

TCP データ通信との公平性を考慮した 輻輳適応型レート制御による動画像通信の実装

宮林 正樹 若宮 直紀 村田 正幸 宮原 秀夫

大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Tel: 06-6850-6588 Fax: 06-6850-6589
E-mail: miyabays@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 通信品質保証のない現在のインターネットにおいて、リアルタイム系マルチメディアアプリケーションとデータ通信系アプリケーションが混在する場合には、マルチメディアアプリケーションの送出する UDP トラフィックによりネットワーク帯域が占有され、TCP を用いるデータ通信系アプリケーションの通信品質が劣化する。

そこで本稿では、TCP データ通信と公平なマルチメディア通信を実現するために TCP-friendly の概念に基づく動画像通信のためのレート制御方式を実装し、受信側エンドシステムにおける動画像品質評価や通信状態の観測を通して実システムへの適用可能性を検討した。その結果、制御間隔を RTT の 32 倍とし、本稿で提案したレート制御方式を用いれば、TCP と公平に帯域を共有しつつ高品質で安定した動画像通信が行えることを示した。

キーワード TCP-friendly, レート制御, 動画像通信, 公平性, MPEG-2

Implementation of Video Transfer with TCP-friendly Rate Control Protocol

Masaki MIYABAYASHI Naoki WAKAMIYA Masayuki MURATA Hideo MIYAHARA

Department of Informatics and Mathematical Science
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Tel: 06-6850-6588 Fax: 06-6850-6589
E-mail: miyabays@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract As the use of real-time multimedia applications increases, a considerable amount of “greedy” UDP traffic would easily dominate network bandwidth and packet loss. As a result, bandwidth available to TCP connections is oppressed and their performance extremely deteriorates. In order that both TCP and UDP sessions fairly co-exist in the Internet, it is vital that we consider the fairness among both protocols.

In this paper, we implement a “TCP-friendly” rate control mechanism suitable to video applications and consider its applicability to a real system through observation of the video quality at the receiver and the connection state. It is shown that we can achieve high-quality and stable video transfer fairly sharing the network bandwidth with TCP by applying our rate control at a control interval of 32 times as long as RTT.

key words TCP-friendly, rate control, video transfer, fairness, MPEG-2

1 はじめに

通信品質保証が提供されない今日のインターネットにおいては、それぞれのアプリケーションが適切な通信プロトコルを使い分けることにより必要な通信品質を確保している。例えば、WWW やファイル転送、電子メールなどのように、遅延には寛容ではあるがデータ棄却には厳しいデータ通信系のアプリケーションは、信頼性のある通信を提供する TCP (Transmission Control Protocol) をトランスポートプロトコルとして用いている。一方、TV 会議のようなリアルタイム系マルチメディアアプリケーションは、多少のデータ棄却を許容する一方でアプリケーションの実時間性を損なわない高速なデータ通信を必要とするため、再送制御や輻輳制御を行わない UDP (User Datagram Protocol) を用いている。

TCP がネットワークの負荷状態に応じた輻輳制御を行なうのに対して、UDP はそのような制御は行わない。そのため TCP, UDP が混在するネットワークにおいて、大量のデータを生成するリアルタイム系アプリケーションが存在する場合には、UDP トラフィックによる帯域の占有やパケット棄却率の増大などの問題が生じる。さらに、TCP コネクションはパケット棄却が発生すると送出データ量を抑制するため、無秩序にトラフィックを送出する UDP コネクションとの性能格差が大きくなる。

