

マルチメディアストリーミング配信サーバにおける ネットワーク情報活用型レート制御方式

尾上 裕子[†] 萩野 浩明[†] 渥美 幸雄[†]
高橋 修[†] 駒木 寛隆^{††}
串田 高幸^{††} 山内 長承^{†††}

本研究では、高速化する次世代移動通信網でのストリーミング配信サーバにおいて、エンドツーエンド型の受信情報と移動網からのネットワーク情報の両者を総合的に判断した効果的なレート制御方式を提案する。また、提案方式を Windows 上のモバイル QoS システムに組み込み実装を行った。IMT-2000 ネットワークシミュレータ装置を用いた評価実験では、チャネルレート変動時、エラー率設定時のそれぞれにおけるパケットロス数、帯域使用率の点から、ネットワーク情報活用型の方がエンドツーエンド型より優位であることが分かった。さらに、再送制御や在圏・圏外制御などのモバイルストリーミングシステムに不可欠な制御において、ネットワーク情報活用型と併用した方が効果が高いことが明らかになった。

Network Information Based Rate Controls on Multimedia Streaming Servers

YUKO ONOE,[†] HIROAKI HAGINO,[†] YUKIO ATSUMI,[†]
OSAMU TAKAHASHI,[†] HIROTAKA KOMAKI,^{††} TAKAYUKI KUSHIDA^{††}
and NAGATSUGU YAMANOUCHI^{†††}

This study proposes effective rate controls regarding both end-to-end receiver's reports and intermediate network information for streaming delivery systems on the next generation mobile communication networks. Moreover, the proposed method has been implemented in our mobile QoS systems on Windows. As the results of evaluation experiments with IMT-2000 network simulator, rate control with the network information is superior to the end-to-end types in terms of the number of packet loss and bandwidth usage at the specified channel and error rates. Moreover, cooperative ways with network information is more effective for retransmission and session controls which is indispensable for mobile streaming systems.

1. はじめに

近年、インターネットの普及と情報通信網の高速化・広帯域化により、VoD(ビデオ・オン・デマンド)やビデオストリーミング配信などのマルチメディアアプリケーションの利用が急増している。さらにモバイル通信においても、モバイルインターネットの普及に加え、IMT-2000¹⁾や MMAC(Multimedia Mobile Access Communication System²⁾などの次世代移動通信技

術の確立により、高速モバイルアクセスを利用したマルチメディアサービスへの要求がますます高まっている。特に IMT-2000 においては最大 384 kbps の高速パケット通信速度を提供するため、IMT-2000 を通信インフラとした音楽・映像配信サービスが今後期待される。ここでマルチメディア配信技術に関する研究動向として論文 3) では、分散マルチメディアシステム全般の QoS サポートについての総論が述べられており、QoS 制御のメカニズムとそれを取り巻く QoS フレームワークが示されている。さらにこれまで開発された 10 のマルチメディアシステムを、QoS 制御機能の統合化・機能分担・透過性・実時間性とパフォーマンスの点から評価している。しかし、ワイヤレスネットワーク環境においては有線網とネットワーク特性が大きく異なるため、モビリティの観点から QoS フレーム

[†] 株式会社 NTT ドコモマルチメディア研究所
Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.

^{††} 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所
Tokyo Research Laboratory, IBM Japan Ltd.

^{†††} 東邦大学理学部情報科学科
Department Information Science, Toho University

ワークをとらえなおす必要があると考える。ここでモバイル QoS に関して 3GPP では、エンドツーエンドマルチメディアサービスを会話、ストリーミング、インタラクティブ、バッグラウンドの 4 つの QoS クラスに分類している^{4),5)}。そのうえで、ペアラサービスに必要な基本的サービス機能と共通化されたアプリケーションインタフェース、ユーザ端末上の実行環境などについて標準化を行っている。これらの標準化動向をふまえ、我々は今後需要が高まることが予想されるモバイル映像配信をサービスターゲットとした。この映像配信をダウンロード型でなくストリーミング型とすることにより、移動機の記憶容量を大きくすることなくユーザの待ち時間が小さくできるが、ある程度のリアルタイム性を要求される。このため通信プロトコルについては、連続メディアのストリーミング配信を RTP (Realtime Transport Protocol ⁶⁾) / UDP / IP 上で行い、ストリーミングセッション制御のプロトコルには RTSP (Realtime Transport Session Protocol ^{7),8)}) を使用する。また、メディア符号化技術としては、MPEG-4 AAC (Advanced Audio Coding) (音楽)、MPEG-4 (映像) などをサポートし、RTP ベイロードフォーマットは IETF の規定に従うこととした。現在 IETF では、RTP の仕様の検討と MPEG-4 や AMR をはじめとした各メディアのベイロードフォーマットの決定作業が進められている⁹⁾。これらのインターネット標準となる通信プロトコルの利用に加え、移動透過性を QoS システム全体で満足するような仕組みが必要となる^{10),11)}。また、これら既存の研究はサーバクライアント間のエンドツーエンドネットワーク状況をつねに把握し、QoS 制御を行っている。一方、ネットワーク上の中継ノードからの帯域使用量・バッファ量などのネットワーク状況を送信側に通知する方式も提案されている^{12),13)}。この方式では、送信ノードと受信ノード間にトラヒック監視用ルータを設け、本ルータが輻輳状態を送信側にフィードバックし、通知内容に基づいて送信ノードに近いルータでトラヒック制御を行う。これにより、エンドツーエンド通信の中継経路となる網にトラヒックが流れ込む前に流量制限をかけ、ボトルネックになりやすい網の輻輳を事前に回避することが可能となる。しかし、この方式は網内に閉じたトラヒック制御となり、エンドノードの QoS 制御とは独立に機能する。さらに、移動網の特性を考慮されていない。そのため、たとえば在圏・圏外などのセッション制御や再送転送など、モバイルストリーミング配信技術に不可欠な機能と上記のようなトラヒック制御の関連性も考慮されていない。

そこで我々は、無線リンク環境における移動特性の動的变化に対し、適応的に動作するストリーミング配信技術の観点から、中継ノードからのネットワーク情報の利用について検討する。

2. 課 題

無線リンク環境においては、基地局ハンドオーバーやフェージング、さらに在圏/圏外流動やチャネル切替えなどの無線リンク特性の影響により、エンドツーエンドで観測されるネットワーク状態の変化の度合いが大きい。そのうえ、次の理由により効果的なレート制御を施すことが難しい。

