

ベストエフォート型移動通信における フィードバック型動画像ストリーム制御の検討

森川大補[†] 太田慎司[†]
山口明[†] 大橋正良[†]

ベストエフォート型移動パケット通信において動画像ストリームサービスを提供する場合、無線リンクの帯域変動や遅延変動の影響による動画像ストリームの再生品質の劣化を防ぐこと、すなわち、与えられた帯域や遅延の中で可能な限り動画像品質を保証することが重要となる。そこで、本論文では、ベストエフォート型移動パケット通信を対象とした動画像ストリーム制御方式を提案する。提案方式では、まず、輻輳の起こる可能性の高い基地局ノードのバッファ量の推移を周期的にモニタリングすることによりレート変更のタイミングを検出し、ゲートウェイへ通知する。続いて、ゲートウェイでは、通知情報やその時点での送出レートをもとに、動画像ストリームの送出レートを再計算する。このとき、ゲートウェイでは、優先度の高い動画像フレームを配信することにより、動画像ストリームを設定された送出レート内に抑えている。さらに、本論文では、提案方式による動画像ストリーム制御を行った場合の有効性を、ベストエフォート型移動パケット通信を想定した計算機シミュレーションにより検証する。シミュレーション結果から、各ユーザへ配信するデータ量が適切に調整され、無線リンクの変動により生じるフレームロスが抑制されることを示すとともに、提案方式における各種パラメータの設定値に関する考察を示す。

A Study of Feedback Rate Control of Video Stream in Best-effort Mobile Packet Network

DAISUKE MORIKAWA,[†] SHINJI OTA,[†] AKIRA YAMAGUCHI[†]
and MASAYOSHI OHASHI[†]

Video stream services in the mobile packet network have recently been deployed. It is important to mitigate the deterioration of quality in video playback due to dynamic change in a wireless bandwidth and delay. This paper proposes a rate control mechanism for video stream service in best-effort high-speed mobile packet network. Proposed mechanism is characterized by a feedback control between an AP (Access Point) and a GW (Gateway). The buffer occupancy at an AP is periodically monitored to detect an indication of buffer overflow and underflow. If the indication is detected, the current state of buffer occupancy is notified to a GW and the target transmission rate (*TargetRate*) is recalculated. And the traffic volume of video stream, which is the selective transmission of video frames with higher priority, is controlled based on *TargetRate* at a GW. Moreover, the proposed mechanism is evaluated in a network simulator composed of best-effort mobile packet network and the proposed rate control mechanism of video streams. It is verified that the traffic volume is adaptively controlled to avoid congestion due to dynamic change in a wireless bandwidth and it is presented how to set parameters in the proposed control mechanism.

1. はじめに

移動パケット通信において、動画像再生機能を搭載した携帯電話端末への動画配信サービスが開始されている。現在、数十秒程度の動画像データをいったん蓄積してから再生するダウンロード方式と、ファイルを受

信し始めたら再生を開始するストリーミング方式が採用されている。今後、利用者の増加、コンテンツの増加とともに、より長時間の動画像データを配信する需要が高まると想定される。また、3GPP (Third Generation Partnership Project) における HSDPA (High Speed Downlink Packet Access¹⁾) 方式や 3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2) における cdma2000 1x EV-DO 方式²⁾ のような、ベストエフォート型の移動パケット通信においても動画配信は

[†] ケイディーディーアイ研究所
KDDI R & D Laboratories Inc.

有力なサービスの1つになると想定される。

ダウンロード型の動画配信では、配信データサイズに見合う蓄積データ領域が携帯電話端末に必要である。それに対して、ストリーミング型の動画配信では、再生済みのデータは破棄するため、再生開始までにバッファリングするデータサイズに見合う蓄積データ領域があればよく、携帯電話端末に大きなデータ格納領域を必要としない。このため、長時間の動画配信サービスを行う場合は、ストリーミング再生が有効な手段であると考えられる。

ストリーミング配信においては、到達保証よりも実時間性が要求される。そこで、本論文では、ストリーミング配信におけるトランスポートプロトコルとしてUDPを利用する場合を想定する。UDPでは、フロー制御機構がないため、ネットワークの帯域変動や遅延変動と関係なく、送出可能なデータすべてを送出してしまう。その結果、回線の利用可能帯域を上回るデータ量の送信により、途中の中継ノードにおいてバッファ溢れが生じたり、中継ノード内のバッファ滞在時間の変動により、パケット到着時間の変動(ジッタ)が大きくなる。さらに、ベストエフォート型移動パケット通信では、無線リソースの有効利用を図ることを目的に、適応変調方式を採用している。このため、電波の受信状況等により、無線リンクのベアラ速度や無線リンクスケジューリングによる遅延変動が、ミリ秒オーダーで変動する。したがって、ベストエフォート型の移動パケット通信では、有線通信に比べてネットワークの帯域変動や遅延変動はさらに大きくなる。

中継ノードや受信クライアント上のバッファが溢れてパケットがランダムに廃棄される場合や、受信クライアントで描画すべき時刻までにデータが到着しない場合、受信クライアントでは、適切に動画データを復号・描画できず、品質劣化が起こる。たとえば、MPEG4方式における動画データは、I、P、Bフレームから構成され、Iフレームは単独で復号可能であるが、Pフレームの復号はIフレームを必要とし、Bフレームの復号はI、Pフレームを必要とする。このため、Iフレームが欠落した場合、Iフレームの復号のみだけでなく、欠落したIフレームを利用するPフレームやBフレームも復号できなくなる。同様にPフレームが欠落した場合、Pフレームの復号のみだけでなく、欠落したPフレームを利用するBフレームも復号できなくなる³⁾。

このようなネットワークの帯域変動や遅延変動による動画再生の品質劣化を防ぐための方法として、RSVP (Resource Reservation Protocol)⁴⁾等の送出する動

