の再送が、SDU、すなわち、パケット単位の遅延として観測される[1][6]。図の ARQ バッファは PDU の送信が完了するまでデータを保持するため、また、受信した PDU から SDU を再構築するために使われるバッファである。パケット

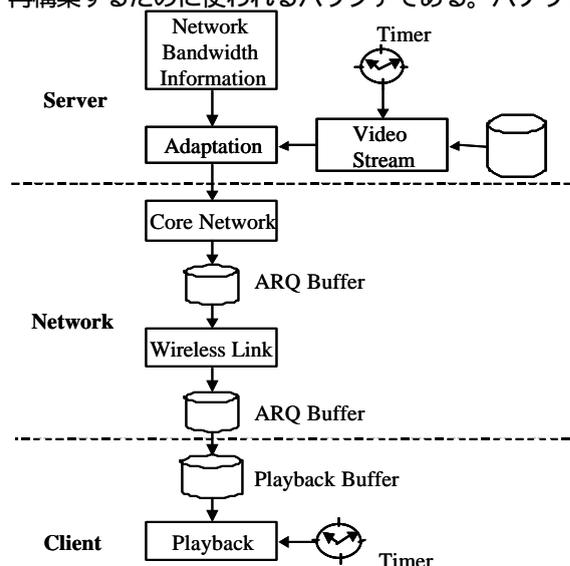


図 2 無線ネットワークを含むマルチメディア・コンテンツ伝送モデル

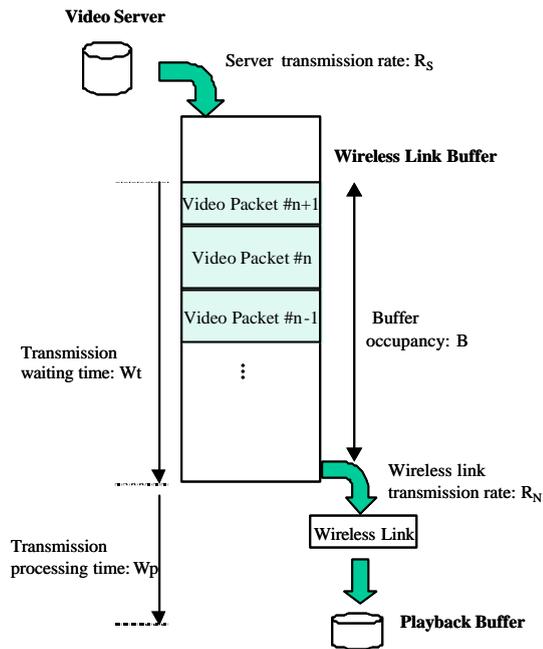


図 3 ネットワーク上バッファと流量の関係

のロスは無線区間においては再送機構により保証されていると考えられるので、主にこの ARQ バッファがオーバーフローした場合に生じると考えることができる。

そこで、一般的なネットワーク・データ転送モデルに従って ARQ バッファの動作をより簡略化して表すと図 3 のようになる。ビデオ・サーバの送出レート  $R_S$  が、無線リンクの転送レート  $R_N$  に比べて大きい場合、その差は、無線リンク上のバッファ(wireless link buffer)の使用量  $B$  の増加を生じ、その結果、転送待ち時間  $W_t$  が増加し、さらに  $B$  の増加が続くとバッファの容量を超えてパケットロスとなる。逆に、 $R_S$  が  $R_N$  に比べて低く無線リンクの帯域幅を十分に利用できていない場合は、 $B$  が減少し、これに伴って  $W_t$  が減少する。 $R_N$  は、無線リンクにおける再送により変化するので、常に  $R_S$  をバッファの許容範囲で  $R_N$  に合わせて制御する必要がある。このような単純なバッファモデルで考えるとサーバにおけるデータ送出量制御において、 $R_S$  を  $R_N$  に合わせて制御することは、バッファの使用量  $B$  をできる限り一定に保つことと相当し、どちらを基準として行っても同様の結果が得られると考えられる。