- (1) 有線ネットワークと比べて IMT-2000 や PDC-P などの無線ネットワークは RTT が最低でも数百ミリ秒と大きいことが知られている¹⁷⁾。さらに、無線区間上のデータリンクプロトコル ARQ (Automatic Repeat Request) により、電波状況の悪化にともなうパケットエラーを再送により回復処理するため、無線区間上のパケットロスが遅延時間の増大を引き起こす。このように、クライアント-サーバ間の遅延時間が大きく、従来のエンドツーエンド型のモニタリング・レポート報告方式では状況変化に迅速に反応することができない。
- (2) 網の状況悪化の原因が特定できず、変化が一時的なゆらぎか、継続的なものかの判別が難しいため、無駄なレート制御や制御の発振になりかねない。
- (3) エンドツーエンドで状況を測定する場合、途中のネットワークの状況を正確に把握できないため、状況変化によるレート制御により別の因が発生し、かえって制御が逆効果に働くといった制御の影響予測がつきにくい。
- (4) 特に輻輳解除や電波状況の改善など、回復タイミングをつかみにくく、試行的な方法に頼っている。

ここで、モバイルネットワーク状況の変動要因と、サーバ・クライアント型のストリーミングシステムにおいて状況認識・制御判断材料となるパラメータの対応を表 1 に示す。表中の、ネットワーク情報とは、経路上に位置する中継ノードが保持する情報を示し、網側からエンドシステムに対して供給される。また、エンドツーエンド情報はエンドノードの受信トラヒックのモニタリングなどにより取得される情報を示す。表 1 が示すように、ワイヤレスリンクにおける電波状況悪化やトラヒック輻輳の際、エンドツーエンド型ではパケットロスや遅延時間など画一的にしか把握できず、要因の切り分けが困難である。さらに、モバイルネットワーク環境において特徴的な在圏・圏外に関しても、

表 1 ネットワーク状況変動要因
Table 1 Factors of various network status.

ネットワーク状況変動要因		ネットワーク情報	エンドツーエンド情報
在圏・圏外		在圏・圏外通知	転送パケット確認 応答未受信
帯域変動(チャネル切り替え, ハンドオーバー)		チャネルレート	受信レート
電波状況悪化・改善	ロスがバースト	パケットロス率の変化量, 中継キュー変化大	パケットロス率, 遅延時間, ネットワーク滞留量
	ロスがランダム	パケットロス率	
他トラフィック混雑・輻輳		中継キュー使用量	

エンドノードで転送パケットの確認応答の未受信タイムアウトを起こして初めて状況変化を認識する。このように、エンドツーエンド型では変化の種別に応じた迅速かつ効果的な制御が難しい。そこで本研究では、上記の問題を解決するために、クライアントから受信状況として報告されるエンドツーエンド情報と通信網から取得するネットワーク情報を併用する。両者を組み合わせ、または使い分けることにより、ストリーミングサーバ側でより効果的なレート制御を実現する。以下、3章で提案方式、4章で設計、5章で実装評価、6章でまとめについて述べる。

3. 提案方式

クライアントの受信レポートを用いたエンドツーエンド型でネットワーク通信状況を推定する方法は誤差・遅延が大きくなり、ネットワーク状況への適応性に問題が生じる。このため、中継ノードから通信状況の情報を取得し、送信側へ通知する方式を提案する。ここでは、サーバ・クライアントで構成されるエンドツーエンドに対し、網上の基地局やゲートウェイなどの装置を総称して中継ノードとする。すなわち中継ノードとは、エンドツーエンドの通信経路上に位置し、エンドノードに対してネットワーク状況を通知する。本中継ノードが提供することを望まれる機能を以下に示す。

- ネットワークの状況悪化、改善などの変化を迅速にエンドノードに通知すること。
- ネットワークの状態変化の要因をエンドノードが推測し、問題の切り分けが図れるようにすること。
- エンドノードが施した制御の効果を、エンドが迅速に計れるようにすること。

さらに、エンドツーエンド情報およびネットワーク情報をストリーミング配信のレート制御に活用する

ため、サーバ側にはエンドツーエンドレート制御機能とネットワーク情報活用制御機能を導入する。エンドツーエンドレート制御機能では、エンドのバッファ使用率、受信数やパケットロス数、RTT値などのクライアントからの受信レポートを元に、受信レートや遅延時間、ネットワーク滞留量などを評価し、マルチメディアコンテンツの符号化レート、ネットワークへの送出レートの切替えを行う。たとえば、RTP通信であればRTCPのRR(Receiver Report)などが本用途に利用できる。一方、ネットワーク情報活用制御機能では、チャネルレートやバッファ使用量など中継ノードから供給されるネットワーク情報を加味したレート制御を行う。これらの制御により、端末の移動にともないネットワーク情報供給が受けられない網に移動した場合は、通常のエンドツーエンド型レート制御を行い、網からの情報が取得できる場合にはネットワーク情報活用型レート制御を用いてより迅速かつ正確なQoS制御を施すことが可能となる。次にその詳細について述べる。

3.1 中継情報とネットワーク情報エージェント

本方式では、エージェントという論理的な機能主体において、中継ノードからバッファ使用量、チャネルレートなどのネットワーク情報をSNMP(Simple Network Management Protocol¹⁵⁾)のMIB(Management Information Base)情報として取得し、サーバへ通知する¹⁶⁾。本エージェントは主に、移動通信状態を含むネットワーク情報のインターネット側への提供機能と、MIBなどを用いて取得されたネットワーク情報の通信プロトコルごとの制御パケットへの変換機能に大別される。それぞれを司るエージェントを図1のようにモバイルインターネットネットワーク環境に配置する。

ネットワーク情報提供エージェントとネットワーク情報プロトコル変換エージェントを分割した理由は、2つのエージェントを分散配置できることにある。たとえばネットワーク情報提供エージェントは基地局などの中継ノードに、ネットワーク情報プロトコル変換エージェントは網間のゲートウェイ装置上に配置する。このように分散配置することにより、プロトコル変換エージェント側でセッション開始時にセッション情報をいったん取得すれば、受信ノードの移動によりネットワーク情報提供エージェントが変わっても、セッション終了までセッション情報を維持できる。そのためには、ネットワーク情報プロトコル変換エージェントは受信ノードとなる移動機とネットワーク情報提供エージェントの対応付けを行えることを前提としている。

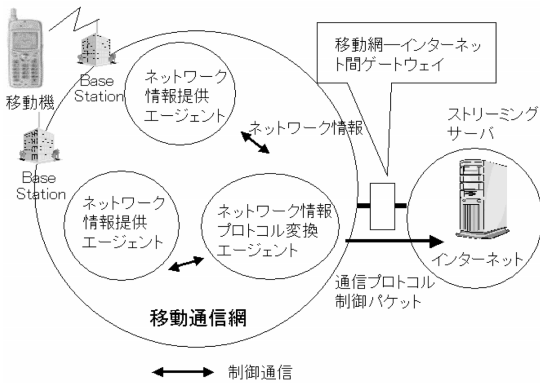


図1 ネットワーク情報提供/プロトコル変換エージェント
 Fig. 1 Network information provision/protocol translation agents.

表2 ネットワーク情報
 Table 2 Network information.