インターネットにおけるリアルタイムマルチメディアアプリケーションの利用が広まっていくためには、TCP と UDP との間の公平性を考慮したトラフィック制御を実現することが必要である。例えば、ネットワーク内の各中継ルータでトラフィック種別に応じたパケットスケジューリングを行なうことにより、プロトコル間の通信品質の格差をある程度小さくすることができるが [1-3]、そのためにはネットワーク内のすべてのルータで同一のスケジューリングアルゴリズムを用いなければならない。また、エンド間で公平な通信を実現するためには、経路上のすべてのルータにおいて適切なパラメータ設定を行なうことが必要であるが、そのような制御は実際困難である。そこで、TCP と公平な通信を実現するためのレート制御手法の研究、開発が近年活発に行われており、特に TCP との公平性を表わす TCP-friendly という概念が注目されている [4-11]。TCP-friendly は、「同一ネットワークパス上における non-TCP の得るスループットと TCP の得るスループットが等しいこと」と定義されている [7]。TCP-friendly に基づくレート制御ではネットワークの状態に応じて、エンドシステムが積極的に UDP トラフィックの送出レートを調整することにより、TCP と公平にネットワーク帯域を分け合う通信を実現する。なお、以降では [7] にない、TCP との公平な通信を実現する TCP-friendly なレート制御手法を TFRCP (TcP-Friendly Rate Control Protocol) と表記する。

これまでの研究 [4-8] においては、レート制御が上位のアプリケーションに与える影響を考慮しておらず、そのままマルチメディアアプリケーションに適用することはできない。そこで、我々は、TFRCP の MPEG-2 符号化動画通信への適用可能性や効果的な制御手法について検討し、動画通信に適した TFRCP を提案した [9-11]。

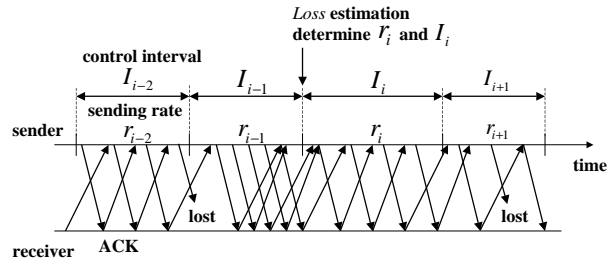


図 1: TFRCP による動画通信

提案手法を用いることにより、動画品質に大きな影響を与えることなく TCP と公平な動画通信が可能となることを示した。しかしながら、コンピュータシミュレーションによる評価のために理想的なシステムを対象としており、レート制御の有効性に影響を与えられられる制御間隔の変動などの要因について考慮していない。また、動画アプリケーションにおいて通信品質を示す重要な指標となる動画品質は送信側から送出された動画データの SNR (Signal to Noise Ratio) で示されており、網内でのパケット棄却など受信側での再生動画品質に与える影響については検討されていないなど、提案手法の実現可能性、実用性に関しては十分明らかにされていない。

そこで、本稿では [9-11] における提案手法を実装し、実システム上での受信側エンドシステムにおける動画品質の評価や通信状態の観測を行うことにより、シミュレーションでは考慮されていなかった諸問題について考察し、提案手法の実システムへの適用可能性について検討する。

2 動画通信に適した MPEG-TFRCP

本章では、MPEG-2 動画通信に適した TFRCP [9-11] の概要と実装に際する問題点について述べる。なお、以降では簡単のため、MPEG-2 動画通信に適した TFRCP を MPEG-TFRCP と表記する。

MPEG-TFRCP では、TCP と公平に帯域を共有しつつ高品質で安定した動画通信を行うため、図 1 のような制御を行う。MPEG-TFRCP では周期的に動画データの送出レートを制御している。すなわち、時間 I_{i-1} の制御期間 $i-1$ の終わりには、送信側エンドシステムは期間内に測定した RTT やパケット棄却率に基づいて TCP コネクションのスループット r_{TCP} を予測し、次の期間 i の制御間隔 I_i や動画データ送出の目標レート r_i を決定する。制御期間 I_i は RTT の 32 倍を GoP 時間 (GoP 内ピクチャ数/フレームレート) で近似したものをを用いる。また、目標レート r_i は期間 $i-1$ におけるパケット棄却の有無に応じて、以下のアルゴリズムにより決定する。

$$r_i = \begin{cases} r_{TCP} \approx \frac{MTU}{RTT \sqrt{\frac{2p}{3} + T_0} \min(1, 3\sqrt{\frac{3p}{8}}) p(1+32p^2)}, & \text{パケット棄却あり (1)} \\ 2 \times r_{i-1}, & \text{パケット棄却なし (2)} \end{cases}$$

