

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 MPEG-4 動画像通信

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インターネットにおける分散型マルチメディアアプリケーションの普及は様々な問題を引き起こす。特に、UDP を用いて送出される大量のマルチメディアトラフィックにより網が輻輳状態に陥ると、TCP によるデータ通信のスループットが著しく低下するため、プロトコル間の性能格差が生じることが指摘されている。そこで、TCP データ通信との公平性を考慮した、マルチメディアアプリケーションのための輻輳適応型レート制御の検討が行われている。

本稿では、圧縮効率、エラー耐性の高さから狭帯域での動画像通信に適している MPEG-4 符号化手法を対象に、輻輳適応型レート制御のもとで高品質で安定した動画像通信を実現するための制御手法について検討し、動画像品質調整メカニズムや動画像レート制御手法を提案している。シミュレーションにより、いくつかのピクチャをまとまりとした単位で制御を行うことにより、動画像トラフィックや動画像品質の変動を抑えた動画像通信が行えることを明らかにしている。

キーワード 動画像通信, 公平性, MPEG-4, Fine Granular Scalability, TFRC

MPEG-4 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 When a considerable amount of UDP traffic is injected into the Internet by distributed multimedia applications, it is easily driven congested. Consequently, bandwidth available to TCP connections is oppressed and their performance significantly deteriorates. In order that both multimedia applications and TCP-based ones fairly co-exist in the Internet, it becomes increasingly important to consider the inter-protocol fairness.

In this paper, we focus on MPEG-4 video which has highly efficient coding algorithms and error resilience capabilities, and investigate video rate control schemes suitable to video transfer over networks with narrow bandwidth. Our schemes employ TFRC (TCP-Friendly Rate Control) as a lower protocol where multimedia application can fairly share network bandwidth with TCP sessions. We consider FGS (Fine Granular Scalability) as the coding algorithm for MPEG-4 video and tackle some issues including appropriate control interval, video quality regulation and video rate adaptation. Through simulation experiments, it is shown that high-quality and stable video transfer can be accomplished by regulating video rate at an interval of group of pictures.

key words video transfer, fairness, MPEG-4, Fine Granular Scalability, TFRC

1 はじめに

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通信とTCPデータ通信が共存するためには、プロトコル間の公平性を考慮したトラフィック制御を行う必要がある。例えば、ネットワーク内の中継ルータでセッションの種別やその流量を認識し、不当に多くの帯域を使用しているセッションの packets を優先的に棄却することにより、セッション間、プロトコル間の通信品質格差をある程度小さくすることができる [1]。しかしながら、インターネット上のすべてのルータにそのような機能を導入するにはコスト、時間を要し、実現は現実的ではない。そこで、近年、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、開発において TCP-friendly という概念が注目されている [2-11]。TCP-friendly は、「同一ネットワークパス上における非 TCP コネクションと TCP コネクションの得るスループットが等しいこと」と定義されている [6]。TCP-friendly に基づくレート制御では、エンドシステムがネットワークの負荷状態に応じて自律的にデータ送出量を調整することにより、TCP コネクションと公平にネットワーク帯域を共有する通信を実現する。特に、文献 [10, 11] で提案されている TCP-Friendly Rate Control (TFRC) は輻輳に対処しながら送出レートを緩やかに調整するという特徴から、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の輻輳適応型レート制御として有効であると考えられている。

我々はそのようなレート制御手法のもとで、高品質かつ公平な MPEG-2 動画通信を実現するための制御パラメータの設定や動画品質調整による動画レート制御に関する検討および提案を行い、提案手法の有効性をシミュレーションおよび実証実験により示した [7-9]。しかしながら、これらの検討においてはアクセスリンク容量が広帯域なシステムを対象としており、電話回線、ISDN、無線網など多くの狭帯域な回線を含むインターネット環境にそのまま適用することができない。

そこで本稿では、比較的狭帯域なインターネットにおいて高品質かつ TCP データ通信と公平な動画通信を実現するため、圧縮効率が高く、伝送誤りに強い MPEG-4 符号化手法を用いて符号化された動画を対象に、TFRC によってレート制御された環境において高品質で安定した動画を提供するための動画レート制御手法について検討する。MPEG-4 符号化手法における動画品質調整には様々な手法があるが、本稿では特に、パケット棄却への耐性が強く、帯域の変動への適応性に優れている Fine Granular Scalability (FGS) アルゴリズム [12, 13] を用いる。本稿では、まず FGS の基本特性を明らかにした後、TFRC コネクションでの FGS 動画の品質、レート調整手法を検討する。次にシミュレーション結果から、提案手法を用いることにより高品質で安定した動画通信を実現可能であることを示す。

2 Fine Granular Scalability (FGS)

TCP データ通信と公平に帯域を共有する動画通信の実現に向けてこれまで我々がやってきた検討 [7-9] に

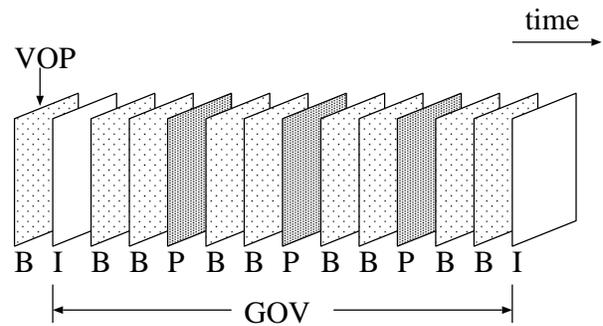


図 1: MPEG-4 データ構造の例

いては、高品質な符号化動画を生成する MPEG-1 や MPEG-2 を対象としていたため、1.5 Mbps 以下の狭帯域には十分対応できない。無線網を介した携帯端末への動画配信など、狭帯域回線でのマルチメディア通信を実現するためには圧縮効率が高く、また頻繁に発生する伝送誤りに対処できるような符号化手法を用いる必要がある。そこで本稿では、圧縮効率、エラー耐性が高く、動画の符号化圧縮手法として標準化が進められつつある MPEG-4 符号化手法のうち、特に帯域変動への適応性に優れている FGS アルゴリズムを利用した動画通信アプリケーションを対象に検討を行う。