MIB 情報
チャネルレート (kbps)
バッファ使用量 (kbytes) 在圏, 圏外
パケット送出レート (bps)
パケットロス率 (%)

また、網内のネットワーク情報を網外のノードから直接参照することは、セキュリティなどの点から難しくなっており、このような場合にも網のゲートウェイなどで必要十分な情報に加工して提供することもできる。さらにネットワーク情報プロトコル変換エージェントを、プロトコルプロキシと組み合わせることも考えられる。

- ネットワーク情報提供エージェント (例: SNMP エージェント)

無線リンクの状態を示す情報 (表 2) を MIB 情報として定期的に取得し、プロトコル変換エージェントに提供する。

- ネットワーク情報プロトコル変換エージェント (例: RTCP エージェント)

サーバの QoS 制御モジュールに対し中継ノードから取得したネットワーク情報を統一的なインタフェースで示すため、ネットワーク情報提供エージェントに定期的に問合せを行い、取得した MIB 情報をエンドツーエンドのトランスポートプロトコル (例: RTCP) に変換し、図 2 に示すようにサーバ側に制御パケットとして送信する。サーバでは、トランスポートプロトコル制御部において、ネットワーク情報を含む制御パケットを解釈し、サービス品質制御を行う。このように、ネットワーク情報のプロトコル変換を行い、エン

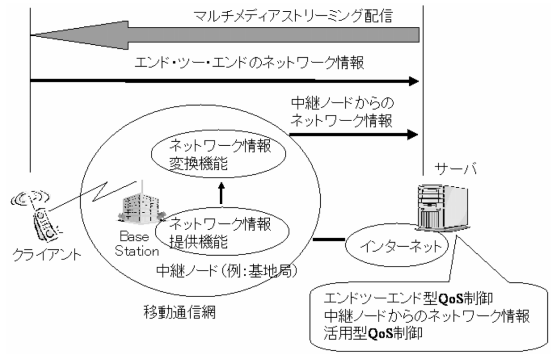


図2 エンドツーエンド情報とネットワーク情報
 Fig. 2 End-to-end and network information.

ドツーエンド型の受信レポートと中継ノードのネットワーク情報の制御パケットフォーマットを共通化することにより、レート制御側となるサーバはエンドツーエンド型制御とネットワーク情報活用型制御との統合化を行うことが可能になる。

3.2 中継情報活用機能 (サーバ)

次に、サーバにおいて両情報を使って実現される機能と処理シーケンスを示す。

(1) 情報保持機能

トランスポートプロトコル制御パケットの受信にとともに、エンドツーエンド情報またはネットワーク情報の両者を切り分けて保持する。さらに、たとえばエンドツーエンド情報の場合には、RTT や受信レートなどについて現在値と過去 N 秒間の平均値を保存する。

(2) 情報判定機能

保持したエンドツーエンド / ネットワーク情報からレート制御の判定を行う。ネットワーク情報受信時には、ネットワーク情報のみ能動的に活用し、レートを判定する。一方、エンドツーエンド情報受信時には、基本的にはエンドツーエンド情報によりレート制御を行うが、ネットワーク活用型レート制御の結果をふまえ、制御の重複や発振を避けるためにネットワーク情報を受動的に活用する。

(3) 情報活用レート制御機能

判定結果に基づきレート増加、減少、在圏・圏外処理を行う。本レート制御に関しては、共通の機能とする。次に、図 3 を用いてエンドツーエンド型およびネットワーク情報受信時のレート制御処理シーケンスを示す。

(1) エンドツーエンド型情報受信時のレート制御処理シーケンス

(1.1) エンドツーエンド型情報 (RTCP の RR) を受信すると、エンドツーエンド情報として保持する

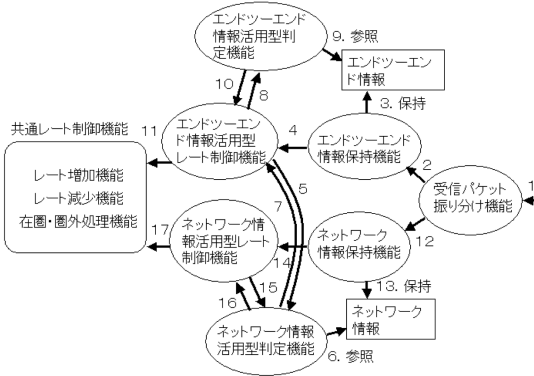


図3 エンドツーエンド情報およびネットワーク情報受信時のレート制御処理シーケンス

Fig. 3 Sequences of rate control at reception of end-to-end and network information.

(図 3 : 1 , 2 , 3) .

(1.2) エンドツーエンド情報活用型レート制御機能では、ネットワーク情報が保持されていたらネットワーク情報活用型判定機能において、レートの増加/減少の可否判定を行う (4 , 5 , 6 , 7) .

(1.3) さらに、エンドツーエンド情報活用型判定機能においてレート制御の判定を行う (8 , 9 , 10) .

(1.4) 判定結果に基づき、共通レート制御機能においてレート・モードの増加・減少を実行する (11) .

(2) ネットワーク情報受信時のレート制御処理シーケンス

(2.1) ネットワーク情報 (RTCP の APP : BSTN タイプ) を受信すると、ネットワーク情報として保持する (1 , 12 , 13) .

(2.2) ネットワーク情報活用型レート制御機能では、ネットワーク情報活用型判定機能においてレート制御の判定を行う (14 , 15 , 16) .

(2.3) 判定結果に基づき、共通レート制御を行う (17) .

3.3 サーバでのレート制御

本節では、提案方式を用いたストリーミングサーバ側での具体的なレート制御処理について述べる。まず、基本となるレート制御のアルゴリズムについて述べ、次に再送制御や在圏・圏外制御などレート制御と関連する他の制御について述べる。

(1) 基本レート制御

本方式のエンドツーエンド型レート制御では、エンドツーエンド情報を受信すると、現在のエンドツーエンドのネットワーク状態としての中継ノードのバッファ量を算出する。さらにこの予測されたネットワーク状態とあらかじめ設定した理想値との差分から次に転送するパケットの送出レートを予測し、次に転送する符

号化レートを決定する。このバッファ理想値に関しては、網全体を単一のネットワークバッファと見なし、溢れず枯渇しない程度につねに一定量データが滞留している状態にあり、チャネルレートの変動やエンドツーエンドの制御遅延をある程度吸収できることが望まれる。

