

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	メディアQoSを考慮したマルチチャネル伝送に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	小川賢太郎
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第5389号, 授与年月日:2003年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第5389号, Conferred date:2003/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

メディア QoS を考慮した
マルチチャネル伝送に関する研究

[学 位 論 文]

2003 年 1 月

指導教官 酒井 善則 教授
山岡 克式 助教授

提出者 大学院 理工学研究科
集積システム専攻
小川 賢太郎

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 MPEG 動画像のマルチチャネル伝送に対する動的帯域割当制御	4
2.1 まえがき	4
2.2 MPEG の符号化方式	4
2.2.1 ピクチャタイプと符号化方式	4
2.2.2 マクロブロックの符号化方式	5
2.2.3 MPEG 符号化画像の評価尺度	6
2.3 従来方式の問題点及び提案方式	6
2.3.1 蓄積メディアのマルチチャネル伝送	6
2.3.2 広域ネットワーク上でのリアルタイムビデオストリーミング	7
2.4 本章のまとめ	9
第3章 単一回線上での最適帯域割当方式	10
3.1 まえがき	10
3.2 システムモデル	10
3.3 動画像のスケーリングと画質	11
3.3.1 再量子化	11
3.3.2 DCT 係数削除	12
3.3.3 スケーリング対画質特性	14
3.4 画質劣化特性を用いた帯域割当方式	20
3.4.1 動画像のパラメータ	20
3.4.2 帯域割当アルゴリズム	20
3.4.3 性能評価	23
3.5 本章のまとめ	24
第4章 シーンチェンジへの対応とストリームのグルーピング	29
4.1 まえがき	29
4.2 伝送スケジュールの作成	29
4.3 伝送スケジュール作成方式の特性	31
4.3.1 切換処理により生じる損失	31

4.3.2	最適な伝送スケジュールからの乖離	34
4.4	ストリームのグルーピング	38
4.5	最適グループ数推定法	39
4.5.1	ストリーム数の増大による方式劣化	39
4.5.2	グルーピングによる方式劣化	45
4.5.3	最適グループ数の推定	49
4.5.4	最適グループ数推定法の適用例及び評価	50
4.6	本章のまとめ	50
第 5 章	実ネットワークへの実装	52
5.1	まえがき	52
5.2	システム内の機能構成	52
5.3	試作システムと伝送実験	53
5.4	本章のまとめ	55
第 6 章	広域ネットワーク上でのリアルタイムストリーミングにおける分散型帯域制御方式	56
6.1	まえがき	56
6.2	システムモデル	56
6.3	自律分散制御によるレート制御方式	57
6.3.1	サーバの伝送アルゴリズム	58
6.3.2	ルータの帯域制御アルゴリズム	60
6.3.3	システムの動作とパラメータの関係	62
6.4	性能評価	62
6.4.1	単一回線モデル	64
6.4.2	広域ネットワークモデル	67
6.5	本章のまとめ	72
第 7 章	結論	74
	参考文献	77

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

近年，インターネットに代表される通信インフラの整備及び通信端末となるパーソナルコンピュータやワークステーションの高性能化によって，ネットワーク上での大容量のデータ通信が可能となりつつある．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動画を含むマルチメディアコンテンツを，ネットワーク上でリアルタイムに伝送・再生するサービスに対する要求が高まっている．このようなサービスの一つとして分散型マルチメディアシステムが挙げられる．このシステムは，ネットワーク上に分散している動画像・静止画像・音声などのメディアデータを統合的に扱うものであり，基本的に送信側（サーバ）と受信側（クライアント）での一対一通信によってメディアデータの伝送を行う．こうした時間的制約を受けながら処理を進める必要のある連続メディアデータを扱うシステムに対しては，本来，エンド-エンド間での QoS（Quality of Service）保証を行う必要がある [1, 2]．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たど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 調整を行う機構が不可欠である．

特に動画像のような大幅な処理遅延が許容されないメディアにおいては，使用可能な資源に応じて伝送する画像の品質あるいは総データ量（ビットレート）を変更していく必要がある [3]，これを実現する手法がこれまでにいくつか提案されているが [4]–[14]，これらはいずれも基本的にエンド-エンド間で高品質な動画像伝送を単独で行うことを目的としており，同一回線を共有する複数セッション間の QoS 調整についてはあまり考慮されていない．また，同一回線を共有する各動画像ストリームに対するネットワーク資源の割当てや伝送制御を統括的に行う方式が，近年研究されるようになってきたが [15]–[20]，これらはネットワーク資源にのみ目的を絞り再生動画像の品質は考慮していないものが多く，考慮している場合でもシステム全体における QoS 総和の最大化を目的としているので，各スト

リームの再生動画像品質がばらついてしまう可能性がある。

このような背景から、本研究では、従来のネットワーク資源指向の QoS 制御と異なる、メディアの再生品質そのものを制御指標及び評価尺度とする QoS 制御をメディア QoS と定義し、メディア QoS の観点における公平なメディアストリーミングの実現について検討する。本論文においては、メディアストリーミングシステムとしてネットワーク上で符号化された動画像のマルチチャネル伝送を想定し、複数動画像ストリームが同一回線を共有する際に、その回線を利用する各ストリームの再生品質を均一化するような帯域制御方式を構築する。なお本論文では符号化方式としては MPEG[21, 22] を主対象とするが、方式自体は MPEG に限定されない。

まず、あらかじめ符号化された状態で複数のサーバに蓄積されている MPEG 動画像群が同一回線を共有する場合に、その回線を利用する各動画像の再生品質を均一化しつつ全体的な画質の向上を実現する帯域割当方式を提案する。この方式では、同一回線を共有する複数の動画像ストリームに対して、ビットレートと画質の関係を数値化したパラメータを求め、このパラメータを利用して全ストリームにおける最大画質劣化が最小となるように帯域を配分する。また、動画像のデータ量を削減してビットレートを伝送帯域に合わせる処理（ビットストリームスケールリング）の方法を、複数の中から選択的に用いることで画質の向上を図る。次に、この方式を実システムで用いる際の諸問題を洗い出し、それらの対処法を確立するとともに、計算機システム上に実装して実験を行った結果について述べる。更に、システム全体の情報を一元管理することが困難な広域ネットワーク上でのリアルタイムビデオストリーミングを対象として、再生品質の公平性を指針とした分散型帯域制御方式を提案する。この方式では、ネットワークを構成するルータに回線やストリームの状況を局所的に監視させ、ストリームサーバに対するビットレート制御を個別に行わせることにより、メディア QoS の自律分散制御を実現する。

1.2 本論文の構成

本論文は次のように構成されている。

第 1 章「序論」では本研究の背景と目的及び本論文の構成について述べる。

第 2 章「MPEG 動画像のマルチチャネル伝送に対する動的帯域割当制御」では、MPEG 符号化画像の符号化方式とその構成について述べる。そして、動画像のマルチチャネル伝送システムにおける従来の QoS 制御方式の問題点について述べ、本研究におけるメディア QoS の定義に沿った動的帯域割当方式について述べる。

第 3 章「単一回線上での最適帯域割当方式」ではサーバに蓄積された複数の動画像が同一回線を共有する場合に、その回線を利用する各動画像の再生品質を均一化しつつ全体的な画質の向上を実現する帯域割当方式を提案する。まず、MPEG 動画像のスケールリング方式について述べ、スケールリングが施された場合の画質劣化の度合（画質劣化特性）を利用した帯域割当方式について述べる。また、その性能を計算機シミュレーションによって評価する。

第 4 章「シーンチェンジへの対応とストリームのグルーピング」では、第 3 章で提案した方式を実システムとして運用する際の問題点とその対処法について述べる。まず、動画

像のシーンチェンジによる画質劣化特性の変化に対応するよう提案方式を拡張する。次に、拡張した方式により多数の動画像ストリームを扱うことの弊害について論じ、その対処法を確立する。

第5章「実ネットワークへの実装」では、第3章で提案し第4章で拡張した方式を実際のネットワーク上へ実装し、そのプロセス構成を述べるとともに伝送実験を行った結果を示す。

第6章「広域ネットワーク上でのリアルタイムストリーミングにおける分散型帯域制御方式」では、全システムの情報を一元管理することが困難な大規模ネットワーク上で、多数の動画像ストリーミングをリアルタイムで行う場合に、ネットワーク上のルータの自律分散型帯域制御によって各ストリームの再生品質を均一化する方式について述べる。また、その性能を計算機シミュレーションによって評価する。

第7章「結論」では本研究の結論を述べる。

第 2 章

MPEG 動画像のマルチチャネル伝送に対する動的帯域割当制御

2.1 まえがき

本章では、まず本論文で主対象とする MPEG 符号化画像の符号化方式とその構成について簡単に述べる。次に、動画像のマルチチャネル伝送システムにおける従来の QoS 制御方式の問題点について述べ、本研究におけるメディア QoS の定義に沿った動的帯域割当方式について述べる。

2.2 MPEG の符号化方式

2.2.1 ピクチャタイプと符号化方式

MPEG 符号化画像のデータシーケンスは次に示す I, P, B, D ピクチャと呼ばれる符号化方式の異なる 4 種類のフレームデータから構成されている [21, 22]。

[I **ピクチャ**] フレーム内符号化画像であり、そのフレーム内の情報のみを用いて符号化される。

[P **ピクチャ**] 前方向動き予測符号化画像であり、直前に位置する I ピクチャまたは P ピクチャを参照フレームとし、そのフレームからの動き補償予測によって符号化される。ただし、部分的にフレーム内符号化されたブロックを含む場合もある。

[B **ピクチャ**] 両方向動き予測符号化画像であり、直前と直後に位置する I ピクチャまたは P ピクチャを参照フレームとし、この 2 つのフレームからの動き補償予測によって符号化される。ただし、部分的にフレーム内符号化されたブロックを含む場合もある。

[D **ピクチャ**] DC 符号化画像と呼ばれ、フレーム内の情報のみを用いて符号化されるが、画像の直流成分のみで構成されている。他の 3 種類のピクチャと同じシーケンスに共存することではなく、特別な用途以外には用いられることはない。本研究で対象とする MPEG 符号化画像は D ピクチャを含まないものとする。

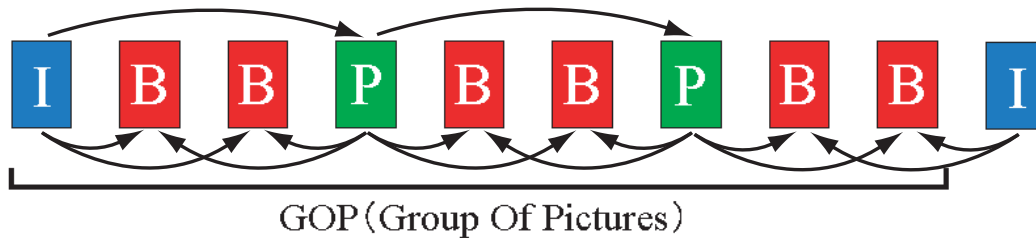


図 2.1: MPEG 符号化画像のピクチャ構造

各タイプのピクチャはこのような符号化されていることから、I ピクチャのデコードには他のピクチャを必要としない。P ピクチャをデコードするためには直前の I ピクチャまたは P ピクチャが必要となる。また、B ピクチャをデコードするためには直前と直後に位置する I ピクチャまたは P ピクチャが必要となる。

また、1 枚以上の I ピクチャと 0 枚以上の非 I ピクチャから構成されるピクチャ列を GOP (Group Of Pictures) と呼ぶ。GOP は 1 枚以上の I ピクチャを含むため、GOP を単位として MPEG 符号化画像のデータシーケンスへのランダムアクセスが可能となる。

図 2.1 に MPEG 符号化画像のピクチャ構成の例を示す。図 2.1 では、I、P、B 各ピクチャの動き補償予測の方向を矢印で示している。また、GOP 構成の例も示している。MPEG 符号化画像では、1 つの GOP に含まれるピクチャ数を N 、I または P ピクチャの現れる周期を M というパラメータで表す。 N 、 M は符号化しようとする動画像のシーンや動きの特徴に合わせて自由に変えることができるが、通常 N は 9~50、 M は 3~6 程度が一般的に用いられる。図 2.1 の例では $N = 9$ 、 $M = 3$ である。

2.2.2 マクロブロックの符号化方式

MPEG 符号化画像の各ピクチャは 16×16 画素のマクロブロックと呼ばれるブロックから構成されており、フレーム内符号化及びフレーム間動き予測符号化はマクロブロックを単位として行われる。各タイプのピクチャは、次のように符号化されたマクロブロックから構成される。

[I ピクチャ] すべてのマクロブロックがフレーム内符号化される。

[P ピクチャ] 直前に位置する I ピクチャまたは P ピクチャからの前方向動き予測符号化と、フレーム内符号化の両方のマクロブロックから構成される。

[B ピクチャ] 次のように符号化されたマクロブロックから構成される。

- a. フレーム内符号化されたマクロブロック。
- b. 直前に位置する I ピクチャまたは P ピクチャのみからの前方向動き予測符号化されたマクロブロック。

- c. 直後に位置する I ピクチャまたは P ピクチャのみからの後方向動き予測符号化されたマクロブロック.
- d. 直前と直後に位置する I ピクチャまたは P ピクチャそれぞれからの両方向動き予測符号化されたマクロブロック.

また、P ピクチャ及び B ピクチャでは、参照フレームからの動き量が小さいマクロブロックに対しては符号化を行わない場合がある。このとき、復号時には、参照フレームの同じ場所に位置するマクロブロックをそのまま用いる。P ピクチャ及び B ピクチャでは、1つのピクチャの中に符号化方式の異なるマクロブロックが混在することが許され、符号化する動画像のシーンや動きの特徴に合わせてマクロブロックの符号化方式を自由に選択することができる。

2.2.3 MPEG 符号化画像の評価尺度

本論文における MPEG 動画像の再生品質の評価は、PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) による客観評価を前提とする。PSNR による評価ではフリッカのような主観評価的雑音を反映することができないが、画質を定量的に扱えるため、動画像ストリームのビットレートと画質の関係を定式化して帯域割当てに利用することが可能となる。また、比較的容易に計算可能であるため、動画像伝送と並行して PSNR を求めることでリアルタイムストリーミングにおける帯域割当て制御の指標として利用できる。

2.3 従来方式の問題点及び提案方式

2.3.1 蓄積メディアのマルチチャネル伝送

近年、CATV や VOD (Video On Demand) のようにサーバに蓄積された動画像データを通信ネットワークを介して伝送するシステムが出現している。しかし、膨大な動画像データを不特定多数の利用者に配信するために必要な高速大容量のネットワーク基盤は開発途上にあり、利用可能なネットワーク資源量によってサービスが制限を受けてしまうのが現状である。このような場合、回線容量に合わせた動画像データのビットレート制御が必要であるが [4]–[14]、従来の方式はいずれも基本的にエンド–エンド間で高品質な動画像伝送を単独で行うことを目的としており、同一回線上を流れる他の動画像ストリームの存在までは考慮していない。したがって、複数の動画像ストリームが同一回線を共有する場合でも、各動画像のビットレートがエンド–エンド間で個別に制御されるため、各動画像の品質にばらつきが生じる。また、同一回線を共有する各動画像ストリームに対するネットワーク資源の割当てや伝送制御を統括的に行う方式も存在するが [15]–[20]、これらの方式における QoS 制御は、基本的にネットワーク資源の観点からコストの最適化または資源の公平な配分を目指すものであり、受信側で再生される動画像の品質そのものは考慮されていないことが多い。再生品質が QoS 制御におけるパラメータの 1 つとして考慮されている場合でも、システム全体における QoS 総和の最大化を目的としているので [18, 19]、各ストリー

ムの再生動画像品質を均一化するような、再生品質における公平性を達成する制御は期待できない。

これらのことから、本研究では、同一回線上で符号化された動画像のマルチチャネル伝送が行われる場合に、その回線を利用する各動画像の画質を均一化し、かつ全体的に画質を向上させるような帯域割当制御方式を提案する。ここで、あらかじめ符号化されている動画像を扱う場合、蓄積状態における品質がまちまちであるため、蓄積状態での PSNR とスケーリング後の PSNR の差分を画質劣化と定義し、動画像の再生品質の評価基準とする。この方式では、同一回線を共有する複数の動画像ストリームに対して、各ストリームにスケーリング処理が施される際の画質劣化特性を数値化したパラメータを利用し、全ストリームにおける最大画質劣化が最小となるように帯域を配分することで再生品質の均一化を実現する。

一方、MPEG 動画像のビットレートを削減するスケーリング方式もいくつか提案されているが [23]–[29]、これらのスケーリング方式はそれぞれのデータ削減に対するアプローチの違いによって性質が異なり、その優劣は画品質、ビットレートによって変化する。そこで、本方式では動画像の特性に合わせてスケーリング方式を選択することで画質の向上を図る。

更に、本方式を実際の動画像伝送システムに適用するためには、動画像のシーンチェンジによる画質劣化特性変動に対処する必要がある。動画像のビットレートと画質には一定の関係があり、かつその関係はシーン内でほぼ不変と考えられる。したがってシーンごとに動的に帯域割当てを行うことにより、画質の均一化が可能となる。画質劣化特性は動画像のシーンごとの性質に負うところが大きいため、本研究では、各動画像のシーンごとの画質劣化特性をあらかじめパラメータ化しておき、これらの情報から帯域配分変動を時間軸方向に示した伝送スケジュールを作成し、このスケジュールに沿って各動画像ストリームのビットレート調整を行わせる方式を提案する。

ここで、伝送スケジュールに則ったストリーム送出を動画像サーバに行わせる場合、シーケンスヘッダにおいてビットレートを指定する MPEG のシンタックス構造から、GOP 単位より細かいビットレート調整を行うことはできない。各ストリームの GOP は同期していないため、各ストリーム間のビットレート調整タイミングにずれが出てしまい、帯域調整が安定するまでのタイムラグが発生する。そのため、システム内のストリーム数増大によりシーンチェンジによる帯域配分調整が頻発すると、スケジュールに沿った伝送が実現できなくなる。そこで本研究では、ストリーム数増大を考慮した帯域割当方式の拡張を行う。具体的には全ストリームをグループ分割して、各グループで独立にストリームに対する最適割当てを行うこととして、最適グループ数を推定する手法を提案する。

以上の方式を LAN 上に実装し、蓄積された MPEG ビデオの伝送実験を行い、動的帯域割当方式が実システム上で有効に機能することを確認する。

2.3.2 広域ネットワーク上でのリアルタイムビデオストリーミング

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・広帯域化に伴い、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 [30]–[32]。しかし、インターネット等の QoS が保証されないネットワークにおいては、十分なネットワーク資源が確保できない状況が考えられる。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。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、ネットワーク全体で複数セッション間の細かな 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ーとして既に知られている技術に、Int-serv (Integrated Service) [33]–[35] や Diff-serv (Differentiated Service) [36] 等があるが、RSVP (Resource ReSerVation Protocol) [37] 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) [38] 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 [39]–[42]。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性が生じるが、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。

これらのことから、本研究では、広域ネットワーク上における MPEG 動画像のリアルタイム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により各動画像の画質を均一化する帯域制御方式を提案する。この場合、原画像の符号化が伝送と並行して行われるため、符号化時点における PSNR を動画像の再生品質の評価基準とする。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、メディア自体の QoS の自律分散制御を実現する。また、動画像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 符号化された動画像データの 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、その回線を共有するストリームの送出サーバの内、最も PSNR の高いものから送出レートを削

減させる。レート削減要求を受けたサーバはこれに従い、符号化ビットレートを調整する。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再生品質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。本論文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 [43]–[46] 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 [47]–[49]。

2.4 本章のまとめ

MPEG 符号化画像は I, P, B, D ピクチャと呼ばれる符号化方式の異なる 4 種類のフレームデータから構成されているが、本章では、まず各タイプのピクチャの符号化方式と、MPEG 符号化画像が各ピクチャからどのように構成されているかについて述べた。更に、各ピクチャはマクロブロックと呼ばれるブロックから構成されているが、各ピクチャはその符号化タイプに応じてどのようなマクロブロックから構成されているかについて述べた。

次に、動画画像のマルチチャネル伝送システムにおける従来の QoS 制御方式の問題点について述べ、本研究における再生品質を考慮した動的帯域割当方式について述べた。

第 3 章

単一回線上での最適帯域割当方式

3.1 まえがき

本章では、サーバに蓄積された複数の動画像が同一回線を共有する場合に、その回線を利用する各動画像の再生品質を均一化しつつ全体的な画質の向上を実現する帯域割当方式を提案する。まず、提案方式が対象とするシステムモデルの動作概要について述べる。次に、本研究で用いる MPEG 動画像のスケーリング方式の処理プロセス及び特性について述べ、各動画像に対してスケーリングが施された場合の画質劣化の度合（画質劣化特性）を利用した帯域割当方式を提案する。また、計算機シミュレーションによって提案方式の性能評価を行う。なお、この方式においては、動画像の蓄積状態での PSNR とスケーリング後の PSNR の差分を再生品質の評価基準として用いる。

3.2 システムモデル

本論文で対象とする動画像伝送システムのモデルを図 3.1 に示す。このシステムは、あらかじめ符号化されサーバに蓄積されている動画データを伝送する、蓄積メディアシステムである。動画像伝送は server i と client i ($i=1, \dots, N$) の間でそれぞれ独立して行われ、各動画像ストリームはルータ間の回線を共有する。共有回線の帯域管理は、ルータが各動画像ストリームに対する帯域割当てを一元的に行うことで実現される。共有回線の容量には限界があるため、すべての動画像ストリームに対して十分な帯域を提供できないこともあるが、その場合は各サーバが割り当てられた帯域に合わせて、動画像ストリームにスケーリング処理を施すことになる。

このシステム下で行われる動画像伝送の具体的な動作は以下のようになる。動画像伝送を開始する際に、各サーバは帯域要求とともに動画像のビットレートと画質の関係を表すパラメータをルータに通知する。ルータは受け取った情報をもとに、各動画像の画質がなるべく均一になるように帯域割当てを決定し、その結果を各サーバに通知する。ここで各サーバはルータから指定された帯域に合わせてビットレート調整を行いつつ動画像伝送を開始し、各動画像ストリームはルータで合流し共有回線に送出される。なお、動画像ストリームはサーバから固定レート（CBR : Constant Bit Rate）符号化モードで送出されるものとする。これは割り当てられた帯域をオーバーしない範囲で有効に利用するためであり、

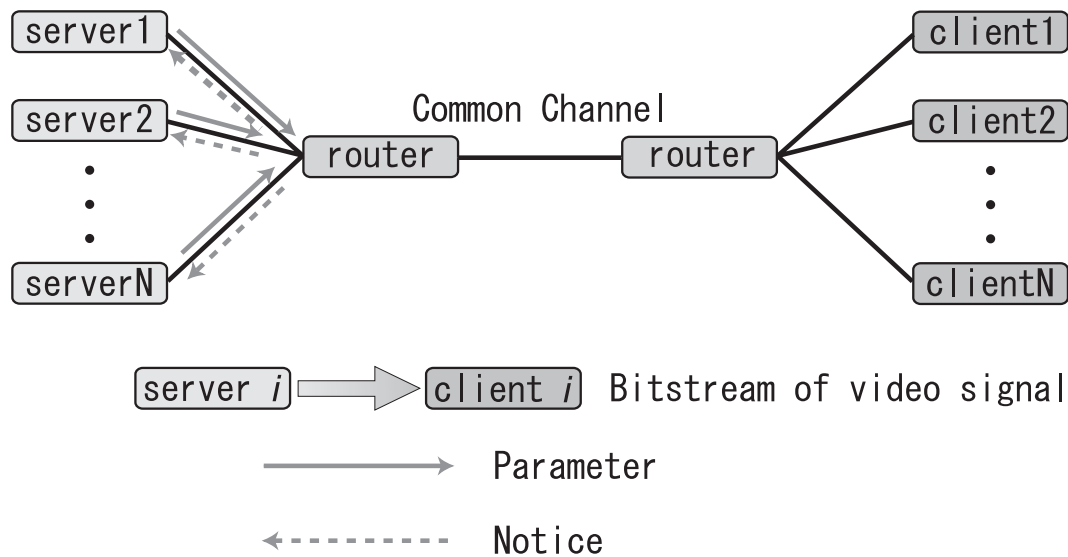


図 3.1: システムモデル

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。

3.3 動画画像のスケーリングと画質

MPEG 動画画像を対象としたスケーリング方式としては従来から多くの方式が提案されている。各スケーリング方式はデータ量削減手法の違いから異なる画質劣化特性をもつため、状況に応じてより有利なスケーリング方式を選択することが望ましい。そこで、本論文で提案する帯域割当制御方式では、動画画像伝送を行う各サーバに複数のスケーリング方式を選択的に使用させる。スケーリング方式としては従来から提案されている各方式を用いることが可能であるが、有利なスケーリング方式を選択するためには、各方式の画質劣化特性を事前に把握しておく必要がある。

本方式では、スケーリング方式として再量子化 [23] と DCT 係数削除 [28] の 2 方式を選択的に用いることとする。以下において、それぞれのデータ量削減手法とその特性、及び実際の動画画像に適用したときの動画画像のビットレートの変動と画質の関係について示す。

3.3.1 再量子化

再量子化によるスケーリングは、MPEG データストリームをデコーダとエンコーダを縦続接続したトランスコーダに通すことで行われる (図 3.2)。トランスコーダに入力された MPEG データストリームはデコーダによって復号化された後、エンコーダによってより粗い量子化ステップで再符号化され、結果として入力時よりも低いビットレートで出力さ