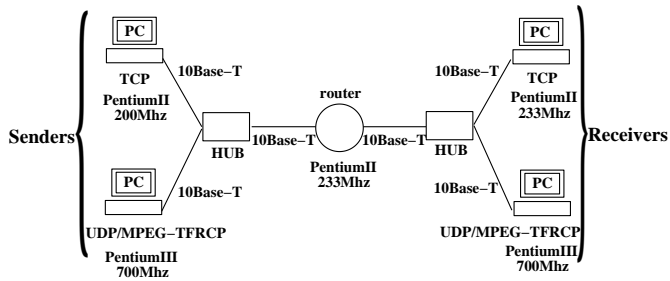


図 2: 実験システム構成図

ただし, MTU は送出パケットの最大サイズ (Maximum Transfer Unit), p はパケット棄却率, および T_0 はタイムアウト時間 (RTO) である.

RTT やパケット棄却率を導出するためのフィードバック情報は, 送信側エンドシステムからの送出パケットにタイムスタンプ, シーケンス番号を付加し, 受信側エンドシステムからすべての受信パケットに対して ACK を返送することにより得る. RTT については, パケットに付加したタイムスタンプと ACK の受信時刻から観測値を取得し, TCP で用いられているものと同様の low-pass フィルタを観測値に対し順次適用することにより推定値を導出する. また, パケット棄却率は, 各制御期間ごとの送出パケット数に対する受信パケット数の割合を用いて導出する. 本手法を用いることにより, TCP と同程度の RTT およびパケット棄却の検出精度があれば, 適切なレベルの制御効果が得られることが示されているが, 特にネットワークの負荷状態やエンドシステムの稼働状態により RTT が大きく変動する場合の適応性については評価されていない.

また, 動画像トラフィック送出レートの制御は, MPEG-2 符号化の際の量子化の度合を決定するパラメータである量子化スケールを調整することで実現する [12]. シミュレーションにより MPEG-TFRCP における動画像品質の変動はそれほど大きくないことが示されているが, 送信側エンドシステムから送出された動画像データの SNR (Signal to Noise Ratio) による品質評価を行っているため, 網内の遅延やパケット棄却が受信側エンドシステムで再生された動画像の品質に与える影響については考慮されていない.

3 MPEG-TFRCP の実装と評価

本章では, 2章で述べた MPEG-TFRCP を実験システム上に実装し, 実証実験によって実システムにおける MPEG-TFRCP の適用性および有効性を評価する.

3.1 MPEG-TFRCP の実装

実験システムは図 2 のように, 2 台のパーソナルコンピュータと 1 台の HUB からなる 2 つのネットワークを 1 台のルータを介して接続することにより構築された, 小規模な実験ネットワークである. それぞれの機器を接続するネットワークとしては 10Base-T を用いる. 一方のネットワークに属するパーソナルコンピュータを送信側,