まず、サーバは通信中の RTT の最小値を RTT_{min} として保持する。さらに、エンドツーエンド情報から求められる受信レート V_r と中継ノードでのバッファ内遅延時間 ($RTT - RTT_{min}$) から、中継ノードにおけるバッファ量 B を、

$$B = V_r \times (RTT - RTT_{min}) \tag{1}$$

と予測する。これより、中継ノードのバッファ量が理想値 B_{exp} に近づくように、次の1秒間の送出レート V_{s1} を、

$$V_{s1} = V_r - (B - B_{exp}) \tag{2}$$

と決定する。

一方、ネットワーク情報活用型レート制御の場合には、ネットワーク情報から中継ノードのバッファ量 B_{cur} と下りチャネルレートとしての V_r を取得する。さらに、たとえばネットワーク情報が1秒間隔でサーバに通知されるとした場合、チャネルレート変化後最大1秒の遅れが考えられる。そこで、ネットワーク情報受信時のバッファサイズ B_p は、ネットワーク情報で通知されたバッファサイズ B_{cur} と過去1秒間のバッファへの流入データ量 B_{in} (送信データ量) とネットワーク情報から取得されるバッファからの流出データ量 B_{out} から、

$$B_p = B_{cur} + B_{in} - B_{out} \tag{3}$$

として補正を行う。本式を式 (2) に代入し、ネットワーク情報活用型レート制御では、次の1秒間の送出レート V_{s2} を、

$$V_{s2} = V_r - (B_p - B_{exp}) \tag{4}$$

と決定する。

次に、上記のレート制御と深く関連し、かつモバイルストリーミング配信に不可欠な他の制御について述べる。サーバにおいて、まず上記の基本レート制御を用いて送出レートを決定する。さらにその得られた送出レートに基づき、クライアントのバッファ量が少なければ送出レートより符号化レートを低下させる (クライアントバッファ枯渇回避), または再送制御により送出レート中の再送レートの割合を決定するなどの関連制御を行う。

(2) クライアントバッファ枯渇回避処理

クライアントは RTP パケットをあらかじめ一定時間バッファリング後、復号化および再生を開始する。もし

符号化レートとクライアントにおける受信レートがつねに一致していれば、クライアントバッファは枯渇しない。しかしながら、特に帯域が低下し、符号化レートの方が受信レートより大きい状態がある程度続くと、バッファは枯渇し再生が停止してしまう。そこで、このような状態を回避するため、エンドツーエンド型でクライアントからバッファ使用量を報告させ、閾値を下回る場合、バッファがある程度溜まるまでサーバからの送出レートおよび符号化レートを基本レート制御で決定した値よりも一定率増加させる。この報告するバッファ使用量について我々は、バッファ内パケット量ではサーバが実際に必要なバッファ消費時間が見積もれないと判断した。なぜなら、バッファ内のパケット量が大きくてもパケットの符号化レートが大きければ、再生によりバッファが短時間で消費されバッファ枯渇になりかねないからである。このため、クライアントバッファ中の最初と最後のパケットの再生時間を取得し、サーバ側に通知することとした。このときさらに、ネットワーク情報として中継キューの使用量が大きいことが通知されると、サーバは基本レート制御で決定した送出レートより一定率低下させた符号化レートのコンテンツを取得する。しかしながら、求めたコンテンツを基本レート制御で決定した元の送出レートで送信する。このようにネットワーク情報型では符号化レートを低下させながら送出レートを維持することで、送出レートを一定に保ちながらクライアントバッファを回復させることができる。したがって、クライアントバッファ枯渇と中継キューの溢れを防止することが可能となる。

(3) 再送制御

本システムでは、無駄な再送の回避のため、エンドツーエンド型でサーバ・クライアント間の RTT を考慮しながら再送可否判断をサーバ側で行っている。具体的には、サーバは RTP で定義された測定方法により毎秒 RTT を測定し、クライアントから報告される RTP 再生時刻と比較することにより、再送パケットが再生時刻に間に合うかどうかを判断し、間に合う重要度の高いパケットのみを再送している。このときさらに、ネットワーク情報の中継キュー使用量をもとに、再送パケット送出レートと通常のストリームの送出レートの制御を行い、再送パケットによるネットワーク輻輳を回避する。すなわち、ネットワーク情報により中継バッファが少なければ基本レート制御で決定した送出レートに再送パケットを加算して送出する。一方、中継バッファが多くなっていけば通常の転送パケットと再送パケットを合わせて基本レート制御で決定した送

出レート内に収まるよう、通常の転送量を低下させる。

(4) 在圏・圏外処理

エンドツーエンド型での圏外流出のサーバ・クライアント側での認識は、RTCP/RTP 未受信タイムアウトによる。このときは、サーバ・クライアント独立にセッション一時停止状態に移行する。さらにクライアントはデータリンクからの通知などにより圏内流入を検知すると、サーバ側へ RTSP を用いて在圏通知を送信し、サーバはセッションを再開する。しかし、このエンドツーエンド型の在圏・圏外処理は RTCP パケットの未受信をトリガとしているため、輻輳により中継ノードで RTCP パケットが廃棄されたのか、圏外によるものかの区別が難しい。このため、RTCP 未受信タイムアウトのタイマ設定値が小さすぎると、ネットワーク輻輳時を圏外と誤認識し、セッションが途切れることが予想される。一方、ネットワーク情報活用型制御においては、中継ノードからの在圏、圏外通知によりサーバは在圏・圏外処理に入る。すなわち、圏外流出時は現在のセッションの状態を保存して一時停止状態に入り、圏内流入時は即座に続きからセッションを再開する。

4. 設 計

提案方式を組み込んだ QoS システムの構成図を図 4 に示す。本 QoS システムは Windows98/2000 上で動作し、MPEG4 データ転送ストリームとその制御用コネクションとの 2 系統の通信を司る。

まず、各モジュールを説明する。図左がクライアント、右がサーバ、下が中継ノードを示す。サーバは、コンテンツ管理やユーザ情報の管理を行うアプリケー

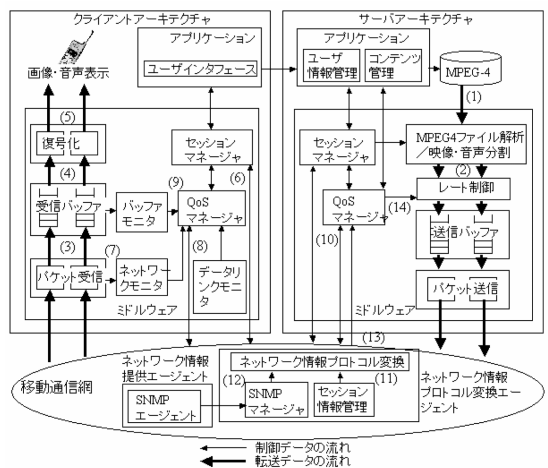


図 4 モバイル QoS システム設計図
Fig. 4 Designs of mobile QoS system.

