

# アプリケーションレベルのQoSを考慮した TCPと公平な動画像通信

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: 06-6850-6586 Fax: 06-6850-6589

E-mail: wakamiya@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットでは通信品質に関する保証がないため、実時間型アプリケーションのUDPトラヒックとデータ系アプリケーションのTCPトラヒック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大量のUDPトラヒックによりTCPの通信品質が極端に劣化するという問題が発生する。

そこで本稿では、TCPと公平な通信を実現するためにTCP-friendlyの概念を導入したレート制御を対象に検討を行ない、効果的な制御手法を提案している。公平性を「non-TCPコネクションの得るスループットが同一パス上のTCPコネクションと同じであること」と定義した従来のレート制御と異なり、提案手法では受信側エンドシステムで再生される動画像の品質やファイルの転送遅延といったアプリケーションレベルのQoS (Quality of Service) を考慮した公平な通信を可能にする。シミュレーションによる評価の結果、提案手法を用いることによりさまざまな負荷状態においてQoSに関してTCPと公平な動画像転送が可能となることを示した。

キーワード 公平性, TCP-friendly, 動画像転送, QoS, レート制御

## On TCP-friendly Video Transfer with Consideration on Application-level QoS

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: 06-6850-6586 Fax: 06-6850-6589  
E-mail: wakamiya@ics.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** When both TCP and UDP sessions co-exist in the current Internet, the performance of TCP sessions easily deteriorate because of congestion incurred by UDP sessions which are of real-time video applications.

In this paper, we extend the TCP-friendly rate control protocol which originally consider the fair-share of link bandwidth among TCP and UDP. With our proposed method, the achievable application-level QoS, such as perceived video quality and file transfer delay, are the same among TCP and UDP sessions which traverse the same path. Through simulation experiments, we show that the high quality video transfer can be performed with our proposed method while satisfying the fairness with TCP in terms of application-level QoS.

**key words** fairness, TCP-friendly, video transfer, QoS, rate control

## 1 はじめに

近年，社会へのコンピュータネットワークの浸透，コンピュータの処理能力の向上にともない，映像，音声などのマルチメディアデータを遠隔地とやり取りする分散型マルチメディアアプリケーションの利用が急激に広まっており，様々な問題を引き起こしている．インターネットにおいては個々のアプリケーションの通信品質は保証されないため，エンドシステム自身が利用するアプリケーションごとに異なる通信プロトコルを使い分け，必要な通信品質を得る努力がなされている．例えば，データの棄却に厳しい一方で遅延には比較的寛容なデータ型アプリケーション (http, ftp, telnet など) に対しては，ネットワークの状態に応じた輻輳制御や再送制御を行なうことによりデータ損失の少ない高品質な通信を実現することのできる TCP が用いられている．一方，多少のデータ損失に耐えることのできる実時間型のマルチメディアアプリケーション (TV 会議など) では，高速なデータ通信を行なうために，煩雑な制御を行なわない UDP が使用されている．

マルチメディアアプリケーションは従来のデータ通信と比較して送出するデータ量が極端に多いため，適切な制御をしないままに通信を開始するとネットワークに大量の UDP トラフィックが流入し輻輳を引き起こす可能性がある．ネットワークが輻輳状態に陥ると TCP は輻輳制御アルゴリズムにしたがってウィンドウサイズを小さくするため，UDP トラフィックにより帯域が占有されることになり，信頼性の高い通信を目指した TCP コネクションの極端な性能劣化を招く．また，中継ノードに適切なパケットスケジューリング機構がない場合には，同じ経路を通る UDP セッション間でも通信品質劣化，性能格差が生じると考えられる．

ネットワークの性能を劣化させることなく TCP と公平なマルチメディア通信を行なうためには，実時間型アプリケーションにもネットワークの状態に応じたレート制御を適用する必要がある．そのため，TCP との公平性を表す概念として TCP-friendliness を導入した研究が近年活発に行なわれている [1-6] ．TCP-friendliness は「non-TCP コネクションの得るスループットが同一パス上の TCP コネクションと同じであること」と定義され，TCP-friendly な通信プロトコルではネットワークの状態に応じて non-TCP コネクションのデータ送出レートを調節することにより TCP と公平な通信を実現する．これらの文献で提案されているいずれの手法においても通信環境に応じた適切なパラメータ設定を行なえばある程度 TCP との公平性を達成することができるが，そのようなパラメータ設定が必ずしも動画通信に代表される分散型マルチメディアアプリケーションにとって適当であるとは限らない．例えば，公平性を高めるためには頻