無線リンクの状態を得る手段として次のようなものが考えられる

1. 無線リンクを司る基地局から直接情報を得る
2. サーバ側の送信状況、クライアント側の受信状況から間接的に得る

1 は基地局の持つ通信状況に関する様々なデータを利用できる可能性があり、また、通知経路に無線リンクを含まないので、時間遅れの少ない情報を受け取れる利点があるが、現状では提供されていない手段である。一方 2 は、得られる情報に誤差が含まれている可能性や、無線リンクの通過過程に生じる時間遅れがあり、扱いにくい情報であるが、実現が容易な方法である。そこで本稿では、2 の方法について特にマルチメディア・コンテンツのストリーミングの標準プロトコルである RTP(real-time transport protocol)[7]を用いて得られる情報について検討することにする。

RTP は、UDP/IP 上のプロトコルであり、ある一定時間間隔で生成される SR(sender report) と RR(receiver report) に含まれる情報から次を得ることができる:

1. RTT(round trip time)
2. クライアントが受信したパケットに付与されたシーケンス番号の最大値
3. クライアントが受信できなかったパケット数
4. データの受信間隔の変動(jitter)

RTT は無線リンクバッファでの転送待ち時間  $W_t$  と基地局からクライアントへのデータ転送時間  $W_p$  とクライアントから基地局までの転送待ち時間  $W_t'$  と転送時間  $W_p'$  の和と考えることができる。ただし、サーバからクライアントに送られるデータ量の比べて、クライアントからサーバに送られるデータ量は非常に少ないので、RTT の時間変化は主に  $W_t$  の変化と考えることができる。従って RTT と無線リンク上のバッファの使用量には密接な関係があると予想できる。

クライアントの受信パケットの最大シーケンス番号とクライアントで受信できなかったパケット数がわかると、受信できなかったパケットがなければサーバ側では各パケットのシーケンス番号、サイズ、送出時間の記録からクライアント側で受信できたデータ量の実績を知ることができる。また、サーバの送信データ量とクライアントの受信データ量を比較することにより、無線リンク上にとどまっているデータ量を予測することができる。

Jitter は無線リンクのデータ転送レート  $R_N$  の変動を知る手がかりとなるが、今回は検討の対象にしなかった。

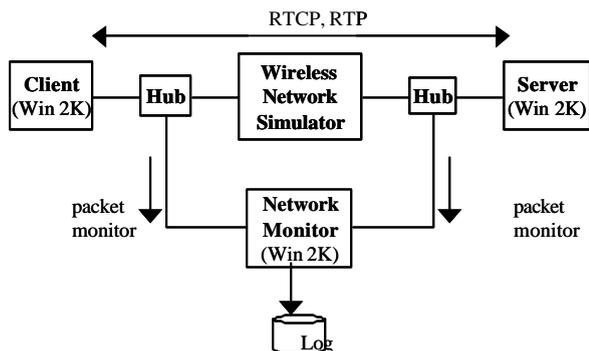


図 4 プロトタイプ評価システムの構成

### 3. プロトタイプ・システムによる帯域幅推定方法の評価

無線ネットワーク環境でのコンテンツ送出量制御を目的として、前章で述べたネットワークからのフィードバック情報が実際の環境においてどのような性質を持つものなのかを知るためにプロトタイプ・システムと無線ネットワーク・シミュレータを用いて実際にコンテンツのストリーミングを行うことにより評価を行った。

図 4 は、使用したプロトタイプ・システムの構成である。サーバからクライアントの経路上に無線リンクのシミュレータを設置し、シミュレータの両端に流れるパケットをモニタコンピュータによりキャプチャして記録する構成になっている。シミュレータへのデータの入力と出力を比較することにより、無線リンクでのデータ転送時間や、パケット・ロス、さらに、無線リンク内に貯まっているデータ量を正確に知ることができる。サーバは[5]に示した方法により MPEG4 コンテンツのレートを制御し、RTP プロトコルに従って送出する機能がある。評価にはあらかじめおおよそ 384Kbps にエンコードされた 1 分ほどの長さをもつコンテンツを用いた。無線シミュレータは、帯域幅がサーバ側からみて下り 384kbps、上り 64kbps とし、データのロス率を 3 段階に切り替えて評価を行った。