画像データに対して十分な帯域およびサービス品質を確保する仕組みが検討されている。しかし、ベストエフォート型の移動パケット通信では、無線リンクにおいて固定的な帯域を確保することができないため、これらの仕組みを適用することができない。そこで、無線リンクが変動することを前提とし、与えられた帯域やサービス品質の中で、可能な限り動画ストリーミングの品質を保証することが重要である。このような問題に対処する方法の1つは、送出側であらかじめ送出する動画フレームを選別して、優先度の高いフレームを配信し、送出トラフィックを伝送可能なレート内に抑える制御を行うことである。

送出トラフィックのレート制御を行うためには、サーバもしくはサーバ-クライアント間に位置するゲートウェイ上に、レート変更を行う機能を配備する必要がある。レート変更機能の実現方法として、主に、2つの方法が報告されている^{5),6)}。1つは、配信するビデオストリームをあらかじめ複数のサブストリームに分割しておき、ネットワーク状況に応じて、統合するサブストリームの数を適切に変更する方法である(以下、階層型と呼ぶ)。この方法は、IPマルチキャストを利用したUDPベースのビデオ伝送において提案されている⁵⁾。もう1つは、トランスコーダを用いる方法である(以下、レート制御型と呼ぶ)。トランスコーダとは、ビデオストリームをいったん復号した後、再符号化するものであり、MPEG2トランスコーダの性能向上に関する研究⁶⁾等が報告されている。

これらのレート変更機能を利用した動画配信の品質を向上させるための制御方式について、受信側からの情報通知に基づくフィードバック型のレート制御を行う方法^{7)~10)}や、ネットワークノードからのフィードバックを行う方法¹¹⁾等が報告されている。

文献7)では、レート変更方法として階層型を想定し、受信側からのフィードバックにより制御を行う方法を報告している。データ送信は、最低レートの送信パターンから開始し、受信側で輻輳を検出しなければ、現状より送信レートの高い送信パターンに変更する。逆に、受信側で輻輳を検出したら、現状より送信レートの低い送信パターンに変更する。ここで、輻輳の検出は、シーケンス番号の抜けを検出した場合、もしくは、一定時間を過ぎても次のシーケンス番号のデータが到達しない場合のいずれかである。上記の報告は、TCPフレンドリなレート制御手法であり、有線通信におけるバックボーンにおいてUDPトラフィックとTCPトラフィックの公平性を検討したものであるが、本手法を移動パケット通信に適用する場合、いくつか

の問題点が生じる。

まず、無線リンクにおいて誤りが発生した場合、受信側では正しいデータとして復号できない。そのため、ネットワークが輻輳していない場合でも、無線リンクで誤りが生じたら、シーケンス番号の抜けがあるということで輻輳と判断してしまう。したがって、受信側でのフレームロスの検出をレート変更のトリガとする方法では、必ずしも適切なレート制御が適切に行われるとは限らない。また、ネットワーク上でパケットロスが発生した場合、その検出は受信側で行うため、レートの変更制御までに時間がかかってしまう。したがって、本手法では、理想的に制御が動作したとしても、確実にパケットロスを回避することができない。

また、文献 8) では、受信側のバッファをモニタリングしながら、送出するビデオストリーミングの階層を変更する方法が提案されている。ここでは、受信側のバッファ溢れを考慮しているが、中継ノードにおけるパケットの破棄については考慮されていない。移動パケット通信における輻輳は、無線リンクにおける帯域の変化により生じることが多い。すなわち、ボトルネックリンクの直前にある基地局ルータのバッファが溢れることにより、パケットが破棄される。したがって、ネットワーク上で発生したパケットロスを低減させることができない。

そのほかにも、文献 9) では、複数受信クライアントへのストリーム配信を想定した動画配信方式として、プロキシサーバおよび受信端末にリソースモニタリングモジュールを実装することにより、背景負荷に対応して QoS 調整を行う仕組みを提案している。同様に、文献 10) では、動画のフレームレートや解像度、オーディオの品質を制御する制御方式を提案しているが、上述の問題を解決することはできない。

これらの問題を解決するためには、受信側フィードバックによるエンド-エンドの制御方法よりも、ネットワーク上の輻輳が生じやすいノードをモニタリングし、その状態をフィードバックする方法が有効であると考えられる。文献 11) では、ネットワーク上のルータからのフィードバック情報により適切な階層を制御する方法を報告しているが、無線リンクのペアラが刻々と変化するようなベストエフォート型の移動パケット通信を想定していない。また、階層型の場合、階層数の変更のみを考慮すればよく、利用可能レートそのものを類推していないため、本手法をそのままレート制御型に適用することはできない。

そこで、本論文では、ベストエフォート型の移動パケット通信において UDP ベースの動画ストリーミ

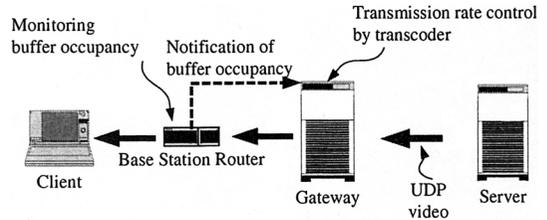


図 1 提案システムの構成

Fig. 1 Configuration of proposed system.