ションと、コンテンツファイルの読み込みや RTP パケット転送を行う MPEG-4 解析・レート制御・パケット送信モジュール、RTSP によりセッション制御を行うセッションマネージャと RTCP によりレート判定などを行う QoS マネージャに分かれる。クライアントは、ユーザインタフェースとなるアプリケーションと、RTP パケットの受信・バッファリングや MPEG-4 の復号化モジュール、さらにパケットの受信状況をモニタリングするネットワークモニタ、クライアントバッファの使用量をモニタリングするバッファモニタと、監視結果を RTCP でサーバ側に通知する QoS マネージャ、QoS マネージャに対しワイヤレスリンクの状態を通知するデータリンクモニタ、サーバ側と RTSP の交換を行うセッションマネージャから成る。移動通信網の中継ノードには、SNMP エージェント機能となるネットワーク情報提供エージェントと、網上のセッション情報を取得し、セッションごとに SNMP エージェントに問合せを行い結果をプロトコル変換するネットワーク情報プロトコル変換エージェントがある。

次に、ストリーミング通信の流れを示す。MPEG-4 ストリームの構成をサーバ・クライアント間で RTSP を用いて交換後、ストリーミングを開始する。サーバ側では MPEG-4 のコンテンツファイルを読み込み (1)、映像と音声データを別々の RTP セッションとしてネットワークに送信する (2)。クライアント側では RTP パケットを受信すると受信バッファに格納する (3)。また、定期的に受信バッファからデータを取り出し (4)、復号化して表示する (5)。再生中、停止や解像度切替えなどのセッション制御はユーザインタフェースを介してセッションマネージャ間でやりとりされる (6)。一方、MPEG-4 ストリーミングと並行して、ネットワークモニタは受信パケットの RTP ヘッダをモニタリングし (7)、受信状況を RR としてサーバ側へ応答する (8)。さらに受信バッファモニタは受信バッファの RTP パケットタイムスタンプ情報を APP (Application-defined RTCP packet) としてサーバ側へ応答する (9)。サーバは、これらのエンドツーエンド型ネットワーク情報を受信すると (10)、RR のパケットロス率などの値からクライアントの受信レートを算出し、結果により解像度に対するユーザの優先度に応じた QoS 制御を行う。これに加え、網内に存在するネットワーク情報プロトコル変換エージェントは、ネットワーク上のセッションをモニタリングし、サーバ・クライアントそれぞれの IP アドレスやポート番号などのセッション情報を取得する (11)。さらにネットワーク情報提供エージェントから MIB 情報を取得

する (12) と、あらかじめ保持するセッション情報を元に RTCP 制御パケットへの変換を行い、APP としてサーバへ応答する (13)。サーバは、このネットワーク情報を受信すると、バッファ占有率やチャンネルレートなどの値からネットワーク情報活用型レート制御を行う (14)。

5. 実装評価

提案方式を試作開発中のモバイル QoS システム上に実装し、IMT-2000 ネットワークシミュレータ装置¹⁷⁾を介してサーバクライアント間でストリーミング配信実験と評価を行った。評価条件を表 3 に、実験構成図を図 5 にそれぞれ示す。特にネットワーク特性となる帯域変動については、第 3 世代移動網である IMT-2000 パケットを対象としており、64, 128, 384 kbps などの各チャンネルレートが用意されているため、これらのレートを階段状に変化させるようにした。以下、基本特性として平均パケットロス数、帯域変動追従性、さらにレート制御以外の制御との関連性における評価結果について述べる。

5.1 平均パケットロス数

帯域変化を施した場合の、ネットワーク情報活用型レート制御とエンドツーエンド型レート制御のパケットロス数の比較結果を表 4 に示す。さらに、中継のネットワークシミュレータ装置においてはワイヤレスリンク上の PDU パケットエラー率を 0%, 5%, 10% とした。この測定条件の下で RTP の受信パケット数およ

表 3 評価条件

Table 3 Evaluation condition.

条件	値
チャンネルレート	64, 128, 384 kbps
最大バッファ量	40 kbytes
パケットロス率	0, 5, 10%

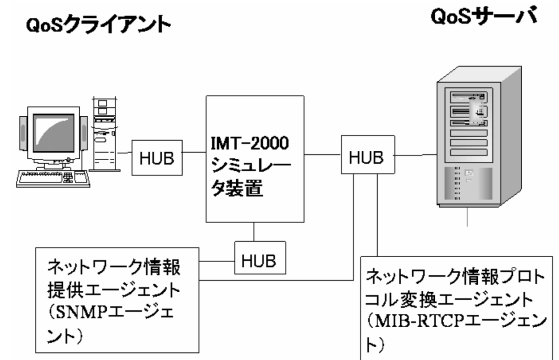


図 5 実験環境構成図

Fig. 5 Experiment environment.

表 4 帯域変化時のエンドツーエンド型およびネットワーク情報活用型レート制御の平均パケットロス数/秒の比較

Table 4 Evaluation of the averaged number of packet loss for end-to-end and network information using rate controls.

測定条件 (kbps)	エンドツーエンド型			ネットワーク情報活用型		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
64	1.37	1.64	1.57	0.46	0.67	0.68
64-128	1.54	1.67	1.69	0.49	0.88	0.73
64-128-64	1.49	1.56	2.10	0.61	0.51	0.97
64-384	1.36	1.59	1.62	0.51	0.73	0.78
64-384-64	2.99	2.16	2.01	0.86	0.93	1.10
128	0.93	1.16	1.08	0.30	0.25	0.42
128-64	1.16	0.93	0.99	0.30	0.27	0.45
128-64-128	1.31	1.31	0.93	0.34	0.32	0.60
128-384	0.84	0.97	0.99	0.34	0.33	1.00
128-384-128	1.51	0.98	1.34	0.49	0.45	0.47
384	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
384-64	1.49	0.49	0.64	0.13	0.25	0.20
384-64-384	1.45	0.92	0.79	0.20	0.27	0.48
384-128	0.74	0.54	0.06	0.12	0.13	1.71
384-128-384	0.68	0.18	0.00	0.02	0.08	0.13

びパケットロス数を観測し、測定時間で平均化した。この結果、ほとんどの場合においてネットワーク情報活用型の方がパケットロスが少ない。すべてのケースを平均すると、ネットワーク情報活用型の平均パケットロス数/秒は 0.47 でエンドツーエンド型は 1.13 であった。

帯域変動時、特に帯域が 384 kbps → 64 kbps など低下したときにエンドツーエンド型とネットワーク情報型のパケットロス数の差が大きくなる。これは、帯域が低下した直後は中継ノードのキュー使用量が急速に大きくなることによる。このとき、エンドツーエンド型ではサーバからクライアントに送信される SR (Sender Report) の応答としてクライアントからサーバへ送られる RR により RTT を測定し、中継ノード滞留量を計っている。しかしながら、帯域が低下してキュー使用量が增大したときには、この SR がクライアントになかなか届かず、その結果今回の測定では SR が届かない 4 ないし 5 秒間の RTT は帯域が減少する前の時点の RTT と同値に計算される。例を図 6 に示す。サーバが SR2 を送信後、ネットワーク輻輳が発生すると、クライアントでの SR2 の到着が遅れ、その前に RR2, RR3, RR4 は SR1 の送信時刻を指定してクライアント側に送信されている。これらの情報からクライアントは、輻輳前の SR1 の下り遅延時間と、RR2, RR3, RR4 の輻輳していない上りの遅延