#### 3.1. Round trip time と無線リンクバッファ使用量との関係

無線ネットワークの変動が与える RTT のモニタ結果に対して与える影響が、無線リンク上のバッファ使用率の予測にどのように作用するかを評価した。RTT の測定方法は RTP プロトコルで規定されている方法に従い、SR、RR から得られる情報に基づいて行った。また、SR、RR の送出は 1 秒ごとに行った。この方法で得られる RTT には下りと上りの 2 回 ARQ

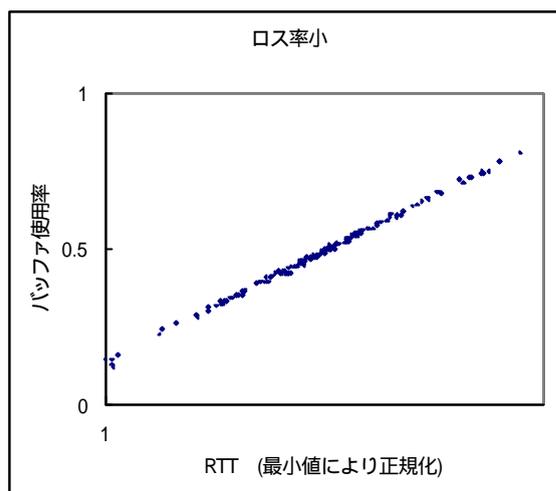


図 5 ロス率:小の場合正規化した RTT とバッファ使用率の関係

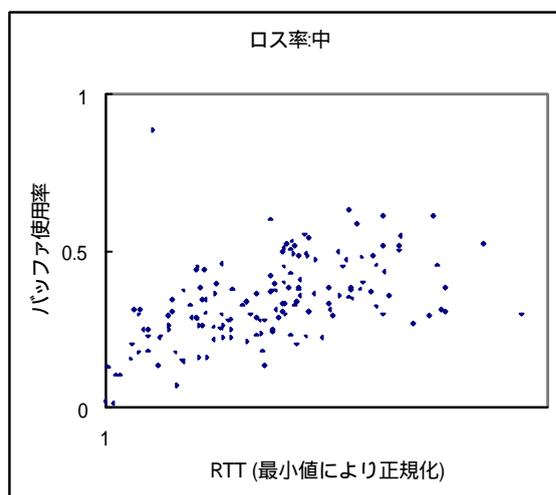


図 6 ロス率:中の場合の正規化した RTT とバッファの使用率の関係

を行う無線リンクが含まれているため、データのロス率が高いと正確さが失われることが予想される。

図 5 は、データのロス率が小さい場合の RTT とネットワーク上のバッファ使用率の関係を示すグラフである。ただし、RTT は最小値との比で表している。ロス率が小さい場合は ARQ による再送がほとんど起こらないので、RTT の増加はバッファの使用率の増加をほぼ正確に表している。

ところが、図 6 に示すように、データのロス率が大きくなると RTT と無線リンク上のバッファ使用率の関係は図 5 に比べて広がった分布となり RTT は正確にバッファの使用率を示さなくなってしまう

表 1 において、1 サンプルからの相関係数はこのような関係を定量的に表したものである。RTT の増減とバ

| ロス率 | 1 サンプルの相関値 | 5 サンプル平均の相関値 | 10 サンプル平均の相関値 |
|-----|------------|--------------|---------------|
| 小   | 1.000      | 0.987        | 0.986         |
| 中   | 0.715      | 0.885        | 0.925         |
| 大   | 0.672      | 0.862        | 0.929         |