ング配信を行うことを想定したレート制御方式を提案する。また、簡単化されたレート変更機能を有するトランスコーダにより、提案制御方式の有効性をネットワークの帯域変動や遅延変動を考慮したシミュレーションにより評価した結果を報告する。

2. 提案制御方式

本論文では、輻輳が生じる可能性の高い基地局ルータのバッファ変動量を監視し、そのフィードバック結果に基づいて動画ストリームの出力レートを制御する方式を提案する。図 1 に示す提案システム構成では、従来サーバに配備されていたレート制御機能が、ゲートウェイに配備されている。その結果、提案方式では、レート制御に関する機能が、サーバ・クライアントのエンドノードではなく、ゲートウェイ・基地局ルータの中間ノードに配備されることになる。このため、動画の提供者や、動画を閲覧者はレート制御のための新たな機能の追加を必要としない。

次に、レート制御の提案方式について述べる。まず、ここでは、次の前提を想定する。

- レート変更方法はレート制御型とする。レート制御に用いるトランスコーダは、ターゲットとするコーディングレート $TargetRate$ を入力パラメータとし、それにあわせてトランスコーダ出力を制御する。
- バックボーン網の帯域は十分にあると考え、ネットワーク輻輳はアクセス網で起こる。

提案制御は、レート制御トリガの検出と $TargetRate$ の決定から構成される。レート制御トリガの検出は、輻輳の起こる可能性の高い基地局ルータのバッファ量の推移を一定周期 T_1 ごとにモニタリングし、バッファ量の推移が一定の条件を満たすかどうかをチェックすることにより行う。レート制御のトリガは、レート DOWN 指示とレート UP 指示からなる。図 2 に示すように、 N 回目にモニタリングしたバッファ蓄積量を q_N 、DOWN 条件閾値および UP 条件閾値をそれぞれ q_{upper} 、 q_{lower} とし、 q_{upper} を上回る領域、

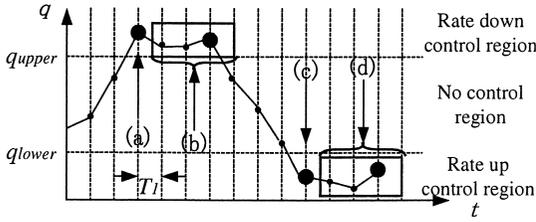


図2 レート変更指示のタイミング
Fig. 2 Timing of rate control trigger.

q_{upper} と q_{lower} の中間の領域, q_{lower} を下回る領域を, それぞれレート DOWN 指示領域, 無指示領域, レート UP 指示領域と呼ぶこととする.

レート DOWN 指示トリガの検出は, m を 1 以上の定数として,

(a) q_{N-1} がレート DOWN 指示領域でない, かつ, q_N がレート DOWN 指示領域である,

もしくは,

(b) q_{N-m+1}, \dots, q_N がレート DOWN 指示領域である,

を満たすときとする. レート UP 指示トリガの検出は,

(c) q_{N-1} がレート UP 指示領域でない, かつ, q_N がレート UP 指示領域である,

もしくは,

(d) q_{N-m+1}, \dots, q_N がレート UP 指示領域である, を満たすときとする. 図2には, レート DOWN 指示トリガおよびレート UP 指示トリガのタイミング例を示しており, 図中の (a), (b), (c), および (d) の矢印が, 上述のそれぞれの条件に対応する.

次に, レート変更条件が満たされた場合, ゲートウェイは, トランスコーダに設定する $TargetRate$ を, 基地局ノードから通知されたバッファ蓄積量の情報とその時点の送出レート $Rate$ から算出する. 以下, $TargetRate$ の算出方法を示す.

あるノードに着目した場合, 時間 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ におけるバッファの変化量 ΔQ は次式となる. ただし, バッファへの流入速度およびバッファからの流出速度をそれぞれ, R_{in}, R_{out} とする.

$$\Delta Q = \int_{T_0}^{T_0 + \Delta T} (R_{in} - R_{out}) dt. \quad (1)$$

ここで, レート変更の制御を行わない場合を考える. 時刻 T_0 の近傍において R_{in}, R_{out} は変化しないものと仮定し, T_1 をモニタリング周期, m を定数とすると, 時間 $[T_0, T_0 + m \times T_1]$ におけるバッファの変化量 ΔQ_{off} は, $\Delta R = R_{in} - R_{out}$ として,

$$\Delta Q_{off} \sim \Delta R \cdot (m \times T_1) \quad (2)$$

となる. また, ΔQ_{off} は, 時刻 $T_0 + m \times T_1$ にお

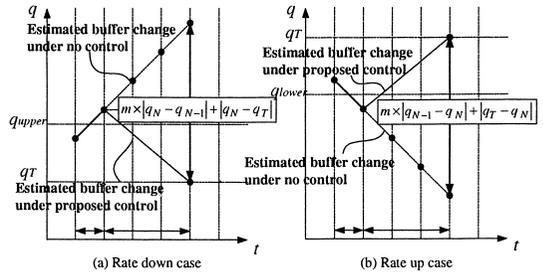


図3 TargetRate 算出方法
Fig. 3 The calculation method of TargetRate.

るバッファ蓄積量と時刻 T_0 におけるバッファ蓄積量の差でもある. そこで, ΔQ_{off} を, 今までのバッファ蓄積量変化の履歴をもとに類推することを考える. 最も簡単な方法として, 時刻 T_0 におけるバッファ蓄積量 q_N と時刻 $T_0 - T_1$ におけるバッファ蓄積量 q_{N-1} の差が当面続くと考えると,

$$\Delta Q_{off} \sim m \cdot (q_N - q_{N-1}) \quad (3)$$

となる. 以上より,

$$\Delta R \sim \frac{q_N - q_{N-1}}{T_1} \quad (4)$$

となる.

一方, レート変更の制御を行ったとき, 時刻 T_0 の時点で流入速度が制御を行わない場合に比べて δR 分減少し, 時刻 $T_0 + m \times T_1$ においてバッファ量がターゲットとするバッファ蓄積量 q_T となったとすると, 時間 $[T_0, T_0 + m \times T_1]$ におけるバッファの変化量 ΔQ_{on} は,

$$\Delta Q_{on} = q_T - q_N \quad (5)$$

$$\sim (\Delta R - \delta R) \cdot (m \times T_1) \quad (6)$$

となる. したがって, 制御を行った場合における減少レート分 δR は次式となる.

