

ストリーミングメディアに対する分散型 QoS 制御

小川 賢太郎[†] 小林 亜樹[†] 山岡 克式^{††} 酒井 善則[†]

[†] 東京工業大学 大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{††} 東京工業大学 学術国際情報センター 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†]{ogaken,koba,ys}@net.ss.titech.ac.jp, ^{††}yamaoka@gsic.titech.ac.jp

あらまし ストリーミング型メディアを扱う通信アプリケーションには、ネットワークの状況に合わせてストリーミングの QoS 制御を行う仕組みが必要であり、それらの制御は対象とするメディアの特性に合わせて行われることが望ましい。しかし、大規模ネットワーク上に多数のストリーミングが存在する場合、全回線及び全ストリーミングの状態を一元管理することは困難である。本稿では、広域ネットワーク上の MPEG ビデオストリーミングにおける、再生品質の公平性を指針とした帯域制御方式を提案する。本方式では、ルータに回線やストリーミングの状況を局所的に監視させ、ストリーミングサーバに対する送出レート制御を個別に行わせることにより、QoS の自律分散制御を実現する。各ルータは、自身に接続された回線の輻輳を感知すると、その上を流れる最も再生品質の高いストリーミングの送出レートを削減するよう要求する。計算機シミュレーションにより性能評価を行い、本方式の有効性を確認している。

キーワード ビデオストリーミング, QoS, 公平性, 自律分散制御, MPEG

Distributed QoS Control for Streaming Media

Kentaro OGAWA[†], Aki KOBAYASHI[†], Katsunori YAMAOKA^{††}, and Yoshinori SAKAI[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

^{††} Tokyo Institute of Technology, Global Scientific Information and Computer center 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

E-mail: [†]{ogaken,koba,ys}@net.ss.titech.ac.jp, ^{††}yamaoka@gsic.titech.ac.jp

Abstract In this paper, we propose an autonomous distributed QoS control method for MPEG video streaming in the wide area network. The capacity of the links and the characteristics of the video streams change dynamically. However, it is difficult to manage the condition of all the links and the streams in the network intensively. On this account, the routers which compose a network observe the conditions of the links and the streams locally, and control the transmission rate of the stream server in the individual judgment. Picture quality oriented fairness is realized because the transmission rate of the stream which has the highest PSNR in the bottleneck link is reduced. The computer simulation results show that this control concept is effective.

Key words Video Streaming, QoS, Fairness, Autonomous Distributed Control, MPEG

1. まえがき

現在、インターネットに代表される広域ネットワークにおいて、アクセス回線及びバックボーンの急速な高速化・広帯域化が進んでいる。これに伴い、電子メールや Web ブラウジングといった静的なコンテンツに比べてデータ量の大きな、音声やビデオを含むマルチメディアコンテンツのストリーミングサービスに対する要求が高まっている。こうしたリアルタイム性の強いメディアを扱う通信アプリケーションを、広帯域ネットワー

ク上で伝送させる試みは各所で行われている [1]~[3]。

しかし、ネットワークが高速化する一方で、ユーザ数の増加が著しいこと、扱うデータ量が増大の一途を辿っていること等により、十分なネットワーク資源が得られない状況も考えられる。ある特定の回線に許容量を超えるトラフィックが集中した場合、その回線がボトルネックとなり輻輳が発生するため、多くのプロトコルでは許容量以上のパケットが廃棄され、エンドホストがネットワークへの送出データ量を削減することで輻輳制御が行われる。この際、ボトルネック回線の帯域資源を特定

のユーザだけが占有することのないように、ユーザ間で公平な制御が行われる必要がある。このため、ストリーミングサービスを提供するにあたっては、複数セッション間での細かな QoS (Quality of Service) 調整を行う機構が不可欠である。

QoS 制御を可能とするネットワークアーキテクチャとして既に知られている技術に、Int-serv (Integrated Service) [4]~[6] や Diff-serv (Differentiated Service) [7] 等があるが、RSVP (Resource ReSerVation Protocol) [8] を用いてデータストリームが通過するネットワークノードの資源を予約する Int-serv モデルでは、ストリームの生成や更新の度にネットワークの広範囲にまたがる高コストの処理が必要となる。また、各パケットに対して扱いのクラスを指定して挙動の区分化を実現する Diff-serv モデルでは、ネットワークの変動に敏感な粒度の細かい制御は期待できない。