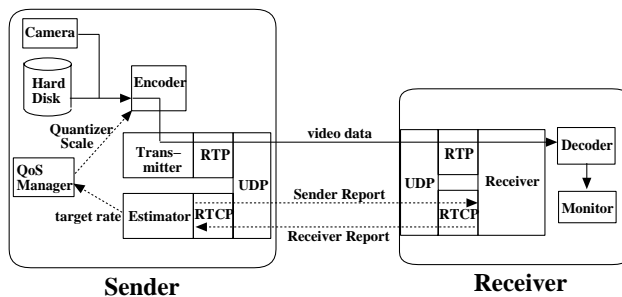


図 3: TFRCP エンドシステム概略図

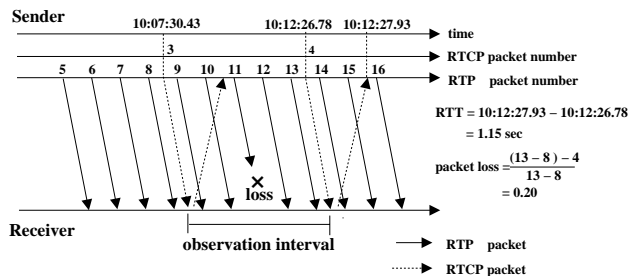


図 4: 制御パケット送受の様子

他方を受信側とし, それぞれ一対ずつの TCP コネクションおよび MPEG-TFRCP または UDP コネクションを設定する. 同一ルータを通る 2 本のコネクションを用いて通信実験を行うことにより MPEG-TFRCP の有効性を評価する.

実験システムにおける MPEG-TFRCP の送受信エンドシステムの概略図を図 3 に示す. 本システムでは実時間通信プロトコルとして RTP (Real-time Transport Protocol) [13] を用いたソケット通信により動画像データの送受信を行う. また, ネットワーク状態を推定するために必要なフィードバック情報は送受信エンドシステム間で RTCP (Real-Time Control Protocol) による制御パケットを送受することにより得る. 送信側エンドシステムは定期的 (本実験では 5 ピクチャごと) にタイムスタンプを付加した Sender-Report パケットを送出する. 受信側エンドシステムでは前回 Sender-Report パケットを受信した際の受信済データパケットの最大シーケンス番号と, 新たな Sender-Report パケット受信時の最大シーケンス番号から Sender-Report パケット間の送出パケット数を算出し, 同期間内の実受信パケット数, Sender-Report のタイムスタンプとともに Receiver-Report パケットとして送信側エンドシステムに返送する. 送信側エンドシステムは得られたフィードバック情報より, パケット棄却率と RTT を導出する (図 4).

また, MPEG-2 動画像をレート調整しつつ実時間で符号化するのには困難なため, 送信側エンドシステムでは, あらかじめいくつかの量子化スケールを用いて符号化した MPEG-2 動画像データを準備しておき, 式 (1), (2) のアルゴリズムによって導出された目標レートを下回るもののうち最も高品質なデータを読み出し, 送出する. 従って, 目標レートがあらかじめ準備された動画像データの最大レートを超過する場合には, 実際の動画像デー

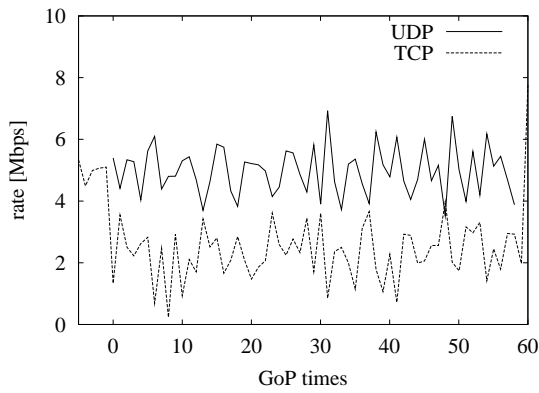


図 5: レート変動 (UDP vs. TCP)

タ送出レートは目標レートを下回ることになる。一方、目標レートが動画データの最低レートを下回る場合には、制御期間と目標レートの積で与えられる期間内送出可能データ量の範囲内で動画データを送出する。なお、本実験で準備した動画データの平均レートは 1.138 ~ 27.260 Mbps である。