$$\delta R \sim \Delta R - \frac{q_T - q_N}{m \times T_1} \quad (7)$$

$$\sim \frac{m \times (q_N - q_{N-1}) + (q_N - q_T)}{m \times T_1}. \quad (8)$$

また, レート UP 指示トリガが出た場合も同様に算出する. 以上から, 提案方式では, レート DOWN 指示時およびレート UP 指示時に設定する $TargetRate$ は, ゲートウェイ側にバッファ情報として通知された今回のバッファ蓄積量 q_N および, 前回のバッファ蓄積量 q_{N-1} を用いて, それぞれ次式により算出する. なお, m は定数とする. また, あわせて算出方法の概略を図3に示す.

$$TargetRate = Rate - \delta R_1, \quad (9)$$

$$TargetRate = Rate + \delta R_2. \quad (10)$$

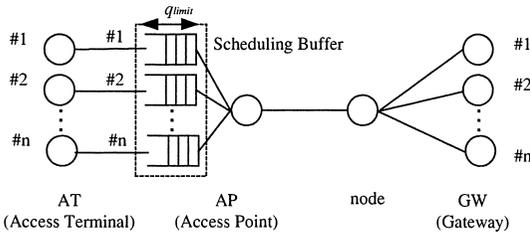


図4 シミュレーションネットワーク構成
Fig. 4 Configuration of simulation network.

ただし,

$$\delta R_1 = \frac{m \times |q_N - q_{N-1}| + |q_N - q_T|}{m \times T_1}, \quad (11)$$

$$\delta R_2 = \frac{m \times |q_{N-1} - q_N| + |q_T - q_N|}{m \times T_1} \quad (12)$$

である. さらに, トランスコーダのパラメータ変更回数は少ない方がよいため, 算出した *TargetRate* 値と現状の *TargetRate* 値の差分が一定値 *R* 未満である場合は, *TargetRate* 値は変更しないものとする.

なお, 無線リンクの帯域が極端に減少して, 実質的に動画ストリームの配信が困難となった場合, *TargetRate* 値は, *Rate* 値よりも小さい値に設定されるが, その後, 無線リンクの帯域が増大すれば, *TargetRate* も増大するため, 動画配信を継続することが可能である. また, 無線リンクの帯域が極端に増大した場合, *TargetRate* 値は *Rate* 値よりも大きい値に設定されるが, 実質的には, 元データのすべてが送信されることになる. その後, 無線リンクの帯域が減少すると, それに応じて *TargetRate* が再計算され, *TargetRate* に見合う動画ストリームが配信されることになる.

3. シミュレーション環境

提案方式の性能を評価するために, ns2^[12]をベースとしたシミュレーション環境を構築した. シミュレーションネットワークは, 図4に示すとおり, 入力動画データを変換した後に送出するトランスコーダを有する Gateway ノード (以下, GW), 無線回線の下りリンクの制御およびバッファモニタリングを行う Access Point (以下, AP), 受信クライアントを有する Access Terminal (以下, AT), および, 中継ノード (以下, node) から構成される. APでは, ATごとにバッファサイズ *qimit* のバッファが用意されている. なお, サーバから GW までのデータ転送は, 本シミュレーションの範囲外とする. また, 簡単のため, 1つのATに対して, 1つのGWノードを設定する. 以下では, シミュレーションにおける各機能モデルを

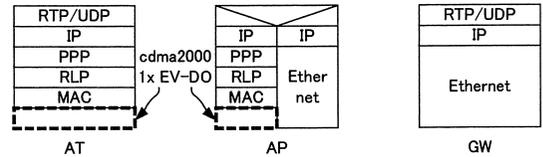


図5 シミュレーションネットワークにおけるプロトコルスタック
Fig. 5 Protocol stack of simulation network.

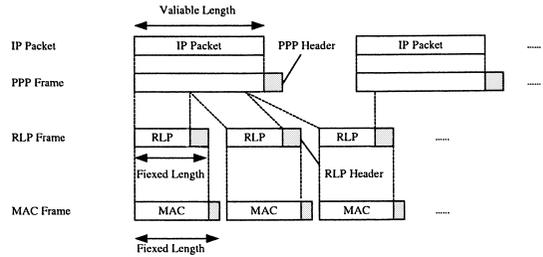


図6 フレーム間の相互関係
Fig. 6 Frame formats of simulation network.

説明する.

3.1 伝送プロトコル/下りリンクスケジューリング

GW-AT間のプロトコルスタックを図5に示す. AP-AT間には, cdma2000 1x EV-DO 相当のプロトコルスタックを模擬している. 具体的には, 図6に示すとおり, APに流入したIPパケットに対し, PPPフレーム, RLPフレーム, およびMACフレームへの分割/組立を行う. RLPフレームおよびMACフレームは, 固定長であり, それぞれ, 998 [bit] および 1,024 [bit] である.

AP-AT間の下り物理層は1つの下りリンクを時分割で共有し, 文献13)にある Proportional Fairness と呼ばれるスケジューリング手法により, 下りリンクをスロット単位で各ATへ割り当てるとともに, そのときの伝送レートを適宜決定する. ここで, 1スロットは 1.67 msec である.

具体的には, まず, スケジューリング入力データとして, 各スロットの時点で (ATでの電波受信状況から決定される) 伝送可能なレート (*DRC*: Data Rate Control) を記したデータ系列をATごとに準備する. 図7に *DRC* の例を示す. 横軸および縦軸は, それぞれスロット番号およびそれぞれの時点で伝送可能なレートである. なお, 参考のため, 平滑化した値もプロットしている.

スロットの割当て先ATの決定は, 各ATの *DRC* 値および平均伝送レート \bar{R} 値から, スロットごとにATごとの DRC/\bar{R} を求め, DRC/\bar{R} が最大となるATを選択することにより行う. なお, 平均伝送レート \bar{R} は, 次式で算出される.

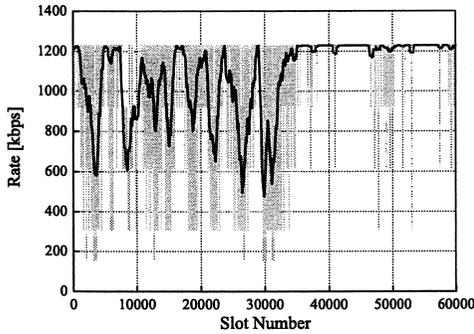


図7 スケジューリング入力データの例
Fig. 7 An example of scheduling input data.