2.1 MPEG-4 動画符号化手法

MPEG-4 では、画像を構成する背景や人、建物などの各オブジェクト (Video Object: VO) ごとに最適符号化することが可能であり、高い符号化効率を実現する。画面全体をビデオオブジェクトとする場合には MPEG-1 や MPEG-2 と同様のフレームベースの矩形形状符号化が、そうでない場合にはオブジェクトベースの任意形状符号化が適用されるが、いずれもビデオオブジェクトをマクロブロックと呼ばれる単位に分割し、動き補償付き予測符号化する。任意形状符号化により、オブジェクトごとの加工、編集などが可能となるが、本稿では動画配信サービスにおけるオブジェクト単位のデータ改ざんなどを避けるため、矩形形状符号化のみを対象とする。

各 VO ごとに生成される MPEG-4 のストリームは複数の Video Object Plane (VOP) から構成される (図 1)。VOP は画像データの基本単位であり、MPEG-1 や MPEG-2 のフレームに相当する。VOP には、単一 VOP 内の情報のみを用いて画面内 (イントラ) 符号化、復号化される I-VOP、前方向予測符号化、復号化される P-VOP、両方向予測符号化、復号化される B-VOP の 3 タイプがある。MPEG-1、MPEG-2 における GoP (Group of Picture) と同様に、複数の VOP の集合である GOV (Group of Video Object Plane) もストリームの構成要素として定義されている。

2.2 FGS 動画符号化手法

通信品質保証のないインターネットにおいて TCP データ通信と公平な動画通信を行うためには、ネットワークの負荷状態に応じて動画データ生成レートを決定し (目標レートと呼ぶ)、適切に動画品質を調整することで動画データ量を制御しなければならない。文献 [7-9]

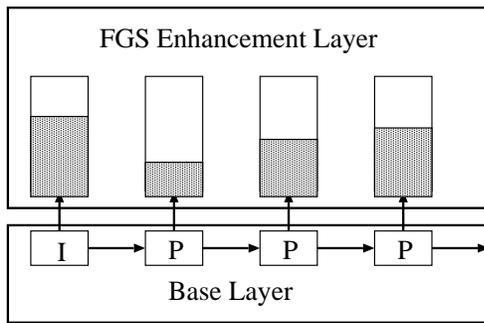


図 2: FGS 動画像符号化手法の階層構造

での動画像品質調整手法と同様に、MPEG-4 動画像符号化アルゴリズムにおける量子化の度合いと動画像データ量の関係を利用することも可能であるが、段階的なレート調整しかできないため、目標レートと生成される動画像データ量との間には誤差が生じる。また、動画像通信には UDP が用いられるため、たとえ FEC (Forward Error Correction) などのエラー回復技術を適用したとしてもパケット棄却による画質劣化は免れない。

そこで、パケット棄却への耐性が強く、利用可能な帯域が大きく変動しても柔軟に適應できるスケーラビリティの高い圧縮技法として、Fine Granular Scalability (FGS) アルゴリズム [12, 13] の検討が進められている。FGS は以下に説明するような特性からストリーミングアプリケーションに適した圧縮技法と考えられており、MPEG-4 標準化に導入されつつある。

図 2 に FGS を用いて符号化された動画像の基本構造を示す。FGS 動画像は基本レイヤ (Base Layer) と上位レイヤ (Enhancement Layer) の 2 階層からなる。基本レイヤは従来通りの離散コサイン変換と予測符号化に基づく MPEG-4 符号化により生成され、最低限の画像品質を提供する。一方、上位レイヤは基本レイヤと原画像をもとに embedded DCT 圧縮手法などを用いて符号化され、基本レイヤとあわせて受信、復号化することで、より高品質な動画像を得ることができる。動画像品質は基本レイヤ、上位レイヤの符号化パラメータと復号時に付加する上位レイヤのデータ量によって決まる。たとえ少量であっても上位レイヤデータを付加することにより品質の向上が得られるため、基本レイヤとあわせて目標レートに応じた適当な量の上位レイヤデータを送出、受信すれば、利用可能な帯域の範囲内で高品質な動画像通信が可能となる。

上位レイヤを復号するには対応する基本レイヤが必要となるため、パケット棄却などによる基本レイヤのデータ損の動画像品質に与える影響は大きい。一方、上位レイヤは予測符号化を用いずに画面内の情報だけを用いて符号化 (イントラ符号化) されるため圧縮効率は低いですが、上位レイヤのデータ損の影響はその VOP だけにとどまるため、優れたエラー耐性を提供することができる。