3.2 MPEG-TFRCP の実証実験結果

図 2 に示すネットワークにおいて、平均レート 5 Mbps の MPEG-2 動画データをそれぞれ 1 本ずつの TCP, UDP コネクションを用いて転送した場合のレート変動の様子を図 5 に示す。ただし、レート変動の観測は TCP, UDP いずれも受信側エンドシステムで tcpdump を用いて行なった。また、図の縦軸には GoP 時間 (GoP 内ピクチャ数/フレームレート = 30/29.97 = 1.001 秒) 単位での平均レートの変動を示し、横軸には実験における GoP 時間単位の時間経過を UDP による動画通信開始時刻を 0 として示している。1 章で述べた通り、TCP と UDP が同一ネットワーク内に混在した場合には UDP トラヒックが TCP コネクションの帯域を圧迫し、性能格差が生じている。

次に、TCP と MPEG-TFRCP コネクションが混在する場合の通信実験の結果を図 6 に示す。図 6 より、MPEG-TFRCP はセッション中にデータの送出レートを調整しており、図 5 と比較して TCP コネクションの通信品質の劣化度は小さくなっている。しかしながら、そのふるまいは理想的なシステムを対象に評価を行った [9-11] に示されている結果とは大きく異なっている。

実システムにおける問題を明らかにするため、TCP コネクションと MPEG-TFRCP コネクションが混在する場合の、MPEG-TFRCP の観測したパケット棄却率 p (図中“loss”), 目標レート r_i (“target rate”), および送出対象となった動画データの平均レート (“video rate”) を図 7 に示す。図 7 より、パケット棄却の有無に応じて MPEG-TFRCP における動画データ送出レートが大きく変動していることがわかる。特にパケット棄却が観測されない期間が続くと目標レートが指数的に大きくなってしまい、その結果引き起こされる輻輳によって次の制御期間の目標レートが急激に小さくなる。また、ルータやエンドシステムにおけるバッファリングおよび送受信処理遅

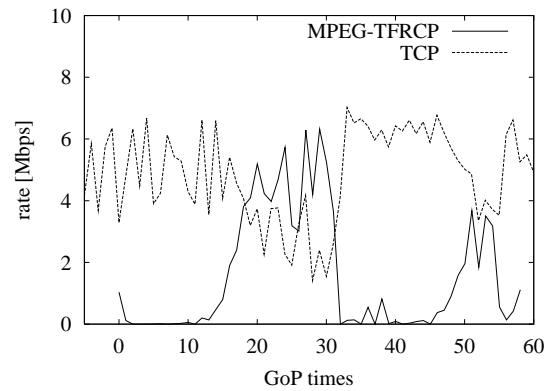


図 6: レート変動 (MPEG-TFRCP)

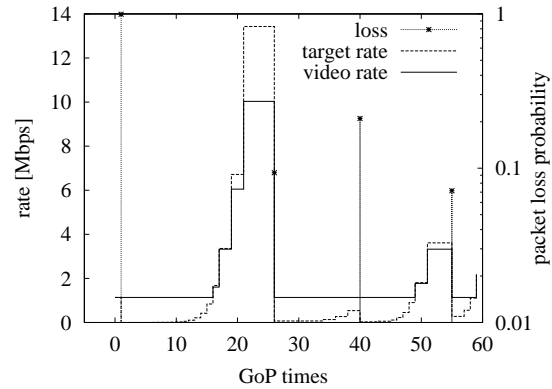


図 7: パケット棄却率の変動 (MPEG-TFRCP)

延によりパケットごとに観測される RTT の変動も大きく、図 6 に示されるとおり制御期間にばらつきが生じる。

4 MPEG-TFRCP の改善

3 章で示した通り、提案された MPEG-TFRCP では実システム上で安定した動画通信が行えない。そこで本章では、高い公平性と安定した品質を得ることのできる動画通信を実現するために、MPEG-TFRCP を改善するいくつかの手法について検討する。