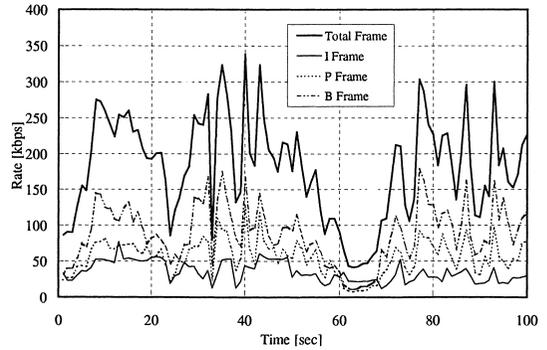


図8 入力動画データ系列
Fig. 8 An example of input MPEG stream.

表1 伝送レート, 利用スロット数およびフレーム数の関係¹³⁾
Table 1 Relations between transmission rate, number of occupied slots, and number of frames¹³⁾.

伝送レート	利用スロット数	フレーム数
38.4 kbps	16	1
76.8 kbps	8	1
153.6 kbps	4	1
307.2 kbps	2	1
614.4 kbps	1	1
921.6 kbps	2	3
1,228.8 kbps	1	2
1,843.2 kbps	1	3
2,457.6 kbps	1	4

$$\tilde{R}(t+1) = (1 - 1/t_c) \times \tilde{R}(t) + 1/t_c \times r \quad (13)$$

ここで, t_c は時定数で, ここでは 1000 とし, r は, 送信中の AT に対しては現在使用している DRC 値を, 送信していない AT に対しては 0 である.

さらに, その時点の決定された AT の DRC 値から, 表 1 に示す対応関係により, 利用スロット数と送信する MAC フレーム数を決定する. たとえば, ある時点で割当て先 AT が AT1, 伝送レートが 76.8 [kbps] と決定された場合, 8 つのスロットを使って, 1 つの MAC フレームを送信する (1.67×16 [msec] で $1,024 \times 1$ [bit] を送信する). 次のスケジューリングは, 9 スロット目の入力スケジューリングデータを用いて行うこととなる.

以上のように, 送信先 AT とその時点の伝送レートの決定を繰り返すことにより, 下りリンクの帯域および伝送遅延が変化することになる. なお, 本シミュレーションでは, AT-AP 間における誤りの発生は考慮せず, AP-AT 間以外のリンクの帯域は, 十分にあるものとする. また, GW-AT 間では, RTP/UDP/IP を用いて動画データを送信する. ユーザデータ長をここでは 1,000 [byte] と設定する.

3.2 入力動画データ

入力データは, MPEG4 トレースファイル¹⁴⁾ を利用

する. I, P, B のフレーム種別, 送出間隔, および各フレームの送信データサイズを指定する. 図 8 に入力トレースデータの例を示す. I, P, B のフレーム種別ごとおよび全フレームの 1 秒平均のコンテンツレートをプロットしている. 本例では「IBBPBBPBBPBB」の系列を繰り返す, 送出間隔は 40 [msec] (1 秒間に 25 フレーム) である. なお, コンテンツレートは, 一定ではなく, 動きが多い場合は高く, 動きが少ない場合は低くなる.

3.3 動画トランスコーダ

動画トランスコーダは, 入力動画データに記された送出間隔のタイミングで読み込んだ入力データに対して, 出力レートがターゲットとするコーディングレート $TargetRate$ になるようにフレーム数を間引き (調整) して出力データを生成する. フレームの間引きは, B および, P フレームを対象とし, I フレームは必ず送信する. したがって, 瞬時的に出力レートが $TargetRate$ を超える場合があるが, 全体としては $TargetRate$ を超えないように送出フレームの調整を行う. また, 入力データに対し, フレーム種別の判断, フレーム数の調整に必要な処理時間は考慮しないものとする.

3.4 フィードバック制御機構

前節で述べたとおり, AP 内に作成された各 AT 用のバッファを一定周期 T_1 で監視し, レート変更条件を満たした場合, バッファ情報を GW へ通知する. 通知インタフェースは, TCP を用いる. GW では, 通知情報をもとに, 動画トランスコーダに設定する $TargetRate$ をリアルタイムに変更する. ただし, AP から GW への通知にかかる時間は考慮されているが, GW 内で動画トランスコーダに設定する $TargetRate$ の算出等に必要の処理時間は考慮しないものとする.

3.5 受信クライアント

受信クライアントは、受信要求開始から T_2 秒間、データをバッファリングした後、描画処理を開始する。描画処理は、規定のタイミングで各フレームを順次描画するとともに、描画済データを破棄する。フレーム欠損を検出した場合は、入力動画データに記された次フレームの描画開始までの送出間隔分だけサスペンドした後、次のフレームの描画を行う。また、データ蓄積量が、受信バッファサイズ q_{client} を超えた場合は、溢れたデータはその時点で破棄する。

4. シミュレーション結果と考察

4.1 提案制御の効果

基地局ルータ (AP) からのフィードバックを行う提案方式の制御を行う場合、受信クライアント (AT) からのフィードバックを行う従来方式の制御を行う場合、および、レート制御を何も行わない場合の3つのケースにおいて、5 ユーザが同時に動画データを受信開始し、100 秒間の動画ストリーミングを受信するシミュレーションを行った。スケジューリング入力データおよび、入力動画データは、すべてのユーザにおいて同一とし、それぞれ、図 8 および図 7 に示した系列とした。また、提案方式の制御を行う場合のシミュレーションパラメータを表 2 に示す。なお、表 2 における T_2 、 q_{client} 以外のパラメータは、2 章において説明している $TargetRate$ 値算出方法のパラメータに相当する。

図 9 は、提案方式による制御を行う場合、従来方式による制御を行う場合、および、レート制御を行わない場合における 1 秒間あたりのフレームロス変動を示す。AP でレート変更のトリガを検出する提案方式で

表 2 設定パラメータ一覧

Table 2 Simulation parameters.