繁なレート制御を行なうことが有効であると考えられるが，受信側エンドシステムで再生される動画は時間による品質のばらつきが大きなものになってしまう．逆にレート制御頻度が小さすぎる場合には，ネットワークの状態にそぐわないレートでの動画転送を長期間行なうことになり，不当に低い品質の動画が配送されたり，ネットワークに負荷を与え続ける可能性がある．

そこで，[7] では MPEG-2 符号化された動画像を用いる分散型マルチメディアアプリケーションを対象に，TCP の通信品質を劣化させることなく高速かつ高品質な動画通信を行なうと同時に，ネットワーク全体の通信効率を高める TCP との公平性を考慮した動画レート制御手法を提案した．[7] で提案した TFRC (Tcp-Friendly Rate Control Protocol) を用いることにより TCP-friendliness を満足しつつ高品質な動画通信を行なうことが可能である．しかしながら，ユーザの立場から見た通信品質，すなわちアプリケーションレベルの QoS を考慮すると「TCP と non-TCP のスループットが同じこと」が必ずしも公平な制御であるとは限らない．例えば，TCP を用いるデータ通信においてはファイル転送遅延，TFRC を用いる動画通信では動画品質をそれぞれのアプリケーションレベルの QoS であるとみなした場合には，データ送出レートが同じであっても得られる QoS は大きく異なる．そこで本稿では，スループットを公平性の指標とするこれまでの TFRC と異なり受信側エンドシステムで再生される動画の品質やファイルの転送遅延といったアプリケーションレベルの QoS を考慮した公平な通信を可能にするレート制御手法について検討する．

## 2 TCP-friendly Rate Control Protocol

TFRC (Tcp-Friendly Rate Control Protocol) では，「non-TCP コネクションの得るスループットが同一パス上の TCP コネクションと同じであること」という公平性の定義に基づき，non-TCP コネクション，特に元来 UDP を用いてきたアプリケーションに対してデータ送出レートの制御を行なう．[7] では，TFRC の (1) 適切な制御間隔ごとに，(2) 観測結果からネットワーク状態を推測し，(3) TCP のスループットを推定，(4) 推定したスループットにあわせてデータ送出レートを調整する，というそれぞれの制御手順について動画通信との適合性を検討し，動画通信に適したレート制御手法を提案した．以下では上記の各項目について提案手法での制御における概要を述べる．

高い制御効果を得るためにはネットワークの状態変化に即座に追従できるように頻繁なレート制御を行なうのが効果的であると考えられる．しかしながら，制御間隔が短すぎる場合には，観測に基づくネットワーク状態推測の精度が低くなるため，TCP のスループットを推定

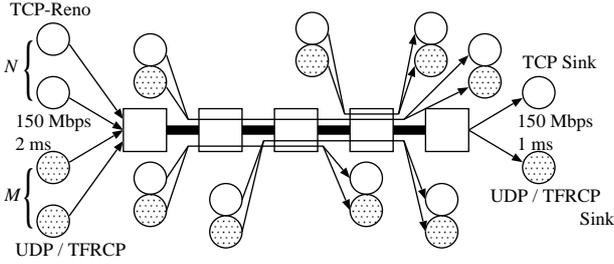


図 1: ネットワークモデル

する際の誤差が大きくなる。また、たとえ正確に TCP のスループットが推定できたとしても、動画通信の頻繁なレート変更は受信側エンドシステムで再生される動画の品質に大きなばらつきをもたらしてしまう。逆にレート制御頻度が低すぎる場合には、ネットワークの負荷状態の変化に対応できず、ネットワークが軽負荷状態であるにもかかわらず不当に低い品質の動画を配送したり、あるいは輻輳状態にあるネットワークにより多くの負荷を与え続ける可能性がある。そこで、[7] ではシミュレーションを通して適切な制御間隔に関する検討を行ない、MPEG-2 符号化された動画については RTT の 32 倍程度の間隔でレート変更制御を行えばよいことを明らかにした。ただし、MPEG-2 動画トラフィックの周期性を考慮し、制御間隔は GoP (Group of Picture) 時間を単位とする。