一方、トランスポートプロトコルレベルでストリーム単位の QoS 制御を行う技術として、RTP (Real-time Transport Protocol) [9] と RTCP (RTP Control Protocol) を組み合わせた送信レート制御方式も提案されている [10]~[13]。RTCP はユーザ固有の情報や RTP メディアストリームに対する受信品質情報を提供することが可能となっており、送信者は RTCP 受信者レポートによりネットワークの輻輳を感知し送信レートを制御する。この方式では細かいレート制御が可能である反面、ネットワーク中のストリーム数が増えるとサーバクライアント間でフィードバック情報を流し続けることによるオーバーヘッドが問題となる。

上記の技術はいずれも単一ストリームをエンドエンド間で制御するものであり、ネットワーク内部の情報を明確に知ることはできない。従って、これらの技術を用いて、ネットワーク内で発生したボトルネック回線を複数のストリーム間で公平に使用させるには、ネットワーク上の全回線及び全ストリームの状態を一元管理する必要が生じるが、大規模ネットワークにおいてそれらの情報を保持・更新し続けることは困難である。

以上のような背景をもとに、本稿では、広域ネットワーク上の MPEG ビデオストリーミングを対象として、ネットワーク内のルータからのレート削減通知を用いた帯域制御方式を提案する。本方式では、ルータに各出力リンクの帯域とその上を流れるストリームの監視機能及びサーバに対するレート削減通知機能を付加し、サーバに対する送出レート制御を個別に行わせることにより、QoS の自律分散制御を実現する。また、ビデオストリームの再生品質に基づいた公平な帯域割当てを行うため、サーバは MPEG 符号化されたビデオデータの packets にその時のレートにおける PSNR 情報を付加し、経路上の各ルータが参照できるようにする。ルータは、自身に接続された回線の輻輳を感知すると、その上を流れる最も再生品質の高いストリームの送出レート削減要求を対象サーバに送る。要求を受けたサーバはこれに従い、送出レートを削減する。本方式により、ネットワーク輻輳時におけるボトルネック回線のメディア特性に基づいた公平利用が可能となる。

本方式の実現には、ネットワーク内のルータに接続回線及びストリームの監視やサーバへのレート削減通知といった新たな

機能が必要となる。本稿では詳細な実装方法には触れていないが、これらの機能はルータがアプリケーション層までの処理を実行することを許しているアクティブネットワーク [14] の技術を適用することで実現可能であり、ルータで知り得た情報をネットワークの輻輳制御に活用する方式がいくつか提案されている [15]~[17]。

2. システムモデル

本方式が対象とするシステムのモデルを図 1 に示す。このシステムにおいて、サーバとクライアントの間で動画像の伝送が行われる。各動画像ストリームはエンドエンド間で独立して伝送され、伝送経路を共有する他の動画像ストリームの情報をサーバが知ることはない。サーバはクライアントからの伝送要求を受けると、原画像データをリアルタイムで MPEG 符号化しながらネットワークへ送出する。この際、符号化された動画像の PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) をリアルタイムに算出し、再生品質情報として送出パケットに付加することで、伝送経路上のルータによる参照を可能にする。また、サーバはルータからの送出レート削減要求が来ない限り、一定の割合で原画像の符号化レートを上げ続ける。

各動画像ストリームの送出レートが上昇する一方、ネットワークを構成する各回線に帯域容量の限界があるため、ネットワーク上に複数のボトルネックが出現する。広域ネットワークにおいては全回線状態及び全ストリーム情報を一元管理することは困難なため、各回線状態の監視や帯域制御は、回線が接続されている各ルータが独自の判断で行う。ルータは自身を通過する動画像ストリームの情報と接続された回線の帯域状況のみを知ることができ、ルータ間での情報のやりとりは行わない。ルータはある接続回線の帯域使用量が一定の閾値を越えた場合、その時点でその回線を共有している動画像ストリームの中で最も PSNR 値の高いものを伝送しているサーバに対してレート削減要求を発生。動画像の特性として、動きの激しさやコントラストの高低といった内容の違いにより、同じ符号化レートであっても再生品質が異なる。従って、再生品質におけるストリーム間の公平性を実現するために、帯域使用量ではなく PSNR 値を判断の基準とする。この動作は対象回線の帯域使用量が閾値を下回るまで一定周期で繰り返される。

以上のサーバ及びルータの挙動から、本方式における伝送制御の特徴は次のようにまとめられる。

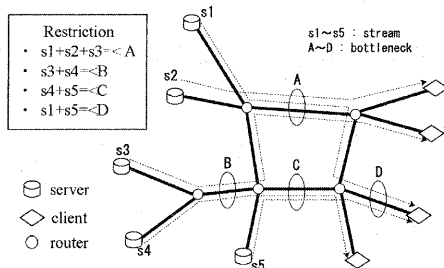


図1 システムモデル

- ネットワークのノードルータによる自律分散制御.
- 動画ストリーム間の画質のばらつきを抑える制御.
- ネットワーク回線の効率良い使用.
- ネットワーク内の各種状況変化に動的に対応.