パラメータ	説明	設定値
q_{limit}	AP バッファサイズ	18 [kbyte]
q_{upper}	DOWN 条件閾値	15 [kbyte]
q_{lower}	UP 条件閾値	0.5 [kbyte]
q_T	ターゲットバッファ蓄積量	10 [kbyte]
T_1	モニタリング周期	500 [msec]
m	サスペンド回数	3
R	レート変更判定閾値	20 [kbps]
T_2	先読み時間	2,000 [msec]
q_{client}	クライアントバッファサイズ	70 [kbyte]

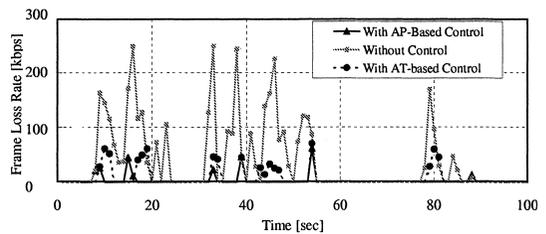


図 9 提案方式による制御を行う場合/従来方式による制御を行う場合/制御を行わない場合のフレームロス変動

Fig. 9 Experimental results of frame loss rate with the proposed AP-based control, with the traditional AT-based control and with no control.

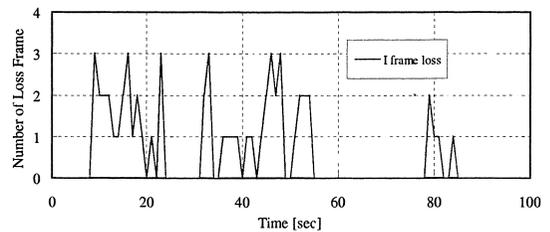


図 10 制御を行わない場合の I フレームのロス数変動

Fig. 10 Experimental result of I-frame loss with no control.

一般に、従来のエンド-エンド方式では、受信側でフレームロスを検出すると現状の出力レートを引き下げ、逆に、一定期間フレームロスが検出されないと、ネットワーク帯域にまだ余裕があると判断して、出力レートを引き上げる制御を行う。

本シミュレーションで用いた従来方式による制御は、次のとおりである。まず、 T_1 秒ごとにフレームロスがあるかどうかを検査する。フレームロスが検出されたら、その時点の AT 受信スループットを $TargetRate$ として設定し、 $TargetRate$ 値を超えないように送出側フレーム数を調整する。また、 $m \times T_1$ 秒間フレームロスが検出されなかったら、その時点の AT 受信スループットの α 倍の値を $TargetRate$ として設定し、 $TargetRate$ 値を超えないように送出側フレーム数を調整する。ここでは、 $\alpha = 1.2$ とした。

なお、AP-GW 間の帯域幅を 5 Mbps、遅延時間を 50 msec に設定した。この値により、AP から GW に通知情報を送信する TCP 性能が決まる。しかし、レート制御のモニタリング周期 $T_1 (= 500 \text{ msec})$ に比べると、遅延時間の時間スケールは小さいため、特にこの値によってレート制御に大きな影響を与えることはない。

は、フレームロスは大きく抑えられることが分かる。また、図 10 は、レート制御を行わない場合の I フレームのロス数を示す。制御を行わない場合は、ランダムにフレームが破棄されるため、図 10 に示すように、I フレームも多く破棄される。それに対して、提案方式による制御を行う場合は、トランスコーダで適切に送信フレームを選択しているため、I フレームの破棄は見られなかった。I フレームは、P、B フレームの復号に必要なため、描画できないフレーム数はさらに増え、結果として、受信側での描画ができない等の不都合が生じてしまう。以上より、提案制御を行うことにより、与えられた無線リンクの状況に対し、可能な限り動画ストリーミングの品質を確保していることが

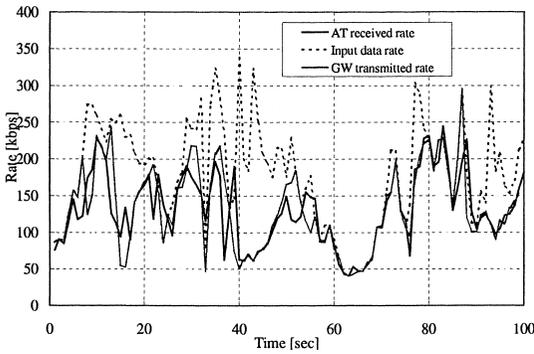


図 11 入力レート、GW 送信レートおよび AT 受信レートの時系列変動

Fig. 11 Experimental results of input MPEG data rate, GW transmitted rate and AT received rate.

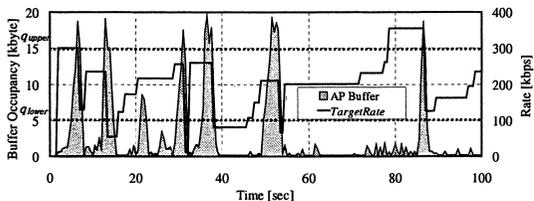


図 12 AP バッファとターゲットレートの時系列変動

Fig. 12 Experimental results of AP buffer and calculated TargetRate.

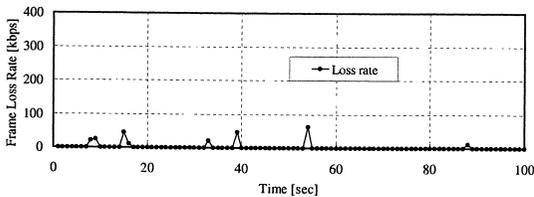


図 13 フレームロスの時系列変動

Fig. 13 Experimental result of frame loss rate.