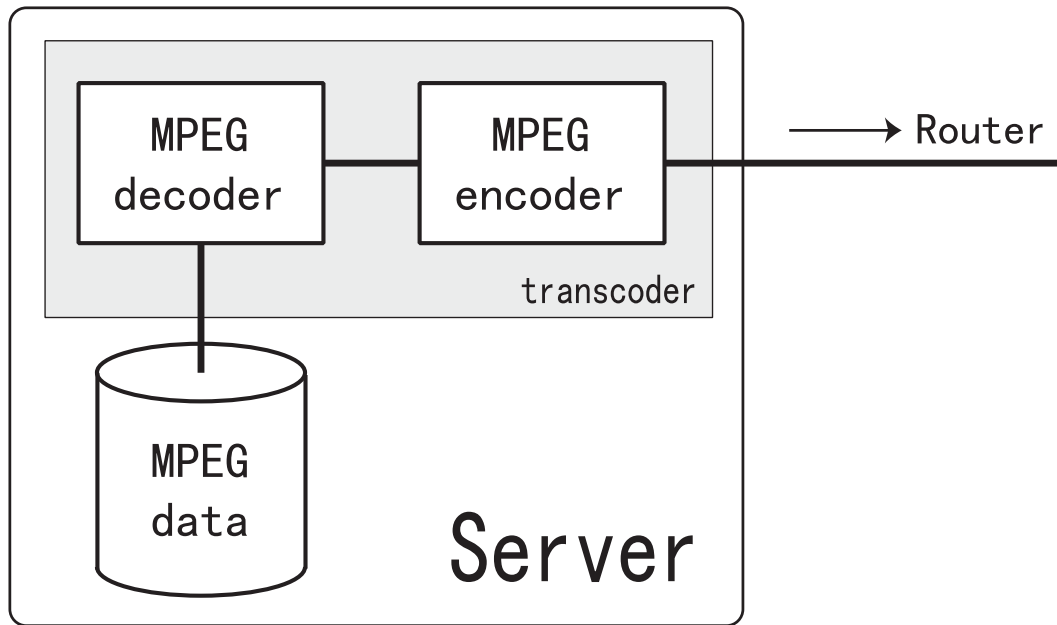


図 3.2: 再量子化によるスケーリング

れる。

この方式のように符号化・復号化をカスケードに繰り返すことの欠点は、符号化に伴う量子化雑音の重畳により画質の劣化が引き起こされることである。

3.3.2 DCT 係数削除

MPEG の P 及び B ピクチャの主なマクロブロックは、前方向動き予測、後方向動き予測または両方向動き予測によって符号化されている [22]。これらの動き予測符号化方式は更に、DCT 係数をもつもの（動き予測＋符号化）ともたないもの（動き予測＋符号化不要）に分類される。“動き予測＋符号化”であるマクロブロックは、動き補償予測によって求めた動きベクトルと、予測画像との差分画像の DCT 係数をもっている。しかし、DCT 係数データの総ビット量が小さいマクロブロックは予測画像との差分が比較的小さいと考えられ、DCT 係数を削除して予測画像で近似することにより“動き予測＋符号化不要”のマクロブロックとして取り扱うことが可能である。この場合、マクロブロックは動きベクトルのみをもつだけであり、符号量が小さくおさえられる。このようなマクロブロックは、前方向予測及び後方向予測では、表示には予測画像をそのまま用いる。両方向予測では、前後 2 つの予測画像を平均した画像を用いる。

DCT 係数削除方式は、このように“動き予測＋符号化”されているマクロブロックの符号化タイプを“動き予測＋符号化不要”に変更することでデータ量を削減する。“動き予測＋符号化”されているマクロブロックは、直前に位置するマクロブロックからの相対的な位置を示す情報（MBAL: Macro-Block Address Increment）、マクロブロックの符号化タイプ

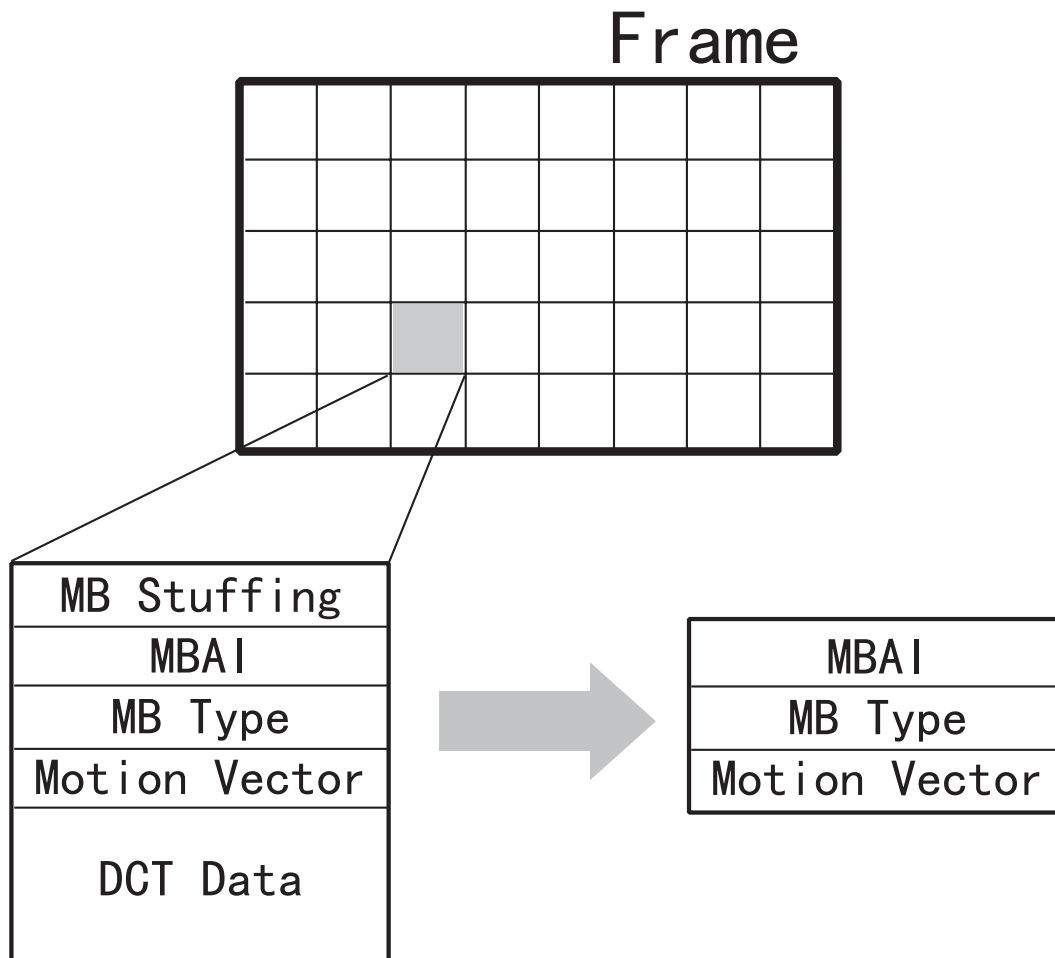


図 3.3: DCT 係数削除によるスケーリング

(MB Type), 動きベクトル情報, および予測誤差の DCT 係数に関するデータから構成されている。また, 符号発生量が少ない場合はマクロブロック・スタッフィングコードが挿入されている場合がある。したがって DCT 係数削除方式は“動き予測+符号化”されているマクロブロックから DCT 係数 (およびマクロブロック・スタッフィングコード) を削除し, 符号化タイプを“動き予測+符号化不要”へ変更する (図 3.3)。

一般に, DCT 係数の削除は, 基本的にまず B ピクチャ中のマクロブロックのうち DCT 係数データの総ビット量が小さい順に行い, 全ての B ピクチャから削除した後更にデータ量を削減する場合は P ピクチャからも同様に行う。P ピクチャからも DCT 係数を削除するようになると, P ピクチャを予測画像とする B ピクチャまで影響を受けるため画質が急激に劣化する。したがって本論文では, すべての B ピクチャ中のマクロブロックから DCT 係数を削除した時点のスケーリングの限界と定める。このとき, 各動画像ストリーム中の DCT 係数データの総ビット量は, 動画像の内容やストリーム構成によって異なるため, スケーリング限界におけるビットレートもそれぞれ異なる。

この方式によるスケーリングでは, 新たな量子化雑音が発生することはないが, マクロ

ブロック単位の処理を行うためブロック歪みが発生する場合がある。また、画質劣化の度合は削減するデータ量に依存する。

3.3.3 スケーリング対画質特性

以上の2つのスケーリング方式を動画像に適用した場合の、出力として得られる再生動画像の画質変動を実験により測定した。まず、原画像として4つのMPEG標準画像 (flower garden, table tennis, susie, football) を用意し、それぞれを2.0 Mbps 及び4.0 Mbps のビットレートで符号化したMPEGデータストリームを生成した。次に、これらのMPEGデータストリームに再量子化及びDCT係数削除の2方式によって複数規模のスケーリング処理を施し、再生動画像のPSNRを測定した。なお、原画像の符号化及び再符号化にはTM5 (Test Model 5) MPEG2 エンコーダ [50] を用い、再符号化における符号化モードと動きベクトルは入力時のものをそのまま使用した。また、DCT係数削除における各ストリームの下限ビットレート値は以下ようになる。

- flower garden 4.0 Mbps $\rightarrow$ 2.4 Mbps
- flower garden 2.0 Mbps $\rightarrow$ 1.2 Mbps
- table tennis 4.0 Mbps $\rightarrow$ 2.6 Mbps
- table tennis 2.0 Mbps $\rightarrow$ 1.4 Mbps
- susie 4.0 Mbps $\rightarrow$ 2.5 Mbps
- susie 2.0 Mbps $\rightarrow$ 1.2 Mbps
- football 4.0 Mbps $\rightarrow$ 2.6 Mbps
- football 2.0 Mbps $\rightarrow$ 1.3 Mbps

スケーリングの大きさと画質変動の関係を図3.4-3.7に示す。なお、横軸はスケーリング後のビットレートのもとのビットレートに対する割合である。

図3.4-3.7から、二つのスケーリング方式の優劣は原画像の種類や符号化レートによって異なり、どちらかが一方的に有利というわけではないことがわかる。例えば flower garden の場合、符号化レート 4.0 Mbps の動画像に対しては再量子化が、符号化レート 2.0 Mbps の動画像に対してはDCT係数削除が有利という結果が出ている。これに対して、football の場合はどちらの符号化レートでも再量子化が有利である。したがって、より高画質を維持するためのスケーリング方式の選択判断は、各動画像ごとに行う必要がある。

また、シミュレーション画像について主観評価を行うと、DCT係数削除を適用した場合に、BピクチャのみからDCT係数データを削除することによるフリッカ雑音の発生が見られた。2.0 Mbps 程度のMPEGデータをスケーリングする場合はほとんど無視できる程度であるが、4.0 MBps 程度のMPEGデータの場合はかなりちらつきが見られた。ただ、スケーリング前のMPEGデータのビットレートが高くなると、DCT係数削除よりも再量子

表 3.1: 各動画像のパラメータ

シーケンス名	flower garden		table tennis	
スケーリング前のビットレート [Mbps]	2.0	4.0	2.0	4.0
スケーリング前の PSNR [dB]	30.96	35.68	37.99	42.19
再量子化時の劣化係数	4.27	2.61	4.49	2.45
DCT 係数削除時の劣化係数	3.40	2.88	4.35	3.16

シーケンス名	susie		football	
スケーリング前のビットレート [Mbps]	2.0	4.0	2.0	4.0
スケーリング前の PSNR [dB]	42.51	45.66	33.06	37.32
再量子化時の劣化係数	2.77	1.49	3.56	2.31
DCT 係数削除時の劣化係数	3.73	2.17	5.88	4.19

化のほうが有利になる傾向があるため、本研究において提案手法を適用した結果にはあまり影響が見られなかった。

ここで、すべてのグラフが線形に近いことから、本研究の対象範囲内ではスケーリングの大きさと PSNR とはほぼ直線関係にあるといえる。このため、図 3.4–3.7 のようにして得られた各グラフを最小 2 乗法により線形近似することにより、動画像のビットレートとそのときの PSNR の関係を表す 1 次式より得られるパラメータを各動画像固有のパラメータとして扱うことができる。すなわち、スケーリング後のビットレート b_r と $\text{PSNR}_Q(b_r)$ の関係を次のように表す。

$$Q(b_r) = R(b_r - B_r) + Q \quad (3.1)$$

$$Q(b_r) = D(b_r - B_r) + Q \quad (3.2)$$

ただし、 B_r 及び Q はスケーリング前の動画像のビットレートと PSNR である。また、 R 及び D はそれぞれスケーリング方式として再量子化及び DCT 係数削除を使用したときの画質の劣化係数であり、この値が大きいほどビットレートの減少に伴う画質劣化が激しい。したがって、 R と D の大小を比較することで、その動画像にとって有利なスケーリング方式の選択が可能である。例として実験で使用した各動画像から得たパラメータを表 3.1 に示す。

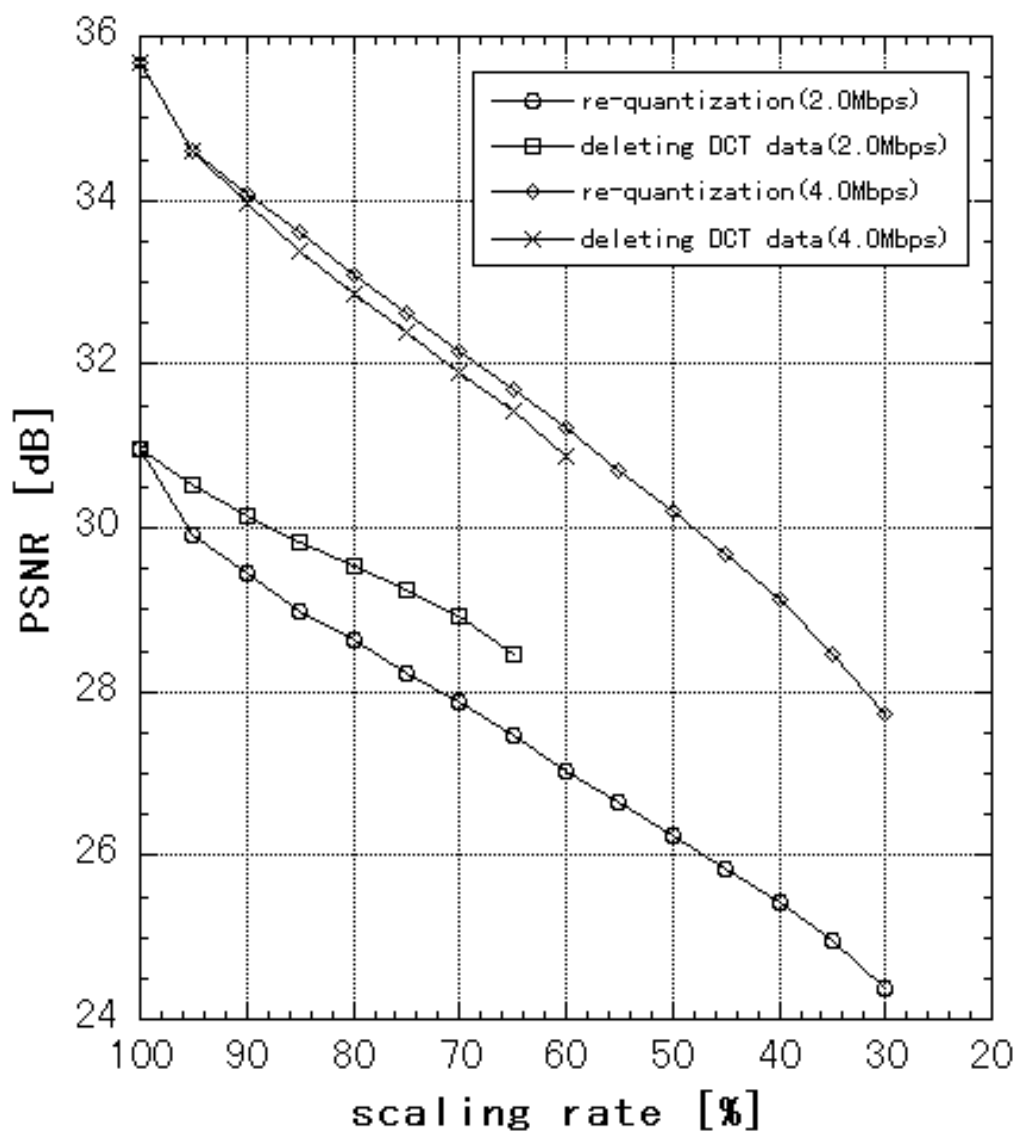


図 3.4: スケーリング対画質特性 (flower garden)

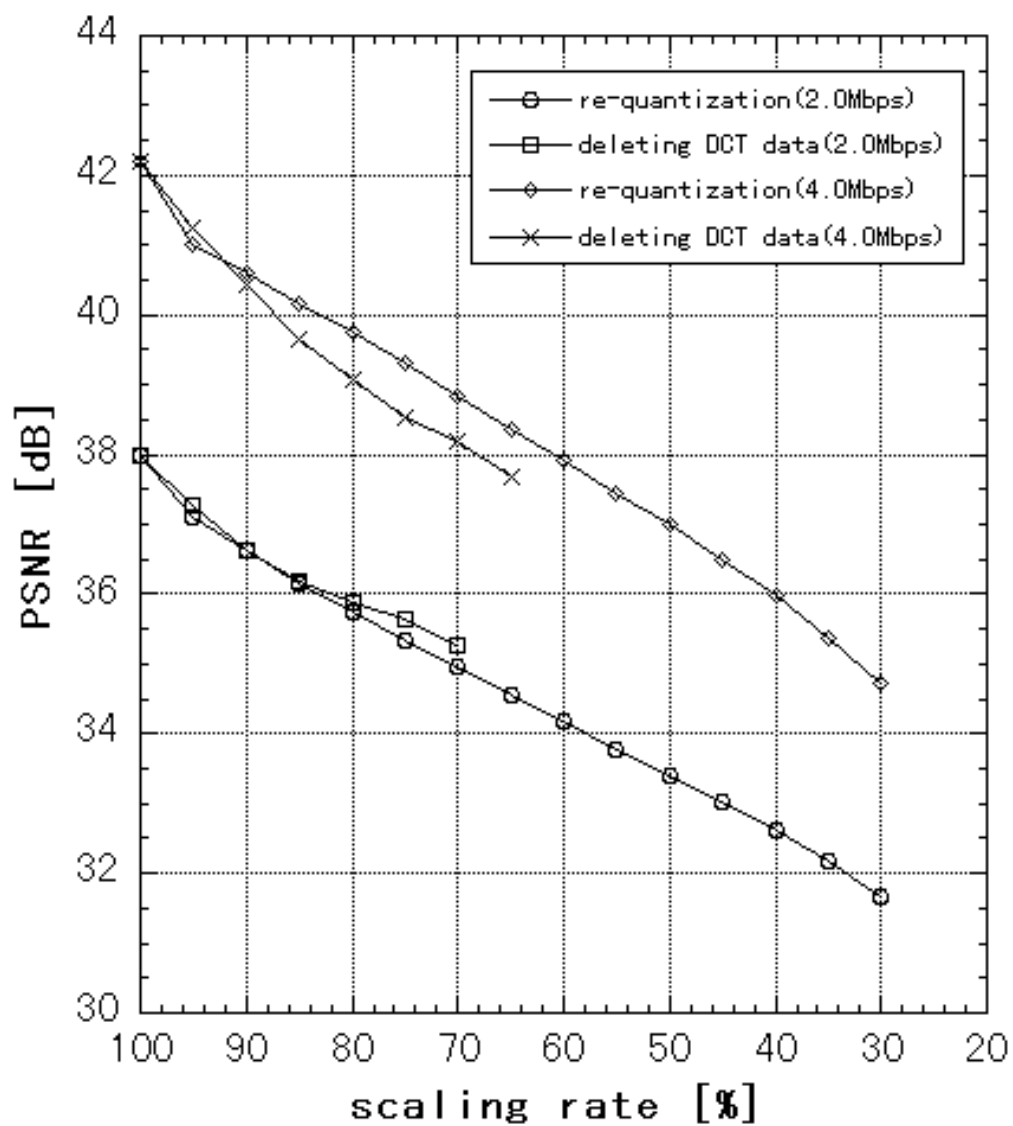


図 3.5: スケーリング対画質特性 (table tennis)

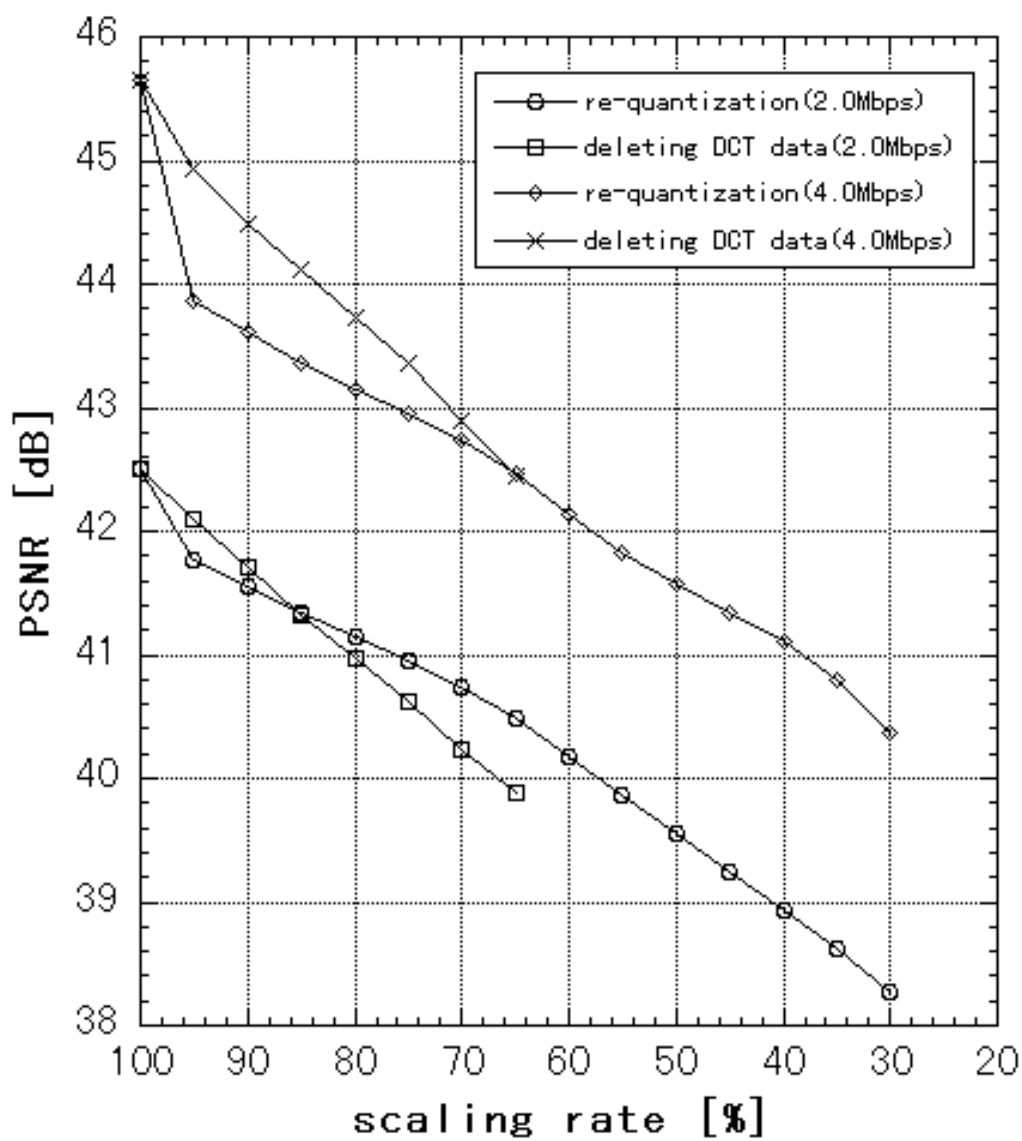


図 3.6: スケーリング対画質特性 (susie)

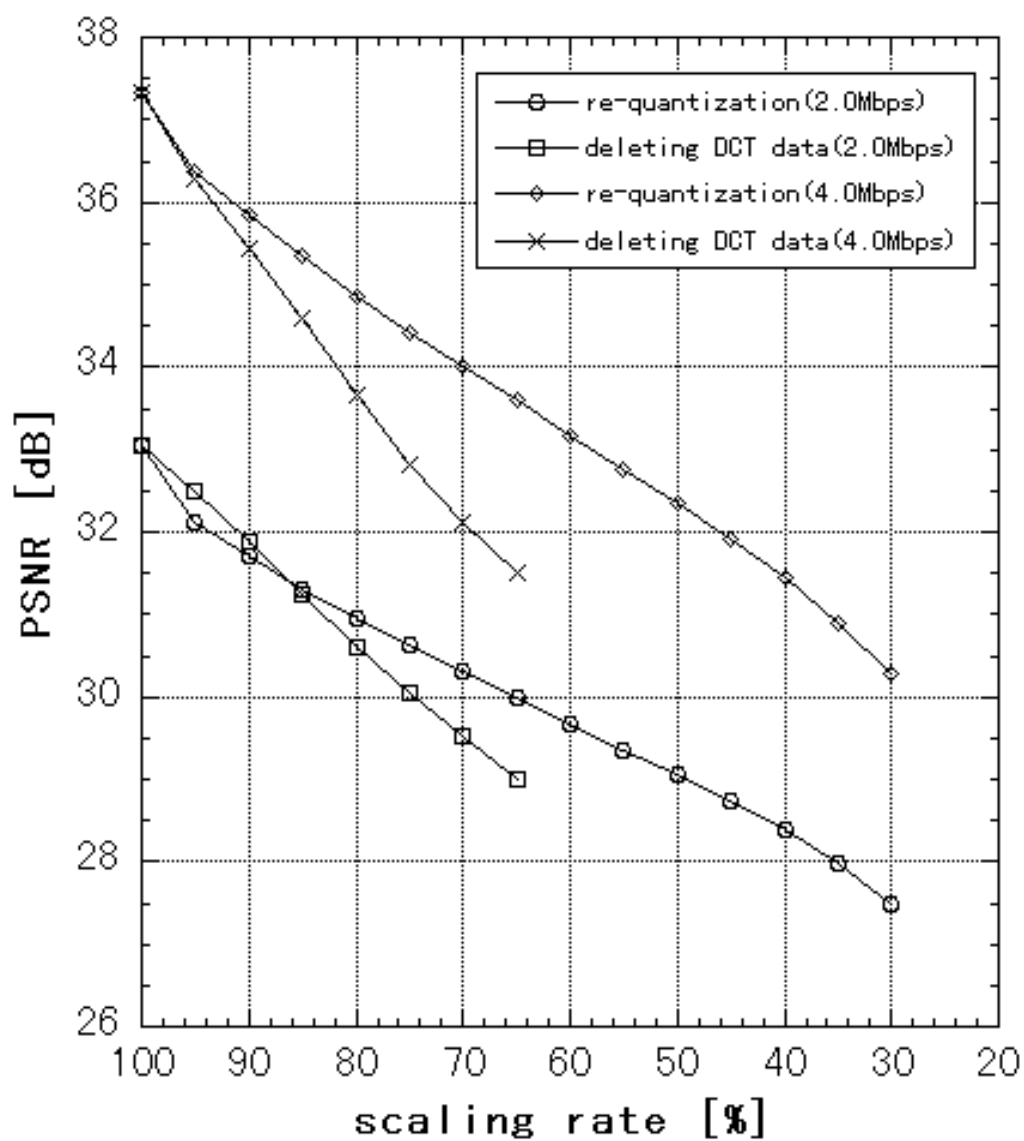


図 3.7: スケーリング対画質特性 (football)

3.4 画質劣化特性を用いた帯域割当方式

動画像の伝送に際して、ルータは各サーバから送られてきた動画像パラメータをもとに帯域割当てを決定し、各サーバはその決定に沿って動画像ストリームの送出を開始する。以下、ルータによる帯域割当アルゴリズムの詳細を述べる。

3.4.1 動画像のパラメータ

ルータにおいて各動画像ストリームに対する帯域割当処理を行う際に使用するパラメータは、動画像データとともにあらかじめ各サーバに蓄積されているものとする。server i から通知される動画像ストリーム i のパラメータを以下に示す。