3. 自律分散制御によるレート制御方式

提案方式は、ネットワーク内のルータがエンド-エンドの帯域制御に介入し、サーバの伝送レート調整フェーズをルータと協調させることで実現する。提案方式は大きく分けて、サーバの挙動とルータの挙動の二つから構成されている。以下、その動作の詳細を説明する。

3.1 サーバの伝送アルゴリズム (図 2)

3.1.1 送出ストリームの生成

クライアントからのストリーミング要求を受けたサーバは、原画像を MPEG 符号化した動画ストリームをパケット分割してネットワークへ送出する。送出パケットには、伝送経路上のルータが参照する PSNR 情報が付加される。このため、符号化した MPEG ストリームをパケット分割する前に一旦ローカルデコーダへ送り、受信側での再生画像を得て原画像と比較することで PSNR を算出する。原画像の符号化・PSNR の算出・送出パケットの生成という一連のプロセスは GOP (Group of Picture) 単位で行う。従って、単一 GOP から生成されたパケットに付加された PSNR 値は全て同じであり、伝送中のストリーム内の PSNR 情報は GOP 長周期で変化する。

なお、動画ストリームはサーバから固定レート (CBR: Constant Bitrate) 符号化モードで送出されるものとする。CBR 符号化モードとは、GOP 内フレームのデータサイズの違いを指定したビットレートで平均化して吸収し、一定レートでの送出を GOP 単位で実現する符号化モードである。

3.1.2 送出レートの調整

サーバは、原画像の MPEG 符号化の際に各 GOP の先頭に付けたシーケンス・ヘッダ内のビットレート情報を変更することで、GOP 単位でビットレートを調整しながらデータ伝送を行う。伝送経路の帯域に余裕がある間は、符号化レートを 1GOP ごとに一定値 U [bps] ずつ上げていき、できるだけ高品質でのストリーミングをおこなうとする。ある時点で伝送経路上のルータからレート削減要求を受けた場合、サーバは符号化中の GOP 次の GOP を、一定値 D [bps] だけ下げたレートで符号化する。

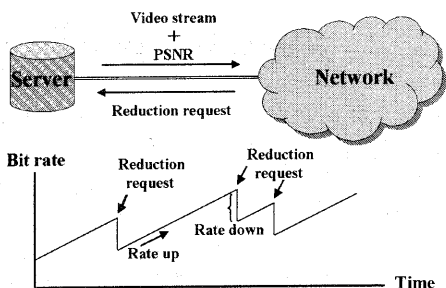


図 2 サーバの動作

る。従って、レート削減要求を符号化に反映させるまでに、最大で GOP 長に等しいタイムラグが生じる。伝送経路上にレート削減要求機能を持つルータが複数存在する場合には、このタイムラグ中に更なるレート削減要求が通知される可能性があるが、これらは無視される。レート削減要求が反映されるのは 1GOP につき一度だけとする。

3.2 ルータの帯域制御アルゴリズム (図 3)

3.2.1 帯域使用量監視と動画ストリームの把握

ルータは、接続された各出力回線に対し、動画ストリームの識別及び各ストリームの再生品質の参照に用いるストリームテーブルと帯域使用量を管理し、回線を監視してこれらを動的に変更する。ストリームテーブルには各動画ストリームの伝送元サーバアドレスとその時々々の PSNR 情報が保持されており、各ストリームのエントリーは伝送開始・終了に伴い追加・削除される。また、ルータは常に動画ストリーム以外のトラフィックも含めた出力回線の帯域使用量を観測し、決められた輻輳検出閾値と比較することでその回線が輻輳状態にあるかどうかを判断する。