2.3 FGS の基本特性評価

本節では、FGS 動画像符号化された動画像データのトラヒック特性や動画像品質など FGS の基本特性を評価

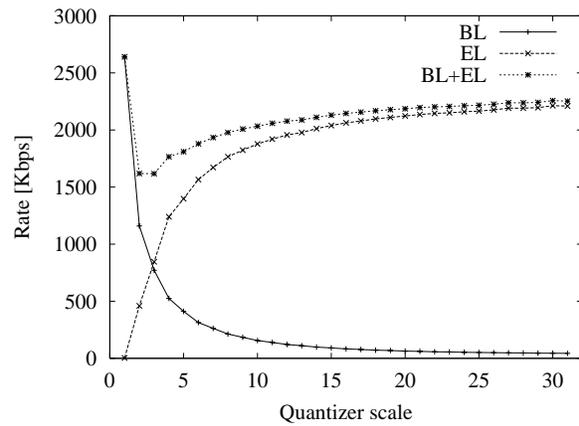


図 3: 量子化スケールと平均レートの関係

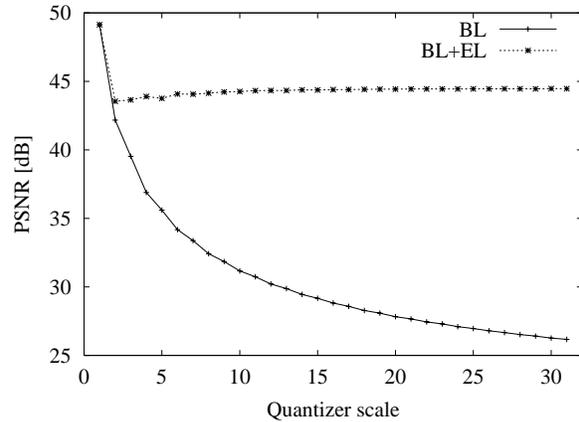


図 4: 量子化スケールと平均画質の関係

する。

評価には、MPEG-4 標準化活動で評価用画像として用いられている “coastguard”, “akiyo” の 2 種類のシーケンスを用いる。いずれも空間解像度は QCIF (176×144 ピクセル) で、300 枚のフレームから構成されている。また、それぞれの GOV は 1 枚の I-VOP と続く 14 枚の P-VOP からなり、毎秒 30 フレーム (30 fps) で符号化した。量子化の度合いを表す符号化パラメータである量子化スケールとしては、1～31 について評価を行った。ただし紙幅の都合上、以降では動画像シーケンスとして “coastguard” を用いた結果のみを示すがシーケンス “akiyo” においても同様の傾向が認められる。

FGS 符号化された動画像シーケンスの量子化スケールとレイヤごとの平均レートの関係を図 3 に、量子化スケールと平均画質 (PSNR) の関係を図 4 にそれぞれ示す。図 3 より量子化スケールが大きくなるほど基本レイヤのレート (図中 “BL”) が減少し、逆に上位レイヤのレート (“EL”) は増加することがわかる。ただし、量子化スケールが 1 のときには上位レイヤは生成されない。また図 4 より、基本レイヤを復号化して得られる動画像の品質は量子化スケールが大きくなるにつれて減少しているが、上位レイヤデータを付加して復号化することで量子化スケールによらず一定の品質 (図中 “BL+EL”) を得ることがわかる。ただし、量子化は非可逆な圧縮であるため、量子化スケールが 1、すなわち量子化を施さない場合と比較すると動画像品質は低い。

いくつかの量子化スケールについて、基本レイヤデー

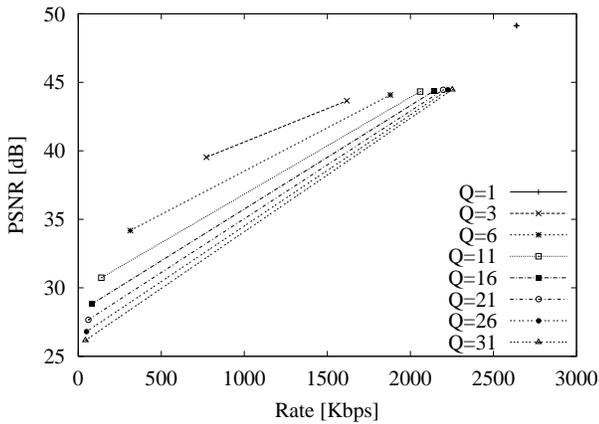


図 5: 平均レートと平均画質の関係

タに対して上位レイヤのデータを順次付加していった際の動画レートと動画品質の関係を図 5 に示す．各線の左端点が基本レイヤのみの場合を，右端点が基本レイヤと全ての上位レイヤを組み合わせた場合の結果に対応している．これらの図より，動画レートが同じであれば量子化スケールの小さなものほど動画の品質が高いことがわかる．したがって，レート制御アルゴリズムによって指定された目標レートの範囲内で最も小さい量子化スケールを選択すれば，高品質な動画通信が可能となる．

しかしながら，量子化スケールが小さいほど適応できるレートの範囲が狭いため，ネットワークの状態変化に応じて大きく変動する目標レートに動画レートが合致しなくなる可能性が高くなる．動画レートが目標レートを超過した場合にはサーバでトラヒックの平滑化を行うことも有効であるが，バッファリングによる遅延が発生する．また，目標レートにあわせて動画レートを調整できたとしても，図 3 に示されるとおり量子化スケールの小さな動画データはトラヒック全体に占める基本レイヤデータの割合が大きいため，パケット棄却が発生すると動画品質が大きく劣化する．したがって，ネットワークの状態変化やパケット棄却に対処するには大きな量子化スケールを用いて符号化するのがよいと考えられるが，全てのデータが誤りなく届いたとしても最小の量子化スケールを用いた場合と比較して最大 6~8 dB 程度画質が低くなる．