分かる。

次節では、本提案方式で利用する各パラメータについて考察する。ただし、これらの値に最適値が存在するわけではないため、あらかじめ何らかの制約・前提により決められるパラメータに対して、他のパラメータはどう影響するかを考察する。

4.2 提案制御の詳細評価

提案方式による制御を行う場合における 1 ユーザ分のシミュレーション結果の詳細を示す。図 11 は、GW での送信レート、AT での受信レート、および、比較値として入力動画データのレートを示す。ただし、レートの算出は 1 秒ごとに行った。図 12 は、AP でのバッファの変動およびそれに応じて決定された TargetRate の変動を示す。図 13 は、AT で描画を行う際に検出されたフレームロスレートを示す。た

だし、フレームロスレートとは、1 秒間にロスしたフレームのデータ量である。

まず、図 11 と図 12 から分かるとおり、GW 送信レートに対し AT 受信レートが下回ると、AP バッファ量が増大していく。引き続いて、AP バッファ量が DOWN 条件閾値 q_{upper} を上回ると、TargetRate が再計算され、より低い値に設定される。その後、TargetRate の減少とともに、GW 送信レートに対し AT 受信レートが上回り、AP バッファ量が減少する。さらに、AP バッファ量が UP 条件閾値 q_{lower} を下回ると、TargetRate が増加している。以上より、AP バッファ量の変動にあわせて、TargetRate が制御されていることが分かる。本制御においては、DOWN 条件閾値 q_{upper} と UP 条件閾値 q_{lower} の差を大きく設定すれば、無線リンクのレート変動と入力動画のレート変動の差を吸収することができるため、TargetRate の変動回数をさらに軽減することが可能である。その一方で、モニタリング周期 T_1 を大きくすると、TargetRate の変動回数は減少するため、パケットロスが生じる可能性が高くなる。

次に、図 13 に示すフレームロスの発生は、AP でのバッファサイズ q_{limit} を超えたことによりパケットが破棄されたことを示している。また、モニタリング周期が大きくなるとレート制御の頻度が減るので、フレームロスが生じる可能性が高くなる。このようなフレームロスをさらに抑えるためには、AP でのバッファサイズ q_{limit} をさらに大きい値に設定すればよい。

ただし、DOWN 条件閾値 q_{upper} および AP バッファサイズ q_{limit} を大きく設定すると、後述するように、必要とする先読み時間 T_2 と、クライアントバッファ q_{client} の設定値を大きくする必要が生じるため、これらのパラメータはトレードオフの関係となる。

続いて、図 14 および図 15 は、それぞれ、描画待ち時間 T_{wait} の時系列変動および、AT 受信バッファの時系列変動を示す。ここで描画待ち時間 T_{wait} は、各フレームに対して次式で定義される。

$$T_{wait} = (\text{描画開始時刻}) - (\text{AT 到達完了時刻}) \tag{14}$$

図 14 から、描画待ち時間 T_{wait} は、ほとんどの時間において、約 1.9 [sec] あたりで微小な変動をしているが、ときおり、大きく変動して、最小で 0.5 [sec] となる。これは、図 12 と図 14 の比較から分かるように、AP バッファ蓄積量が大きくなると、AP バッファでの滞在時間が長くなり、AT への到達時間が遅れることによる。したがって、先読み時間 T_2 の設定は、AP バッファサイズ q_{limit} と考えあわせて検討する必要がある。

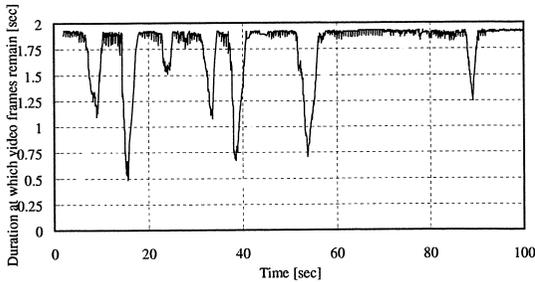


図 14 描画待ち時間の時系列変動

Fig. 14 Experimental result of the duration at which video frames remain at an AT buffer.

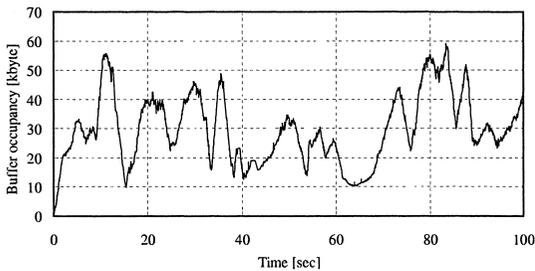


図 15 AT 受信バッファの時系列変動

Fig. 15 Experimental result of AT receiver buffer.

る．本例では，AP バッファサイズ $q_{limit} = 18$ [kbyte] に対して，先読み時間 $T_2 = 1.5$ [sec] 以上の先読み時間を設定しておかないと，動画の描画再生時において，対応するフレームが未到着となってフレームロスが起こることになる．また，描画待ち時間が短くなった後，再び 1.9 [sec] あたりに戻っている．これは， $TargetRate$ を下げて，GW からの送出レートを抑えた場合，AP でのバッファ蓄積量が減少し，バッファ滞在時間が小さくなるからである．また，描画待ち時間の微小な変動は，主に，AP でのスケジューリングにおける待ち時間変動によるものと考えられる．本例においては，300 [msec] 程度の変動である．

続いて，図 15 に示した AT 受信バッファ蓄積量は，ほぼ，描画待ち時間 T_{wait} 分の受信データが蓄積されたものであると考えられる．AP バッファ蓄積量が少ない時間においては，描画待ち時間 T_{wait} が先読み時間 T_2 に近くなるため，AT 受信レートの変動と相関があるように見える．また，本例においては，AT 受信バッファ q_{client} を 60 [kbyte] 以下に設定すると，AT 受信バッファ溢れによるフレームロスが起こる．したがって，AT 受信バッファ溢れを起こさないようにするためには，AT 受信バッファ q_{client} を，先読み時間 T_2 と，GW からの最大送出レート $Rate_{max}$ から計算される値 $Rate_{max} \times T_2$ に設定しておけば十分である．本例で