TFRCP はネットワークの負荷状態をあらわす 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を推定する。そのため TFRCP の送信側エンドシステムは適当な頻度でネットワークや受信側エンドシステムからのフィードバック情報を得る必要がある。例えば [1-4, 6] では送出パケットにタイムスタンプを付加し対応する ACK の受信時刻を観測することで、また [5] では RTCP (Real-Time Control Protocol) パケットを送受信することにより RTT の観測値を得、複数の観測値に対して適当なフィルタを適用することで RTT を推定する。パケット棄却率に関しては、パケットのシーケンス番号の抜けから棄却数を算出し、総送出パケット数で除算する手法 [5, 6] や、TCP と同様に 1 RTT 内の複数のパケット棄却は 1 回と数え、観測期間中のパケット棄却回数を総パケット数で除算する手法 [2-4] などがとられる。[7] では、送出するパケットにタイムスタンプとシーケンス番号を付加し、受信側エンドシステムから返送される ACK を利用して TCP での制御 [8] と同様の手法を用いて RTT やパケット棄却率を推測する。

フィードバック情報に基づき算出された RTT とパケット棄却率より TCP コネクションのスループットを推定するためには精度の高い推定式を用いる必要がある。TCP のスループット推定式としては以下の 2 つの手法がよく知られている。

手法 1 [1, 2]: RTT とパケット棄却率  $p$  および MTU

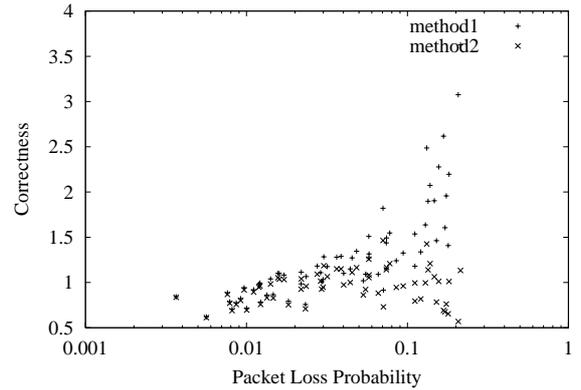


図 2: 推定精度

(Maximum Transport Unit) から次式を用いて TCP コネクションのスループット  $r_{TCP}$  を推定する。ただし、タイムアウトについては考慮していない。

$$r_{TCP} = 1.22 \times \frac{MTU}{RTT\sqrt{p}} \quad (1)$$

手法 2 [3, 4]: 受信側エンドシステムのウィンドウサイズ  $W_{max}$  や RTO (Retransmission Time Out)  $T_0$  を考慮することにより推定精度を高めている。

$$r_{TCP} \approx \min\left(\frac{W_{max}}{RTT}, \frac{1}{RTT\sqrt{\frac{2p}{3} + T_0 \min(1, 3\sqrt{\frac{3p}{8}})p(1+32p^2)}}\right) \quad (2)$$

[7] では、図 1 に示すネットワークにおけるシミュレーション結果 (図 2) に基づき、TCP コネクションのスループット推定手法として手法 2 を採用している。ただし、推定式 (2) では観測期間中にパケット棄却が発生しなかった場合に TCP のスループットを推定できないため、提案手法では制御期間  $i-1$  におけるパケット棄却の有無に応じて次の期間  $i$  のデータ送出レート  $r_i$  を次のように与える。

$$\begin{aligned} \text{棄却あり} \quad r_i &= \frac{MTU}{RTT\sqrt{\frac{2p}{3} + T_0 \min(1, 3\sqrt{\frac{3p}{8}})p(1+32p^2)}} \quad (3) \\ \text{棄却なし} \quad r_i &= 2 \times r_{i-1} \quad (4) \end{aligned}$$