3 TCP データ通信との公平性を考慮した FGS 動画転送

本章では，TCP データ通信と公平に帯域を共有するためのレート制御手法である TFRC を紹介し，TFRC に基づいてデータ送出レートが制御されたコネクションにおいて動画通信を行うための，動画品質調整を利用した動画レート制御手法を提案する．シミュレーションにより，提案手法の有効性，および実現可能性について評価する．

3.1 TCP-friendly Rate Control

TFRC (TCP-Friendly Rate Control) は，インターネットにおいて TCP データ通信と公平かつ TCP より安定したエンド間ユニキャスト通信を行うための輻輳適応型レート制御アルゴリズムである [10, 11] ．

TCP と公平な通信を実現するため，TFRC ではネットワークの状態推定に基づいて TCP コネクションのスループットを予測し，データ送出レートを決定する．送信側エンドシステムは 1 RTT (Round Trip Time) 内に 1 度以上制御パケットを送出し，受信側エンドシステムはデータパケットに付加されているシーケンス番号から算出されるパケット棄却率をフィードバック情報として返送する．ただし，棄却パケット数によらず 1 RTT につき 1 度だけウィンドウサイズを小さくするという TCP のメカニズムにならない，1 RTT 内に発生したパケット棄却はその回数にかかわらず 1 回のロスイベントとみなし，ロスイベントの発生率を棄却率 p とする．送信側エンドシステムは制御パケット送受信時刻より RTT の観測値を取得し，TCP と同様のローパスフィルタを観測値に対して適用することにより RTT の推定値 \hat{RTT} を導出する．ネットワークの負荷状態を表すこれらのパラメータから TCP コネクションのスループット r_{TCP} を予測し [4]，これをデータ送出レートとする．

$$r_{TCP} \approx \frac{MTU}{\hat{RTT} \sqrt{\frac{2p}{3} + T_0(3\sqrt{\frac{3p}{8}})p(1+32p^2)}} \quad (1)$$

ただし， MTU は送出パケットの最大サイズ (Maximum Transfer Unit)， T_0 はタイムアウト時間 (retransmission timeout) である．

3.2 TFRC によるレート制御の FGS 動画への適用

前節で述べた TFRC を用いれば TCP と公平に帯域を分け合う通信を実現することができるが，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いないため，TFRC をそのまま動画通信に適用するには様々な問題がある．例えば，TFRC では RTT ごとに送出レートを変更するが，制御結果に従って頻繁に動画レートを調整すると動画品質の変動が激しくなり，ユーザが感じるアプリケーションレベルの通信品質が極端に劣化する．従って，TFRC に基づいてデータ送出レートが決定されるコネクション上で FGS 符号化された動画データを高品質かつ効率よく転送するためには，以下の諸点について検討しなければならない．

1. 目標レート設定間隔

TFRC により決定されたデータ送出レートに応じて動画データ生成レート (目標レート) を設定し，動画品質を調整する場合には，レート制御が再生動画品質に与える影響をできる限り抑えなければならない．MPEG-4 のデータ構造や画質の安定性などを考慮すると，VOP や GOV を単位とした品質調整，動画レート制御が適切であると考えられる．そこで本稿では VOP や GOV の開始時のデータ送出レートに基づき動画レート制御の目標レートを決定し，品質調整を行う．以降では前者を V 手法，後者を G 手法と呼び，

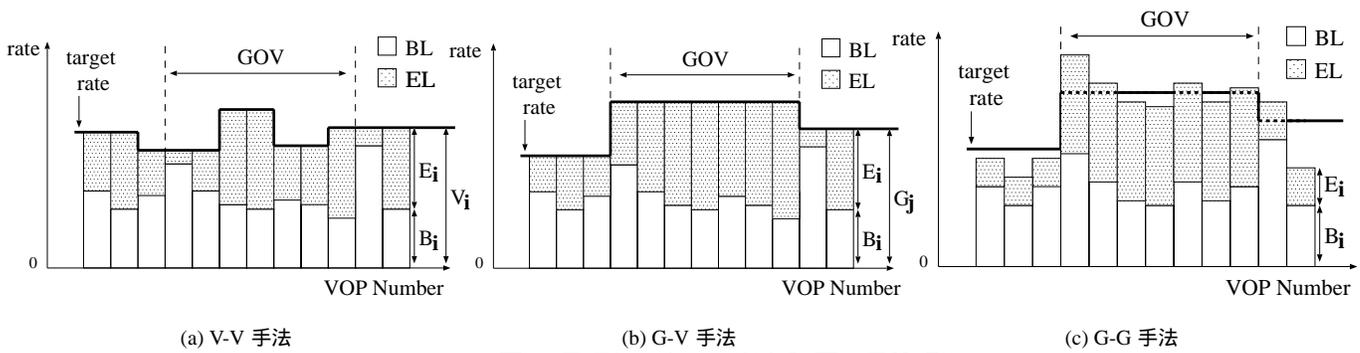


図 6: 目標レートに応じた動画品質調整

表 1: FGS 動画通信制御手法

	レート設定間隔	超過対処法	品質調整
V-V early	VOP 単位	VOP 単位	<i>early</i>
V-V smooth	VOP 単位	VOP 単位	<i>smooth</i>
G-V early	GOV 単位	VOP 単位	<i>early</i>
G-V smooth	GOV 単位	VOP 単位	<i>smooth</i>
G-G smooth	GOV 単位	GOV 単位	<i>smooth</i>