- 動画像ストリーム i のスケーリング前のビットレート B_i [Mbps] と PSNR Q_i [dB]
- 再量子化時のビットレートと PSNR の関係を線形近似した直線から得られる画質劣化係数 R_i と再量子化によるビットレート変動の下限値 B_{iR_min} [Mbps]
- DCT 係数削除時のビットレートと PSNR の関係を線形近似した直線から得られる画質劣化係数 D_i と DCT 係数削除によるビットレート変動の下限値 B_{iD_min} [Mbps]

ここにあげたパラメータのうち、 B_i 、 Q_i 、 R_i 及び D_i については 3.3.3 で既に述べている。 B_{iR_min} と B_{iD_min} は、それぞれ再量子化及び DCT 係数削除によるスケーリングを限界まで行ったときのビットレートである。前述のように DCT 係数削除では、P ピクチャの DCT 係数削除を行うと急激に特性が劣化するため、B ピクチャ中の DCT 係数データをすべて削除した時点で限界 (B_{iD_min}) とする。再量子化によるスケーリング限界 (B_{iR_min}) は一般には利用者により許容限界として定められることを前提としているが、本論文におけるシミュレーションでは、主観評価によりもとのビットレートの 7 割減の値を限界値として使用している。

3.4.2 帯域割当アルゴリズム

ルータによる帯域割当ては、各動画像における画質劣化のばらつきをできるだけおさえつつ全体的に画質を向上させることを目的として行われる。帯域割当アルゴリズムは動画像のパラメータ以外に、各動画像ストリームが共有する回線のデータ転送速度 C [Mbps]、動画像ストリームの数 N 及び各ストリームの状態集合 X を使用する。ここで、 X は以下のように表される。

$$\begin{aligned} X &= \{(x_1, x_2, \dots, x_N) \mid \\ &\quad x_i \in \{\phi, r, r', r'', r''', d, d', d'', d'''\}\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

x_i は動画像ストリーム i の状態変数であり、動画像ストリーム i に適用されるスケーリング方式を示している。 ϕ 、 $r \sim r'''$ 、 $d \sim d'''$ は状態の要素であり、その意味は次のとおりであ

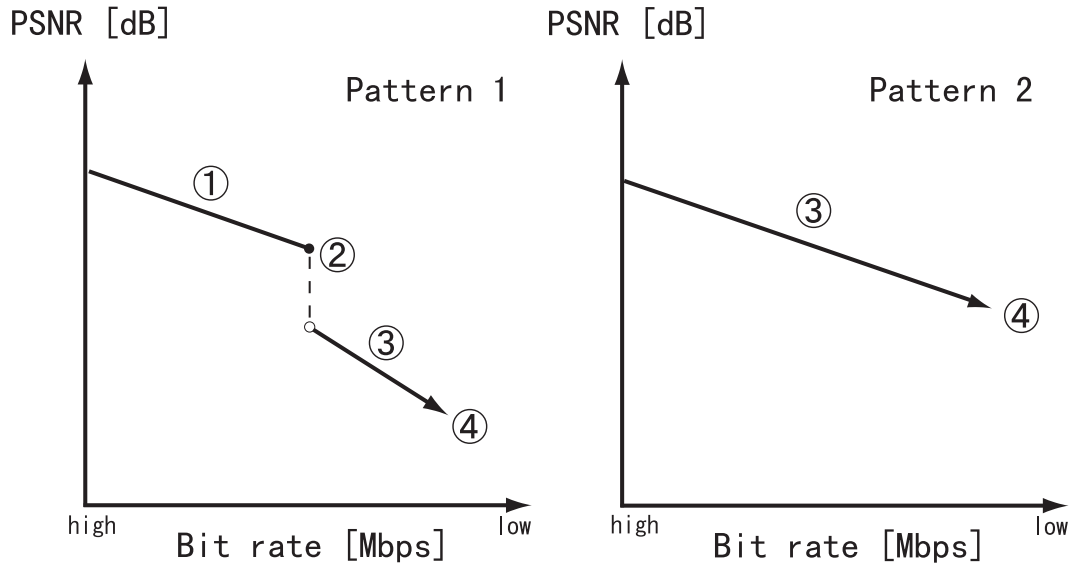


図 3.8: 画質劣化パターン

る．図 3.8 に示すように，ビットレートの低下に伴う画質の劣化は二つのパターンに分けられる．パターン 1 は当初選択したスケーリング方式の下限値のほうが大きいためスケーリング方式の切り換えが必要な場合であり，パターン 2 は切り換え不要な場合である．各状態要素は， r 及び d が①， r' 及び d' が②， r'' 及び d'' が③， r''' 及び d''' が④に対応する．それぞれの意味は，

- ① スケーリング方式の切り換え可能
- ② スケーリング方式の切り換え待ち
- ③ スケーリング方式の切り換え不可
- ④ スケーリングの限界

である．また ϕ はそのストリームに帯域が割り当てられないことを意味する．

以下に，帯域割当てを決定する手順を示す．

[step 1] $x_i \neq \phi$ の各ストリームについて，

- $R_i < D_i$ かつ $B_{iR_min} > B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow r$
- $R_i < D_i$ かつ $B_{iR_min} \leq B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow r''$
- $R_i > D_i$ かつ $B_{iR_min} < B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow d$
- $R_i > D_i$ かつ $B_{iR_min} \geq B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow d''$
- $R_i = D_i$ かつ $B_{iR_min} < B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow r''$

- $R_i = D_i$ かつ $B_{iR_min} \geq B_{iD_min}$ ならば $x_i \leftarrow d''$

という代入操作を行う.

[step 2]

$$Z_i = \begin{cases} R_i(B_i - B_{iR_min}) & (x_i = r, r'' \text{ のとき}) \\ D_i(B_i - B_{iD_min}) & (x_i = d, d'' \text{ のとき}) \\ Z_i & (\text{それ以外のとき}) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Z_k = \min\{Z_i\} \quad (1 \leq k \leq N) \quad (3.5)$$

とする.

[step 3]

$$b_i = \begin{cases} B_i - \frac{Z_k}{R_i} & (x_i = r, r'' \text{ のとき}) \\ B_i - \frac{Z_k}{D_i} & (x_i = d, d'' \text{ のとき}) \\ B_{iR_min} & (x_i = r', r''' \text{ のとき}) \\ B_{iD_min} & (x_i = d', d''' \text{ のとき}) \\ 0 & (x_i = \phi \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^N b_i = C' \quad (3.7)$$

とし, $C' > C$ なら step 4 へ, $C' \leq C$ なら step 5 へ進む.

[step 4]

$$x_k \leftarrow \begin{cases} r' & (x_k = r \text{ のとき}) \\ d' & (x_k = d \text{ のとき}) \\ r'' & (x_k = d' \text{ のとき}) \\ d'' & (x_k = r' \text{ のとき}) \\ r''' & (x_k = r'' \text{ のとき}) \\ d''' & (x_k = d'' \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.8)$$

とする. この代入操作を行うことによって, すべての x_i が r''', d''', ϕ のいずれかになったなら, $x_i \neq \phi$ かつ $\min\{B_{iR_min}, B_{iD_min}\}$ が最大であるストリーム i の状態を ϕ に変更して step 1 に戻る. そうでなければ

$$Z_k = \begin{cases} D_k(B_k - B_{kR_min}) & (x_k = r' \text{ のとき}) \\ R_k(B_k - B_{kD_min}) & (x_k = d' \text{ のとき}) \\ \infty & (x_k = r''', d''' \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.9)$$

として step 2 に戻る.

[step 5]

$$z_i = \begin{cases} R_i(B_i - b_i) & (x_i = r, r', r'', r''' \text{のとき}) \\ D_i(B_i - b_i) & (x_i = d, d', d'', d''' \text{のとき}) \\ 0 & (x_i = \phi \text{のとき}) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$b_i = \begin{cases} B_{iR_min} & (x_i = r', x_i = r''' \text{のとき}) \\ B_{iD_min} & (x_i = d', x_i = d''' \text{のとき}) \\ 0 & (x_k = \phi \text{のとき}) \end{cases} \quad (3.11)$$

として,

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^N b_i \leq C \quad (3.12)$$

$$\text{目的関数: } \max\{z_i\} \rightarrow \min \quad (3.13)$$

を満たす b_i [Mbps] を線形計画法 [51] によって求め、動画像ストリーム i に割り当てる帯域とする。

step 2 ではその時点における状態集合 X の内容を変更することなく行えるスケーリングの限界点 Z_k を求めている。つまり、各動画像ストリームがその時点における状態集合 X に示されたスケーリング方式を採用する場合、 Z_k [dB] だけ画質を劣化させることが可能となる。更なるスケーリング処理のために劣化を Z_k [dB] 以上にせざるをえない場合は、動画像ストリーム k が用いるスケーリング方式を、他のものへ変更しなければならない。また step 4 においてすべての x_i が r''', d''', ϕ のいずれかになった場合、全ストリームを限界までスケーリングしてもなお共有回線の帯域が足りないことを示しているため、ビットレートの下限值が最も大きい動画像ストリームを帯域割当てから排除している。アルゴリズムが step 5 に到達した場合、その時点での状態集合 X の内容から、各動画像ストリームに適用されるべきスケーリング方式の最適な組合せが求まる。この段階で、ビットレート配分を線形計画法を用いて決定することにより、各動画像ストリームの画質劣化のばらつきをおさえることができる。

3.4.3 性能評価

ここでは、3.4.2 で述べた帯域割当アルゴリズムについて、実験による性能評価を行った結果を示す。

原画像 football, flower garden 及び susie をそれぞれ 4.0, 2.0 Mbps 及び 2.0 Mbps で符号化した動画像ストリームが、6.0 Mbps の回線を共有する場合を例にとり、本研究で提案する帯域割当アルゴリズムの評価実験を行った。本方式の主な目的は、

- ① 各動画像ストリームの画質劣化のばらつきをおさえる

② 複数のスケーリング方式を選択的に使用することで全体的な画質の向上を図る

の二つであり、その効果を個別に確認するため以下に示す4方式の性能比較を行った（表3.2）。

(A) 各動画像ストリームに均等に帯域割当てを行う。スケーリング方式にはDCT 係数削除のみを使用する。

(B1) 提案方式により帯域割当てを行う。スケーリング方式にはDCT 係数削除のみを使用する。

(B2) 提案方式により帯域割当てを行う。スケーリング方式には再量子化のみを使用する。

(C) 提案方式により帯域割当てを行う。スケーリング方式には再量子化とDCT 係数削除を選択的に使用する。

表2のパターン(A)を他と比較することで、提案方式が各動画像ストリームの画質劣化のばらつきをおさえていることがわかる。また、表2のパターン(C)における画質劣化値がパターン(B1)、(B2)に比べて低いことから、複数のスケーリング方式を選択的に使用することで全体的に画質が向上するといえる。

図3.9-3.11では、表3.2のパターン(A)と(C)を実画像によって比較している。提案方式を用いるパターン(C)では、均等に帯域割当てを行うパターン(A)に比べて、flower garden と susie の画質をある程度犠牲にすることでfootballの画質を大幅に改善させていることがわかる。

3.5 本章のまとめ

本章では、サーバに蓄積された複数の動画像が同一回線を共有する場合に、その回線を利用する各動画像の再生品質を均一化しつつ全体的な画質の向上を実現する帯域割当方式を提案した。提案方式では、各動画像に対してスケーリングが施された場合の画質劣化の度合（画質劣化特性）をパラメータ化し、これを用いて線形計画法により各ストリームの帯域割当てを決定することで、各動画像の再生品質の均一化を実現する。また、MPEG 動画像のスケーリング方式には様々なものがあり、それらの処理プロセスの違いによりスケーリング特性が異なるため、状況に合わせて複数のスケーリング方式を選択的に利用することで画質の向上を図っている。計算機シミュレーションによる性能評価を行い、提案方式の有効性を確認した。

表 3.2: 均等割当てと提案方式の性能比較

パターン (A)

	ビットレート	PSNR 劣化値
football	2.00 Mbps	8.38 dB
flower garden	2.00 Mbps	0.00 dB
susie	2.00 Mbps	0.00 dB

パターン (B1)

	ビットレート	PSNR 劣化値
football	3.42 Mbps	2.58 dB
flower garden	1.27 Mbps	2.58 dB
susie	1.31 Mbps	2.58 dB

パターン (B2)

	ビットレート	PSNR 劣化値
football	3.16 Mbps	1.95 dB
flower garden	1.54 Mbps	1.95 dB
susie	1.30 Mbps	1.95 dB

パターン (C)

	ビットレート	PSNR 劣化値
football	3.20 Mbps	1.84 dB
flower garden	1.46 Mbps	1.84 dB
susie	1.34 Mbps	1.84 dB

comparison method



2.00 Mbps

proposed method



3.20 Mbps

図 3.9: 実画像の比較 (football)

comparison method



2.00 Mbps

proposed method



1.46 Mbps

図 3.10: 実画像の比較 (flower garden)

comparison method



2.00 Mbps

proposed method



1.34 Mbps

図 3.11: 実画像の比較 (susie)

第 4 章

シーンチェンジへの対応とストリームのグループリング

4.1 まえがき

本章では、第 3 章で提案した方式を実システムとして運用する際の問題点とその対処法について述べる。まず、動画像のシーンチェンジによる画質劣化特性の変化に対応するよう提案方式を拡張する。次に、提案方式の拡張がシステムの動作に与える影響について考察し、問題点を整理してその対処法を確立する。

4.2 伝送スケジュールの作成

第 3 章で提案した帯域割当アルゴリズムを実際の動画像伝送システムに適用させる際には、次のことを考慮する必要がある。

動画像の内容が異なればスケーリングによる画質劣化特性も異なるが、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と、単一の動画像ストリーム内においても、シーンチェンジによってスケーリングによる画質劣化特性が変化する (図 4.1)。

したがって、より実用的な処理を行うためには、各動画像ストリームのシーンチェンジによるパラメータ変化に応じた帯域の再割当てが必要になる。しかし、伝送中にある動画像ストリームでシーンチェンジが起こる度に帯域の再割当てを行っていると、帯域割当処理や各ストリームに対する通知伝送に伴う遅延が増大し、システム全体における同期制御に支障をきたす場合が考えられる。

この問題を回避するために、各動画像ストリームのタイムスケジュールとシーンごとの画質劣化特性をパラメータ化してサーバにあらかじめもたせておき、これらの情報をもとにルータにおいて各動画像ストリームの伝送スケジュールを決定しサーバに対して通知するよう本方式を拡張する。伝送スケジュールには、図 4.2 に示されるような各時間間隔 $T_1, T_2, \dots$ における各動画像ストリームへの帯域割当てと適用されるべきスケーリング方式が示されているので、サーバはこれに沿って伝送処理を行う。この方法では、一度動画像伝送が開始されると動画像データ伝送以外のサーバ・ルータ間のやりとりが原則としてなくなるの

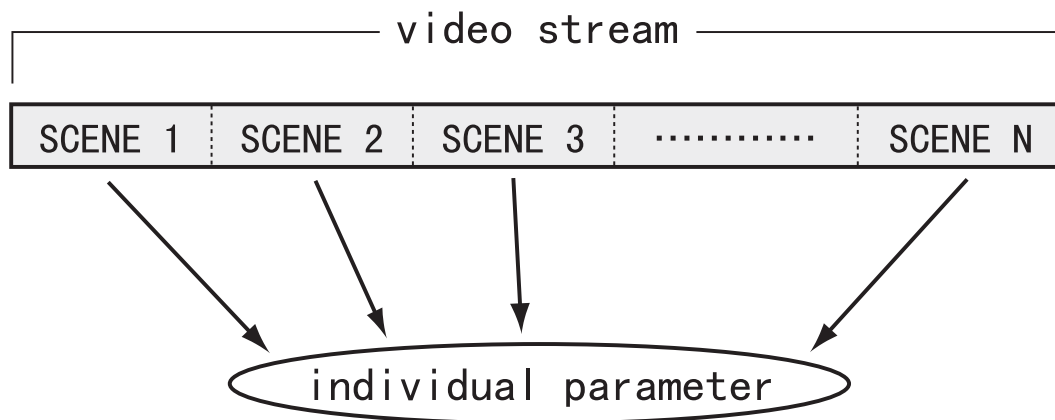


図 4.1: シーンごとの画質劣化特性

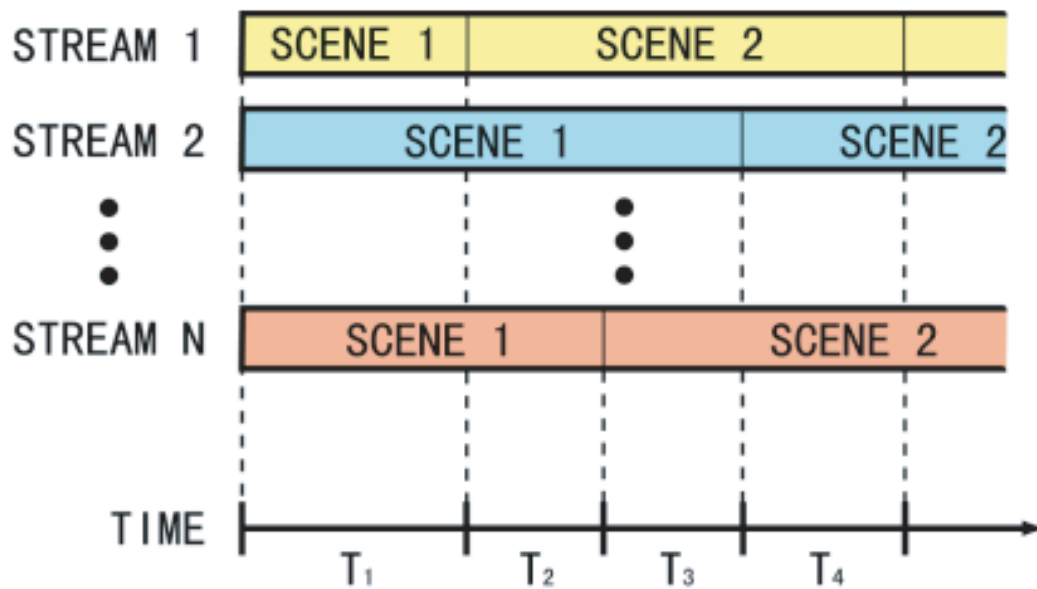


図 4.2: 時間分割された伝送スケジュール

で、上に挙げたような各種遅延を考慮する必要はない。ただし、新しい動画像ストリームの参入時には伝送スケジュール自体を再構成する必要がある、その処理に伴い遅延が発生する。したがって、新規スケジュールの開始時刻の設定にはその分の遅延を見込んでおく必要がある。

スケーリングの変更を行う場合、MPEG のデータ構造から、GOP の境界で行うことでプログラム処理が単純になり、実装が容易になる。しかし複数の動画像ストリームの GOP は同期していないため、合計帯域が回線容量をオーバする可能性がある。したがって、ここでは次の手順により回線容量オーバを防止する。

- (1) 切換処理発生後に最も早く GOP の境界がくるストリームに注目する。
- (2) そのストリームが切換えを行うことで回線容量がオーバする場合は、切換タイミングを 1 GOP 遅らせる。そうでなければ切換えを行う。
- (3) その時点から最も早く GOP の境界がくるストリームについて同様の操作を行う。
- (4) すべてのストリームの切換処理が終了する前に次の切換処理が発生する場合は、その時点から新しい切換処理に移行する。

4.3 伝送スケジュール作成方式の特性

4.3.1 切換処理により生じる損失

本方式では理論上、回線の帯域容量が十分でない場合にその帯域容量すべてを常に使い切るが、前述のような GOP のずれの問題より、切換発生時に回線容量を十分使用できない可能性が生じる。図 4.3 は、4.0 Mbps の帯域を動画像ストリーム 1 及び 2 で共有し、切換処理を GOP 単位で行う例を示したもので、 T_i と T_{i+1} の境界で A にシーンチェンジが発生した場合を想定している。ここでケース 1 のようにシーンチェンジと同時にストリーム 1 のビットレートを切り換えると、合計帯域が 5.0 Mbps となり回線容量を一時的にオーバしてしまう。したがって、ケース 2 のようにストリーム 1 の切換タイミングを 1 GOP 遅らせることで、回線容量に余裕ができるのを待つ必要がある。この場合、4.0 Mbps の帯域のうち 3.0 Mbps しか使っていない時間が生じ、損失と考えられる。この損失が生じる時間はごくわずかであるが、回線を共有するストリーム数に比例して切換処理の発生数が増大していくため、この損失が無視できないほど大きくなることも考えられる。この問題について以下の条件のもとで計算機シミュレーションによる解析を行った。なお、シミュレーションでは各ストリームのシーンスケジュールとシーンごとの画質劣化特性パラメータの情報のみからなる疑似ストリーム群を用いた。

- 各動画像ストリームのシーンチェンジはランダムに発生する。ただし、各シーンの長さの平均は 10 s とする。
- 各動画像ストリームの 1 GOP の長さはランダムであるが、上限は 0.5 s とする。

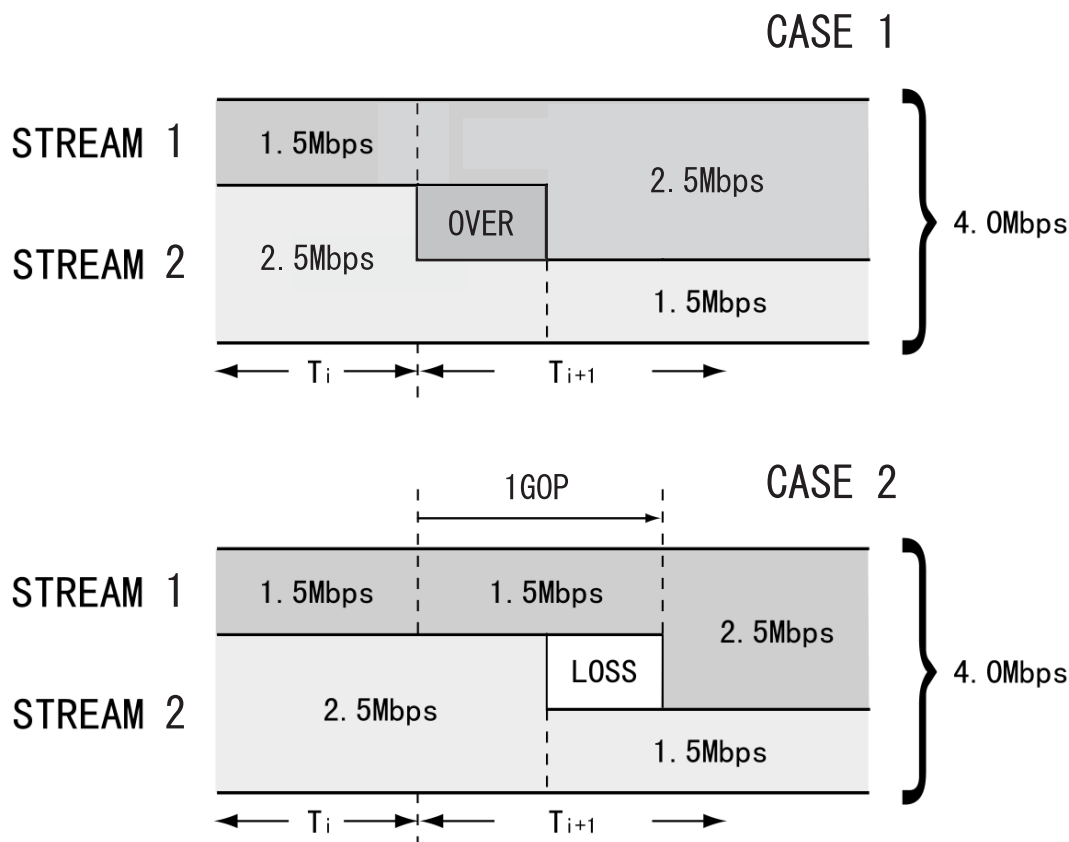


図 4.3: 切替処理に伴う帯域損失

- 各動画像ストリームに割り当てられる帯域量は1.0~2.0 Mbps の間で変動する.

以上の条件下で、8.0 Mbps の帯域を5本の動画像ストリームに配分した場合の、合計使用帯域の変動を図 4.4 に示す. 切替処理の発生に伴って、瞬間的に帯域ロスが生じていることがわかる. ここで、帯域ロスの平均値を以下の式で定義する.

$$\text{平均帯域ロス} : \frac{\int_0^T (C - B(t)) dt}{T} \quad (4.1)$$

C は共有回線の帯域、 $B(t)$ は時刻 t における合計使用帯域、 T は全伝送時間である. この結果、平均帯域ロスは0.12 Mbps と求められ、これは共有回線の帯域全体の1.5 %に相当する.

更に、共有回線の容量及び動画像ストリームの本数に帯域ロス率が依存するかを調べるため、動画像ストリームの本数 N が5, 10, 20, 50 のそれぞれの場合について、共有回線の容量を $N \times 1.0 \sim N \times 2.0$ Mbps の間で変動させながら同様の解析を行った結果を図 4.5 に示す. どの場合でも帯域ロス率は3 %以内に収まっていることから、ストリーム数の増加により帯域ロスは増加するが、全体に対する帯域ロス率はあまり変化しないことがわかり、伝送スケジュール方式によるロスは実用上問題にはならないといえる.