なお、図 2 では推定精度の指標として Correctness  $CR$  を次式で与えている。

$$CR = \frac{\text{Estimated Rate}}{\text{Average Throughput}} \quad (5)$$

TCP との公平性を考慮した動画転送において、送信側エンドシステムは設定されたデータ送出レート  $r_i$  に応じて動画トラフィックの生成レートを調整しなければならない。そのため、[7] では MPEG-2 符号化手法 [9] の符号化アルゴリズムに基づき、動画データの量子化の度合、すなわち量子化スケールの値を動的に制御する。具体的には、図 3 に示される量子化スケールと生成される動画の平均レートおよび SNR (Signal to Noise Ratio) で評価した平均動画品質の関係に基づき、式 (3) および式 (4) によって定められた送出レート  $r_i$  の範囲内で最も高い動画品質を得ることのできる量子化スケールを選択する。ただし、制御期間  $i$  中は一定の送出レート、

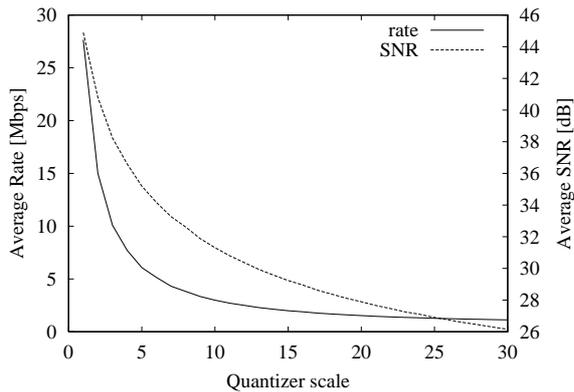


図 3: 量子化スケールとレート, 動画像品質の関係

動画像品質での動画像転送を行なうため, MPEG-2 符号化アルゴリズムとしては固定の量子化スケールを適用する VBR (Variable Bit Rate) 符号化手法を用いている. 文献 [10] では, さまざまな動画像データに対して量子化スケール, 解像度, フレームレートといった符号化パラメータから動画像転送に必要な帯域を導出できる関係式を導出しているが, 図 3 に対しても同様の手法を適用することにより量子化スケールと平均レートの関係を得ることができる.

制御期間  $i$  中は決定された量子化スケールを用いて動画像符号化を行ない, 生成された動画像データは送信側エンドシステムから順に送出される. ただし, 期間内の総送出データ量が設定レート  $r_i$  と制御期間の長さ  $I_i$  の積によって与えられる期間内送出可能データ量を超過する場合には, 残りの動画像データは送出されない. また, 送出トラヒックのレートスムージングは行なわない.

### 3 アプリケーションレベルの QoS に関する公平性

前章で述べた TFRCP [7] では [1-6] と同様に TCP を用いるデータ通信と TFRCP を用いる動画像通信の得るスループットが等しい場合に公平であるとしてレート制御を行なっている. しかしながら, それぞれのアプリケーションを利用するユーザの立場から見たアプリケーションレベルの品質を考慮すると, スループットが同じであっても必ずしも公平な通信品質を得ているとみなされとは限らない. 例えば, データ通信においてはファイル転送遅延を, 動画像通信では SNR や MOS (Mean Opinion Score) などの指標を用いて評価される動画像品質をアプリケーションレベルの QoS であるとした場合, データ通信ではスループットが 2 倍になればファイル転送遅延が半分になるためユーザの感じる通信品質も 2 倍になるのに対し, 動画像通信ではスループットに対する QoS の増減率はスループットの変化する領域によって異なる (図 3).

アプリケーションレベルの QoS に関して TCP と公平なレート制御を実現するためには, TFRCP は (1) 適切

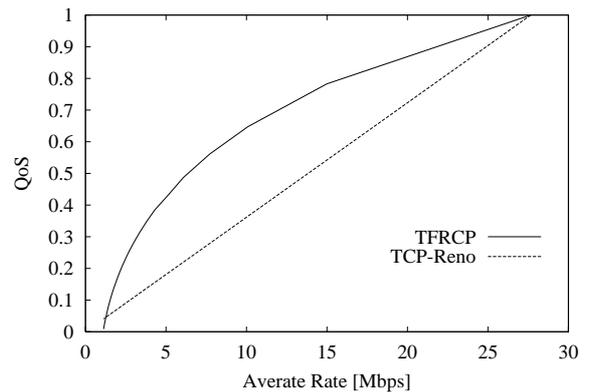


図 4: スループットとアプリケーションレベルの QoS

な制御間隔ごとに, (2) 観測結果からネットワーク状態を推測し, (3) TCP の QoS を推定, (4) 同じ QoS を得ることのできる動画像データ送出レートを算出, 調整する必要がある. 項目 (1) および (2) については, 2 章と同じ手法が適用可能であるため, 本章では項目 (3) および (4) について検討する.