VOP_i の目標レートを V_i , GOV_j の目標レートを G_j と表記する。ただし, TFRC のデータ送出レートの瞬間的な変動の影響を抑えるため, TCP における RTT 平滑化と同様のローパスフィルタを用いる。

2. 目標レートに応じた動画品質調整

VOP, あるいは GOV を単位として決定された目標レートに応じて各 VOP ごとに付加する上位レイヤデータの量を調整する。V 手法により VOP 単位で決定された目標レート (V_i) から基本レイヤのデータレート (B_i) を差し引いたものを上位レイヤのレートとする V-V 手法 ($E_i = V_i - B_i$, 図 6(a)), G 手法により GOV 単位で決定された目標レート (G_j , $VOP_i \in GOV_j$) から基本レイヤのレート (B_i) を差し引いたものを上位レイヤのレートとする G-V 手法 ($E_i = G_j - B_i$, 図 6(b)), および GOV 単位で決定された目標レートを GOV 内の VOP で均等に割り振ることで VOP 間の動画品質変動をおさえる G-G 手法 ($E_i = \frac{NG_i - \sum_{VOP_k \in GOV_j} B_k}{N}$, 図 6(c)) がある。ただし N は GOV あたりの VOP 数である。V-V 手法, G-V 手法では VOP 単位で目標レート V_i または G_j が達成され, G-G 手法では GOV での平均レートが目標レート G_j に等しくなる。

3. 基本レイヤレートの目標レート超過時の対処法

FGS など階層符号化された動画における基本レイヤデータの重要性は高い。そこで, ネットワークの負荷変動などにより一時的に基本レイヤのビットレートが目標レートを上回った場合にも, データ量を削減することなく基本レイヤデータをそのまま送出する。ただし, 続く VOP, GOV に付加する上位レイヤデータを超過データ量に応じて減ずる。超過データ量の配分法としては, 同じ GOV 内の VOP 間で均等にわりふるもの (*smooth* と呼ぶ) と, 直後の VOP から順に必要な分だけ上位レイヤデータを削減することによりできるだけ早く超過量を解消するもの (*early* と呼ぶ) が

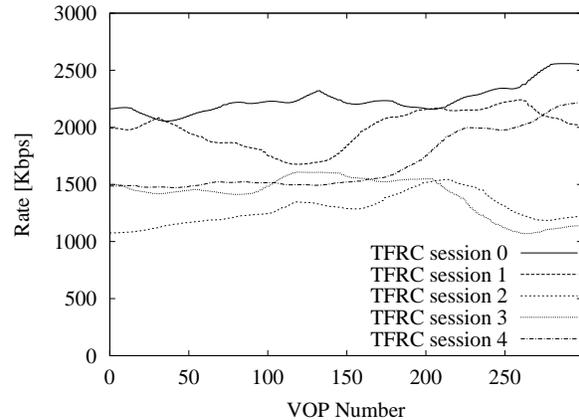


図 7: VOP 単位で適用する目標レートの推移

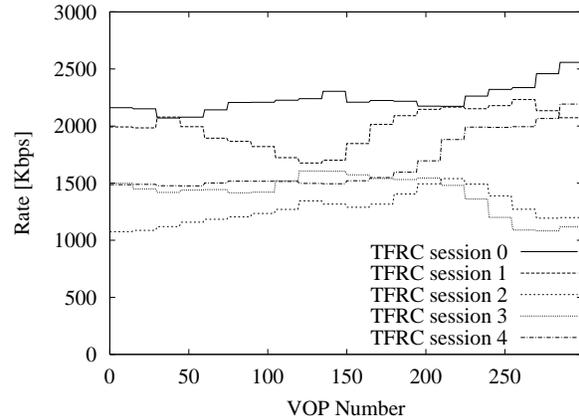


図 8: GOV 単位で適用する目標レートの推移

ある。

表 1 に各検討項目ごとの手法を組み合わせることにより得られる制御手法をまとめる。ただし, GOV 単位で目標レートを達成する G-G 手法については, VOP への割当レートを均一にするため, *smooth* 手法のみを考慮する。次節ではシミュレーションにより制御手法の比較評価を行う。

3.3 FGS 動画通信制御手法の評価

本節では, 様々な FGS 動画通信制御手法の有効性をシミュレーションにより評価し, また MPEG-2 を対象とした提案手法 [7-9] を MPEG-4 動画に適用した場合との比較を行う。

ns-2 [14] を用いたシミュレーションの結果得られた TFRC セッションのレート変動に基づいて VOP 単位

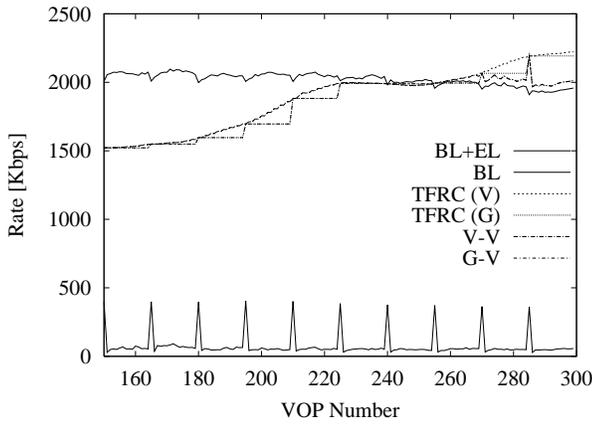


図 9: レート変動の様子 (V-V 手法 vs. G-V 手法)