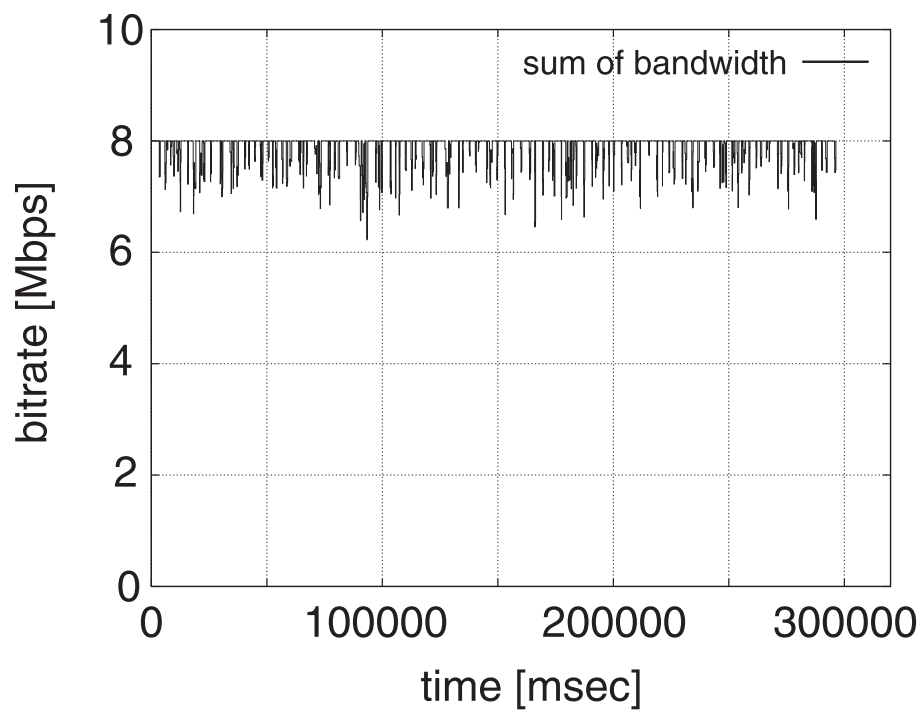


図 4.4: 合計使用帯域の変動

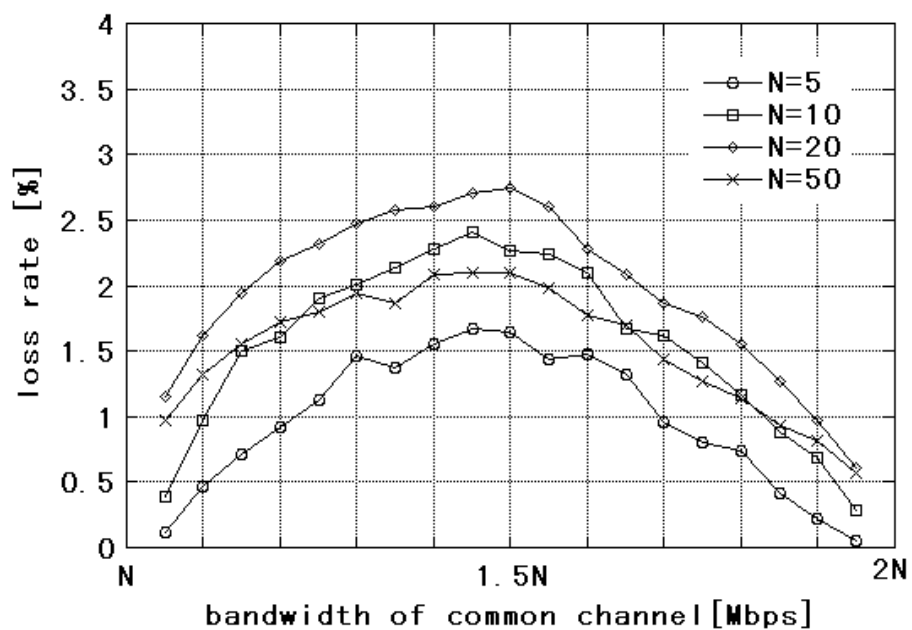


図 4.5: 帯域ロス率の推移

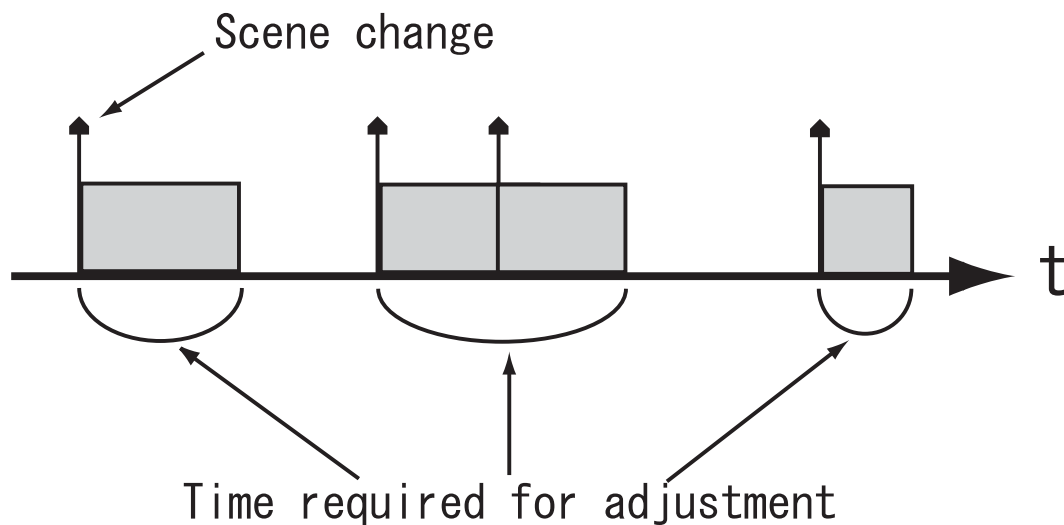


図 4.6: 調整終了までのタイムラグ

4.3.2 最適な伝送スケジュールからの乖離

4.3.1 より、伝送される動画像ストリームの数が帯域ロス率には大きく影響しないことがわかった。しかし、動画像ストリームが増えればシステム全体におけるシーンチェンジによる切替処理が頻発するようになる。切替処理の手順から明らかなように、1回の切替処理による全体のビットレート調整が終了するまでに、最長で全ストリーム中最大 GOP 長の2倍のタイムラグが生じる。このため、切替処理の発生間隔があまりに短くなると、すべての動画像ストリームが切替処理を終了する前に次の切替処理に入ってしまうことが多くなり（図 4.6）、最適なスケジュールに基づいた伝送が実現できなくなる可能性がある。すなわち、シーンチェンジによる切替間隔が GOP 長より十分大きくないと、方式劣化が生じることが予測される。そこで、動画像ストリーム数の増加が、各動画像ストリームにおける伝送スケジュールで示された帯域割当てと実際の伝送に使用した帯域との開きに与える影響を調べるため、次の計算機シミュレーションを 4.3.1 と同等の条件下で行った。

ある動画像ストリーム i に本来与えられるべき帯域よりも実際に使用した帯域が少なかったという状況をシステムの劣化と考え、その帯域差分の最大値 $\max\{\Delta_i\}$ を求め集計する。これを動画像ストリームの数が 4, 6, 8, 10, 20, 50 の場合についてそれぞれ行い、得られた結果をヒストグラムで表した（図 4.7–4.12）。これより、明らかに動画像ストリームの数が 10 本を超えると、 $\max\{\Delta_i\}$ は急速に大きくなる。

平均シーン長を T_s [s]、ストリーム数を N とすると平均シーン切替間隔は T_s/N [s] であり、本例では $N = 10$ の場合 $T_s = 10$ s であるから $T_s/N = 1$ s となる。GOP 長の最大値が 0.5 s であることを考慮すると前述の予測はほぼ確認された。実システム上で提案方式を有効に機能させるには、この問題を解決する必要がある。

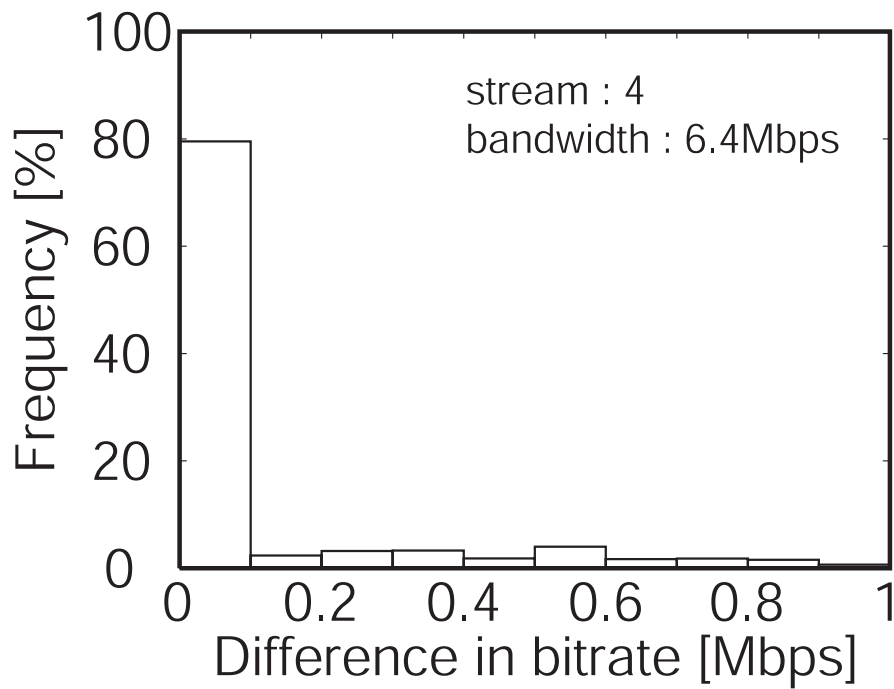


図 4.7: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 4 本)

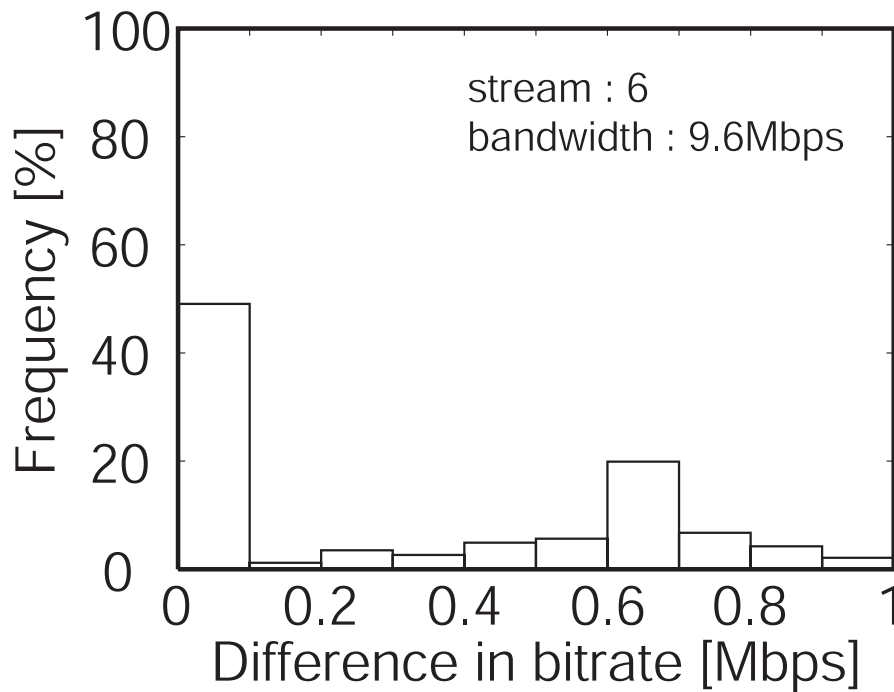


図 4.8: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 6 本)

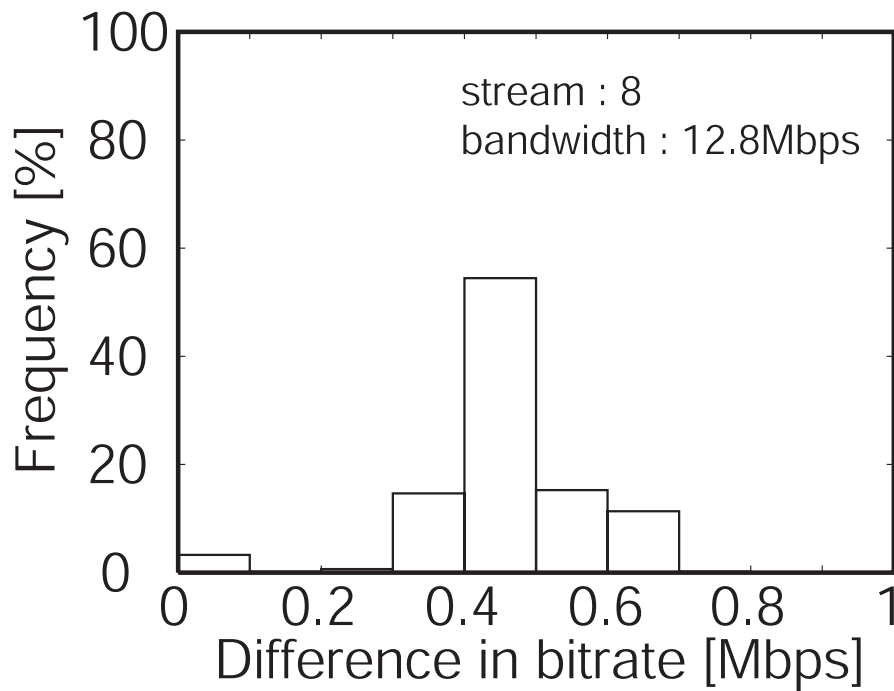


図 4.9: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 8 本)

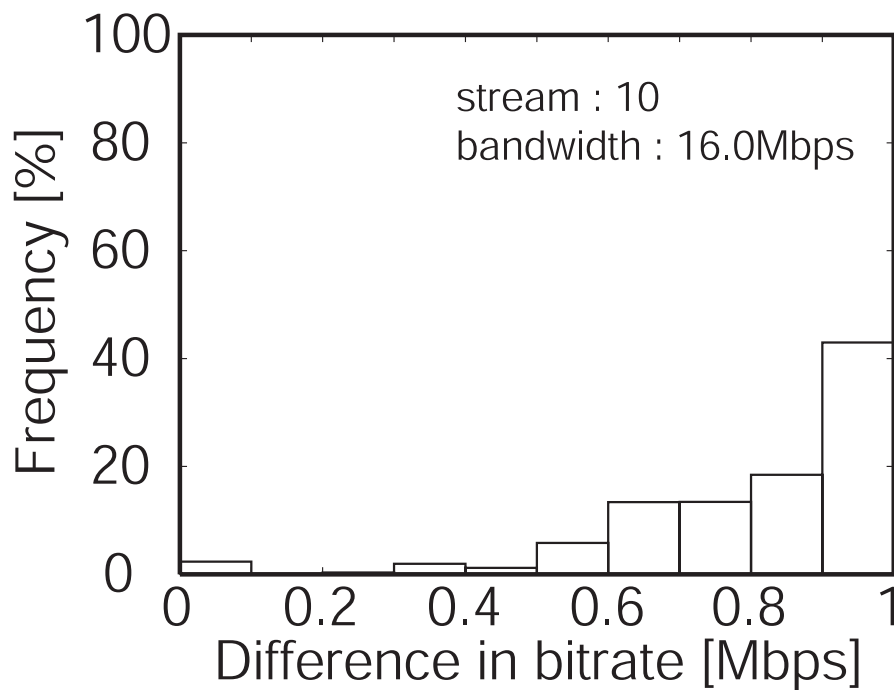


図 4.10: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 10 本)

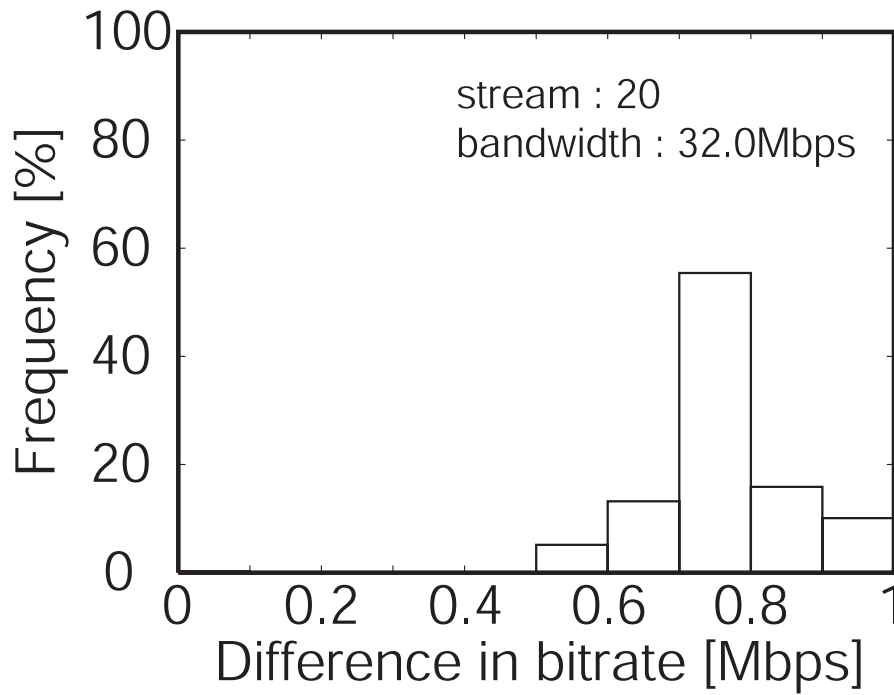


図 4.11: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 20 本)

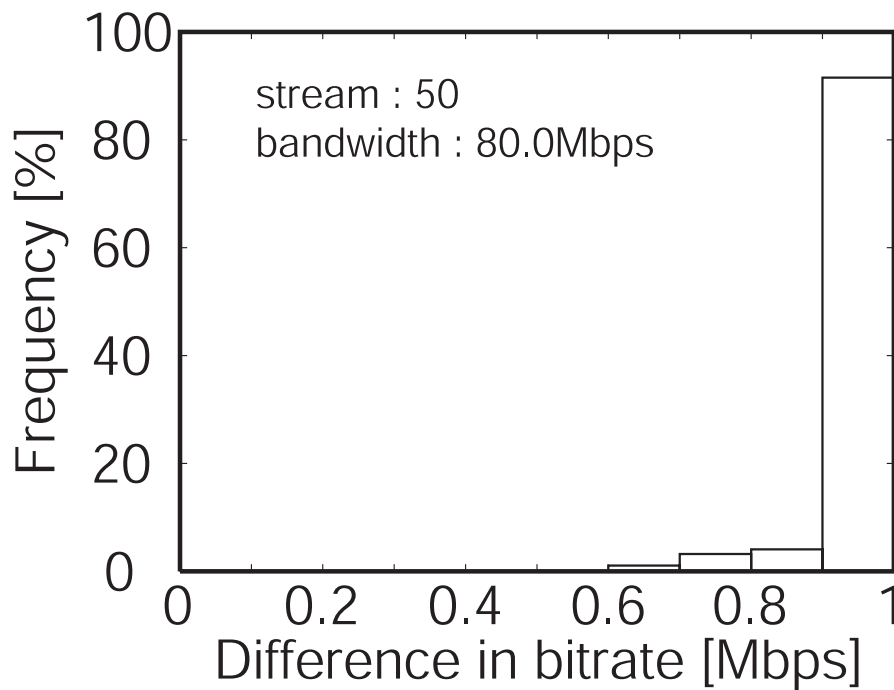


図 4.12: 最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 50 本)

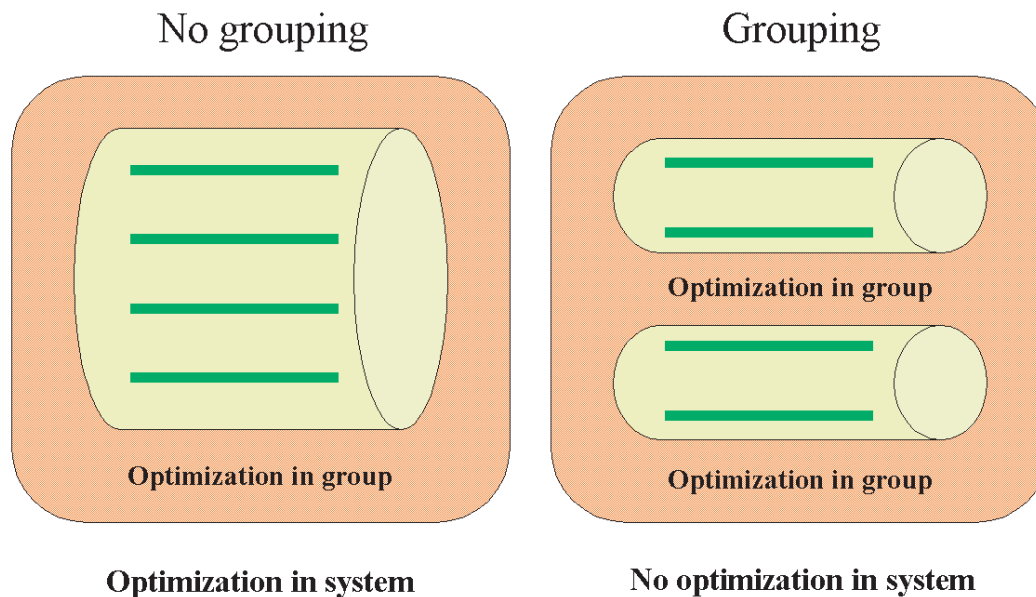


図 4.13: グルーピングの弊害

4.4 ストリームのグルーピング

4.3.2 で述べた問題に対処するには、ストリーム数が多くなりすぎる場合に、あらかじめ各ストリームをいくつかのグループに分けて、各グループごとにグループ内のストリーム量合計に比例した帯域割当てを行い、グループ内で提案方式による帯域割当てを行う。グループ数に反比例して 1 グループ内のストリーム数が少なくなり、それだけ帯域調整処理による方式劣化をおさえることができる。

一方、グループごとに帯域割当てを行うと、各グループ内における最大画質劣化は最小にできるが、システム全体での最適割当てからは外れてしまう（図 4.13）。この方式劣化はグループ数が多くなる（1 グループのストリーム数が少なくなる）ほど大きくなる。

つまり、一方でストリーム数の増大による方式劣化があり、もう一方でグループ分けによる方式劣化があり、これらはトレードオフの関係にある。したがって、伝送開始前に各ストリームをいくつかのグループに分ける場合、1 グループ内に含まれる最適なストリーム数を求めるために、このトレードオフ関係をリアルタイムに推定する方法を確立する必要がある。そこで本研究では、ストリーム数及びグループ数と方式劣化の関係に着目し、このトレードオフ関係を対象となる動画像群から直接推定する方法を提案する。これにより、対象となる動画像群のパラメータが与えられれば、その環境下における最適グループ数を知ることができるようになる。ここで、最適伝送時と比較した最大画質劣化の単位時間あたり平均増加量を方式劣化の評価基準とし、これが最小となるグルーピングを行ったときのグループ数を最適グループ数とする。

4.5 最適グループ数推定法

4.5.1 ストリーム数の増大による方式劣化

システム内のストリーム数が増大することによる最適スケジュールからの乖離が、最大画質劣化に与える影響を調べるため、以下のようなシミュレーションを行う。

- (1) ある条件下における各ストリームの伝送スケジュールを作成する。
- (2) その伝送スケジュールに沿って伝送が行われる時に、各ストリームが実際に使用する帯域を求める。
- (3) GOP の同期がとれていて最適なスケジューリングが行われる場合と実際のスケジューリングを比較して、最大画質劣化の単位時間当りの平均増加量を求める。

この作業によって、ある条件下におけるストリーム数と最大画質劣化の増加量との関係がわかる。シミュレーションに使われる条件パラメータには以下のものがある。

- ストリーム数： n
- 全ストリームの平均ビットレート： B [Mbps]
- 全ストリームの平均シーン長： S [s]
- 全ストリームの平均 GOP 長： G [ms]
- 要求帯域充足率（与えられた帯域と必要帯域の比）： R [%]

ストリーム数以外の条件パラメータについては、帯域割当決定手順及び方式劣化の原因となるビットレート調整手順をかんがみて、関係が深いと思われるものをういた。全ストリームの平均ビットレート B とは、各ストリームの蓄積状態における符号化レートの平均である。全ストリームの平均シーン長 S とは、全ストリーム中の全シーンの長さの平均である。シミュレーションにおいては、各ストリームのシーンチェンジが $0 \sim 2S$ [s] の間のランダムな時間ごとに起こるものとしている。したがって、ある動画像のシーンチェンジによるビットレート調整処理は、 $0 \sim 2S/n$ [s] の間のランダムな間隔で発生することになる。このことから、 S が小さく n が大きくなるほど調整処理の発生間隔が短くなり、方式劣化が増大することが予想される。なお、本論文では、客観的に動画像が不連続となる点（カット点）に挟まれたシーケンスを 1 シーンとして扱っている。このとき、実際の動画像の平均シーン長がどのくらいかを知るため、市販の DVD ムービー約 10 時間分を用いて測定したところ、だいたい $4 \sim 8$ s 程度の幅に収まった。また、文献 [52] において、スポーツ、ニュース及び旅行案内など約 180 時間分の映像に対して同様のデータが採取されているが、こちらも $5 \sim 9$ s 程度の幅に収まっている。全ストリームの平均 GOP 長 G とは、全ストリームの GOP 長の平均である。シミュレーションにおいては、各ストリームの GOP 長として $G/2 \sim 3G/2$ [ms] の間のランダムな値を与えている。4.3.2 で述べたように、調整処

理には最悪で全ストリーム中最大 GOP 長の 2 倍の時間がかかるので、 G が大きくなるほど調整処理に時間がかかるケースが多くなり、方式劣化が増大することが予想される。要求帯域充足率 R とは、全ストリーム量合計と共有回線の帯域の割合である。また、伝送スケジュール作成に必要なシーンごとの画質劣化特性パラメータについては、経験的に 3 ~ 6 dB/Mbps の間で変動するランダムな値を用いた。

シミュレーションでは各ストリームのシーンスケジュールとシーンごとの画質劣化特性パラメータ及び各種パラメータ (n, B, S, G, R) の情報のみからなる疑似ストリーム群を生成し、それらが伝送された場合の単位時間当りの平均方式劣化を仮想的に算出する。様々な条件下でシミュレーションを行った結果を図 4.14–4.18 に示す。図 4.14–4.18 のグラフは、それぞれ以下の条件でシミュレーションを行った結果である。

図 4.14 : $S=6, G=400, R=80$ で固定。 $B=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ のそれぞれについて、 n を 1 ~ 30 の間で変動させた場合。

図 4.15 : $S=6, G=400, R=80$ で固定。 $n=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて、 B を 1.0 ~ 4.0 の間で変動させた場合。

図 4.16 : $B=2.0, G=400, R=80$ で固定。 $n=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて、 S を 4 ~ 10 の間で変動させた場合。

図 4.17 : $B=2.0, S=6, R=80$ で固定。 $n=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて、 G を 300 ~ 600 の間で変動させた場合。

図 4.18 : $B=2.0, S=6, G=400$ で固定。 $n=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて、 R を 50 ~ 95 の間で変動させた場合。

これらの結果 (サンプル数 930) に対して重回帰分析 [53] を適用したところ、各パラメータを説明変数として、ストリーム数増大による方式劣化 D_s を推定する回帰式が得られた。このとき、 D_s に対する回帰式は

$$D_s = b_{0D_s} + b_{1D_s}n + b_{2D_s}B + b_{3D_s}S + b_{4D_s}G + b_{5D_s}R \quad (4.2)$$

となる。ここで、 b_{iD_s} ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) は重回帰分析によって得られる偏回帰係数であり、これらの値とその標準偏回帰係数を表 4.1 に示す。標準偏回帰係数の絶対値の大きさから、各説明変数は n, R, B, S, G の順で方式劣化の推定に寄与していることがわかる。このときの決定係数は 0.887, 重相関係数は 0.942 となっており、回帰式の信頼性を分散分析を用いて検定したところ、1 % 有意水準において有意であるとの結果を得た。よって、この回帰式は方式劣化 D_s の予測に十分役立つといえる。

また、説明変数間相互の相関値を調べたところ (表 4.2), いずれも 0.1 以下という低い値を示すことから各説明変数の独立性が保証され、図 4.14–4.18 から各説明変数と方式劣化との単相関関係が明らかであるので、方式劣化の推定に各説明変数が必要であるといえる。更に各偏回帰係数の有効性を検定したところ、いずれも 1 % 有意水準において有意で

あるとの結果を得たことから、各偏回帰係数の値は方式劣化推定に対して十分信頼性があるといえる。これらの検討から、式(4.2)がストリーム数増大による方式劣化の推定式として妥当あることが示された。