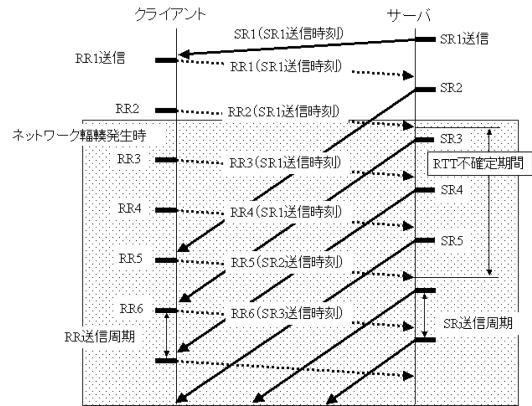


図 6 ネットワーク輻輳時の SR と RR の交信タイミング
Fig. 6 Exchanges of SR and RR at network congestion.

時間の和を RTT とするため、SR1-RR1 間の遅延時間の値と変わらず計算される。このため、エンドツーエンド型では、帯域低下時のレート追従性が悪化し、パケットロスを引き起こす。一方、ネットワーク情報活用型では中継ノードからキュー使用量、チャンネルレートが報告されるため、帯域低下時もキュー量増大による RTT の測定不可能状態を、報告されるバッファ使用量で修正できる。

また、エンドツーエンド型は特に帯域の小さい 64 kbps の測定条件のときに、ネットワーク情報活用型と比較してパケットロスが大きい。これは、レート制御のアルゴリズムがバッファの理想値 (B_{exp}) を 384 kbps に合わせた固定値としているため、帯域が小さいほど RTT が大きくなるためである。これから、エンドツーエンド型では前述の理由と同様に、RTT の測定不可能状態が長くなり、ネットワーク滞留量の判断を誤ってパケットロスが生じるのに対し、ネットワーク情報活用型ではバッファ使用量でレート判断の補正を行っている。

5.2 帯域変動への追従性

帯域使用率(受信レート/チャンネルレート)の 80 秒間の平均値を表 5 に示す。すべてのケースを平均すると、ネットワーク情報活用型の帯域使用率は 69% でエンドツーエンド型は 59% であった。このように、ネットワーク情報型の方がエンドツーエンド型より帯域使用率が高く、ネットワーク帯域を有効利用できているといえる。この主な理由としては、エンドツーエンド型はバッファ使用量の変化のふれ幅が大きく、特に帯域幅が急に増大したときや通常のレート制御により RTT が増大して送出レートを低下させた後に中継バッファ使用量の枯渇が見られる。しかし、ネットワーク

A-B-C とは、最初帯域を A kbps で開始し 20 秒後に B kbps、40 秒後に C kbps に設定を変更したことを示す。

表5 帯域変化時のエンドツーエンド型およびネットワーク情報活用型レート制御の帯域使用率(%)の比較

Table 5 Evaluation of the bandwidth usage for end-to-end and network information using rate controls.

測定条件 (kbps)	エンドツーエンド型			ネットワーク情報活用型		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
64	57	51	45	56	49	90
64-128	61	58	50	66	60	53
64-128-64	62	56	50	65	59	54
64-384	74	50	45	78	73	71
64-384-64	69	57	47	74	68	60
128	65	64	59	72	66	64
128-64	65	58	51	66	58	55
128-64-128	67	62	55	72	69	60
128-384	75	55	46	78	72	69
128-384-128	72	56	53	79	77	68
384	80	57	53	82	75	68
384-64	83	56	50	81	74	65
384-64-384	74	52	45	76	71	62
384-128	78	62	57	81	74	61
384-128-384	76	55	48	79	74	71

情報活用型ではこれらの制御判断のふれをバッファ使用量で補正しているため、バッファ使用量の変化は小さく、中継ノードのバッファが枯渇することはない。もう1つの理由として、符号化レートの設定値に対して実際の符号化レートはつねに変動している。そのため、判断した送出レートと実際の送出レートに食い違いが生じることがあり、このとき中継ノードのバッファ量は一時的に低下する。このような状況でも、ネットワーク情報活用型ではバッファ使用量低下の報告を受信し、エンドツーエンド型よりも早く送出レートを増大させるため、中継ノードのバッファ枯渇の回避となっている。

5.3 再送制御との関連性

次に再送制御との関連を調査するため、ワイヤレスリンク上で中継キューが溢れてパケットロスした場合、インターネット側でランダムにパケットロスした場合のロスパターンを発生させ、再送を行う実験を行った。このようにロスパターンを2種類用意したのは、同じキュー溢れの現象でもワイヤレスリンクとインターネットなどの有線リンクとでは、網の特性が異なるためである。具体的には、ワイヤレスリンクの方は、リンク上のエラー率が高くなるとARQによりRTTが長くなり、最終的にキュー溢れによるパケットロスを起こす。一方、有線の場合にはワイヤレスリンクと比較すると、RTTが伸びる前にすでにバッファ溢れを起こしている。これらの2ケースにおける再送制御の効果を計った。

まず、無線リンク側のネットワーク帯域幅をストリーミング開始20秒後に384→64kbpsに落とした場合

表6 再送制御の効果の比較

Table 6 Evaluation of effects of retransmission controls.

ネットワーク情報	再送	全送信 パケット 数	パケット ロス率 (受信)	パケット ロス率 (表示)
ネットワーク型	有	1,236	0.0%	0.0%
エンドツーエンド型	有	1,352	11.9%	10.6%
エンドツーエンド型	無	1,507	7.5%	13.1%

の受信時のパケットロス率と再送後の表示直前で無効となったパケット率を、ネットワーク情報活用型とエンドツーエンド型とで比較した結果を表6に示す。表示時の無効パケットには、再送に間に合わなかったパケットにMPEGのIフレームがロスしたことによる後続のPフレームのパケット無効数も加算されている。表6が示すようにエンドツーエンド型で再送なしの場合に、表示時のパケットロス率が受信時のパケットロス率より大きい。これはIフレームのロスによるPフレームのパケットの無効化による。しかし、エンドツーエンド型でも再送ありの場合には、Pフレームのパケットの無効化はあるものの再送で間に合っているパケットもあり、その分受信時より表示時のパケットロス率は小さくなっている。しかし、エンドツーエンド型では再送しているにもかかわらずパケットロスが発生している。これは、帯域が64kbpsに落ちたときにバッファ溢れが生じ、再送が行われたがRTTが伸びているために一部の再送パケットが表示時間に間に合わなかったことによる。さらに、再送した方が受信時のパケットロス率が多くなっているのは、再送によりさらに中継バッファを圧迫したためである。