表 1 RTT とバッファ使用率の関係の相関値

バッファ使用率の増減の関係を相関値(最大 1.0、最小 -1.0)として表している。ロス率が大きくなると相関値が低下している傾向がわかる。これは、RTT を知るために用いるSR やRR はパケットサイズが100バイトほどと小さく、RTT は PDU の再送遅延の分布に従った分布をもつためと考えられる。このような場合は、測定に用いるサンプル数を増やすことによりより平均的な傾向をとらえることにより改善が期待できる。そこで、測定に用いるサンプル数によって、相関値の改善にどのような効果があるかを検討した。表は、過去5サンプルのRTTとバッファ使用率の平均値の相関値と、同様に10サンプルの平均値の相関値を示している。平均化の効果としてロス率が小さい場合は、相関値が少しだけ低下してしまうが、ロス率が中の場合と、大の場合は10サンプルほどのデータを用いることによりかなり相関値が改善していることがわかる。

### 3.2. クライアント受信データ量レポート結果と無線リンク上バッファ使用率の関係

次にクライアントがモニタしている受信 RTP データから求められる、クライアントの受信データ量の実績値と、サーバの送信データ量の実績値から求めた無線リンク上のバッファ使用率と実際のバッファ使用率の関係が、無線ネットワークの変動によって受ける影響を評価した。測定方法は RTP プロトコルで規定されている方法に従い、SR、RR から得られる情報に基づいて行った。また、SR、RR の送出は1秒ごとに行った。この方法では、クライアントからサーバに送られるレポートを返す時間内に起きる無線リンク上バッファの変化が予測誤差として現れる。

図 7 はデータのロス率:小の場合の両者の関係を表している。この場合は両者に線形の関係があることがわかる。ところが、図 8 に示すようにロス率が大きくなると見積もりにずれが生じてしまう。これは、ロス率が大きくなると、再送制御により短時間のデータ転送レート見かけ上大きく変動してしまうことが原因と考えられる。

この方法に対しても RTT の場合と同様に複数サンプルを測定に用いることにより見積もりの精度が改善

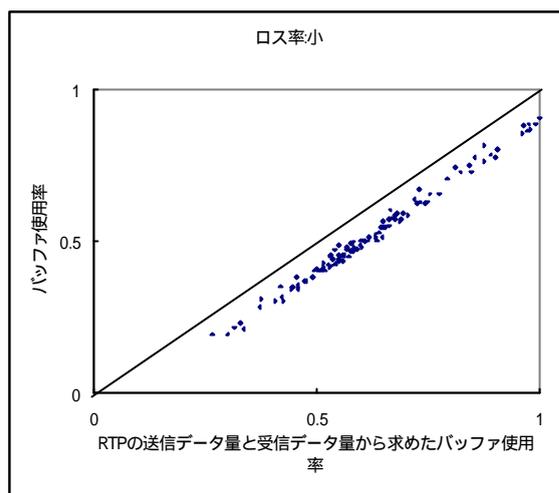


図 7 ロス率:小の場合におけるクライアントの受信実績から求めたバッファ使用率と実際の使用率の関係

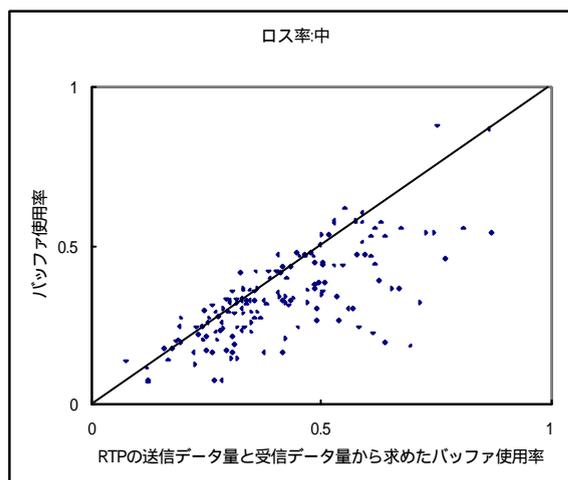


図 8 ロス率:中の場合におけるクライアントの受信実績から求めたバッファ使用率と実際の使用率の関係

| ロス率 | 1 サンプルの相関値 | 5 サンプル平均の相関値 | 10 サンプル平均の相関値 |
|-----|------------|--------------|---------------|
| 小   | 0.999      | 0.999        | 0.999         |
| 中   | 0.735      | 0.762        | 0.773         |
| 大   | 0.744      | 0.839        | 0.875         |