3.2.2 送出レート削減要求

ある回線に輻輳が検出されると、ルータはストリームテーブルを参照し、その時点で保持されている PSNR 値が最も高いストリームの送信元サーバに対して送出レート削減要求メッセージを送る。このメッセージは、対象回線の帯域使用量が閾値を下回り、輻輳状態が終了したと判断されるまで、一定周期で送られ続ける。ここで、サーバが受け取ったメッセージを送出レートに反映させるまでには、最大で GOP 長に等しいタイムラグがあるため、あまりに稠密なメッセージ送信には意味がなく、ネットワークを余計に圧迫することになりかねない。タイムラグの長さは GOP 長の範囲でランダムであるため、メッセージ送信周期は各動画ストリームの平均 GOP 長の半分程度に設定するのが妥当である。

4. 性能評価

ルータによる分散型 QoS 制御により再生品質に基づいた公平な帯域配分が可能であることを示すために、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。まず、単一回線を共有するネットワークモデルにおいて提案方式の基本性能を調べる。次に、複数のボトルネックが発生しうる広域ネットワークモデルにお

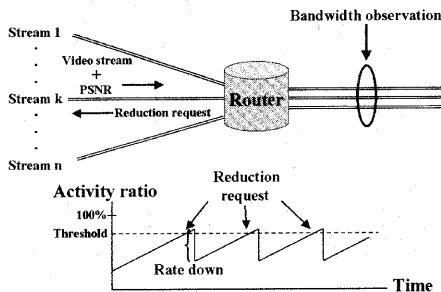


図 3 ルータの動作

いて、Max-Min fairness [18] の観点から帯域の有効利用がなされているか評価する。なお、シミュレーションでは実際に動画像を送送せず、複数の実画像を様々なレートで符号化し PSNR を測定することで得たビットレート-PSNR 特性情報 (図 4 参照) をランダムに持つ疑似ストリームを用いた。表 1 にシミュレーション条件を示す。

4.1 単一回線モデル

4.1.1 ネットワークモデル

本節では図 5 に示すモデルを用いる。2 台のルータが 20[Mbps] の回線で繋がれており、それぞれにサーバとクライアントが各 5 台ずつ接続されている。動画像ストリームはサーバからクライアントへ 1 対 1 で伝送され、ルータ間の回線を共有する。

4.1.2 静的環境における性能評価

各動画像ストリームのビットレート-PSNR 特性が変化しない場合において、提案方式による QoS 制御を行った場合の結果を図 6 に示す。図 6 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を、図 6 (b) は各ストリームの PSNR の時間変化を表している。各ストリームの伝送開始・終了時刻はランダムである。本方式では、ある回線が輻輳状態に入った場合、回線を共有するストリームの中で最も PSNR の高いものからレートを下げさせる。そのため、図 6 に示したように、定常状態における各ストリームの帯域使用量に差があるにも関わらず、PSNR はほぼ同じ範囲で変動している。このことから、再生品質に基づいた公平性が実現されていることが確認できる。

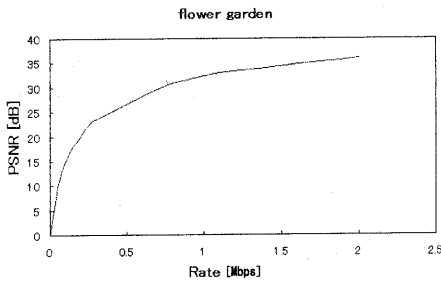


図 4 ビットレート-PSNR 特性

表 1 シミュレーション条件

start rate	1.0 [Mbps]
rate up	10 [kbps]
rate down	100 [kbps]
threshold	100 [Kbps] remainder
message span	200 [msec]
GOP length	400 [msec]

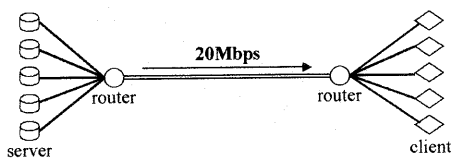
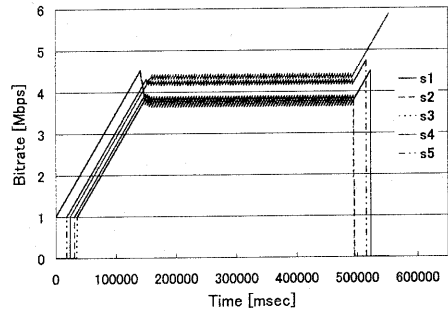