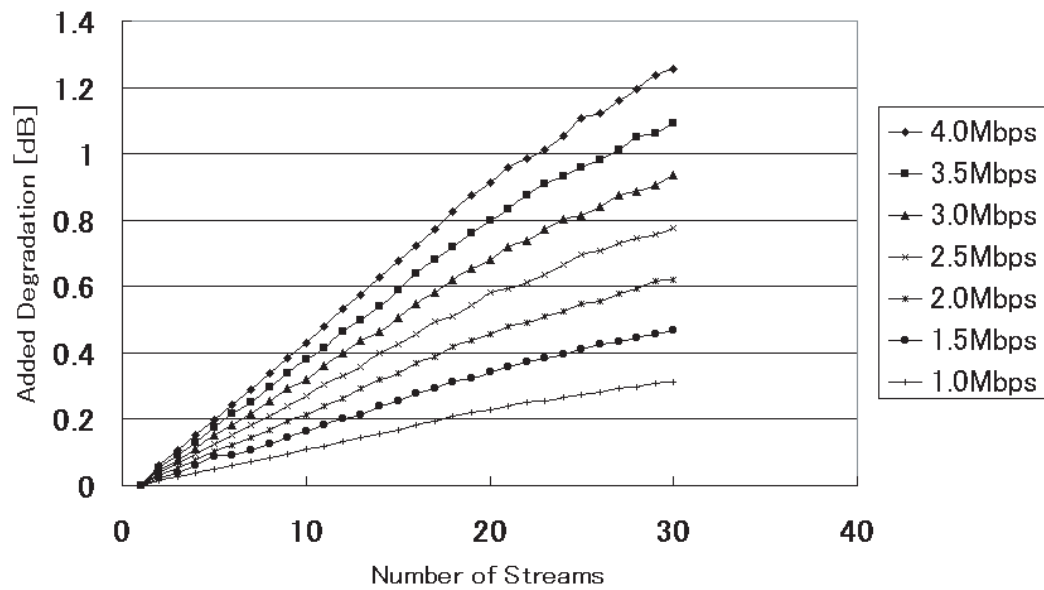


図 4.14: ストリーム数の増大による劣化 (n を変動させた場合)

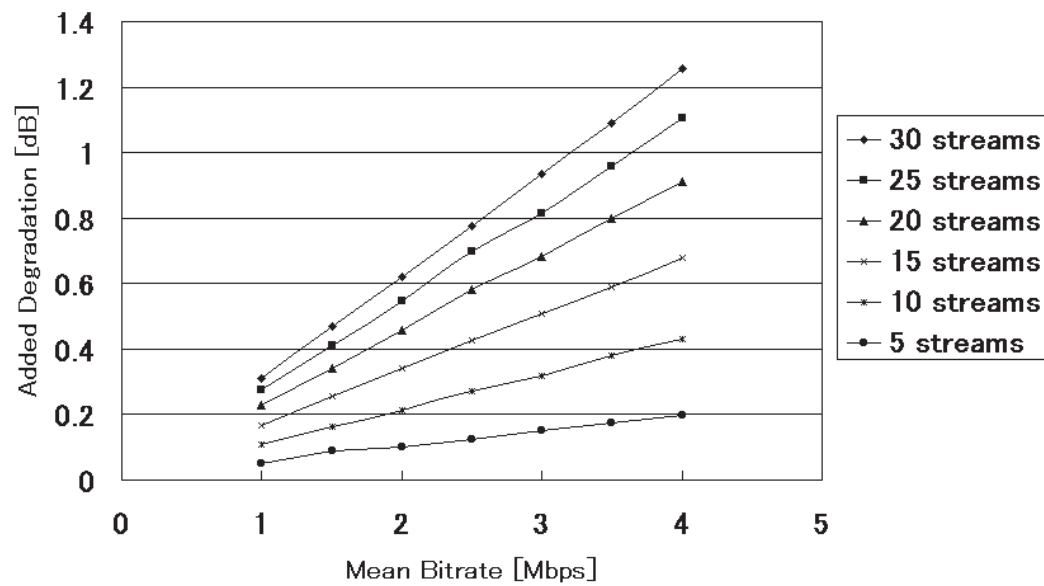
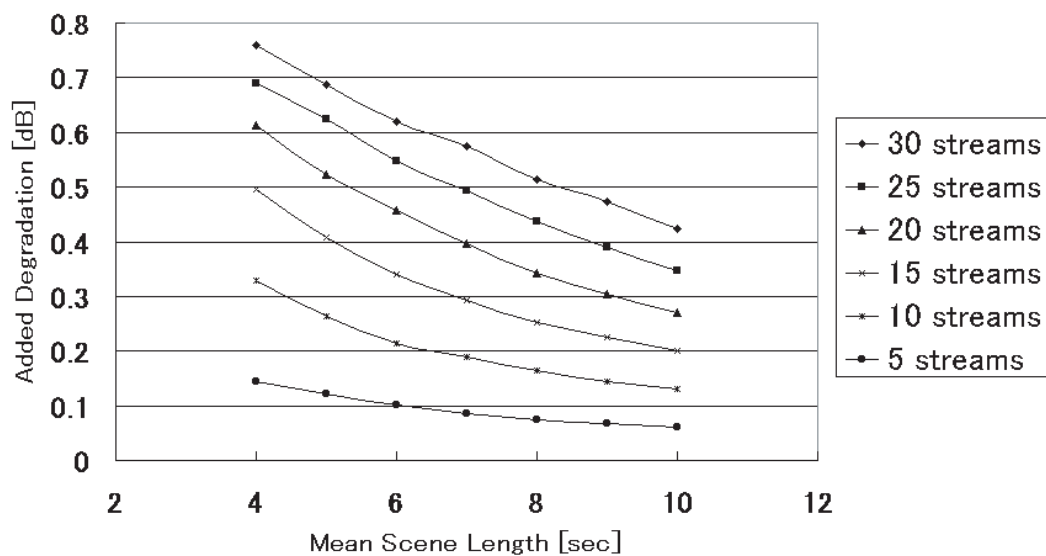
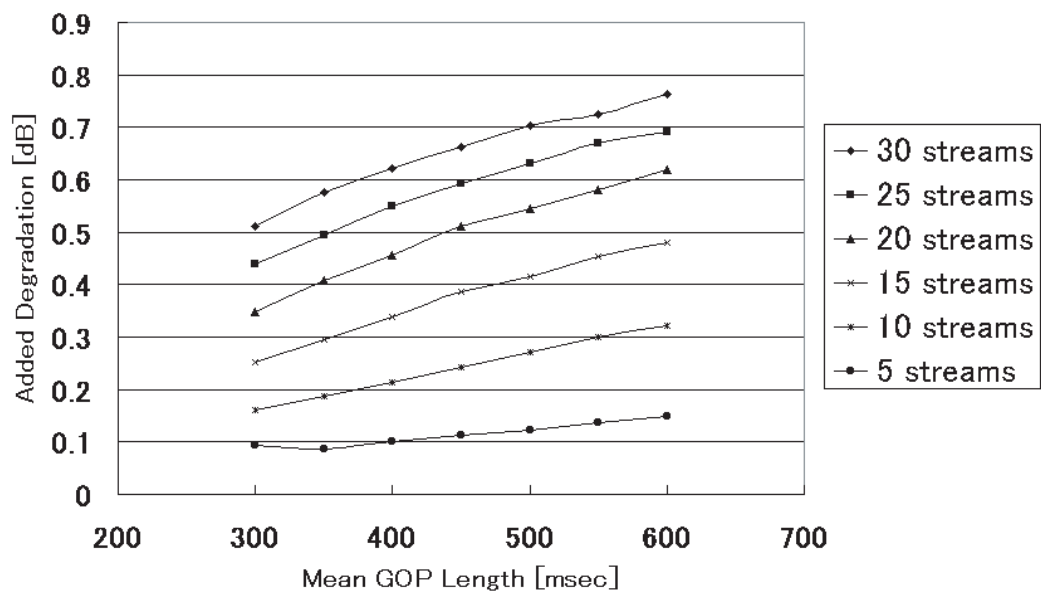
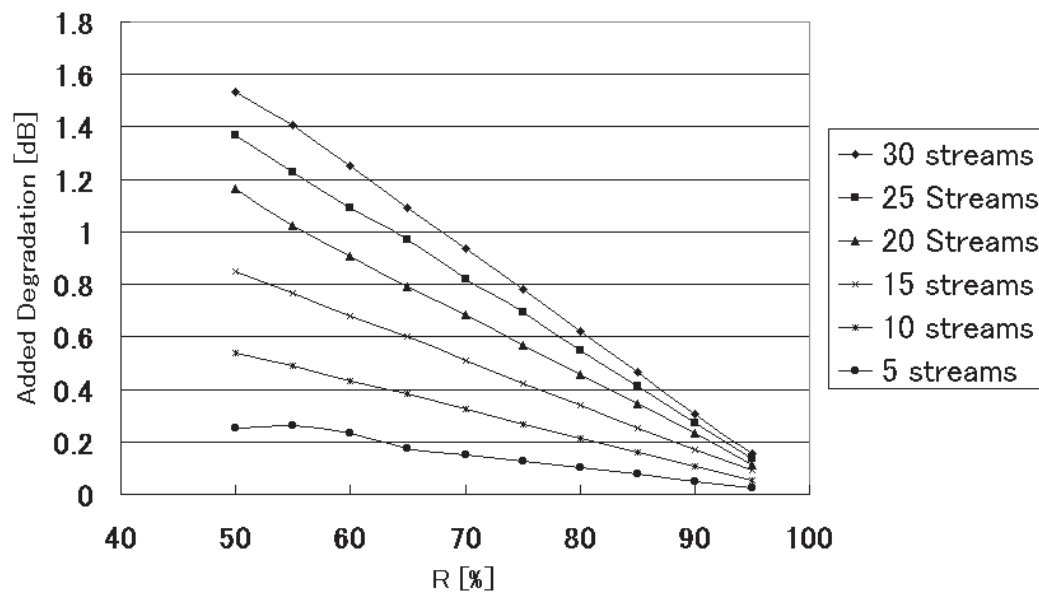


図 4.15: ストリーム数の増大による劣化 (B を変動させた場合)

図 4.16: ストリーム数の増大による劣化 (S を変動させた場合)図 4.17: ストリーム数の増大による劣化 (G を変動させた場合)

図 4.18: ストリーム数の増大による劣化 (R を変動させた場合)表 4.1: D_s の偏回帰係数と標準偏回帰係数

coefficient	partial regression coefficient	standard
b_{0D_s}	0.940	—
b_{1D_s}	0.0258	0.738
b_{2D_s}	0.168	0.288
b_{3D_s}	-0.0374	-0.129
b_{4D_s}	0.000601	0.103
b_{5D_s}	-0.0169	-0.496

表 4.2: D_s の説明変数間の相関行列

variable	n	B	S	G	R
n	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
B	0.000	1.000	-0.047	-0.047	0.059
S	0.000	-0.047	1.000	-0.047	0.059
G	0.000	-0.047	-0.047	1.000	0.059
R	0.000	0.059	0.059	0.059	1.000

4.5.2 グルーピングによる方式劣化

システム内の全ストリームをいくつかのグループに分け、それぞれのグループごとに帯域割当てを行う場合の、システム全体での最適割当てと比較した最大画質劣化の増加程度を調べるため、以下のようなシミュレーションを行う。

- (1) ある条件下において全ストリームに対して最大画質劣化が最小となるように帯域割当てを行う。
- (2) 同様の条件下で全ストリームを与えられたグループ数で分割し、各グループごとに独立して帯域割当てを行う。このときのグルーピングは、各グループ内のストリーム数ができるだけ等しくなるように行う。
- (3) それぞれの状況におけるシステム全体の最大画質劣化を比較し、その差分をグルーピングによる方式劣化として求める。

この作業によって、ある条件下におけるグループ分割数と最大画質劣化の増加との関係がわかる。シミュレーションに使われる条件パラメータには以下のものがある。

- グループ数： g
- 全ストリームの平均ビットレート： B [Mbps]
- 要求帯域充足率： R [%]
- システム内の全ストリーム数： N

パラメータはグルーピングによる方式劣化の計算に直接影響を及ぼすものを用いた。これらのパラメータのうち、平均ビットレート B と要求帯域充足率 R については、4.5.1 のものと同様である。全ストリーム数 N については、例えば全ストリームを同じ 10 グループに分割するときでも、10 本のストリームを 10 グループに分割する場合と 60 本のストリームを 10 グループに分割する場合では方式劣化の程度が異なることが予想されるため、考慮すべきパラメータであると判断した。また、帯域割当てに必要なシーンごとの画質劣化特性パラメータについては、4.5.1 と同様に 3 ~ 6 dB/Mbps の間で変動するランダムな値を用いた。

このシミュレーションでは、適当な g 、 B 、 R 及び N を与えることにより、その条件下において最大画質劣化がグルーピングによりどの程度増加するか計算できる。更に、各パラメータを変化させて同様のシミュレーションを繰り返すことで、各パラメータが方式劣化の変動に与える影響を調べることができる。

このシミュレーションにおいても 4.5.1 と同様に各種パラメータ (g 、 B 、 R 、 N) 情報のみからなる疑似ストリーム群を生成し、それらがグルーピングされた場合の仮想的な方式劣化を算出する。様々な条件下でシミュレーションを行った結果を図 4.19–4.22 に示す。図 4.19–4.22 のグラフは、それぞれ以下の条件でシミュレーションを行った結果である。

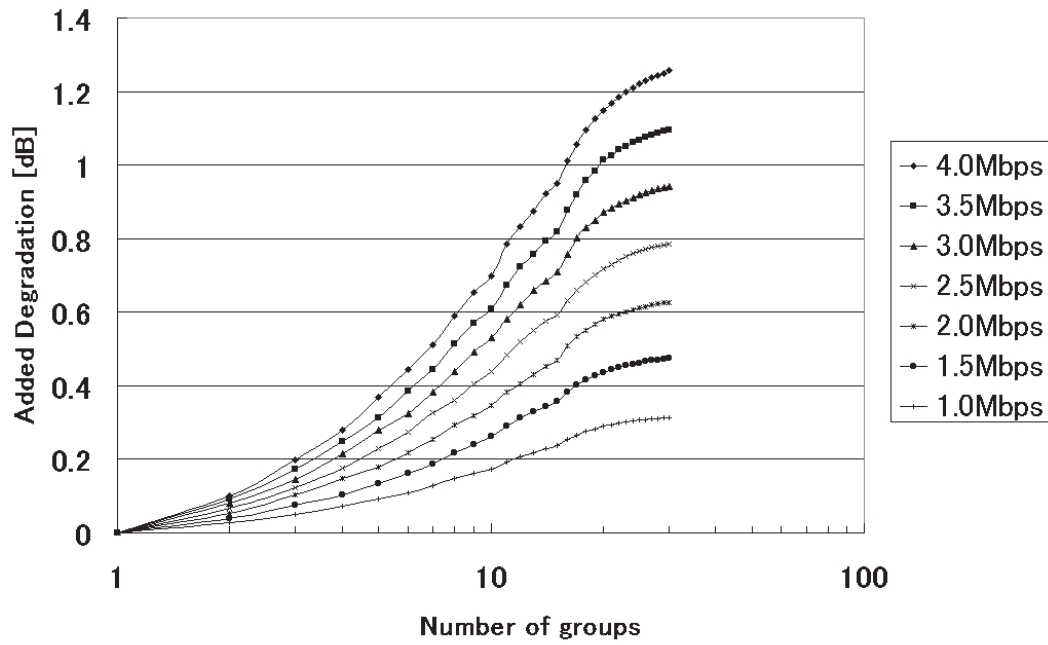


図 4.19: グルーピングによる劣化増加 (g を変動させた場合)

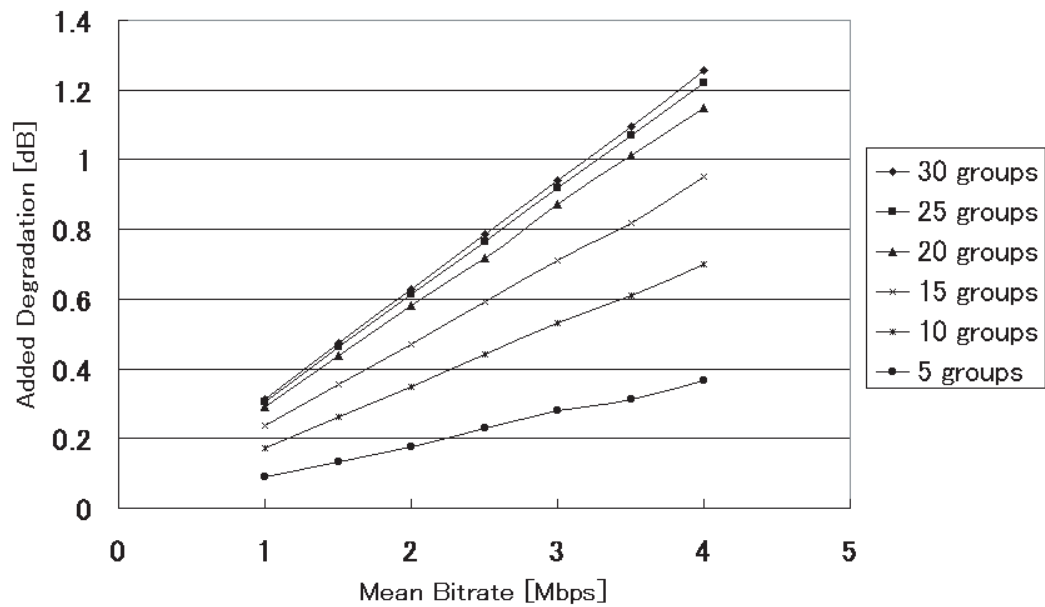


図 4.20: グルーピングによる劣化増加 (B を変動させた場合)

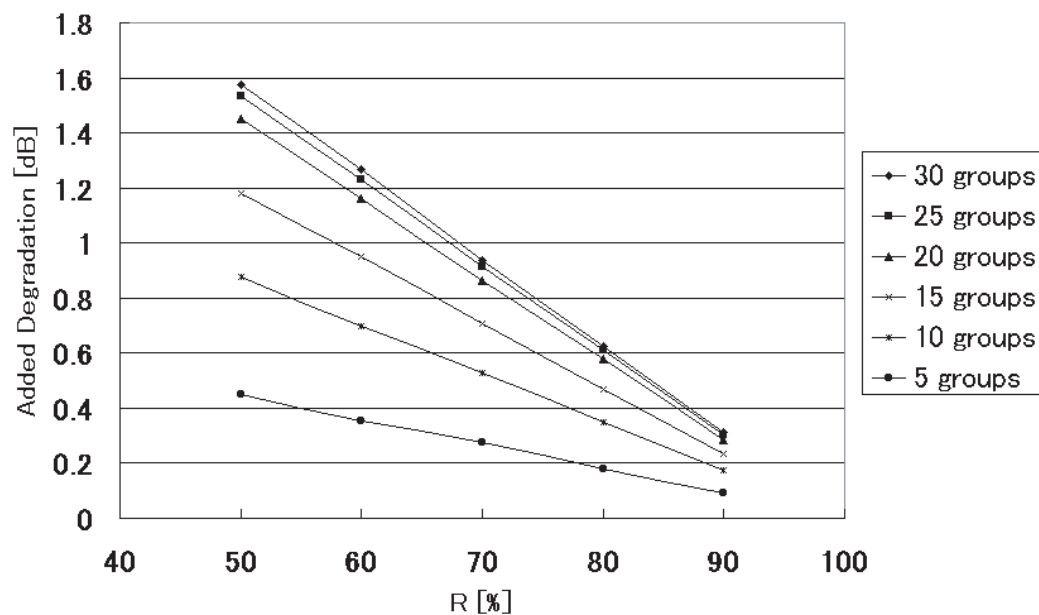


図 4.21: グルーピングによる劣化増加 (R を変動させた場合)

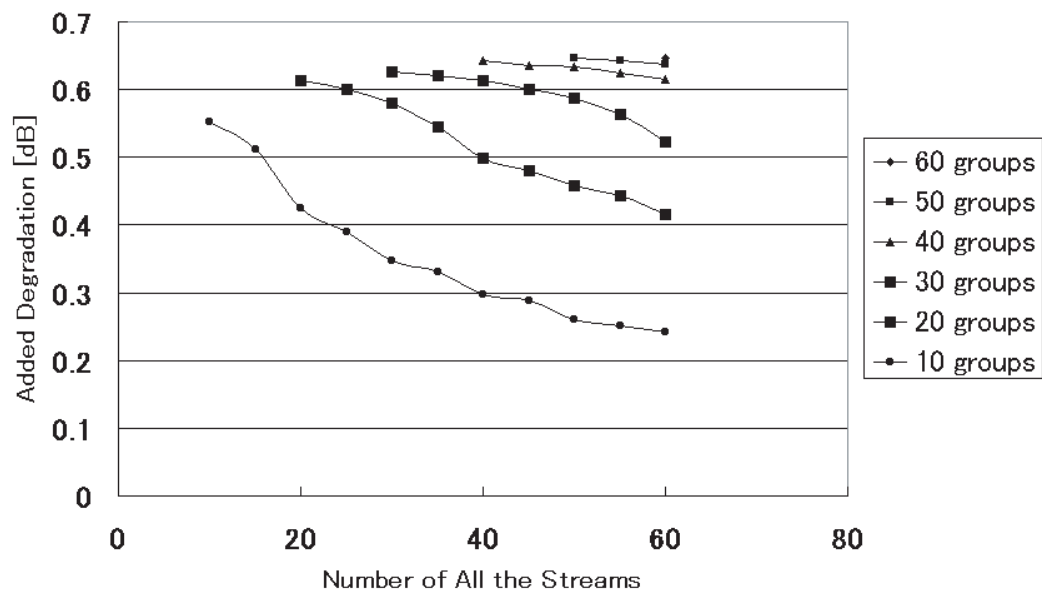


図 4.22: グルーピングによる劣化増加 (N を変動させた場合)

表 4.3: D_g の偏回帰係数と標準偏回帰係数

coefficient	partial regression coefficient	standard
b_{0D_g}	1.241	—
b_{1D_g}	0.256	0.752
b_{2D_g}	0.212	0.393
b_{3D_g}	-0.0215	-0.517
b_{4D_g}	-0.00498	-0.193

表 4.4: D_g の説明変数間の相関行列

variable	$\ln g$	B	R	N
$\ln g$	1.000	-0.0318	0.0349	0.355
B	-0.0318	1.000	0.0651	-0.123
R	0.0349	0.0651	1.000	0.135
N	0.355	-0.123	0.135	1.000

図 4.19 : $R=80$, $N=30$ で固定. $B=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ のそれぞれについて, g を 1 ~ 30 の間で変動させた場合.

図 4.20 : $R=80$, $N=30$ で固定. $g=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて, B を 1.0 ~ 4.0 の間で変動させた場合.

図 4.21 : $B=2.0$, $N=30$ で固定. $g=5, 10, 15, 20, 25, 30$ のそれぞれについて, R を 50 ~ 90 の間で変動させた場合.

図 4.22 : $B=2.0$, $R=80$ で固定. $g=10, 20, 30, 40, 50, 60$ のそれぞれについて, N を 10 ~ 60 の間で変動させた場合.