TFRCP による動画像転送におけるアプリケーションレベルの QoS は転送される動画像の品質で表されるものとする, 図 3 より導出される送出レートと動画像品質の関係から, ある QoS を得るための動画像データ送出レートを容易に設定可能である. なお, 本稿では動画像品質を客観的評価指標である SNR によって表すものとする. ただし, TCP で得られる QoS と比較するためには SNR を例えば 0~1 の範囲に正規化する必要がある. そのためには動画像通信においてどのような品質の動画像が得られればユーザが最も満足するか, すなわち  $QoS=1$  となるかについて明らかにしなければならないが, 本稿では量子化スケールを調整することにより MPEG-2 動画像のデータ生成レート制御を実現していることを考慮し, 量子化スケールを 1 とした場合に得られる動画像品質を  $QoS=1$  としている.

一方, TCP によるデータ通信におけるアプリケーションレベルの QoS はファイルの転送遅延で表現されるものとする, TFRCP が QoS に関して TCP と公平な制御を行なうためには, 推定式 (2) により算出された TCP のスループットからファイル転送遅延を導出する必要があり, 転送されているファイルのサイズを推定しなければならず, また TCP で  $QoS=1$  として扱われる遅延についても把握しなければならない. しかしながら, 同じパスを經由しているコネクション間であってもファイルサイズや QoS に関する情報をやり取りするためのシグナリングプロトコルは存在せず, TFRCP が公平性の対象となる TCP の QoS を推定するために必要な情報を得ることは非常に困難である.

そこで本稿では, TFRCP が符号化された動画像データの特性や受信側エンドシステムからのフィードバックなど送信側エンドシステムで保持しているローカル情報から

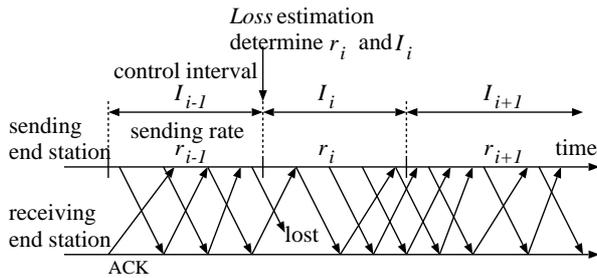


図 5: Q-TFRCP による動画転送

TCP の QoS を推定できることを目指し、TFRCP で最も高い品質が得られる動画データ送出レート  $R_{max}$  (図 3 では約 27 Mbps) でのファイル転送遅延を TCP で QoS が 1 となる遅延とみなす。したがって、TCP で得られる QoS は TCP のスループットの TFRCP における最大レート  $R_{max}$  との相対関係により与えられ、具体的には式 (2) を用いて推定した TCP のスループットを  $R_{max}$  で除算することにより算出する。図 4 に TCP, TFRCP におけるスループットと QoS の関係を示す。TFRCP は算出した TCP の QoS と本図に示す両者の関係に基づき、TCP と同じ QoS を得ることのできる動画データの生成レートを導出し、図 3 に示す関係から導き出された生成レートの範囲内でも最も高い動画品質を得ることのできる量子化スケールを選択、動画符号化を行なう。

#### 4 アプリケーションレベルの QoS を考慮した TFRCP

本章では前章の検討に基づきアプリケーションレベルの QoS に関して TCP と公平な動画通信を実現するレート制御手法 (Q-TFRCP: Qos-based TFRCP) を提案し、シミュレーションによりその有効性を示す。