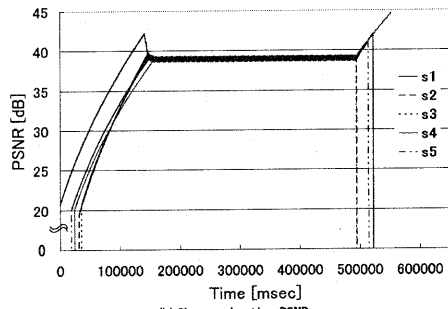
図 5 単一回線モデル

4.1.3 動的環境における性能評価

動画像の内容が異なればビットレート-PSNR 特性も異なるが、実際の動画像ストリームは複数のシーンから構成されているため、一つ一つのシーンを異なる動画像シーケンスと考える

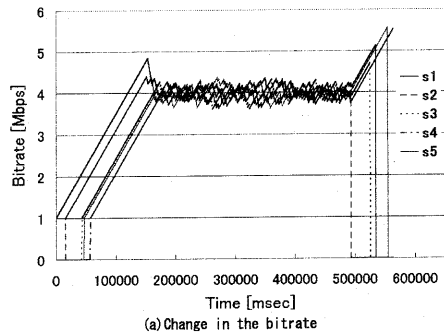


(a) Change in the bitrate

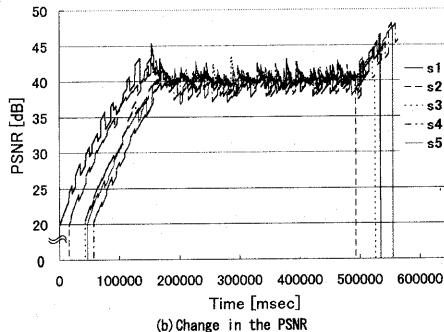


(b) Change in the PSNR

図 6 ビットレート及び PSNR の時間変化



(a) Change in the bitrate



(b) Change in the PSNR

図 7 ビットレート及び PSNR の時間変化 (特性変動あり)

と、単一の動画ストリーム内においても、シーンチェンジによってビットレート-PSNR 特性が変化する。そこで、各動画ストリームのビットレート-PSNR 特性が動的に変化する場合において、提案方式による QoS 制御を行った場合の結果を図 7 に示す。図 7 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を、図 7 (b) は各ストリームの PSNR の時間変化を表している。各ストリームの伝送開始・終了時刻はランダムである。また、各動画ストリームのビットレート-PSNR 特性の変化は、4~10[sec] の間のランダムな時間ごとにかかるものとしている。

図 7 から明らかなように、動画ストリームのビットレート-PSNR 特性が変化する場合、各ストリームの帯域使用量が定常状態に落ち着くことがなく、常に振動している。同様に PSNR の値も振動しているが、常に各ストリーム間で同程度の品質に収束するよう制御されているため、値が発散することなくある程度の幅に収まっている。このことから、ストリームの画像特性が変動する場合においても、提案方式が動的に対応可能であることが確認できる。

4.2 広域ネットワークモデル

本節では、より一般的な広域ネットワークモデルに提案方式を適応した場合の性能評価を行う。このようにボトルネックとなりうる回線が複数存在するモデルの場合、Max-Min fairness と呼ばれる公平性が実現される必要がある。つまり、ネットワーク内のある回線がボトルネックとなった時に、その回線を共有している動画ストリーム間では再生品質が公平になるように帯域制御が行われるが、それ以外の回線の帯域が余っている場合は、全ストリームの公平性よりも利用可能な帯域を使える限り使うことが優先されなければならない。

4.2.1 ネットワークモデル

本節では図 8 に示すネットワークモデルを用いる。4 台のルータが 5 本の回線で繋がれているネットワーク上において、それぞれ 5 台ずつのサーバとクライアントが 1 対 1 の動画伝送を行う。サーバ及びクライアントに付けられた番号をそのまま伝送ストリームの番号とし、ネットワークを構成する回線の帯域容量とそれぞれの回線を共有するストリームの組を表 2 に示す。