これらの結果 (サンプル数 750) に対して重回帰分析を適用したところ, 各パラメータを説明変数として, グルーピングによる方式劣化 D_g を推定する回帰式が得られた. このとき, D_g に対する回帰式は

$$D_g = b_{0D_g} + b_{1D_g} \ln g + b_{2D_g} B + b_{3D_g} R + b_{4D_g} N \quad (4.3)$$

となる. ここで, g の対数をとるのは, g が D_g に対して非線形の関係にあり, 対数をとることにより $\ln g$ と D_g の間で高い相関が得られたためである. b_{iD_g} ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) は重回帰分析によって得られる偏回帰係数であり, これらの値とその標準偏回帰係数を表 4.3 に示す. 標準偏回帰係数の絶対値の大きさから, 各説明変数は $\ln g$, R , B , N の順で方式劣

化の推定に寄与していることがわかる．このときの決定係数は0.895，重相関係数は0.946となっており，回帰式の信頼性を分散分析を用いて検定したところ，1%有意水準において有意であるとの結果を得た．よって，この回帰式は方式劣化 D_g の予測に十分役立つといえる．

また，説明変数間相互の相関値を調べたところ（表4.4），いずれも0.4以下という低い値を示すことから各説明変数の独立性が保証され，図4.19–4.22から各説明変数と方式劣化との単相関関係が明らかであるので，方式劣化の推定に各説明変数が必要であるといえる．更に各偏回帰係数の有効性を検定したところ，いずれも1%有意水準において有意であるとの結果を得たことから，各偏回帰係数の値は方式劣化推定に対して十分信頼性があるといえる．これらの検討から，式（4.3）がグルーピングによる方式劣化の推定式として妥当あることが示された．

4.5.3 最適グループ数の推定

4.5.1，4.5.2で示した手法により，ある条件下における最適グループ数は以下のように推定できる．

ある条件が与えられたとき，式（4.2）及び式（4.3）のパラメータのうち，全ストリームの平均ビットレート B ，全ストリームの平均シーン長 S ，全ストリームの平均 GOP 長 G ，要求帯域充足率 R 及びシステム内の全ストリーム数 N が決定する．これらの値を代入することにより，両式中の対応する項は全て定数となり，式（4.2）及び式（4.3）はそれぞれ以下のようなストリーム数 n 及びグループ数 g の関数として表記できる．

$$D_s(n) = b_{1D_s} n + \text{const1} \quad (4.4)$$

$$D_g(g) = b_{1D_g} \ln g + \text{const2} \quad (4.5)$$

const1 及び const2 はそれぞれ条件パラメータの代入によって発生した式（4.2）及び式（4.3）中の定数項をまとめたものであり，その値の妥当性は式（4.2）及び式（4.3）中の各偏回帰係数の信頼性が示されていることから保証される．

ここで，全ストリームをあるグループ数 g_α で分割した場合の最大画質劣化増加について考える．まず，グルーピングを行ったことにより，全体における最大画質劣化が $D_g(g_\alpha)$ [dB] 増加する．次に，各グループ内に存在するストリーム数の最大値は $\lceil N/g_\alpha \rceil$ なので，複数のストリームをまとめて扱うことにより，全体における最大画質劣化が更に $D_s(\lceil N/g_\alpha \rceil)$ [dB] 増加することになる．したがって，最大画質劣化の増加をできるだけおさえる最適なグループ数を決定するには，

$$1 \leq g \leq N \quad (4.6)$$

という制約条件のもとで，

$$D_{g+s} = D_g(g) + D_s\left(\left\lceil \frac{N}{g} \right\rceil\right) \rightarrow \min \quad (4.7)$$

を満たす g を求めてやればよい．その際には，式（4.7）に $g = 1, 2, \dots, N$ をそれぞれ代入して，結果の大小を比較する．

このようにして決定したグループ数で、システム上のストリーム群を伝送開始前にグルーピングしてやることにより、提案方式の実装に伴う方式劣化を可能な限りおさえることができる。

4.5.4 最適グループ数推定法の適用例及び評価

最適グループ数の推定精度を評価するため、一定の条件下における最適グループ数について、シミュレーションによる実測値と近似手法を適用した場合の推定結果を比較する。各条件パラメータは以下のように設定した。本実験に用いたデータは方式劣化の近似式の導出に用いられたサンプル群を含んでいない。

(a) $B = 1.8 \text{ Mbps}$, $S = 5 \text{ s}$, $G = 370 \text{ ms}$, $R = 85 \%$, $N = 20$

(b) $B = 3.5 \text{ Mbps}$, $S = 9 \text{ s}$, $G = 550 \text{ ms}$, $R = 65 \%$, $N = 50$

シミュレーションによって得られたグループ数と方式劣化の関係を図 4.23 に示す。(a) の場合、方式劣化の近似手法を用いて推定した最適グループ数は2であった。シミュレーション結果から得られる最適グループ数は3であるが、このときの誤差は0.02 dB と無視できる大きさである。一方、(b) の場合、方式劣化の近似手法を用いて推定した最適グループ数は5であり、シミュレーション結果から得られる最適グループ数と一致した。このことから、提案手法によって最適グループ数を実用的な精度で推定可能であるといえる。

また、図 4.23 におけるグループ数1のときの方式劣化が、グルーピングによる GOP 非同期問題への対処を行わない場合に対応していることから、この例では推定したグループ数でグルーピングを行うことにより劣化が改善されることがわかる。条件によっては最適グループ数の推定結果が1となる可能性もあるが、この場合は特にグルーピングを行う必要がないことを示す。以上のことから、提案方式によるストリームのグルーピング手法が GOP 非同期問題の改善に効果があることは明らかである。

4.6 本章のまとめ

本章では、第3章で提案した方式を実システムとして運用する際の問題点とその対処法について述べた。まず、動画像のシーンチェンジによる画質劣化特性の変化に対応するため、あらかじめ蓄えられている各ストリームのシーンスケジュールを用いて全体の伝送スケジュールを作成するよう提案方式を拡張した。次に、伝送スケジュール方式がシステムの動作に与える影響について考察し、システム内のストリーム数の増大により方式劣化が発生することを指摘した。この問題に対処するため、ストリーム群を適当なグループ数で分割し、各グループごとに独立した伝送を行わせることとし、あらかじめ入手可能な情報から最適グループ数を推定する方法を確立した。更に、計算機シミュレーションによって、提案した最適グループ数推定法が実用的な精度を有していることを明らかにした。

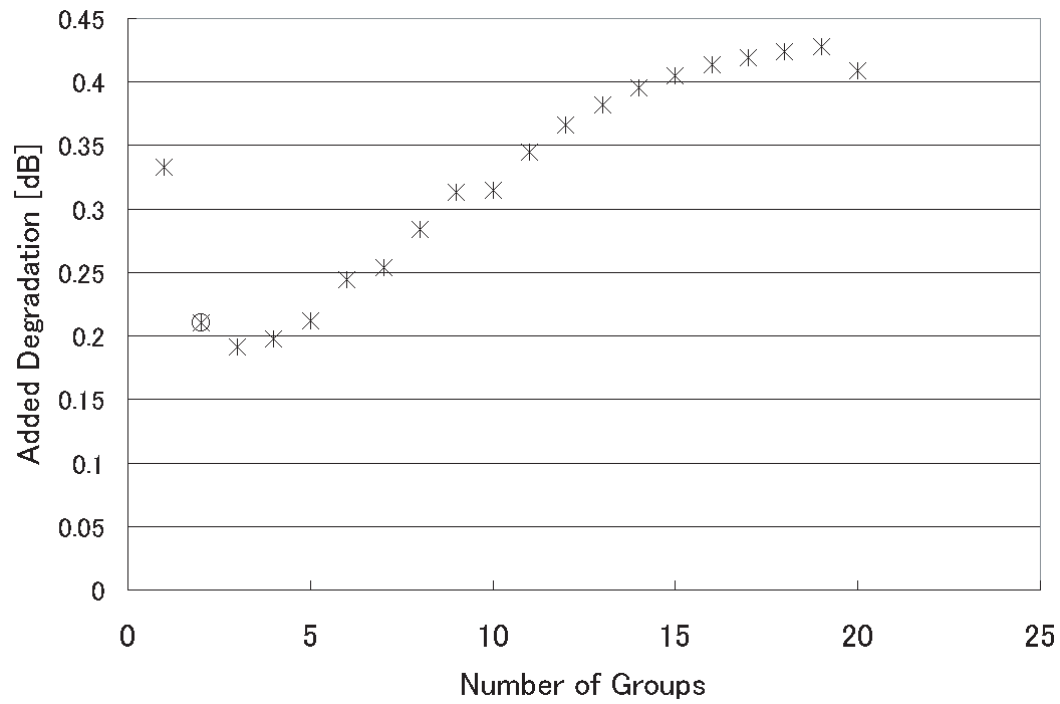
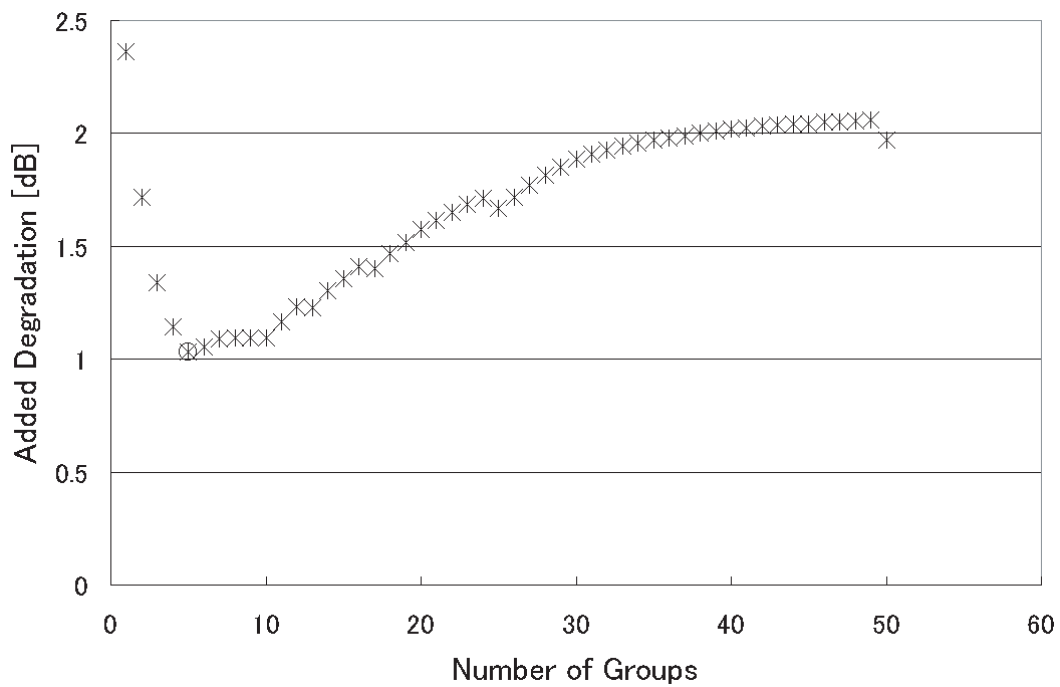
(a) $B=1.8$, $S=5$, $G=370$, $R=85$, $N=20$ (b) $B=3.5$, $S=9$, $G=550$, $R=65$, $N=50$

図 4.23: グループ数と劣化

第 5 章

実ネットワークへの実装

5.1 まえがき

本章では、第 3 章で提案し第 4 章で拡張した方式を実際のネットワーク上へ実装し、そのプロセス構成を述べるとともに伝送実験を行った結果を示す。

5.2 システム内の機能構成

システム内で稼働する各プロセスと、プロセス間のデータの流れを図 5.1 に示す。本システムの動作を保証するために必要な機能と動作の特徴は、以下のようにまとめられる。

- (1) サーバ・ルータ間における各種データの送受信のために、それぞれがインタフェースとなるプロセスをもっており、サーバ側で動画像伝送の要求が発生すると、これらのインタフェースプロセスによってデータ送受信用のソケットが作成される。
- (2) 各サーバから送られてきたパラメータをもとに行われる帯域割当スケジュールの作成や、ストリーム群のグルーピング作業は、ルータ上のスケジューラプロセスが行う。このプロセスは各ストリームの伝送開始前に送信される各種パラメータ情報を保持しており、新たなサーバから伝送要求が発生したり、伝送中の動画像ストリームが途中でキャンセルされた場合には、このプロセスによって帯域割当スケジュールの再作成が行われる。この際、ストリームのグルーピングや伝送スケジュール再計算にかかる時間分の余裕をもたせる必要があるため、新たな伝送スケジュールの再作成が発生した場合、その数秒後に適用開始時刻を設定して伝送スケジュールを計算する。
- (3) 伝送スケジュールに示された使用可能帯域が時間とともに変動するので、サーバ上での MPEG データのスケーリング処理は実時間で行われる。
- (4) 本システムでは、共有回線上を流れるデータストリームの総ビットレートが共有回線の帯域容量を超えないように、各データストリームに対する帯域割当てを決定している。したがって、各サーバはスケジュールに沿った安定的な帯域使用量を実現し、かつサーバ間における時間的な同期をとる必要がある。このため各サーバは、常にルータ上のタイマープロセスから通知される時刻を確認しながら動画像伝送を行う。

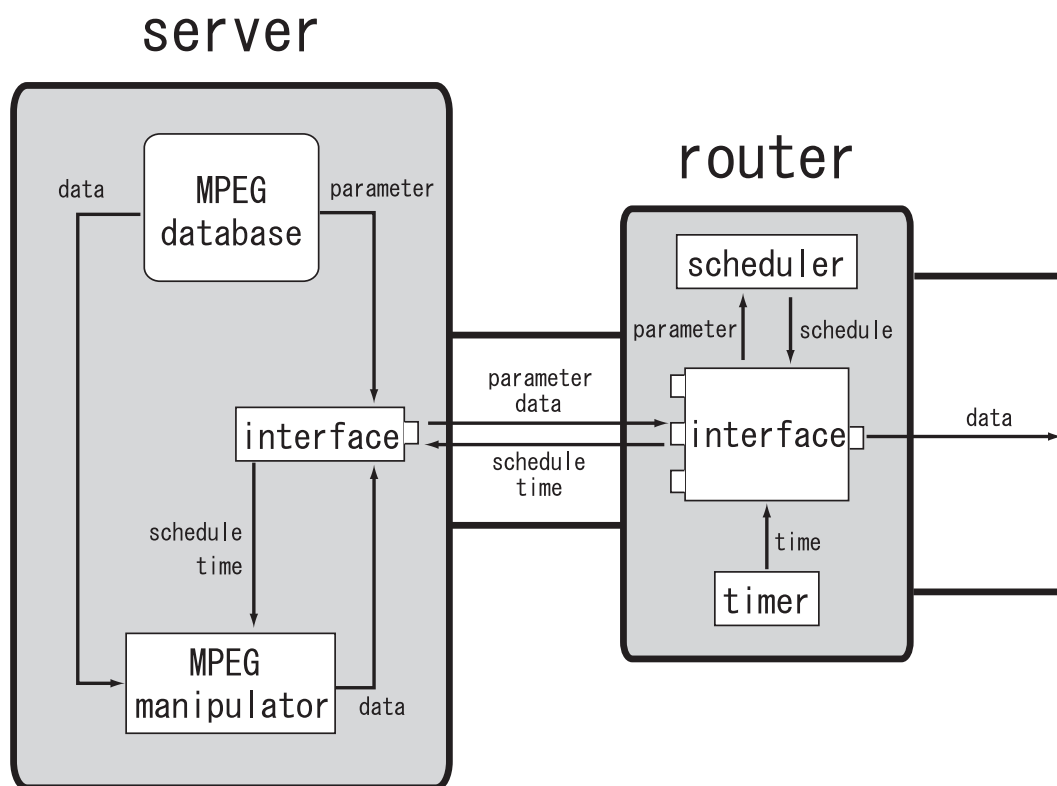


図 5.1: システム内のプロセス構成

同時に、一定時間当りに送信ソケットに書き込まれる MPEG データ量を監視し、適当に割込み処理をかけることで書き込み量を調節し、ビットレート変動の安定化を図る。

5.3 試作システムと伝送実験

今回試作したシステムでは、サーバ、ルータ及びクライアントといった各ネットワークノードに、UNIX 搭載の市販 PC を利用した。また、所要機能はソフトウェア処理によって実現しており、各機能を担当するプロセスが相互に連携しながら全体として動作する。動画伝送に伴う種々のデータ通信は、各ノード上に生成されたプロセス間で行われる。なお、本システムではスケーリング方式として再量子化のみを用いている。

実験環境は以下のとおりである（図 5.2）。

- マシン台数：サーバ・クライアント用に各 3 台，ルータ用に 1 台。
- CPU：Pentium 500～850 MHz。
- OS：FreeBSD 4.2。

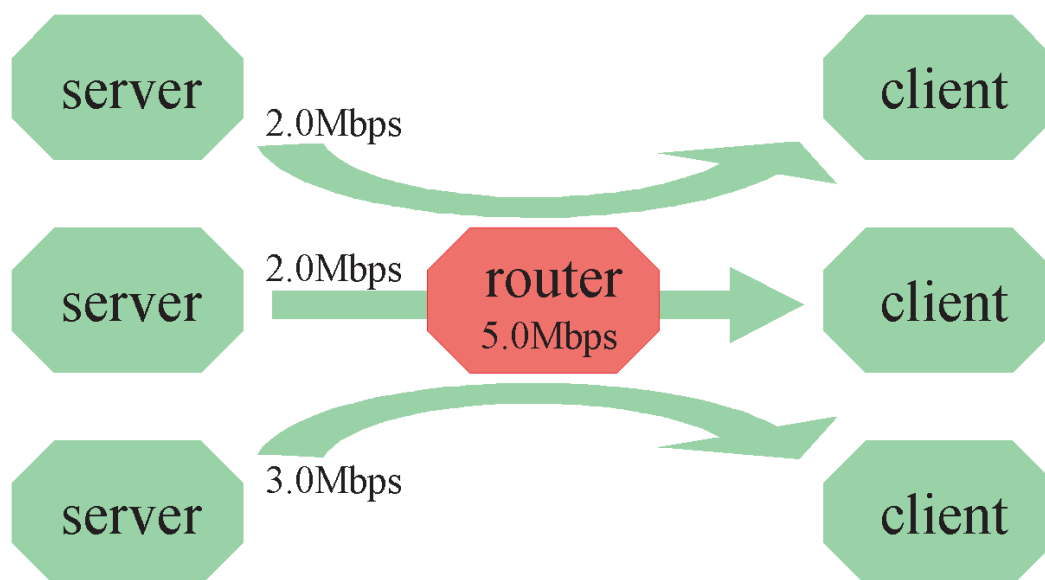


図 5.2: 実験環境

- 伝送する MPEG ビデオ：2.0 Mbps のもの 2 本及び 3.0 Mbps のもの 1 本．いずれもサイズは 352×240 ，フレームレート 30 frames/s．
- 共有回線の帯域容量：5.0 Mbps．

伝送実験中の各ストリームの使用帯域及びその合計帯域の変動を図 5.3 に示す．この実験では stream1,2 のみで伝送を開始し，開始 10 秒後に stream3 を参入させ，開始 30 秒後に stream2 の伝送を中止した．また，伝送スケジュール再作成のための時間的余裕は 3 秒に設定した．

この実験中に伝送スケジュール作成は伝送開始前，開始 10 秒後及び開始 30 秒後の 3 回行われたが，最適グループ数はいずれも 1 であった．図 5.3 から，各サーバが与えられた伝送スケジュールに沿って，送出ビットレートの調整を行いながらストリームを伝送している様子がわかる．また，再計算された伝送スケジュールの適用は，設定通りストリーム数増減の 3 秒後から行われており，各ストリームの合計帯域の変動を見ると，常に帯域制限 5.0 Mbps を超えない範囲で共有回線を効率良く使っていることがわかる．このことから，本試作システムは提案方式の機能を実現しているといえる．

また，この実験システムではストリームのグルーピング計算に 10~20 ms，10 本前後のストリームの伝送スケジュール計算に 500~1000 ms 程度の時間がかかった．グルーピング計算にかかる時間はストリーム数によらず無視できる程度なので，提案方式を実システムの処理時間内で動作させることの妨げにはならない．伝送スケジュール再計算にかかる時間は，システム内のストリーム数増大に伴い長くなるが，経験上 1 グループ内のストリーム数は 10 本以内に収まることが多いため，各グループの伝送スケジュール計算を複数のプロセッサに分担・並行して行うことで対処できる．1 グループ内のストリーム数があまり

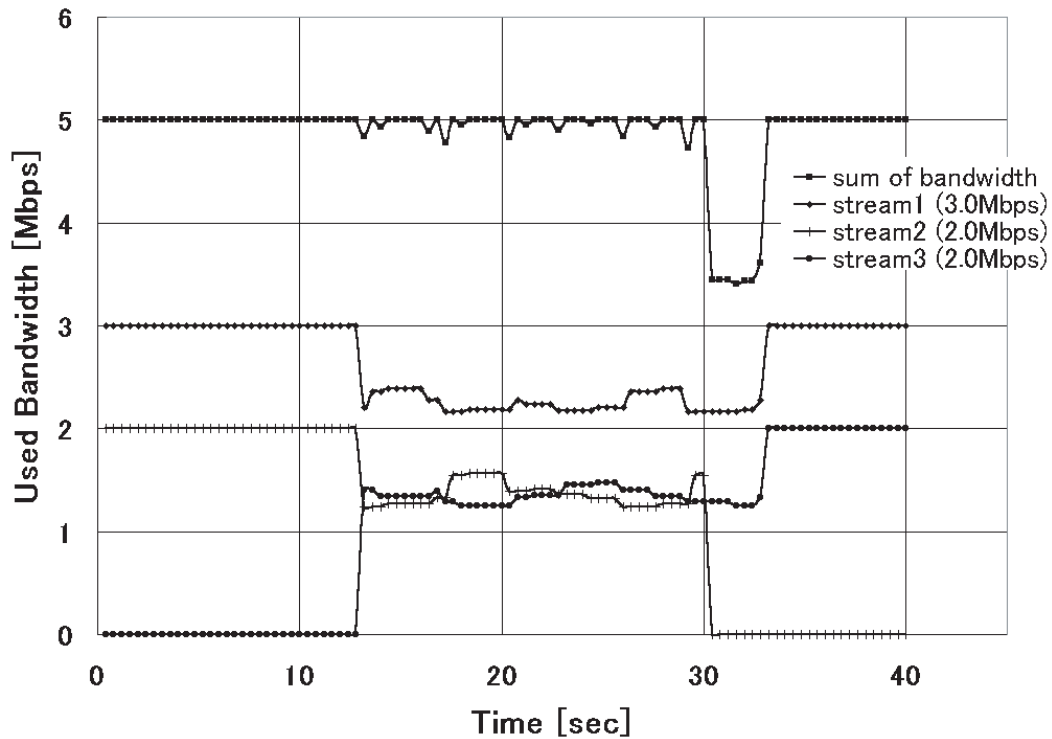


図 5.3: 実装システムによる実験結果

多くならないのは、ストリーム数増大による方式劣化が線形増加するのに対し、グループ数増大による方式劣化は対数増加するためと考えられる。以上のことから、本システムの処理動作は十分使用に耐えるものであるといえる。

5.4 本章のまとめ

本章では、第3章で提案し第4章で拡張を加えた動的帯域割当方式を、実システムとして実装する際の機能構成について示し、試作システムを用いた伝送実験により提案方式が有効に機能することを示した。

第 6 章

広域ネットワーク上でのリアルタイムストリーミングにおける分散型帯域制御方式

6.1 まえがき

本章では、全システムの情報を一元管理することが困難な大規模ネットワーク上で、多数の MPEG 動画像のリアルタイムストリーミングを行う場合に、ネットワーク上のルータの自律分散型帯域制御によって各ストリームの再生品質を均一化する方式を提案する。まず、提案方式が対象とするシステムモデルの動作概要について述べる。次に、提案方式を実現するために必要なサーバとルータの機能について論じ、それぞれの詳細な動作アルゴリズムについて述べる。また、計算機シミュレーションによって提案方式の性能評価を行う。なお、この方式においては、サーバ上での符号化時点における PSNR を動画像の再生品質の評価基準とする。

6.2 システムモデル

本方式が対象とする動画像伝送システムのモデルを図 6.1 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 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

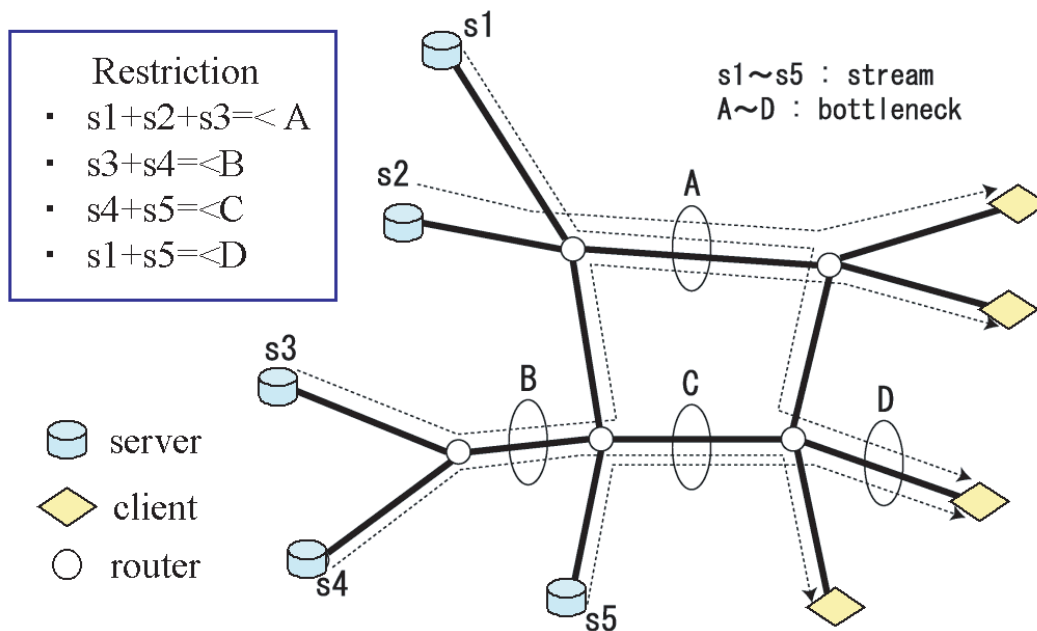


図 6.1: システムモデル

一定の閾値を越えた場合、その回線を共有するストリームの送出サーバの内、最も PSNR の高いものから送出レートを削減させる。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。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。

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。

- ネットワーク内のルータによる自律分散制御
- 動画像ストリーム間の再生品質の公平化
- 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

6.3 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在し、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。

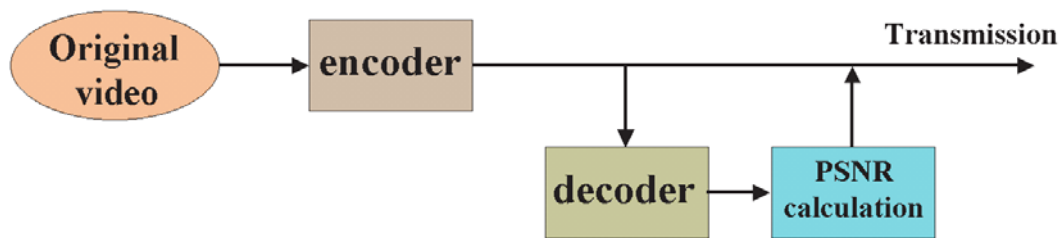


図 6.2: PSNR 情報の付加

6.3.1 サーバの伝送アルゴリズム

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（図 6.2）。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 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。また、パケットに付加される PSNR 情報のデータ量は無視できるほど小さいため、オーバーヘッドについて考慮する必要はない。なお、動画ストリームはサーバから CBR 符号化モードで送出されるものとする。

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。アルゴリズムの詳細を述べる前に、各種パラメータを以下のように定義する。

- 符号化中の GOP の符号化レート： R [bps]
- 送出レート上昇量： U [bps]
- 送出レート減少量： D [bps]
- レート削減フラグ変数： F
- 帯域チェック周期： S [ms]
- 輻輳検出閾値： T_h [bps]
- 帯域余剰量： B_r [bps]

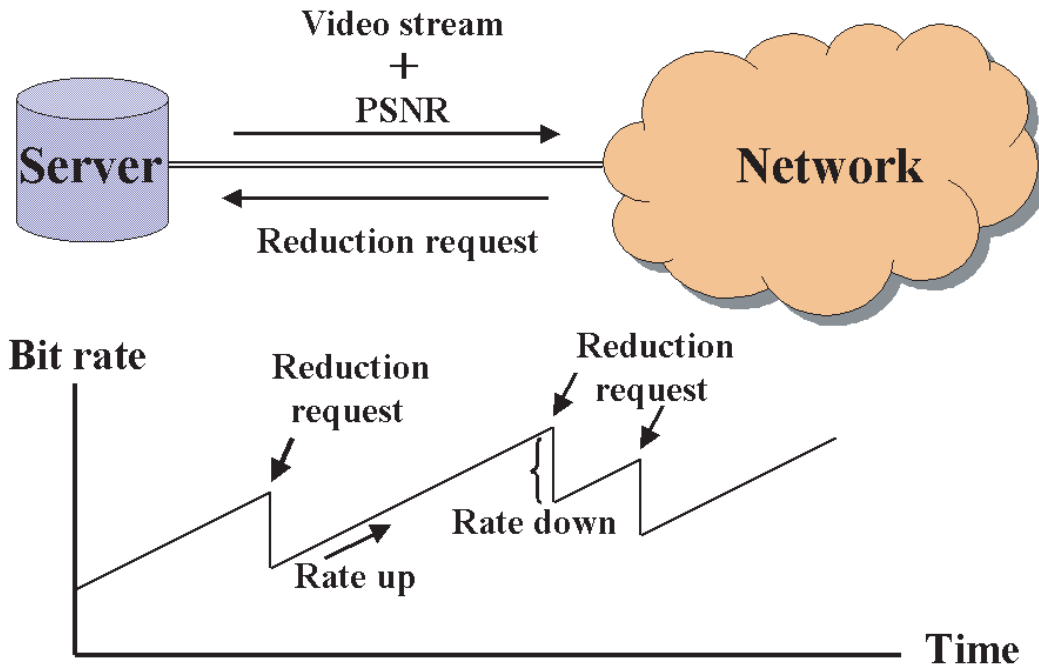


図 6.3: サーバの動作

- ストリーム数： n

なお、 U 、 D 及び T_h はあらかじめ決定されている定数とし、 F の初期値は 0 とする。

サーバは、以下の手順で動画像伝送を行う（図 6.3）。

[step 1] サーバは符号化対象の GOP をレート R で符号化しながら、伝送経路上のルータより送られる送出レート削減要求メッセージを受け付ける。ルータからメッセージを受けた場合、

$$F \leftarrow 1 \quad (6.1)$$

とする。対象 GOP の符号化が終了したら step 2 に進む。

[step 2]

$$R \leftarrow \begin{cases} R - D & (F = 1 \text{ のとき}) \\ R + U & (F = 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (6.2)$$

$$F \leftarrow 0 \quad (6.3)$$

とし、次の GOP の符号化を開始して step 1 に戻る。

この手順の元では、ルータからの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 につき一度だけである。

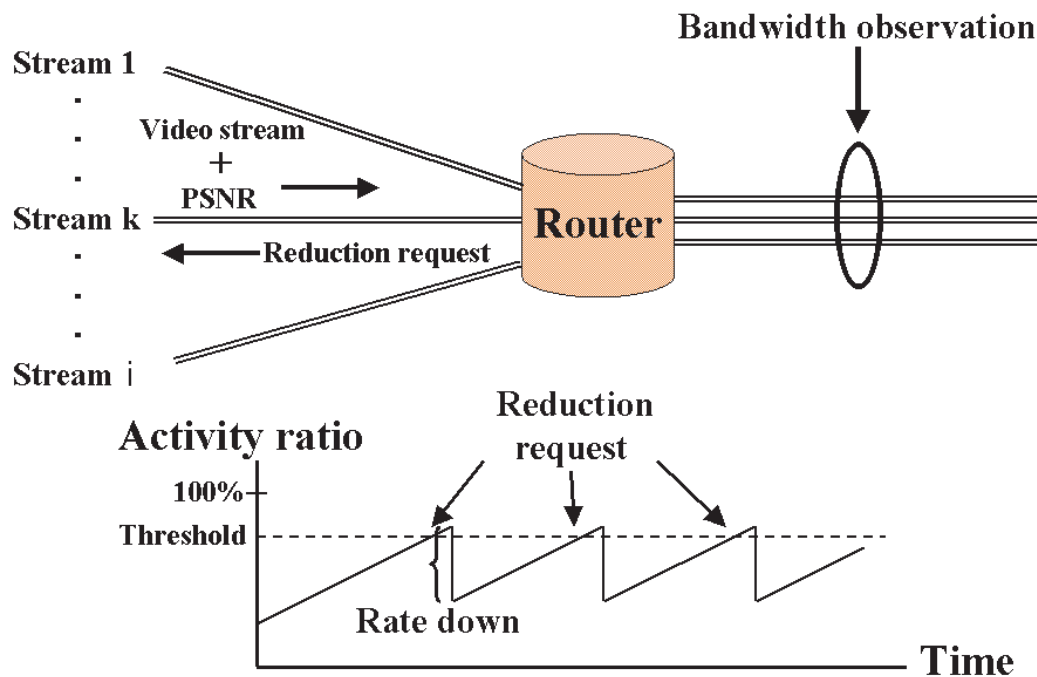


図 6.4: ルータの動作

6.3.2 ルータの帯域制御アルゴリズム

帯域使用量監視と動画像ストリームの把握

ルータは、接続された各出力回線に対し、動画像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像ストリームの伝送元サーバアドレスとその時々 PSNR 情報が保持されており、各ストリームのエントリは伝送開始・終了に伴い追加・削除される。また、ルータは動画像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。

送出レート削減要求

ルータは回線が輻輳状態にあるかどうかのチェックを S [ms] 周期で行い、輻輳が検出されると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 値が高い順に N 本のストリームを選出し、それら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。 i 本のストリームが共有する回線に対するルータの輻輳制御手順を以下に示す (図 6.4)。

[step 1] ルータは監視対象回線の余剰帯域量 B_r を S [ms] 周期でチェックし,

$$T_h > B_r > 0 \quad (6.4)$$

なら step 2 へ,

$$0 \geq B_r \quad (6.5)$$

なら step 3 へ進む.