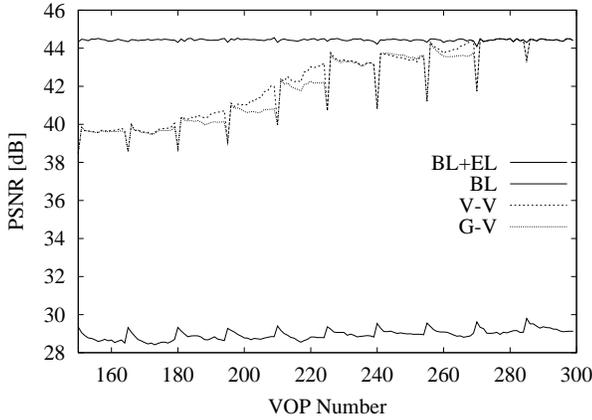


図 10: 画質変化の様子 (V-V 手法 vs. G-V 手法)

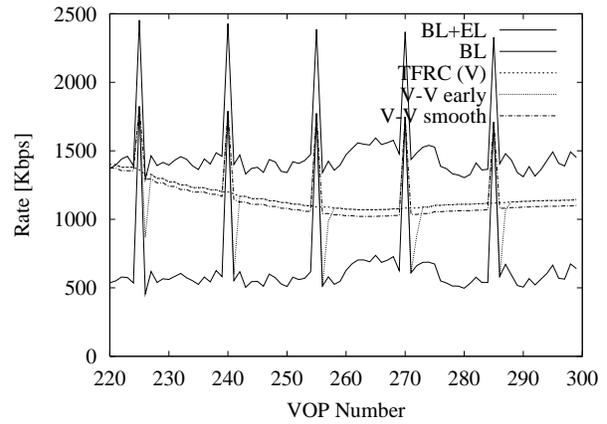


図 11: レート変動の様子 (V-V 手法)

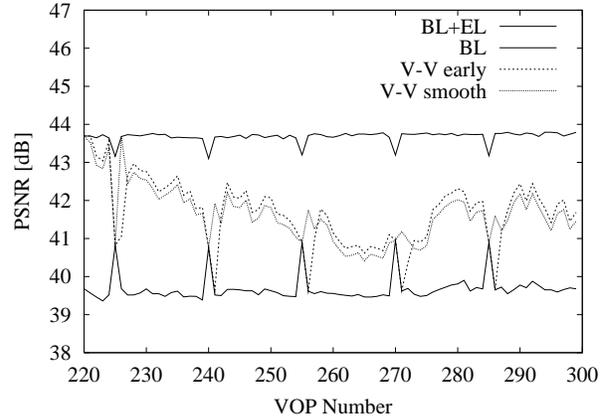


図 12: 画質変化の様子 (V-V 手法)

(1/30=0.033 秒), GOV 単位 (15/30=0.50 秒) で決定された目標レートの推移を図 7, 8 に示す. 図が煩雑になるのを避けるため, 以降ではあるセッション上での動画像レート調整の結果についてのみ示す.

まず, 目標レート設定間隔の比較評価を行うため, 基本レイヤレートが目標レートを超えないよう “coastguard” を量子化スケール 16 で FGS 符号化し, VOP 単位で目標レートを設定する V-V 手法と GOV 単位で目標レートを設定する G-V 手法をそれぞれ用いた場合の結果を図 9, 10 に示す. 図中, “BL”, “BL+EL” と表記された実線 (上例が “BL+EL”) は基本レイヤデータのみ, 基本レイヤに全ての上位レイヤデータを合わせた場合のレート, 画質をそれぞれ表している. また “TFRC (V)”, “TFRC (G)” はそれぞれ V 手法, G 手法により VOP 単位, GOV 単位で決定された目標レートを表している.

VOP 単位で目標レートを設定する V 手法では, 目標レートに応じて緩やかに動画像品質が変動するのに対し, G 手法では GOV 内での画質は安定しているが GOV 間の品質差が生じる. ただし, VOP 単位で目標レートを達成する V-V, G-V 両手法においては, 他の VOP タイプと比較して付加される上位レイヤデータ量が少ない I-VOP の画質が劣化する. また, G 手法の画質が V 手法を下回るのは, TFRC のデータ送出レートが増加傾向にあるためであり, 網の負荷が大きくなっていく場合には G 手法の画質が高くなる. したがって, レート変動が比較的緩やかな TFRC コネクションにおける動画像品質に関する

手法間の差異はそれほど小さくなく, より柔軟にネットワークの状態変化に適応することのできる, VOP 単位で目標レートを設定する V 手法を用いるのが適当であると考えられる.

次に基本レイヤレートの目標レート超過時の対処法について比較評価を行う. 超過データ量を GOV 内で均等配分する V-V smooth 手法とできるだけ早く超過分を解消する V-V early 手法についてのシミュレーション結果を図 11, 12 に示す. ただし, 量子化スケール 3 を用いた. TFRC のデータ送出レートが比較的低いため, 符号化動画像の I-VOP に相当する VOP 225, 240, 255, 270, 285, 300 では基本レイヤレートが目標レートを超過する. その結果, できるだけ早く超過量を解消する early 手法では直後の VOP に付加される上位レイヤデータ量が大きく削減され (図 11), 画質が急激に劣化する (図 12). 一方, GOV 内で超過分を均等に配分する smooth 手法では画質の変動が小さい. ただし, early 手法では超過解消後は目標レートどおりの動画像データ生成が行われる. また動画像品質も改善され, smooth 手法を上回る.