は，図 8 より，最大送出レート $Rate_{max} = 350$ [kbps] であるから， $350 \times 2.0/8 = 87.5$ [kbyte] となる．なお，実際は，描画待ち時間 T_{wait} は 2.0 [sec] よりも小さく，送出レートも最大送出レート $Rate_{max}$ 以下であるため，AT 受信バッファの最大値は，87.5 [kbyte] よりも小さく，60 [kbyte] になっている．

5. む す び

本論文では，ベストエフォート型の移動パケット通信において，与えられた帯域や遅延の中で可能な限り動画像品質を保証することを目的とした動画像ストリームの制御方式を提案した．IP の中継ノードでのパケットバッファリングにより，UDP パケットのロスをおよぼさず，低レイヤで生じる短時間での帯域や遅延のふらつきをおよぼさず吸収することができる．本提案方式は，バッファリングの限界になるまでの間に，送出データ量そのものを調整するものである．

提案制御は，基地局ルータにおけるレート変更トリガの検出と，ゲートウェイに配備されたトランスコーダによる動画像ストリームのレート調整により行われる．まず，レート変更トリガの検出は，基地局ルータのバッファモニタリングにより行われる．続いて，トランスコーダに設定するレート値は，基地局ルータで取得されたバッファ情報およびその時点での送出レートをもとに適宜決定される．

続いて，ベストエフォート型移動パケット通信を模擬したネットワークシミュレータを構築し，提案方式の有効性を検証した．すなわち，低レイヤ（伝送レベル）での数ミリから数十ミリ秒オーダの事象と，上位レイヤ（レート制御レベル）での数秒オーダの事象が，提案方式によりうまく制御されていることをシミュレーションにより確認した．また，シミュレーション結果を元に，提案方式における設定パラメータ，基地局ルータのバッファ値，受信クライアントの受信バッファ値および先読み時間値の設定に関する考察を示した．

謝辞 日頃ご指導いただく（株）KDDI 研究所浅見所長に深謝します．

参 考 文 献

- 1) 3GPP Home Page. <http://www.3gpp.org/>
- 2) 3GPP2 Home Page. <http://www.3gpp2.org/>
- 3) 藤原 洋：最新 MPEG 教科書，アスキー（1994）．
- 4) Braden, R., Zhang, L., Berson, S., Herzog, S. and Jamin, S.: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Functional Specification, RFC2205 (1997)．

- 5) McCanne, S., Jacobson, V. and Vetterli, M.: Receiver-driven layered multicast, *Proc. ACM SIG COMM'96* (1996).
- 6) 高橋健志, 花村 剛, 笠井裕之, 永吉 功, 富永英義: MPEG-2 ビデオトランスコーダのための再量子化パラメータ禁止領域制御方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B, No.2, pp.278-287 (2002).
- 7) Chung, J. and Claypool, M.: Better-Behaved, Better-Performing Multimedia Networking, *Proc. SCS Euromedia Conference* (2000).
- 8) Rejaie, R., Handley, M. and Estrin, D.: Quality Adaptation for Congestion Controlled Video Playback over the Internet, *Proc. ACM SIGCOMM'99* (1999).
- 9) 山崎達也, 福永 茂, 佐藤範之: トランスコーディングを用いた複数端末への QoS 調整動画配信, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B, No.1, pp.50-59 (2002).
- 10) 増田彰久, 橋本豊大, 上田尚純, 石原 進, 水野忠則: コンテンツ指向空間的解像度制御方式の実装と評価, 情報処理学会 MBL 研究報告, 99-MBL-11, pp.19-26 (1999).
- 11) 中内清秀, 森川博之, 青山友紀: 階層化マルチキャストのためのネットワーク支援型レート制御手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.3, pp.365-379 (2001).
- 12) ns2 (network simulator version2).
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- 13) Jalali, A., Padovani, R. and Pankaj, R.: Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency — High Data Rate Personal Communication Wireless System, *Proc. VTC2000 Spring* (2000).
- 14) MPEG4 trace file.
<http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/fitzek/TRACE/ltvt.html>

(平成 14 年 3 月 25 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



森川 大補

1996 年京都大学工学部電子工学科卒業, 1998 年同大学大学院工学研究科電子通信工学専攻修士課程修了。同年国際電信電話株式会社(現 KDDI 株式会社)入社。以来研究所にて移動通信ネットワーク, 移動通信サービスならびにユビキタスネットワーク関連技術の研究開発に従事。現在(株)KDDI 研究所研究員。電子情報通信学会会員。



太田 慎司

1990 年筑波大学第 3 学群基礎工学類卒業, 1992 年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話株式会社(現 KDDI 株式会社)入社。以来研究所にて移動通信ネットワーク, サービス関連技術の研究開発を行い, 現在携帯電話向けアプリケーション・サービスプラットフォーム関連技術の研究開発に従事。現在(株)KDDI 研究所主任研究員。電子情報通信学会会員。



山口 明

1989 年早稲田大学理工学部電子通信工学科卒業, 1991 年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話株式会社(現 KDDI 株式会社)入社。以来研究所にて移動管理, 移動通信ネットワーク, ユビキタスの研究開発に従事。現在(株)KDDI 研究所主任研究員。電子情報通信学会会員。



大橋 正良(正会員)

1981 年京都大学工学部電気工学第 2 学科卒業, 1983 年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話株式会社(現 KDDI 株式会社)入社。以来研究所にて移動衛星通信, 誤り訂正符号化, セキュリティ関連技術の研究開発を行い, 現在 3.5 ~ 第 4 世代の移動通信技術の研究開発, ならびに 3GPP2/TTC での標準化に従事。3GPP2 TSG-S WG4(セキュリティ)Vice Chair。現在(株)KDDI 研究所無線エンジニアリンググループリーダー。IEEE, 電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会各会員。工学博士。