図 5 に提案する Q-TFRCP におけるレート制御の様子を示す。提案手法では、時間  $I_{i-1}$  の制御期間  $i-1$  で測定されたパケット棄却率や RTT に基づき次の期間  $i$  の制御間隔  $I_i$  や動画データ送出レート  $r_i$  を決定する。データ送出レート  $r_i$  の決定は次のようにして行なう。まず、式 (2) を用いてパケット棄却率、RTT の推測値より TCP コネクションのスループット  $r_{TCP}$  を推定する。ただし、期間  $i-1$  にパケット棄却が発生しなかった場合には式 (2) を適用することができないため、式 (4) と同様に、期間  $i$  で推定した TCP コネクションのスループットを 2 倍したものを新たな  $r_{TCP}$  とする。次に、導出された  $r_{TCP}$  を Q-TFRCP において最も高い動画品質を得るための動画データ送出レート  $R_{max}$  で除算することにより、データ通信アプリケーションで得られる QoS を算出する。その後、図 4 に示すレートと QoS の関係から TCP と同じ QoS を得るための動画データの送出レート  $r_i$  を導出し、2 章で述べた制御手法と同様に図 3 に示す関係に基づいてレート  $r_i$  を達成するための量子化スケールを決定する。制御期間  $i$  中は定められ

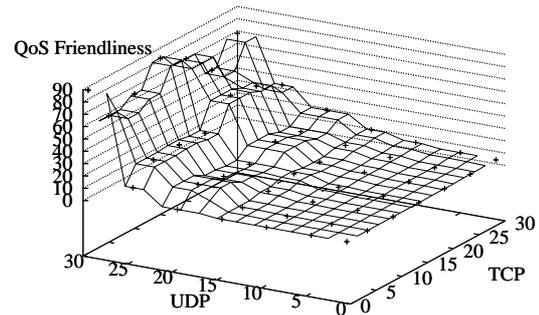


図 6: UDP における QoS に関する公平性

た量子化スケールを用いて動画を符号化、送出する。

図 1 に示すネットワークを対象に、本制御手法の有効性をシミュレーションにより評価した。なお、シミュレーションには ns version2 [11] を用いた。シミュレーションに際しては、各ノード間のリンク容量を 150 Mbps、伝搬遅延を 10 msec、中継ノードのバッファサイズを 100 パケットとした。なお、パケットスケジューリングアルゴリズムとしては FIFO を用いている。Q-TFRCP には図 3 に示す特性を持つ動画データを、TCP には図 3 において動画品質が最も高い場合の動画レートに等しい約 27 Mbps の CBR トラフィックを入力として与えた。TCP としては広く一般に用いられている TCP-Reno を用い、タイム粒度は 10 msec とする。また、それぞれ 4 コネクションずつある外部からの TCP, UDP には図 3 において量子化スケールを 6 とした場合の動画トラフィック (平均レート約 5.4 Mbps) を与えている。

図 6 から図 8 にそれぞれ動画転送に UDP, TFRCP, Q-TFRCP を適用し、ファイル転送、動画転送それぞれのコネクション数を 0 ~ 30 に変化させた場合のシミュレーション結果を示す。比較に際しては、QoS に関する TCP との公平性を表す指標として次式を用いた。

$$\frac{\text{Average QoS with non-TCP}}{\text{Average QoS with TCP}} \quad (6)$$

動画転送に UDP を用いた場合には TCP の性能が劣化するため得られるスループットのプロトコル間格差が大きく、図 6 に示すとおり QoS に関しても不公平な結果となる。スループットに関して TCP と公平な制御を行なう TFRCP を適用することにより、図 7 に示すとおり QoS に関する公平性も高まることがわかる。しかしながら、図 4 から明らかのように同じスループットに対して得られるアプリケーションレベルの QoS は TCP よりも TFRCP の方が高いため、図 7 においてもほぼ全ての領域で TFRCP で得られる QoS が上回っており、最大約 2.1 倍の差が生じている。動画通信に Q-TFRCP を適用した場合には QoS に関して公平なレート制御が実現されており (図 8)、その差は最大約 1.8 倍である。