次に動画像品質調整手法についての検討を行うため, V-V smooth 手法と GOV 単位で目標レートを達成する G-G smooth 手法を比較評価する (図 13, 14). 図 13 より, V-V smooth 手法が VOP 単位で目標レートを達成しており, 設定レートに従って動画像トラフィックが緩やかに変化しているのに対し, G-G smooth 手法では全ての VOP に均一に上位レイヤデータを付加するため, 基本レ

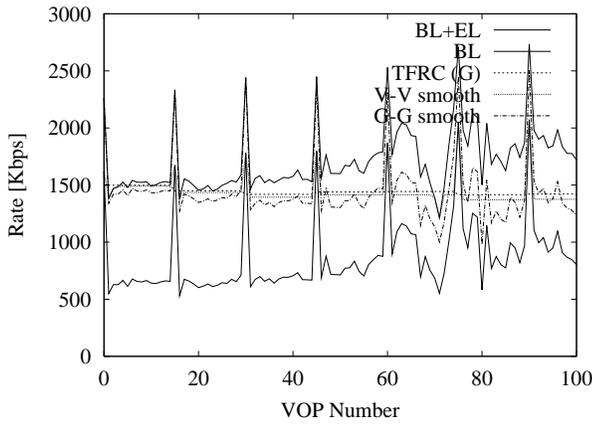


図 13: レート変動の様子 (V-V smooth 手法 vs. G-G smooth 手法)

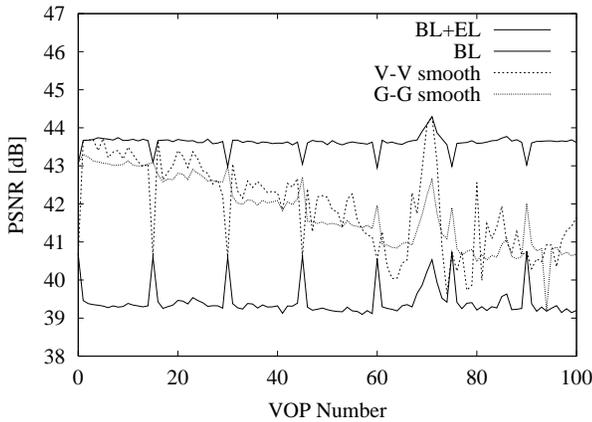


図 14: 画質変化の様子 (V-V smooth 手法 vs. G-G smooth 手法)

イヤのレート変動と似通ったふるまいをしていることがわかる。また、図 14 より G-G smooth 手法では VOP 間、GOV 間で動画像品質が安定していることが明らかである。特に G-G smooth 手法では基本レイヤレートが目標レートを超過した VOP にも上位レイヤデータを付加するため、V-V smooth 手法に見られるような I-VOP における急激な画質劣化が発生しない。ただし、上位レイヤデータの配分量を決めるためには GOV 内の全ての VOP について基本レイヤデータ量を知る必要があり、実時間符号化された動画像の場合には適切な動画像データ量予測手法を用いない限り 1 GOV 時間の遅延が発生する。

次に、文献 [7-9] で有効性を示したレート制御手法と G-G smooth 手法との比較評価を行う。上記の文献では、MPEG-2 動画像符号化手法アルゴリズムにおける量子化の度合いと動画像データ量に基づいて生成する動画像の品質を決定しているが、本節では MPEG-4 動画像符号化手法における量子化の度合いと基本レイヤデータ量の関係 (図 3) に基づいて、GOV 単位で動画像品質を調整するように拡張した (MPEG-4 over TFRC)。

図 15 に示すレート変動の様子より、G-G smooth 手法が利用可能な帯域を有効に利用して動画像通信を行っているのに対して、MPEG-4 over TFRC は量子化スケールを制御することによる段階的なレート調整しかできないため、目標レートと生成されるデータ量との間に大きな

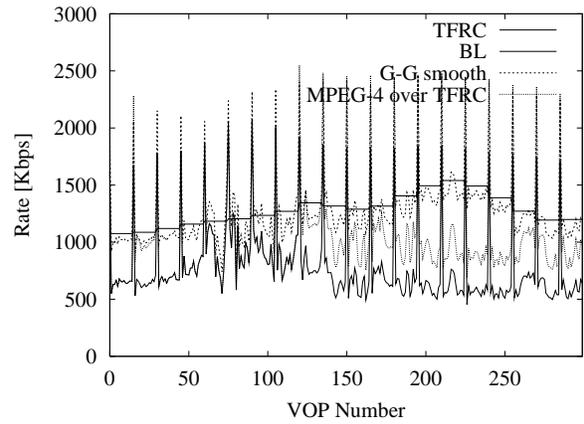


図 15: トラフィック変動の様子 (G-G smooth 手法 vs. MPEG-4 over TFRC)

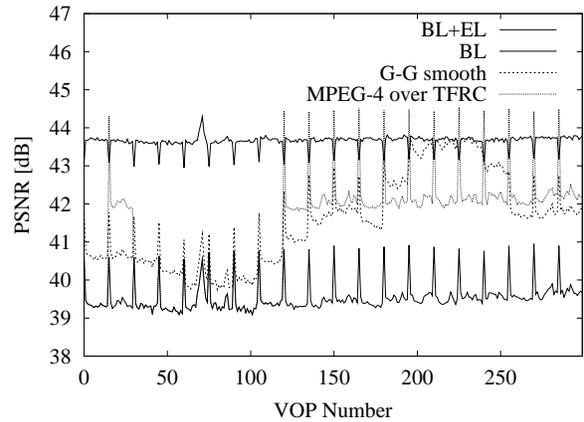


図 16: 画質変化の様子 (G-G smooth 手法 vs. MPEG-4 over TFRC)