[step 2]

$$ND > (i - N)U \quad (6.6)$$

を満たす最小の N を求め, その時点でストリームテーブルに保持されている PSNR 値が高い順に N 本のストリームの送出元サーバに対して, 送出レート削減要求メッセージを送り, step 1 に戻る.

[step 3] i 本全てのストリームの送出元サーバに対して, 送出レート削減要求メッセージを送り,

$$B'_r \leftarrow B_r \quad (6.7)$$

とし, step 4 に進む.

[step 4] S [ms] 経過後再び余剰帯域量 B_r のチェックを行い,

$$B_r > T_h \quad (6.8)$$

なら step 1 へ,

$$T_h > B_r > 0 \quad (6.9)$$

なら step 2 へ,

$$0 > B_r > B'_r \quad (6.10)$$

なら step 3 へ,

$$B'_r \geq B_r \quad (6.11)$$

なら

$$S \leftarrow \frac{S}{2} \quad (6.12)$$

とし, step 3 へ戻る.

step 2 において, 送出レート削減対象ストリーム数 N を設定された U 及び D のもとで式 (6.6) を満たす最小値としているのは, 同時に送出レートを下げるストリーム数が少ないほど全ストリームの再生品質が同程度に収束し易く, かつ一時的な回線の空き容量も小さくて済むためである. また step 4 において, 全ストリームに帯域削減要求を出したにも関わらず帯域使用量が増大している場合, 回線の輻輳チェック周期が各ストリームの GOP 長に比べて長いと, 各ストリームの GOP ごとの送出レート上昇に帯域削減制御が追いついていないことを示しているため, 輻輳チェック周期を半減して対処している.

6.3.3 システムの動作とパラメータの関係

回線の輻輳チェック周期 S が長い場合、チェックの合間に各ストリームの送出レートが上がり過ぎてしまうので、ネットワーク状況の変動に対して敏感な対応をするためには S が各ストリームの GOP 長に対して十分に短い必要がある。一方で、サーバが受け取ったレート削減要求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 長の半分程度が妥当である。

ストリームの送出レート上昇量 U [bps] 及び送出レート減少量 D [bps] は、システム全体で同じ設定値を用いる。ここで、 S が各ストリームの GOP 長に対して十分に短いという前提で、 i 本のストリームの合計帯域使用量を B_c [bps] 変動させる場合、変動に要する時間 T [ms] は以下の式で表される。

$$T = \begin{cases} \frac{B_c G}{iU} & B \geq 0 \\ \frac{B_c G}{ND - (i-N)U} & B < 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

G は各動画ストリームの平均 GOP 長である。 T の長さは U 及び D の設定値に依存している。 U 及び D を大きく設定した場合、合計帯域使用量の調節にかかる時間は短くなるものの、各ストリームの送出レート変動幅が全体的に大きくなるため、それに伴って受信側での再生品質変動が激しくなってしまう。また、1GOP あたりの帯域使用量の下げ幅が大きくなると、一時的な回線の空き容量が大きくなるため、回線の有効利用という観点からは好ましくない。一方、 U 及び D を小さく設定した場合、各ストリームの送出レート変動幅が小さくなるため、再生品質の変動が小さくなり回線もより有効に活用できる。しかし、合計帯域使用量の調節に時間がかかるため、ネットワーク状況の頻繁な変動には対応しきれなくなる。このことをふまえて、その時々ネットワーク環境に合わせて U 及び D を設定する必要がある。

6.4 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う。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する広域ネットワークモデルにおいて、Max-Min fairness[54] の観点から帯域の有効利用がなされているか評価し、さらにネットワーク内回線の帯域変動に対する応答性について調べる。

なお、シミュレーションでは実際に動画を伝送せず、実動画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 特性グラフ (図 6.5) を複数用意し、その中からランダムに与えられた特性グラフを持つ疑似ストリームを用いた。この特性グラフから、各ストリームのある時点における PSNR を、その時の符号化レートから求めることができる。その他のシミュレーション条件を表 6.1 に示す。

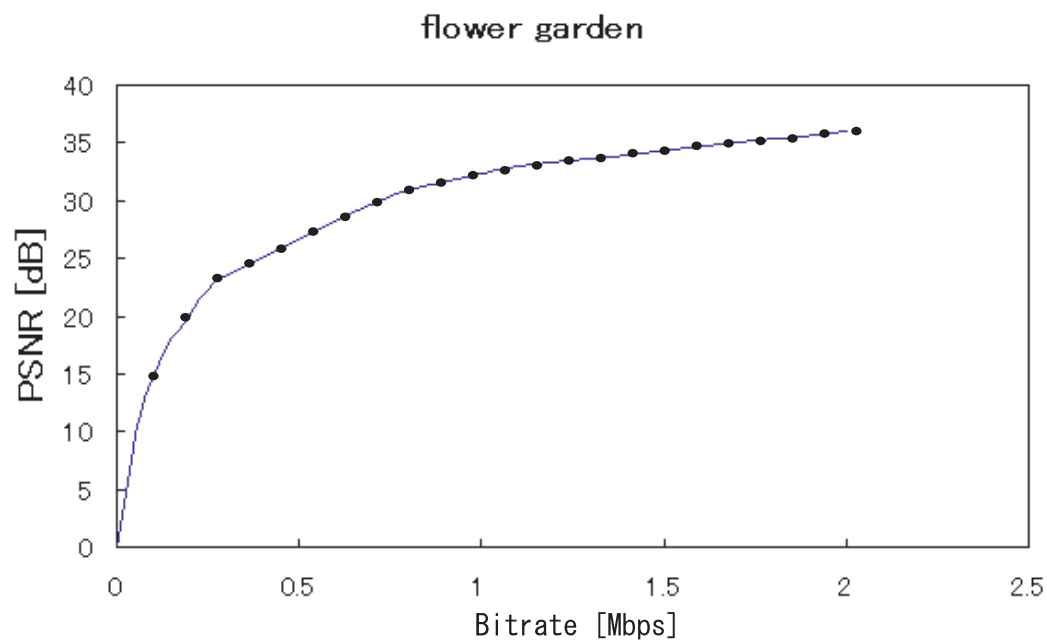


図 6.5: ビットレート-PSNR 特性

表 6.1: 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
check span	200 ms
GOP length	400 ms

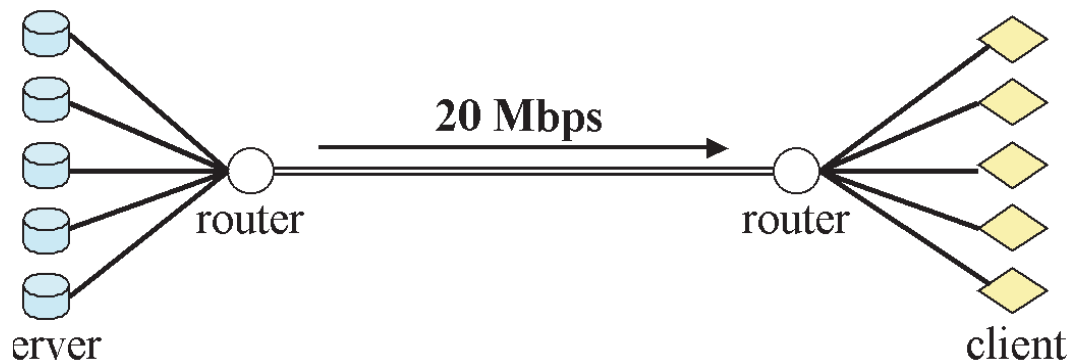


図 6.6: 単一回線モデル

6.4.1 単一回線モデル

ネットワークモデル

本節では図 6.6 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。

静的環境における性能評価

各動画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 6.7 に示す。図 6.7 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を、図 6.7 (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。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 6.7 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。

動的環境における性能評価

動画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シーケンスと考えると、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 6.8 に示す。このシミュレーションでは、各動画ストリームのビットレート-PSNR 特性の変化が 4~10 s の間のランダムな時間ごとに起こるものとしており、その度に各疑似ストリームが参

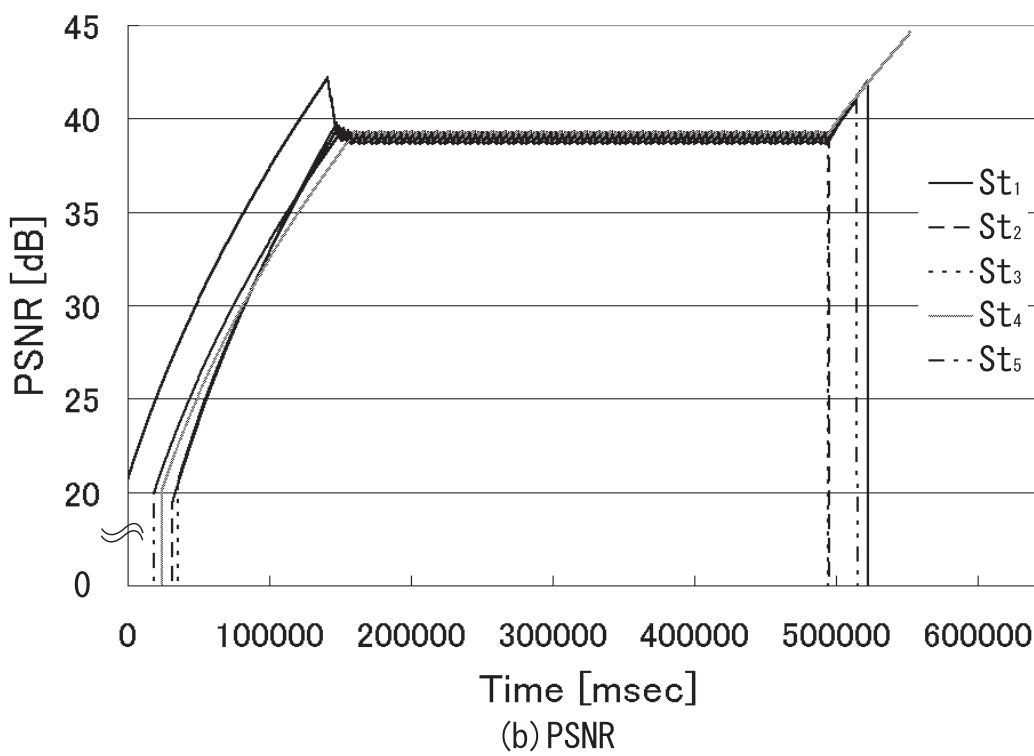
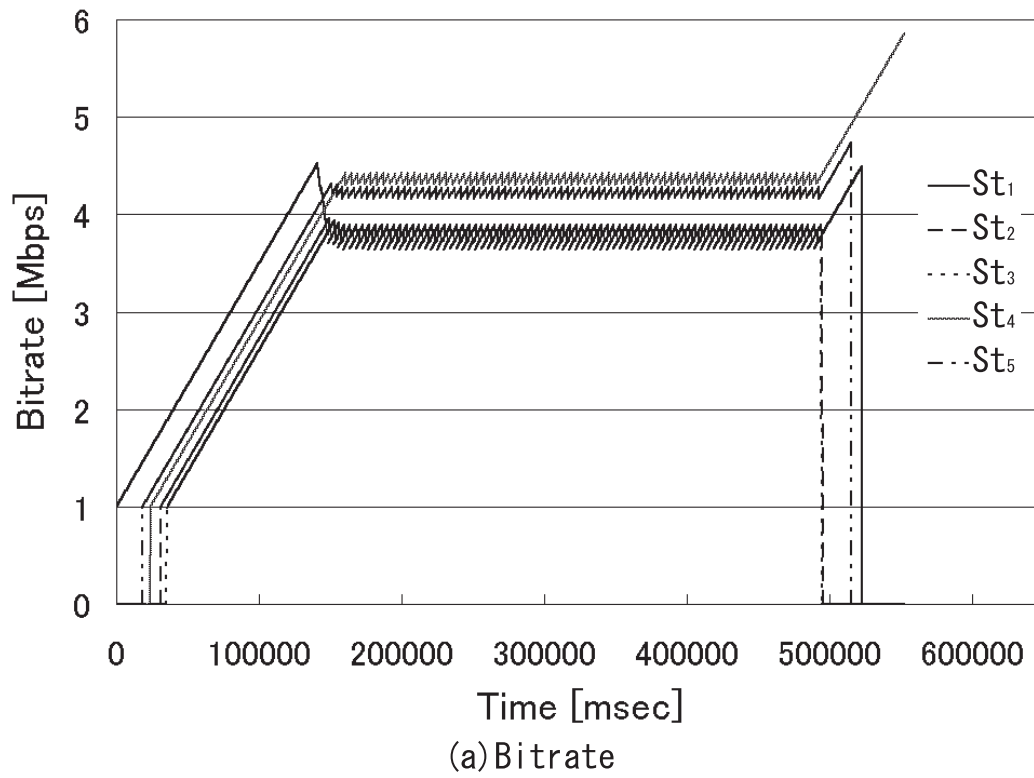


図 6.7: ビットレート及び PSNR の時間変化

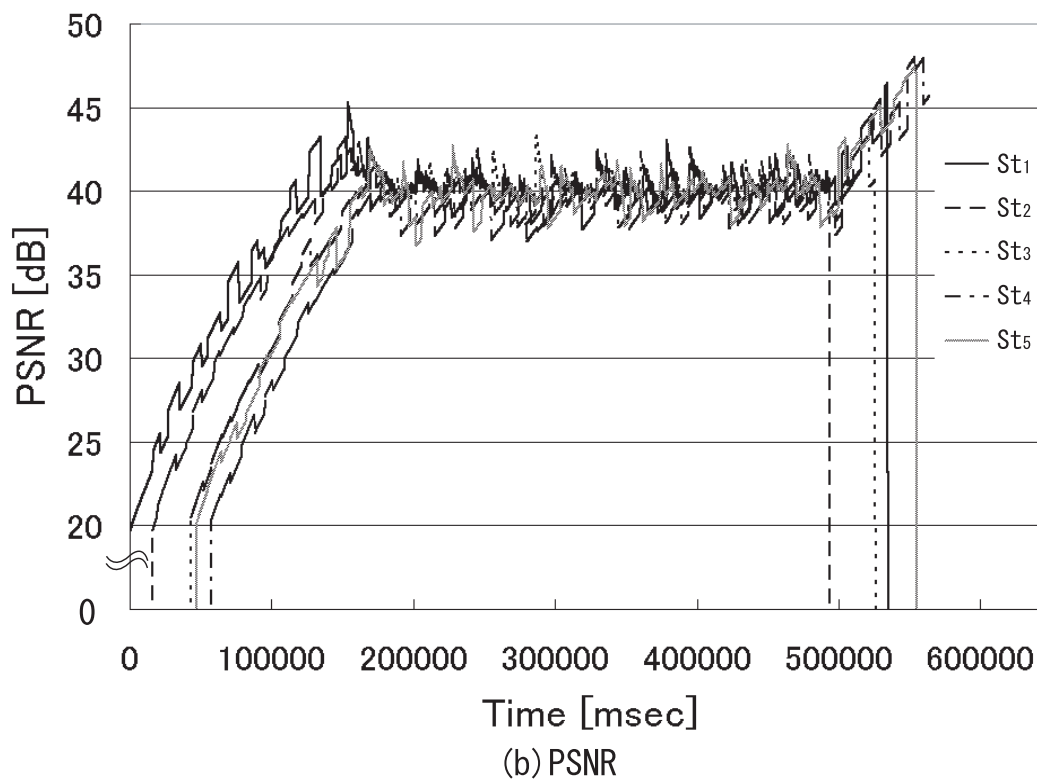
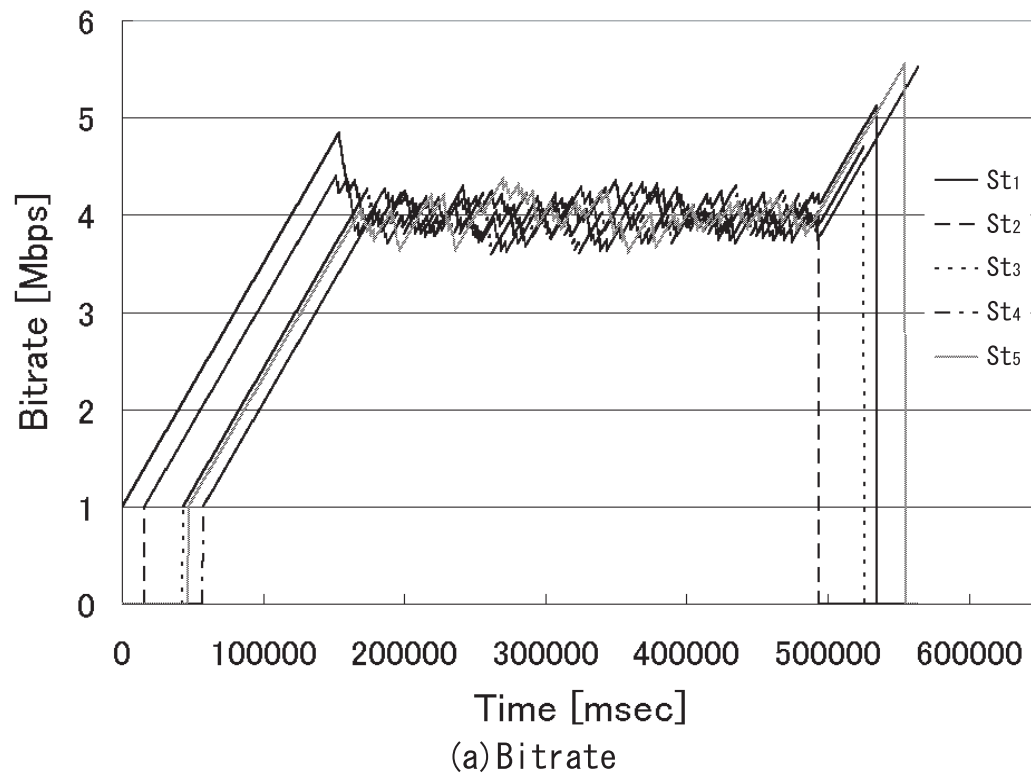


図 6.8: ビットレート及び PSNR の時間変化 (特性変動あり)

照するビットレート-PSNR 特性グラフが再選択される．図 6.8 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を，図 6.8 (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．

図 6.8 から明らかなように，動画像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．

6.4.2 広域ネットワークモデル

単一回線モデルに続いて，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像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．また，一般的なネットワーク上で動画像伝送を行う場合，本方式により制御される動画像ストリーム群以外のデータトラフィックによってネットワーク内の回線状況が変化する可能性があり，こうした状況変化に対する提案方式の応答性も評価する必要がある．

ネットワークモデル

本節では図 6.9 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 の動画像伝送を行う．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 6.2 に示す．

Max-Min fairness の実現

図 6.9 のネットワークモデル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 6.10 に示す．図 6.10 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を，図 6.10 (b) は各ストリームの PSNR の時間変化を，図 6.10 (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，各動画像ストリームのビットレート-PSNR 特性の変化は，4～10 s の間のランダムな時間ごとに起こるものとしている．その他のシミュレーション条件は表 6.1 のものを用いる．

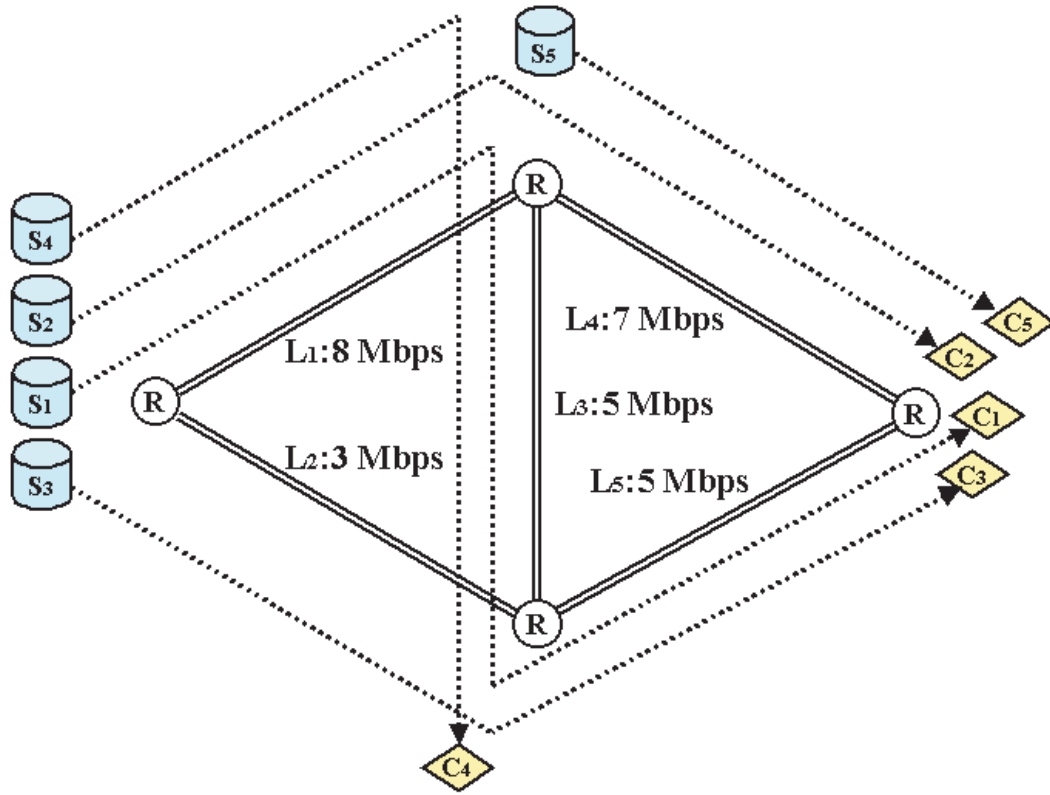
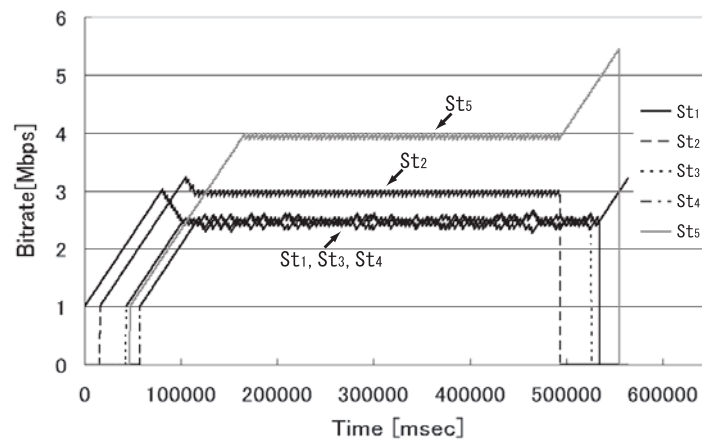