図 7 および図 8 における QoS に関する公平性の分布

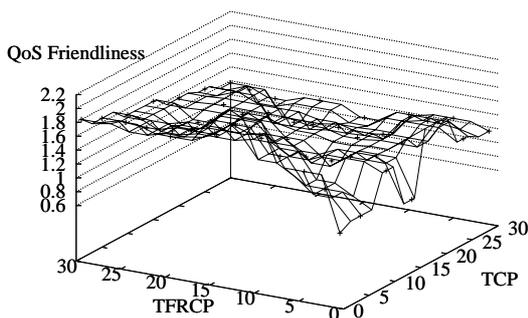


図 7: TFRCP における QoS に関する公平性

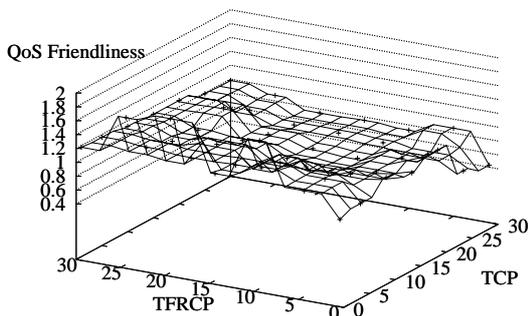


図 8: Q-TFRCP における QoS に関する公平性

の様子を累積分布曲線で示す (図 9)。図に示されるとおり、TFRCP よりも Q-TFRCP の方がアプリケーションレベルの QoS に関する公平性が高く、例えば図 7 において TCP と TFRCP で得られる QoS の差が 1.5 倍以内に収まる領域は 67.3% であるのに対し、Q-TFRCP では 90.0% となっている。また、図には示さないが Q-TFRCP では TFRCP と比較して動画像転送の設定レートが低くなるため TCP の性能が向上し、ファイル転送、動画像転送をあわせた総スループットも高くなっている。

## 5 おわりに

本稿では通信品質保証のないネットワークにおける TCP コネクションと non-TCP コネクションとの間に発生する不公平を解決するため、non-TCP コネクションを利用する動画像転送を対象にアプリケーションレベルの QoS に関して公平な通信を行なうレート制御手法を提案し、さまざまなネットワークの負荷状態において TCP と公平な通信が可能となることを示した。今後は、公平性を保ちつつレート制御による動画像品質の変動を抑えるための手法について検討する予定である。

## 参考文献

[1] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, and T. Ott, "The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm," *Computer Communication Review*, vol. 27, pp. 67–82, July 1997.

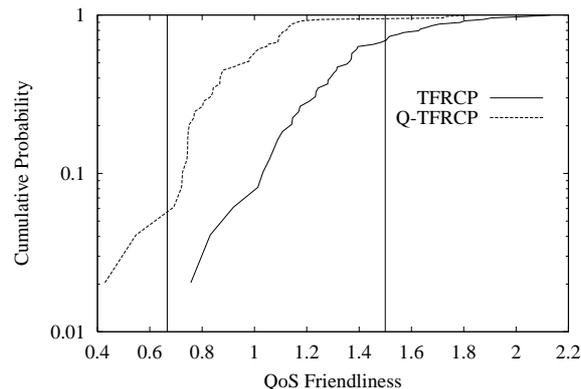


図 9: QoS に関する公平性の累積分布

- [2] W. tian Tan and A. Zakhor, "Real-time internet video using error resilient scalable compression and TCP-friendly transport protocol," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 1, pp. 172–186, June 1999.
- [3] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation," *Proceedings of ACM SIGCOMM'98*, September 1998.
- [4] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, "A model based TCP-friendly rate control protocol," *UMASS-CMPSCI Technical Report*, October 1998.
- [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] 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.
- [7] 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像転送," 電子情報通信学会技術研究報告 (SSE99), November 1999.
- [8] W. Stevens, *TCP/IP Illustrated*. Addison-Wesley, 1994.
- [9] ISO/IEC DIS 13818-2, "MPEG-2 video," *ISO standard*, 1994.
- [10] 福田健太郎, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫, "帯域予約型ネットワークに適した MPEG-2 動画像における品質と帯域の関係," 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J82-B, pp. 358–367, March 1999.
- [11] The VINT Project, "UCB/LBNL/VINT network simulator - ns (version 2)," <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>, 1996.