誤差が生じている。その結果、MPEG-4 over TFRC の生成する動画像の品質は長期にわたって安定するが、目標レートの変化に伴い量子化スケールが変更されると急激に画質が変動する (図 16)。一方、G-G smooth の動画像品質は目標レートに応じて柔軟に調整されているだけでなく、高品質で安定している。

最後に、パケット棄却の影響について検討するため、図 17, 18 に量子化スケールを 3, 6, 16 で符号化した動画像を G-G smooth 手法を用いて転送した際のレートと画質変動を示す。ただし、全ての動画像データは長さ 1 K バイトのパケットに分割して転送され、手法、レイヤによらずパケット棄却率を 10^{-3} とし、ランダムにデータ損を発生させている。図より、2.3 節で述べた通り、量子化スケールの小さいものほど基本レイヤデータ量の動画像データの占める割合が大きいため、送出トラフィックはほとんど同じであっても (図 17)、パケット棄却の影響により動画像品質が激しく変動する (図 18)。

4 おわりに

本稿では、TCP によるデータ系通信と UDP による動画像通信が混在する比較的狭帯域なネットワークにおいて、スループットに関するプロトコル間の公平性を考慮しつつ高品質な MPEG-4 動画像通信を実現するための、FGS 動画像通信制御手法を提案した。シミュレーションによ

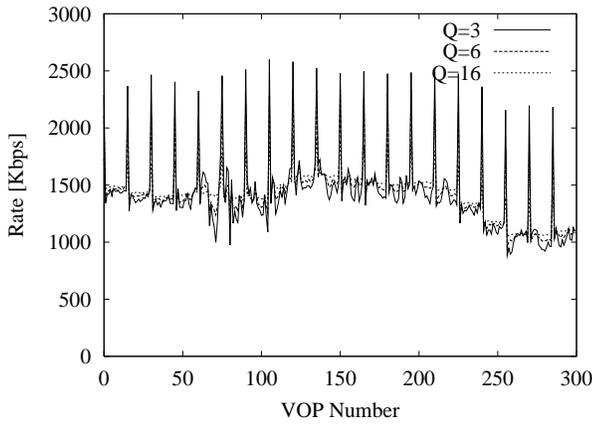


図 17: レート変動の様子 (パケット棄却発生時)

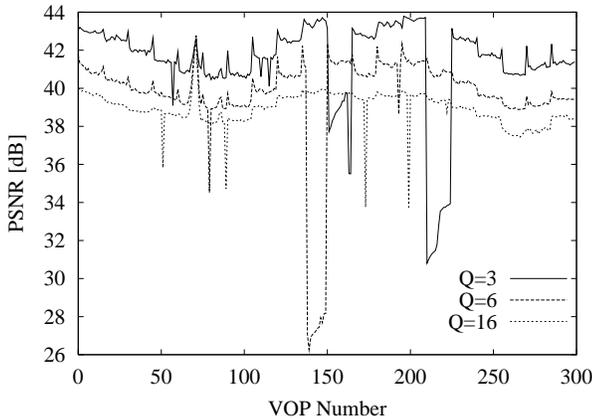


図 18: 画質変動の様子 (パケット棄却発生時)

り，GOV を単位として目標レートを設定し，VOP に均等に上位レイヤデータを付加することが有効であることを示した。

ただし，本稿では TFRC によるスムージングによって引き起こされるバッファリング遅延の影響については考慮していない。また，量子化スケールによってパケット棄却の影響は異なるため，パケット棄却率や目標レートに応じて量子化スケールを動的に変更するなどの制御について検討したい。

謝辞

本研究の一部は，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」，文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(2)11305030，奨励研究(A)12750322，科学技術庁平成 12 年度科学技術振興調整費による「高度医療ネットワークに関する研究調査」および通信・放送機構「次世代広帯域ネットワーク利用技術の研究開発プロジェクト」によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] S. Floyd and K. Fall, “Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, pp. 458–472, August 1999.

[2] 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.

[3] 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.

[4] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, “Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM’98*, vol. 28, pp. 303–314, September 1998.

[5] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, “RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the Internet,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM’99*, March 1999.

[6] J. Padhye, J. Kurose, D. Towsley, and R. Koodli, “A model based TCP-friendly rate control protocol,” in *Proceedings of International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV’99)*, June 1999.

[7] N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “On TCP-friendly video transfer with consideration on application-level QoS,” in *Proceedings of IEEE International Conference of Multimedia & EXPO 2000*, July 2000.

[8] N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “On TCP-friendly video transfer,” in *Proceedings of SPIE International Symposium on Information Technologies 2000*, November 2000.

[9] M. Miyabayashi, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “MPEG-TFRC: Video transfer with TCP-friendly rate control protocol,” to be presented at *IEEE International Conference on Communications 2001 (ICC2001)*, June 2001.

[10] J. Widmer, *Equation-based congestion control*. Diploma Thesis, University of Mannheim, February 2000.

[11] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, “Equation-based congestion control for unicast applications: the extended version,” Technical Report TR-00-003, International Computer Science Institute, March 2000.

[12] H. Radha and Y. Chen, “Fine-granular-scalable video for packet networks,” in *Proceedings of Packet Video’99*, April 1999.

[13] M. van der Schaar, H. Radha, and C. Dufour, “Scalable MPEG-4 video coding with graceful packet-loss resilience over bandwidth-varying networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference of Multimedia & EXPO*, July 2000.

[14] The VINT Project, “UCB/LBNL/VINT network simulator - ns (version 2).” available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.