さらに図7に、表示直前のパケットロス数をネットワーク情報ありなし/再送ありなしにおいて示す。パケットロス数には、MPEGのIフレームがロスしたことによる後続のPフレームのパケット無効数も加算されている。グラフから、ネットワーク情報がないエンドツーエンド型では384→64kbpsの輻輳時には再送ありなしの違い(図7、中と下のグラフ)が見られず、再送しているにもかかわらずパケットロス数はほとんど変わらない。再生あり時の中継バッファ使用量を図8に示す。エンドツーエンド型レート制御では、64kbpsに落とした20秒から最大バッファ使用量(あらかじめ40kbytes指定)付近が続いている。このため、輻輳時の再送パケットすらロスし、ベースとなる基本レート制御がうまく機能しておらずバッファ溢れが発生している場合には、再送制御の効果も得られない。

次に、インターネットでのパケットロスを模擬する

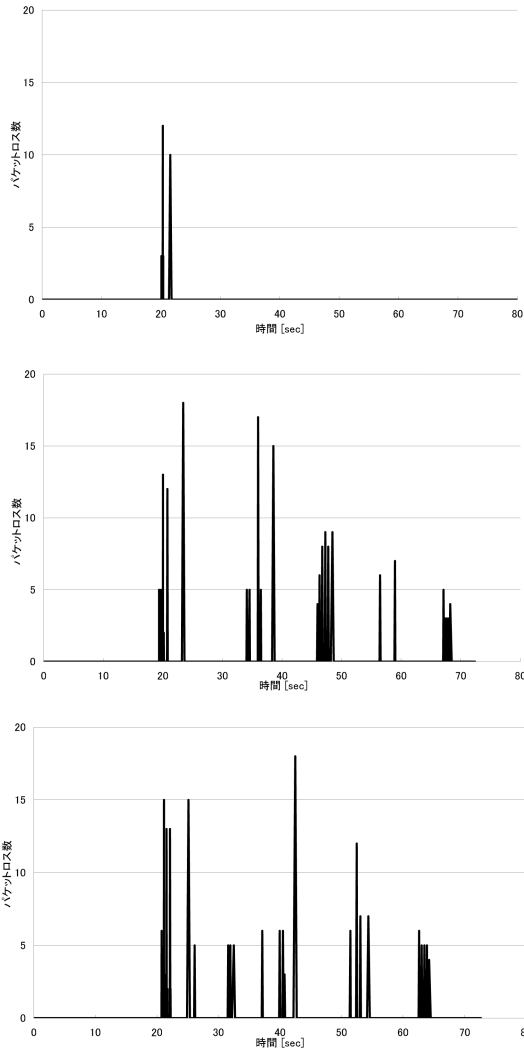


図7 20秒時点で帯域変動(384→64kbps)を行った場合の表示直前のパケットロス数(上:ネットワーク情報あり再送あり,中:ネットワーク情報なし再送あり,下:ネットワーク情報なし再送なし)

Fig. 7 The number of packet loss just before displaying at the bandwidth change (up: with network information and retransmission, middle: retransmission without network information, down: without network information nor retransmission).

ため,サーバ-エラー発生装置-IMT-2000 ネットワークシミュレータ装置-クライアントという接続環境において,ネットワークシミュレータ装置の帯域は変動させず(64kbps一定),エラー発生装置においてパケットをロスさせた場合のネットワーク情報活用型とエンドツーエンド型の再送制御の効果の比較を表7に示す.エラー発生装置には,遅延50msec,IPパケットロス発生率はポアソン分布で5%を指定した.本比較結

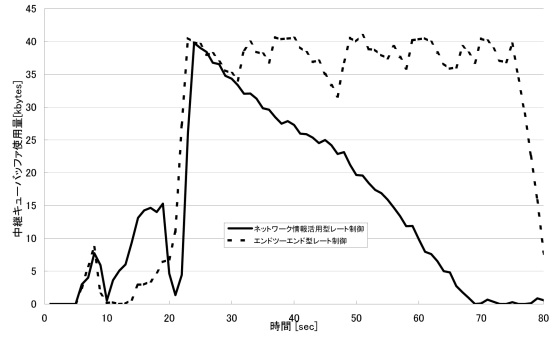


図8 中継キューバッファ使用量変化(20秒時点で384→64kbps)

Fig. 8 Usage of intermediate queue buffer (384→64kbps at 20 sec).

表7 再送制御の効果の比較(2)

Table 7 Evaluation of effects of retransmission controls (2).

ネットワーク情報	再送	全送信 パケット 数	パケット ロス率 (受信)	パケット ロス率 (表示)
ネットワーク型	有	238	2.9%	0.0%
エンドツーエンド型	有	290	3.8%	4.1%

表8 在圏・圏外制御時のパケットロス数

Table 8 The number of lost packets at in-range and out-range controls.

ネットワーク情報	パケットロス数
ネットワーク型	58
エンドツーエンド型	258

果から,無線リンク側での帯域は一定でインターネット側でパケットロスが生じた場合にも,ネットワーク情報活用型の方が再送制御がより効果的に機能していることが分かる.この理由も前述のように,基本レート制御により中継バッファの使用量が大きく変動しており,特に使用量が大きいときに再送すると,ますますバッファ使用量が増大し,ロスを助長させる結果となったためである.

5.4 在圏・圏外の評価

最後に,在圏・圏外制御時の効果を計るために,前述の実験環境においてネットワークシミュレータ装置で一時的にチャンネルをダウンさせ,サーバ・クライアントで在圏・圏外制御時のパケットロス数を測定した.実験では,セッション開始時は384kbpsの帯域設定を行い,20秒後から40秒後の20秒間チャンネルを一時ダウンさせ,40秒後以降は384kbpsの帯域を回復させた.その結果,表8に示すようにネットワーク情報活用型の方がエンドツーエンド型に比較してパケッ

トロスが少なくなった。これは、エンドツーエンド型では、サーバ側で圏外を検知するまでに RTCP 未受信タイムアウトが発生する 5 秒間は無駄にパケットを転送しているためである。しかしネットワーク情報活用型では、SNMP エージェントへのネットワーク情報の要求を 1 秒間隔で行っているため、最大 1 秒の検出遅れと中継ノードからサーバまでの遅延時間の和分の遅れで収まる。このため、クライアントの圏外流出時にエンドツーエンド型の方がパケットロスが大きくなる。

6. ま と め

本研究では、高速化する次世代移動通信網でのストリーミング配信サーバにおいて、エンドツーエンド型の受信情報と網からのネットワーク情報の両者を総合的に判断した効果的なレート制御方式を提案した。また、提案方式を Windows 上のモバイル QoS システムに組み込み実装した。IMT-2000 ネットワークシミュレータ装置を用いた評価実験では、チャネルレート変動時、エラー率設定時 (0%, 5%, 10%) のそれぞれにおけるパケットロス数、帯域使用率の点から、ネットワーク情報活用型はエンドツーエンド型に比べて、パケットロスを小さく抑えながらも帯域使用率が大きくネットワーク資源の有効利用が図られていることが分かった。さらに、再送制御や在圏・圏外制御などのモバイルストリーミングシステムに不可欠な制御において、ネットワーク情報活用型と併用した方が効果が高いことが明らかになった。今後は、IMT-2000 から無線 LAN を含む新世代移動通信網における QoS ブロキシ方式などについて検討していく。