表 2 クライアントの受信実績から求めたバッファ使用率と実際の使用率の相関値

するかを相関値により検討した。表 2 に示すようにサンプル数の増加により相関値が向上するものの、RTT の場合に比べてその程度は低くなっている。

#### 4. 考察

サーバにおいてコンテンツの送出量制御をするために RTT、または、クライアントの受信データ量を指標とした場合にそれらをプロトタイプ・システムを用いて評価した。RTT を指標とすると 10 サンプルデータの平均値を用いることにより無線リンクのロスによる変動をから受ける測定値の信頼性の低下を改善できることがわかった。これに対し、受信データ量実績を指標とするより場合には、10 サンプルデータを用いても信頼性の低下の改善を期待できないことがわかった。今回の評価は SR、RR を 1 秒間隔で送出したので、10 サンプルは 10 秒に相当する。シミュレーションは、ロス率一定で行っているので、ロス率が変動する場合は、10 秒という時間はやや長い可能性がある。SR、RR の送出頻度は調節可能であるので、信頼性を向上するために必要なサンプル数と送出レートとの関係をさらに評価する必要がある。さらに今後の課題として、RTT を指標として送出量制御を行う有効性を実際にプロトタイプ・システムに組み込み検討する必要がある。

#### 5. まとめ

無線ネットワーク環境においてストリーミングを行う場合に、データの送出量制御の方法としてネットワークのモニタ結果から無線リンクのバッファ量の変化を予測する方法を検討し、RTT を基準に行う方法がクライアントの受信データ量を基準に行う方法より無線リンクの変動の影響を改善しやすいことを述べた。

#### 参考文献

- [1] 山内長承, 串田高幸, 富田アルベルト, 尾上裕子, 渥美幸雄. 再送を伴う無線リンクを持つインターネットでの動画転送時のバッファ制御. マルチメディア通信と分散処理, pp. 37-42. 情報処理学会, Jun. 2001.
- [2] 安木成比古, 渥美幸雄, 高橋修, 尾上裕子, 黒川雅人, 串田高幸, 富田アルベルト, 山内長承. モバイルストリーミングのための QoS 制御フレームワーク. DICOMO 2001 予稿集, pp. 717-722, 情報処理学会, Jun. 2001.
- [3] 串田高幸, 富田アルベルト, 黒川雅人, 山内長承, 尾上裕子, 安木成比古, 渥美幸雄, 高橋修. モバイルマルチメディア QoS の構成方式. DICOMO 2001 予稿集, pp. 723-728, 情報処理学会, Jun. 2001.
- [4] 尾上裕子, 安木成比古, 渥美幸雄, 萩乃箴, 村尾高秋, 串田高幸, 山内長承. マルチメディアセッション制御プロトコルにおけるモビリティ拡張機能について. 情報処理学会研究報告, pp. 253-259, Vol. 2001, No.83, Sep. 2001.
- [5] 村尾高秋, 谷口雅昭, 串田高幸, 萩野浩明, 尾上裕子, 高橋修. ワイヤレス区間を想定したビデオストリーミングシステム. マルチメディア通信と分散処理, pp. 61-66, Sep. 2001.
- [6] 稲村治, 石川太郎, 高橋修. W-CDMA 網での TCP トラフィック特性評価. MBL 研究会, 情報処理学会, Sep. 2001.
- [7] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC1998, IETF, Jan. 1996.