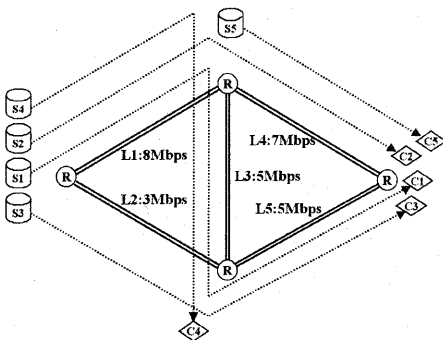


図 8 広域ネットワークモデル

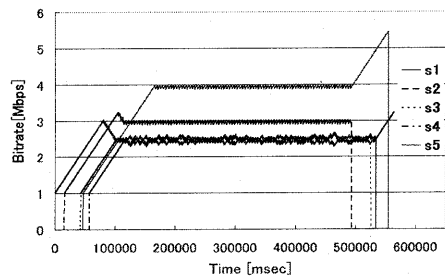
4.2.2 Max-Min fairness の実現

提案方式による QoS 制御を行った場合の結果を図 9 に示す。図 9 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を、図 9 (b) は各ストリームの PSNR の時間変化を、図 9 (c) は各リンクにおける帯域使用量を表している。各ストリームの伝送開始・終了時刻はランダムである。また、各動画ストリームのビットレート-PSNR 特性の変化は、4~10[sec] の間のランダムな時間ごとにかかるものとしている。

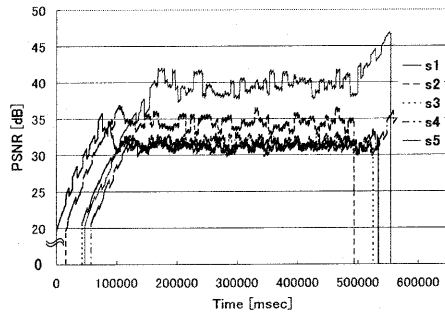
まず、図 9 (b) から分かるように、単一回線モデルの場合との明らかな違いとして、各ストリームの PSNR が同程度に

表 2 各回線の帯域容量と存在するストリーム

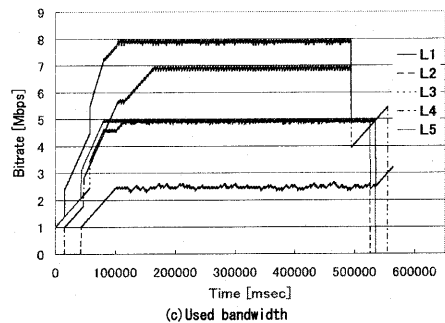
link number	bandwidth	stream number
L1	8 [Mbps]	1, 2, 4
L2	3 [Mbps]	3
L3	5 [Mbps]	1, 4
L4	7 [Mbps]	2, 5
L5	5 [Mbps]	1, 3



(a) Change in the bitrate



(b) Change in the PSNR



(c) Used bandwidth

図 9 ビットレート、PSNR 及び帯域使用量の時間変化 (特性変動あり)

収まっていないことが挙げられる。特にストリーム5の再生品質が突出して高くなっている。ストリーム5は回線L4をストリーム2と共有しているの、基本的にストリーム2とストリーム5の再生品質が同程度になるよう制御が働かずだが、ストリーム2は回線L4の帯域を3[Mbps]前後しか使っていないため、ストリーム5が残りの4[Mbps]近い帯域を使うことになり、再生品質に開きが生じている。この原因は、ストリーム2がストリーム1及びストリーム4とともに回線L1を共有しているため、ここがボトルネックになり3[Mbps]前後までしか送出レートを上げられないことにある。見方を変えれば、ストリーム2の送出レートが頭打ちになっているため回線L4に余剰帯域が生まれ、その余剰分をストリーム5が最大限に利用しているといえる。このことを裏付けるように、実験開始から約49秒後にストリーム2の伝送が終了し、回線L4にさらに余剰帯域が生じると、ストリーム5の送出レートがさらに上昇する。

次に、回線L1に着目すると、ストリーム2の帯域使用量がストリーム1及びストリーム4に比べて多くなっている。これは、ストリーム1及びストリーム4が回線L1の先で共有している回線L3がボトルネックになり、それぞれの送出レートが2.5[Mbps]前後で頭打ちになるためである。その分ストリーム2が回線L1の3[Mbps]近い余剰帯域を利用可能となる。また、回線L2においては、ストリーム3によって3[Mbps]の帯域容量のうち2.5[Mbps]前後の帯域しか使われていない。これは、ストリーム3がストリーム1と共有する回線L5がボトルネックになり、ストリーム3の送出レートが2.5[Mbps]前後で頭打ちになるためである。従って、このネットワーク内における真のボトルネックは回線L3及び回線L5であると結論できる。これらの回線を共有するストリーム1、ストリーム3及びストリーム4の再生品質はほぼ同程度に保たれており(図9(b)参照)、公平な帯域配分がなされているといえる。