4.1 動画通信に適したレート制御手法

MPEG-TFRCP ではパケット棄却が発生しなかった場合には式 (2) に従ってレートを制御するため、送出レートが指数的に高くなりパケット棄却を引き起こす。そこで、TCP におけるウィンドウベースの制御にならって、より緩やかなレート制御を行う方式について検討する。TCP は ACK を受信するごとにウィンドウサイズ $cwnd$ を $1/cwnd$ ずつ大きくするため、ウィンドウサイズは RTT ごとに 1 ずつ増加することになる。そこで、MPEG-TFRCP においても、長さ I_{i-1} の制御期間 $i-1$ でパケット棄却が発生しなかった場合の次の制御期間 i での動画データ送出レート r_i を、式 (3) により設定する。

$$r_i = r_{i-1} + \frac{MTU \times I_{i-1}}{RTT^2} \quad \text{パケット棄却なし (3)}$$

また、パケット棄却発生時に TCP のスループットを推定する式 (1) は、ネットワークの負荷、RTT とともに安定した状態でのランダムなパケット棄却を前提としている

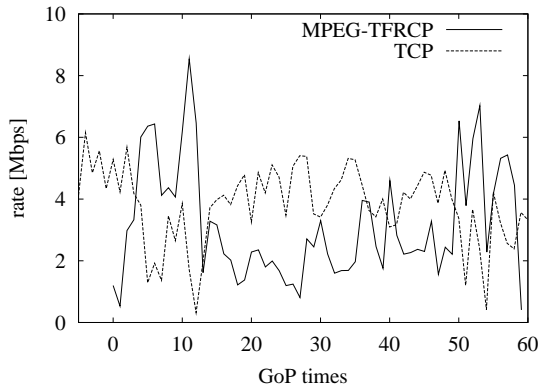


図 8: レート変動 (提案レート設定手法)

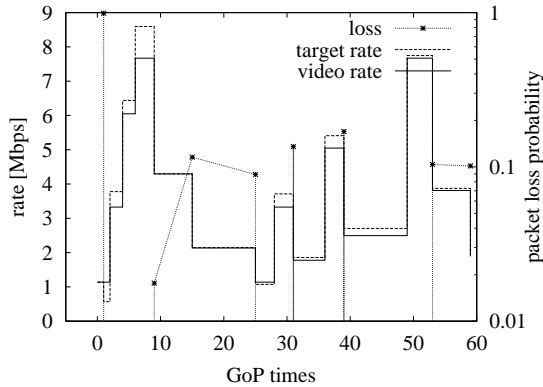


図 9: パケット棄却率の変動 (提案レート設定手法)

ため [6, 7], 特に本実験システムのようにそれぞれのコネクションのふるまいが互いに大きな影響を与える場合にはうまく適用できない. そこで, TCP が輻輳時にウィンドウサイズを半分にするのと同様に, MPEG-TFRCP でもパケット棄却が発生した場合のレート設定法として式 (4) が有効であると考えられる.

$$r_i = \frac{r_{i-1}}{2} \quad \text{パケット棄却あり (4)}$$

式 (3) および式 (4) を MPEG-TFRCP のレート設定アルゴリズムとして用いた場合の実験結果を図 8, 9 に示す. これらの図より MPEG-TFRCP コネクションのレート変動が比較的緩やかになり, また TCP コネクションとほぼ同程度のスループットが得られていることがわかる. さらに, MOS (Mean Opinion Score) による再生動画品質の主観評価を行った結果, UDP の場合 (図 5) の MOS 値が 2.4, 改善前の MPEG-TFRCP (図 6) では 1.8 であるのに対して, 図 8 では 2.6 となり, 再生動画品質も高い.

紙幅の都合上, レート設定式の他の組合せ (式 (1) と (4), 式 (3) と (2)) についての実証実験結果については省略するが, 式 (3) と (4) を用いたレート設定アルゴリズムが最も適切であった.