謝辞 無線データリンクシミュレータを提供してくださった NTT ドコモマルチメディア研究所の稲村浩主任研究員、石川太郎社員に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 澤田, 有馬: IMT-2000 ネットワークアーキテクチャ, 信学会誌, Vol.82, No.2, pp.145-0152, 電子情報通信学会 (1999).
- 2) 高木, 加藤, 渋谷, 森谷, 坂本: ハイブリッド MMAC 実験システムにおけるネットワーク機能, *DICOMO2001* (June 2001).
- 3) Aurrecochea, C., Cambell, A.T. and Hauw, L.: A Survey of QoS Architecture, *ACM Multimedia Sys. J.* (May 1998).
- 4) Transparent end-to-end packet switched streaming service (PSS); Protocol and codecs, 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Service and System As-

- pects, 3GPP TS 26.234 V1.5.1 (Mar. 2001).
- 5) QoS Concept and Architecture, 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Service and System Aspects, 3GPP TS 23.107 V3.2.0 (Mar. 2000).
- 6) Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R. and Jacobson, V.: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, RFC1998, IETF (Jan. 1996).
- 7) Schulzrinne, H., Rao, A. and Lanphier, R.: Real Time Streaming Protocol, RFC2326, IETF (Apr. 1998).
- 8) Handley, M. and Jacobson, V.: SDP: Session Description Protocol, RFC2327, IETF (Apr. 1998).
- 9) Kikuchi, Y., Nomura, T., Fukunaga, S., Matsui, Y. and Kimata, H.: RTP Payload Format for MPEG-4 Audio/Visual Streams, RFC3016, IETF (Nov. 2000).
- 10) 安木, 渥美, 高橋, 尾上, 黒川, 串田, 富田, 山内: 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, *DICOMO2001* (June 2001).
- 11) 串田, 富田, 黒川, 山内, 尾上, 安木, 渥美, 高橋: モバイルマルチメディア QoS の構成方式, *DICOMO2001* (June 2001).
- 12) Albuquerque, C., Vickers, B.J. and Suda, T.: Network Border Patrol, *INFOCOM2000*.
- 13) Tamura, Y., Tobe, Y. and Tokuda, H.: A Neighbor-State Based Congestion Control Scheme for Adaptive Bandwidth Sharing, *Trans. Information Processing Society of Japan*, Vol.41, No.2, pp.210-221 (Feb. 2000).
- 14) Miyazaki, A., Fukushima, H., Hata, K., Wiebke, T., Hakenberg, R., Burmeister, C., Takatori, N., Okumura, S. and Ohno, T.: RTP Payload Formats to Enable Multiple Selective Retransmissions, Draft-ietf-avt-rtp-selret-03.txt, IETF (May 2002).
- 15) Case, J., Fedor, M., Schoffstall, M. and Davin, J.: SNMP: A Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC1157, IETF (May 1990).
- 16) 駒木, 村尾, 串田, 尾上, 萩野, 石川, 稲村, 山内: 中間ネットワーク情報を用いたワイヤレスストリーミング QoS 制御, 移動通信ワークショップ (Mar. 2002).
- 17) 稲村, 石川, 高橋: W-CDMA 網での TCP トラフィック特性評価, MBL 研究報告, 情報処理学 (Sep. 2001).

(平成 14 年 6 月 24 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



尾上 裕子(正会員)

平成元年慶應義塾大学理工学部数
理科学科卒業。平成3年同大学大
学院修士課程修了。同年NTT入社。
現在NTTドコモマルチメディア研
究所主任研究員。携帯用IPの応用
技術の研究に従事。電子情報通信学会会員。



萩野 浩明(正会員)

平成13年大阪大学大学院工学研
究科博士課程修了。工学博士。同年
(株)NTTドコモ入社。マルチメディア
研究所にて、モバイルマルチメディア
通信プロトコルの研究に従事。



渥美 幸雄(正会員)

昭和50年慶應義塾大学工学部電
気工学科卒業。昭和52年同大学大
学院修士課程修了。同年電電公社(現
NTT)横須賀電気通信研究所入社。
主に通信プロトコル、通信制御ソフ
トウェアの研究開発に従事。平成6年より(株)超
高速ネットワーク・コンピュータ技術研究所。プロトコ
ルアーキテクチャの研究に従事。平成11年より(株)
NTTドコモ・マルチメディア研究所に勤務。次世代
のモバイルインターネット方式の研究開発に従事。博
士(情報工学)。電子情報通信学会会員。



高橋 修(正会員)

昭和50年北海道大学大学院工学
研究科修士課程修了。同年電電公社
(現NTT)入社。情報通信研究所で
コンピュータネットワークアーキテ
クチャの研究開発、およびOSIの標
準化に従事。平成11年より(株)NTTドコモ・マル
チメディア研究所に勤務。モバイルインターネットの
研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



駒木 寛隆

平成11年東京大学工学部電子工
学科卒業。平成13年同大学大学院
工学系研究科電子情報工学専攻修士
課程修了。同年日本アイ・ピー・エ
ム(株)入社。東京基礎研究所にて
モバイル・マルチメディアシステムの研究開発に従事。
専門分野は、情報セキュリティ、暗号プロトコル、モ
バイル・マルチメディア。



串田 高幸(正会員)

昭和60年日本アイ・ピー・エム
(株)入社。同年サイエンス・インス
ティテュート(現東京基礎研究所)
配属。入社以来、ネットワークゲ
ートウェイ、超高速ネットワークプロ
トコル、信頼性マルチキャストプロトコル、インター
ネット・トラフィック測定評価、エンドエンド・パフォー
マンス解析の研究に従事。平成12年よりワイヤレス
マルチメディア QoSの研究に従事。現在、日本アイ・
ピー・エム(株)東京基礎研究所に研究員として勤
務。平成12年より情報処理学会マルチメディア通信
と分散処理研究会幹事、情報処理学会論文誌編集委員。
IEEE, ACM 各会員。



山内 長承(正会員)

昭和50年東京大学工学部電子工
学科卒業。昭和58年同大学大学院情
報工学専門課程中退。昭和53年~
59年スタンフォード大学大学院在
学。昭和59年~平成12年日本ア
イ・ピー・エム(株)勤務。平成12年より東邦大学理
学部情報科学科助教授。平成14年より同教授。主と
してOS、並列プログラムの検証、計算機ネットワ
ークの応用の研究開発に従事。工学博士。ACM, IEEE,
日本ソフトウェア科学会各会員。