以上により、ボトルネックとなる回線の帯域は公平に分配され、かつ回線の余剰帯域は最大限有効に活用されていることが分かり、提案方式によりMax-Min fairnessが実現されることが示された。

5. まとめ

本稿では、広域ネットワーク上でのビデオストリーミングにおいて、再生品質に基づいた公平な帯域配分を、ルータによる自律分散制御により実現する方式を提案した。また、計算機シミュレーションによりその性能評価を行った。本方式は、ルータに回線状況と動画ストリーム情報を局所的に監視させる機能を付加し、ある回線に輻輳が発生した場合には、その回線を共有する動画ストリームの中で最も再生品質の高いストリームの送出レートを削減するよう要求するというものである。ネットワーク内に輻輳が発生せず、回線容量に余裕がある間は、各ストリームの送出レートが一定の速度で上昇し、回線をできる限り有効に利用しようとする。本方式を用いることにより、ネットワーク内に単独もしくは複数のボトルネック回線が存在する場合において、ボトルネック回線の再生品質から見た公平な利用が可能となる。同時に、帯域に余裕のある回線を最大限

に活用する制御が行われるので、Max-Min fairnessと呼ばれる公平性が実現される。

今後は、ストリーミング中にネットワーク回線の帯域容量が変動する場合についての検証や、ルータからサーバに送られる送出レート削減要求メッセージの伝達に遅延が発生した場合の影響分析等を行う予定である。

文 献

- [1] A. Basso, G.L. Cash, and M.R. Civanlar, "Transmission of MPEG-2 Streams over Non-Guaranteed Quality of Service Networks," Proc. of Picture Coding Symposium '97, Sept. 1997.
- [2] A. Ogawa, K. Kobayashi, K. Sugiura, O. Nakamura, and J. Murai, "Design and implementation of DV based video over RTP," Proc. of Packet Video Workshop '2000, May 2000.
- [3] T. Komine, F. Kubota, S. Nakagawa, and A. Amemiya, "Development of the Japan Gigabit Network," Proc. of ICATM 2000, June 2000.
- [4] J. Wroclawski, "The use of RSVP with IETF integrated services," IETF RFC 2210, Sept. 1997.
- [5] J. Wroclawski, "Specification of the controlled-load network element service," IETF RFC 2211, Sept. 1997.
- [6] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin, "Specification of guaranteed quality of service," IETF RFC 2212, Sept. 1997.
- [7] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An architecture for Differentiated Services," IETF RFC 2475, Dec. 1998.
- [8] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin, "Resource Reservation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification," IETF RFC 2205, Sept. 1997.
- [9] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederik, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for realtime applications," IETF RFC 1889, Jan. 1996.
- [10] D. Sisalem and H. Schulzrinne, "The loss-delay based adjustment algorithm: A TCP-friendly adaptation scheme," Proc. NOSSDAV '99, 1999.
- [11] R. Rajaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the Internet," Proc. INFOCOM '99, 1999.
- [12] 櫻尾次郎, 胡 杭陵, 本田康弘, 鈴木秀智, "TCPと共存するリアルタイム通信プロトコル(RTP)のためのレート制御," 情報学マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO1999)シンポジウム, pp.381-386, June 1999.
- [13] 奥村誠司, 福田和真, 鷹取巧人, 大野次彦, 下間芳樹, "MPEG-4 over RTP 配信システムとQoS制御方式," 情報学マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2000)シンポジウム, pp.433-438, June 2000.
- [14] K. Psounis, "Active Networks: Applications, security, safety, and architectures," IEEE Communi. Surveys, First Quarter 1999.
- [15] T. Faber, "ACC: Using active networking to enhance feedback congestion control mechanisms," IEEE Network Magazine, vol.12, no.3, pp.61-65, May/June 1998.
- [16] M. Geria, W. Wang, and R. Cigno, "Bandwidth feedback control of TCP and real time sources in the Internet," Proc. of IEEE GLOBECOM 2000, pp.561-565, Nov. 2000.
- [17] 永田 晃, 山本和徳, 松田崇弘, 山本 幹, 池田博昌, "レート通知を用いたネットワーク介在型TCPふくそう制御方式," 信学論 B, vol.J85-B, no.8, pp.1402-1410, Aug. 2002.
- [18] D.P. Bertsekas and R. Gallager, "Data networks," Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, 1992.