4.2 動画通信に適したレート制御間隔

MPEG-TFRCP は適切な制御間隔ごとにデータ送出レートを決定し動画データを送出するため, 高品質かつ安定した動画通信を実現するためには制御間隔を適切に

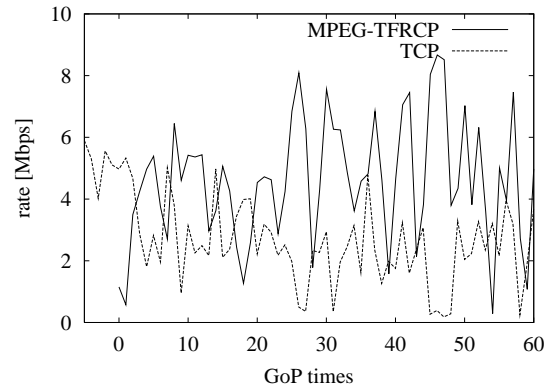


図 10: レート変動 (16-RTT)

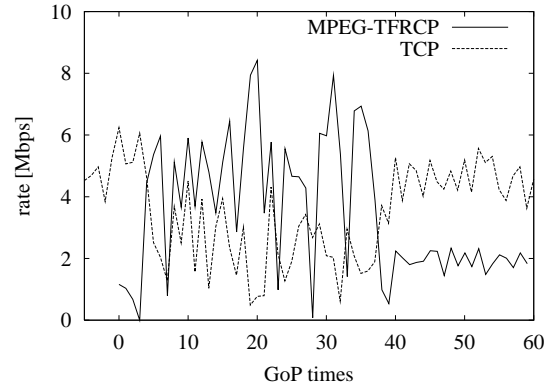


図 11: レート変動 (64-RTT)

設定しなければならない. 制御間隔が短すぎると, 頻繁なレート制御により送信側エンドシステムの送出レート変動が激しくなり, ネットワークの不安定性を招くとともに受信する動画の品質が大きくばらついてしまう. また, 観測期間が短くなるため, 精度の高いネットワークの状態推定が行えない. 逆に制御間隔が長すぎる場合には, ネットワークの状態に適さないレートでの動画通信が長時間続いてしまい, ネットワークが軽負荷状態であっても不当に低い品質の動画が転送されたり, ネットワークに負荷を与え続けることで TCP コネクションに不利な状況を招いたりする問題が考えられる.

図 6 から図 9 においては提案に従い, 制御間隔として RTT の 32 倍を GoP 時間で近似したものをを用いた (簡単のためこの手法を 32-RTT と呼ぶ). 本節では制御間隔を RTT 推定値の 16 倍 (16-RTT), および 64 倍 (64-RTT) したものを GoP 時間で近似する手法についても検討を行なう.

4.1 節で述べたレート設定手法について, 制御間隔を 16-RTT および 64-RTT として実験した結果を図 10, 11 にそれぞれ示す. 32-RTT の場合 (図 8) と比較して, 制御間隔を RTT 推定値の 16 倍と小さくすることによりレート変動が大きくなることが図 10 より明らかである. これは, 制御間隔が短い場合には, 制御期間内の送出パケット数が少ないため, ネットワーク状態を高い精度で推定するのに十分なフィードバック情報が得られないことによると考えられる. 一方, 図 11 に示されるとおり制御間隔を 64-RTT と大きくすると TCP と公平でないレートで動画データを送り続けるため, TCP と MPEG-TFRCP

との短中期的な公平性が得られない。

以上より、本実験システムにおいては MPEG-TFRCP における動画送出レートの制御間隔として RTT 推定値の 32 倍を GoP 時間で近似したものをを用いるのが適当であると考えられる。

5 おわりに

本稿では、データ系通信とリアルタイム系動画通信が混在するネットワークにおいて使用帯域に関するプロトコル間の公平性を実現するためのレート制御手法である MPEG-TFRCP を対象に、小規模ネットワークにおける実証実験を通して TCP と公平な動画レート制御の有効性、および適用可能性について評価、検討を行なった。理想的な環境を前提としたシミュレーションによってその有効性が示されている MPEG-TFRCP を実システムに実装するためには、様々な問題点を解決する必要があり、本稿ではそのうちの幾つかについて解決策を検討した。

エンドシステムからのフィードバック情報に基づいた動画データ送出レートの設定手法としては、直前の制御期間におけるパケット棄却の有無に応じて異なるレート設定を行なう 4 種類の手法を対象に動画データ通信実験を行い、TCP のウィンドウ制御をレート制御に置き換えたものをを用いるのがよいことを明らかにした。また、動画品質の変動に大きな影響を与えられらるレート制御間隔については、それぞれ RTT 推定値の倍率の異なる 16-RTT, 32-RTT, 64-RTT 手法について比較評価を行ない、RTT の推定値を 32 倍したものを GoP 時間で近似する 32-RTT 手法を用いて制御間隔を設定することにより安定した動画通信が実現できることを明らかにした。さらに、受信側エンドシステムにおける再生動画品質に対する主観評価を行い、本稿で実装したレート制御を用いることにより、UDP コネクション上で動画通信を行なう場合と比較して、使用帯域に関して TCP と公平かつ高品質で安定した動画通信が行えることを示した。

ただし、本稿で用いた実験システムは 4 台のエンドシステム、2 台のハブ装置、および 1 台のルータからなる比較的小規模なネットワークであるため、他のトラヒックが多数混在する大規模なネットワークについてもレート制御の有効性を評価するための実証実験を行う必要があるものと考えられる。また、本報告では、送受信エンドシステム間で RTCP を利用した制御パケットを送受することによりレート制御のためのフィードバック情報を得ているが、ネットワークが過負荷状態に陥るとこれらの制御パケットもネットワーク内で棄却される可能性がある。制御パケットが棄却されるとネットワークの状態推定精度が劣化し、適切なレート制御が行えないため、なんらかの回復制御が必要となるが、データパケットの棄却による動画品質劣化からの回復制御とともに今後の課題としたい。

参考文献

- [1] S. Floyd and V. Jacobson, "Link-sharing and resource management models for packet networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, pp. 365–386, August 1995.
- [2] J. C. R. Bennett and H. Zhang, "Hierarchical packet fair queueing algorithms," *Proceedings of ACM SIGCOMM'96*, vol. 26, pp. 143–156, October 1996.
- [3] D. Lin and R. Morris, "Dynamics of random early detection," *SIGCOMM'97*, pp. 127–137, September 1997.
- [4] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, and T. Ott, "The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 27, pp. 67–82, July 1997.
- [5] J.-C. Bolot and T. Turletti, "Experience with control mechanisms for packet video in the Internet," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 28, pp. 4–15, January 1998.
- [6] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation," *Proceedings of ACM SIGCOMM'98*, vol. 28, pp. 303–314, September 1998.
- [7] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "A model based TCP-friendly rate control protocol," *UMASS-CMPSCI Technical Report*, October 1998.
- [8] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the Internet," *Proceedings of IEEE INFOCOM'99*, March 1999.
- [9] 若宮 直紀, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "TCP との公平性を考慮した動画転送," 電子情報通信学会技術研究報告 (*SSE99-100*), pp. 79–84, November 1999.
- [10] 若宮 直紀, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "アプリケーションレベルの QoS を考慮した TCP と公平な動画通信," 電子情報通信学会技術研究報告 (*CQ99-61*), pp. 37–42, December 1999.
- [11] N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "On TCP-friendly video transfer with consideration on application-level QoS," *to be presented at IEEE ICME 2000*, July 2000.
- [12] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "QoS mapping between user's preference and bandwidth control for video transport," *Proceedings of IFIP IWQoS'97*, pp. 291–302, May 1997.
- [13] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for real-time applications," *RFC1889*, January 1996.