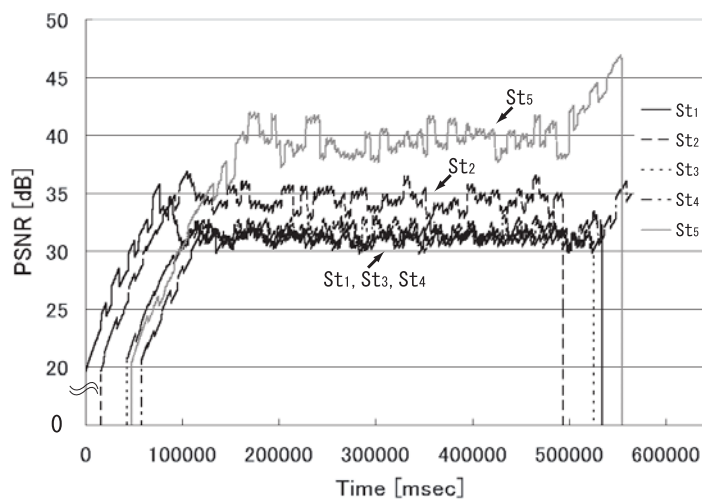
図 6.9: 広域ネットワークモデル

表 6.2: 各回線の帯域容量と存在するストリーム

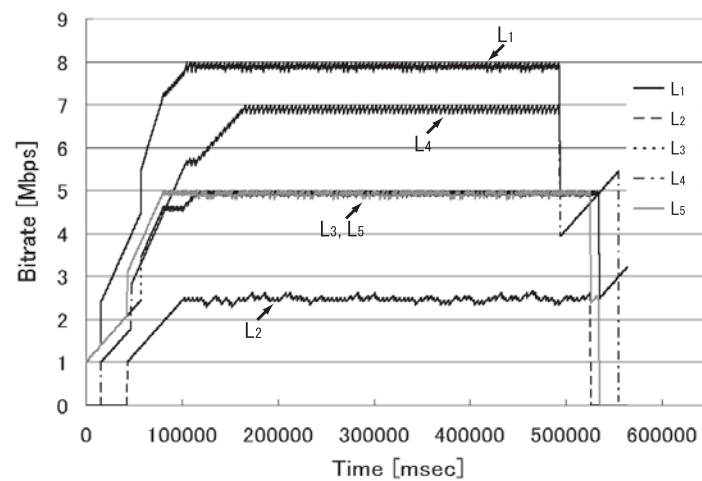
link number	bandwidth	stream number
L_1	8 Mbps	St_1, St_2, St_4
L_2	3 Mbps	St_3
L_3	5 Mbps	St_1, St_4
L_4	7 Mbps	St_2, St_5
L_5	5 Mbps	St_1, St_3



(a) Bitrate



(b) PSNR



(c) Used bandwidth

図 6.10: 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)

まず、図 6.10 (b) からわかるように、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 が同程度に収まっていないことが挙げられる。特にストリーム St_5 の再生品質が突出して高くなっている。ストリーム St_5 は回線 L_4 をストリーム St_2 と共有しているので、基本的にストリーム St_2 とストリーム St_5 の再生品質が同程度になるよう制御が働くはずだが、ストリーム St_2 は回線 L_4 の帯域を 3 Mbps 前後しか使っていないため、ストリーム St_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 St_2 がストリーム St_1 及びストリーム St_4 とともに回線 L_1 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 St_2 の送出レートが頭打ちになっているため回線 L_4 に余剰帯域が生まれ、その余剰分をストリーム St_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 490 秒後にストリーム St_2 の伝送が終了し、回線 L_4 にさらに余剰帯域が生じると、ストリーム St_5 の送出レートがさらに上昇する。

次に、回線 L_1 に着目すると、ストリーム St_2 の帯域使用量がストリーム St_1 及びストリーム St_4 に比べて大きくなっている。これは、ストリーム St_1 及びストリーム St_4 が回線 L_1 の先で共有している回線 L_3 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 St_2 が回線 L_3 の 3 Mbps 近い余剰帯域を利用可能となる。また、回線 L_2 においては、ストリーム St_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 St_3 がストリーム St_1 と共有する回線 L_5 がボトルネックになり、ストリーム St_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 L_3 及び回線 L_5 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 St_1 、ストリーム St_3 及びストリーム St_4 の再生品質はほぼ同程度に保たれており (図 6.10 (b))、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わかり、提案方式により Max-Min fairness が実現されることが示された。

ネットワーク状況の変動に対する応答性

次に、同様のシミュレーションにおいて、伝送開始 300 秒後に回線 L_3 の帯域容量を 5 Mbps から 3 Mbps に落とした場合の結果を図 6.11 に示す。図 6.11 (a) は各ストリームのビットレートの時間変化を、図 6.11 (b) は各ストリームの PSNR の時間変化を、図 6.11 (c) は各リンクにおける帯域使用量を表している。

回線 L_3 の帯域容量変動を受けて、回線 L_3 上を流れるストリーム St_1 及びストリーム St_4 の帯域使用量が減少していく様子がわかる (図 6.11 (a))。これにより回線 L_1 及び回線 L_5 に余剰帯域が生まれるため、回線 L_1 をストリーム St_1 及びストリーム St_4 と共有しているストリーム St_2 と、回線 L_5 をストリーム St_1 と共有しているストリーム St_3 の帯域使用量が増大している。同時に、回線 L_4 の帯域がストリーム St_2 及びストリーム St_5 の間で公平に使用されるようになり、両者の再生品質がほぼ同程度に変化している。

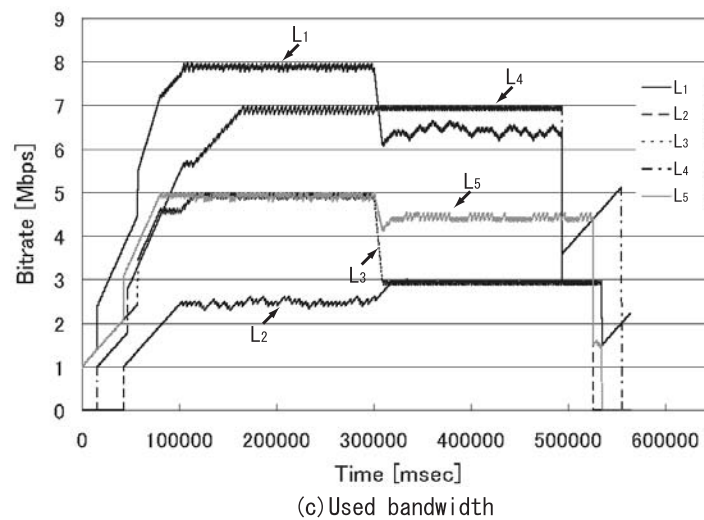
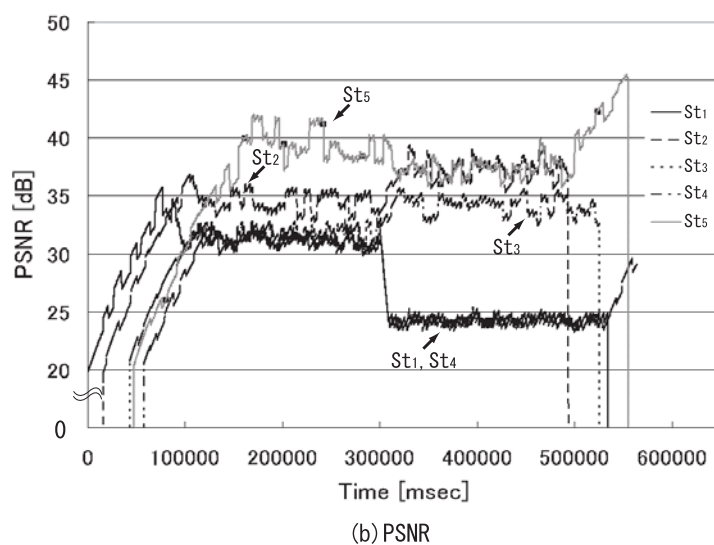
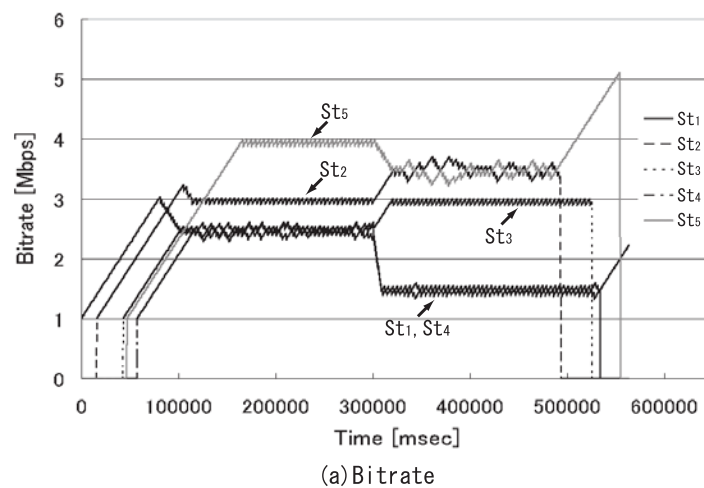


図 6.11: ビットレート, PSNR 及び帯域使用量の時間変化 (特性変動・帯域変動あり)

ここで、回線 L_3 の帯域容量変動前後において、回線 L_3 中の帯域使用量がそれまでの定常状態から新たな定常状態に落ち着くまで約 9 s かかっている (図 6.11 (c)). この時間の長さは、6.3.3 で述べたように各ストリームの普段の送出レート上昇量 U [bps] 及び帯域削減要求受信時の送出レート削減量 D [bps] に依存する. このことを示すために、同様のシミュレーションを U 及び D の値を変化させて行った (図 6.12).

送出レート調整幅を $U = 50$ kbps, $D = 500$ kbps と大きく設定した場合 (図 6.12 (a)), 回線 L_3 の帯域容量減少に約 2 s で対応しているが、各ストリームの送出レート変動幅が全体的に大きくなっている. 一方、送出レート調整幅を $U = 2$ kbps, $D = 20$ kbps と小さく設定した場合 (図 6.12 (b)), 各ストリームの送出レート変動幅が小さくなっているが、帯域変動への対応に時間がかかるため、なかなか定常状態に落ち着かなくなり、ネットワーク内回線の頻繁な帯域変動に対応しきれていない. この結果から、 U 及び D の設定がシステムの動作に影響を与えることがわかる.

6.5 本章のまとめ

本章では、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分配を、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. 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ストリームの中で最も再生品質の高いものからレートを下げさせ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、再生品質から見たボトルネック回線の公平な利用が可能となり、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、Max-Min fairness と呼ばれる公平性が実現されることを確認した. また、ネットワーク内の回線容量変動に対する提案方式の応答性について述べた.

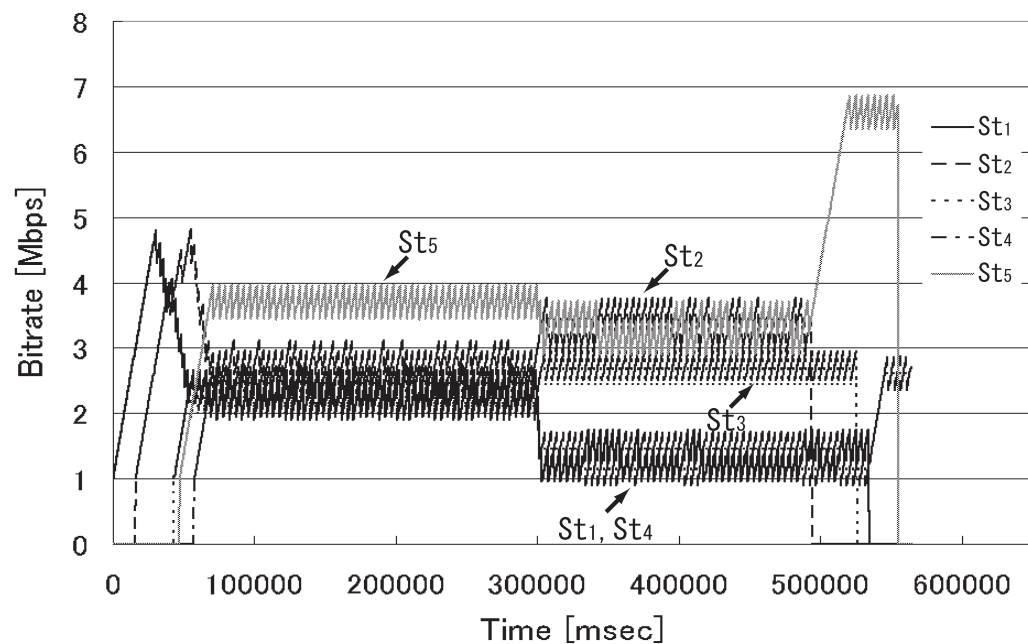
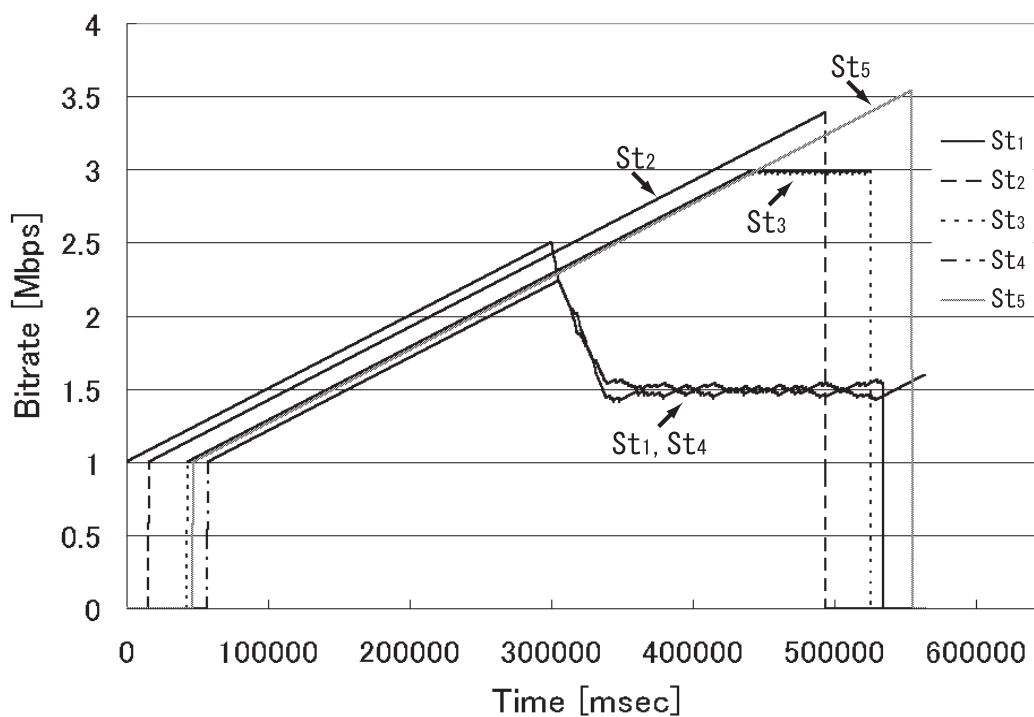
(a) $U=50$ kbps, $D=500$ kbps(b) $U=2$ kbps, $D=20$ kbps

図 6.12: ビットレートの時間変化 (特性変動・帯域変動あり)

第 7 章

結論

ネットワーク上でリアルタイムに映像や音声などのメディアデータを伝送・再生するシステムは、将来の通信サービスとして最も期待されているサービスの 1 つとなっている。このような連続メディアデータを扱うシステムに対しては、エンド-エンド間での QoS 保証を行う必要があるが、ネットワークが高速化する一方で、ユーザ数の増加や扱うデータ量の増大により、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。そのため、使用可能な資源に応じてメディアの品質を変更していく必要が生じるが、システム内のメディアストリームをネットワーク資源の観点から個別に制御する従来方式の場合、ストリーム間で品質のばらつきが生じてしまうという問題がある。そこで、本研究では、メディアの再生品質そのものを制御指標及び評価尺度とする QoS 制御をメディア QoS と定義し、メディア QoS の観点における公平なメディアストリーミングの実現について検討した。本論文においては、メディアストリーミングシステムとしてネットワーク上で符号化された動画像のマルチチャネル伝送を想定し、複数動画像ストリームが同一回線を共有する際に、その回線を利用する各ストリームの再生品質を均一化する統括的な帯域制御方式を提案した。

まず、あらかじめ符号化された状態で複数のサーバに蓄積されている MPEG 動画像群が同一回線を共有するシステムを想定し、その回線を利用する各動画像の再生品質を均一化しつつ全体的な画質の向上を実現する帯域割当方式を提案した。この方式では、各動画像に対してスケーリングが施された場合のビットレート削減に伴う画質劣化の特性をパラメータ化し、これを用いて各ストリームの帯域割当てを決定することで、各動画像の再生品質の均一化を実現した。また、MPEG 動画像のスケーリング方式には様々なものがあるため、それぞれの処理プロセスに起因するスケーリング特性の違いに着目し、状況に合わせて複数のスケーリング方式を選択的に利用することで画質の向上を図っている。更に、この方式の実システム上での運用について検討し、動画像のシーンチェンジによる画質劣化特性の変化に対応するため、あらかじめ蓄えられている各ストリームのシーンスケジュールを用いて全体の伝送スケジュールを作成するよう提案方式を拡張した。また、伝送スケジュール方式がシステムの動作に与える影響について考察し、システム内のストリーム数の増大により方式劣化が発生することを指摘した。この問題に対処するため、ストリーム全体を適当なグループに分割する手法を提案したが、一方でグループ化による方式劣化という問題が生じる。このトレードオフ関係を定式化するため、シミュレーション結果に重回帰分析を適用して各々の方式劣化に対する予測回帰式を導出し、これらの回帰式を用い

て最適グループ数を推定する手法を確立した。実験の結果、提案手法によって推定されるグループ数と実測値から得られる最適グループ数との誤差はほとんどなく、実用的な精度で推定可能であることを確認した。この方式については、実際のネットワーク上への実装を行い、伝送実験によって有効に機能することを確認した。

次に、システム全体の情報を一元管理することが困難な広域ネットワーク上での MPEG 動画像のリアルタイムストリーミングを対象として、各ストリームの再生品質を均一化する分散型帯域制御方式を提案した。この方式では、ネットワークを構成するルータに回線やストリームの状況を局所的に監視させ、ストリームサーバに対するビット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削減させる。この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、各ストリームの再生品質に基づいたボトルネック回線の公平な利用が可能となり、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実現されることを確認した。この方式については、動画像の PSNR が符号化レートの増加に伴って単調増加するという前提のもとで設計されているため、ある符号化レート以上において PSNR が頭打ちになる動画像も扱うには、帯域制御アルゴリズムを拡張する必要がある。また、システムの動作に関わる各種パラメータの決定法についても検討していく必要がある。更に、計算機システム上への実装及び伝送実験による動作確認が今後の課題として残っているが、その過程において提案方式を実際の広域ネットワーク上で運用する際に発生する物理的及びシステムの要因による影響について検討し、提案方式を対応させていく必要がある。

なお本論文では、動画像の符号化方式として MPEG を主対象としたが、あくまでもこれは一例であり、方式自体は MPEG 以外のストリームメディアにも適用可能である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教官として親身になって御指導下さった酒井善則教授に心から感謝致します．また，常に的確なアドバイスを与え続けて下さった山岡克式助教授，日頃から研究上の有益な御意見・御助言を頂きました小林亜樹助手をはじめ，酒井研究室の皆様に深く感謝致します．

参考文献

- [1] A.T. Campbell, G. Coulson, and D. Hutchison, “A quality of service architecture,” ACM Comput. Commun. Rev., vol.24, pp.6–27, April 1994.
- [2] A. Campbell, C. Aurrecoechea, and L. Hauw, “A review of QoS architecture,” ACM Multimedia Systems, 1996.
- [3] J.F.K. Buford, ed, Multimedia systems, ACM Press SIGGRAPH Series, Addison-Wesley, 1994.
- [4] L. Delgrossi, C. Halstrick, D. Hehmann, R.G. Herrtwich, O. Krone, J. Sandvoss, and C. Vogt, “Media scaling for audiovisual communication with the heidelberg transport system,” Proc. ACM Multimedia '93, pp.99–104, 1993.
- [5] K. Jeffay and D. Bannett, “A rate-based execution abstraction for multimedia computing,” Lecture Notes in Computer Science, LNCS 1018, pp.64–75, Springer-Verlag, 1995.
- [6] 村上恭朗, 瀬崎 薫, “ATM のレートベース型輻輳制御に基づく可変レート動画像転送,” 信学技報, IN96-149, pp.153–160, Feb. 1997.
- [7] G. Morrison, “Video transcoders with low delay,” IEICE Trans. Commun., vol.E80-B, no.6, pp.963–969, June 1997.
- [8] 福田健太郎, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫, “帯域再交渉を考慮した ATM DBR サービス上での MPEG-2 動画像転送におけるレート制御,” 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.6, pp.398–407, June 1997.
- [9] K. Chandra and A.R. Reibman, “Modeling One- and Two- Layer Variable Bit Rate Video,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol.7, no.3, pp.398–413, June 1999.
- [10] 笠井裕之, 永吉 功, 富永英義, “ドリフト誤差伝搬を考慮した MPEG-2 ビットストリームレートスケール符号量制御方式の検討,” 信学技報, IE99-12, pp.41–48, 1999.
- [11] 笠井裕之, 児玉 明, 富永英義, “階層符号量配分率の動的更新制御による動画像階層符号化符号量制御方式,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.8, pp.1475–1488, Aug. 1999.

-
- [12] 笠井裕之, 富永英義, 花村 剛, 亀山 渉, “低遅延 MPEG-2 ビデオトランスコーダ符号量制御方式,” 信学論 (B), vol.J83-B, no.2, pp.151–164, Feb. 2000.
 - [13] 清水 淳, 嵯峨田淳, 渡辺 裕, 小林直樹, “参照フレームレート変更によるビットレートスケーリング,” 信学論 (D-II), vol.J83-D-II, no.3, pp.967–976, March 2000.
 - [14] L. Wang, “Rate control for MPEG video coding,” Signal Processing: Image Commun., vol.15, pp.493–511, 2000.
 - [15] 河内谷清久仁, “マルチメディア処理の動的 QoS 制御のためのフレームワーク,” 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.6, pp.465–471, June 1997.
 - [16] A. Puliafito, O. Tomarchio, and H. de Meer, “An agent-based framework for QoS management,” Proc. WCSS '97, pp.392–396, Singapore, Sept. 1997.
 - [17] 市川明男, 山岡克式, 酒井善則, “複数動画像ストリームの通信回線共有時の帯域割り当てに関する検討,” 信学技報, SSE98-232, IN98-204, pp.125–130, March 1999.
 - [18] 渡辺 啓, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, “ユーザ QoS を考慮した動的帯域管理方式の性能評価,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.4, pp.549–559, April 1999.
 - [19] 福田健太郎, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫, “ユーザ効用最大化を目的とした動画像通信のための資源割当制御,” 信学技報, SSE99-15, pp.19–24, May 1999.
 - [20] 小菅昌克, 山崎達也, 荻野長生, 松田 潤, “マルチエージェントによる適応的 QoS 制御方式,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.5, pp.702–710, May 1999.
 - [21] 藤原 洋監修, 最新 MPEG 教科書. アスキー出版局, 東京, 1994.
 - [22] 安田 浩, MPEG/マルチメディア符号化の国際標準, 丸善株式会社, 東京, 1994.
 - [23] G. Keesman, R. Hellinghuizen, F. Hoeksema, and G. Heideman, “Transcoding of MPEG bitstreams,” Signal Processing: Image Commun., vol.8, pp.481–500, 1996.
 - [24] H. Sun, W. Kwok, and J.W. Zdepski, “Architectures for MPEG compressed bitstream scaling,” IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol.6, no.2, pp.191–199, April 1996.
 - [25] 酒澤茂之, 滝嶋康弘, 和田正裕, “ネットワーク上でのレート削減可能なパケットビデオ符号化方式の検討,” 信学技報, IE96-39, pp.33–40, July 1996.
 - [26] S. Jacobs and A. Eleftheriadis, “Real-time video on the web using dynamic rate shaping,” ICIP'97, 1997.
 - [27] G. Morrison, “Video transcoders with low delay,” IEEE Trans. Commun., vol.E80-B, no.6, pp.963–969, June 1997.

-
- [28] A. Ichikawa, T. Tsushima, T. Yoshida, and Y. Sakai, "Bitstream scaling and encoding methods for MPEG video dedicated to media synchronization in a network," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E81-B, no.8, pp.1637–1646, Aug. 1998.
 - [29] 花村 剛, 富永英義, "スケーラブルビデオ符号化-MPEG での動向と将来像," *テレビ技報*, vol.17-57, pp.25–30, Oct. 1999.
 - [30] 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.
 - [31] 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.
 - [32] T. Komine, F. Kubota, S. Nakagawa, and A. Amemiya, "Development of the Japan Gigabit Network," *Proc. of ICATM 2000*, June 2000.
 - [33] J. Wroclawski, "The use of RSVP with IETF integrated services," *IETF RFC 2210*, Sept. 1997.
 - [34] J. Wroclawski, "Specification of the controlled-load network element service," *IETF RFC 2211*, Sept. 1997.
 - [35] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin, "Specification of guaranteed quality of service," *IETF RFC 2212*, Sept. 1997.
 - [36] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An architecture for Differentiated Services," *IETF RFC 2475*, Dec. 1998.
 - [37] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin, "Resource Reservation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification," *IETF RFC 2205*, Sept. 1997.
 - [38] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederik, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for realtime applications," *IETF RFC 1889*, Jan. 1996.
 - [39] D. Sisalem and H. Schulzrinne, "The loss-delay based adjustment algorithm: A TCP-friendly adaptation scheme," *Proc. NOSSDAV '99*, 1999.
 - [40] 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.
 - [41] 檜尾次郎, 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," *情処学マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO1999) シンポジウム*, pp.381–386, June 1999.

-
- [42] 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,” 情処学マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2000) シンポジウム, pp.433–438, June 2000.
 - [43] D. Tennenhouse and D. Wetherall, “Towards an active network architecture,” *ACM Computer Commun. Rev.*, vol.26, no.2, pp.5–18, April 1996.
 - [44] D. Tennenhouse, J. Smith, W. Sincoskie, and D. Wetherall, “A survey of active network research,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.35, no.1, pp.80–86, Jan. 1997.
 - [45] K. Calvert, S. Bhattacharjee, and E. Zegura, “Directions in active networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.36, no.10, pp.72–78, Oct. 1998.
 - [46] K. Psounis, “Active Networks: Applications, security, safety, and architectures,” *IEEE Communi. Surveys*, First Quarter 1999.
 - [47] 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.
 - [48] M. Gerla, 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.
 - [49] 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.
 - [50] ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11, Test model 5, April 1994.
 - [51] 一森哲男, 数理計画法, 共立出版, 1994.
 - [52] 佐藤 隆, 児島治彦, 阿久津明人, 外村佳伸, “映像コーパスの構築と分析,” *信学論 (D-II)*, vol.J82-D-II, no.10, pp.1552–1560, Oct. 1999.
 - [53] 永田 靖, 棟近雅彦, 多変量解析法入門, サイエンス社, 2001.
 - [54] D.P. Bertsekas and R. Gallager, “Data networks,” Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, 1992.

目 次

2.1	MPEG 符号化画像のピクチャ構造	5
3.1	システムモデル	11
3.2	再量子化によるスケーリング	12
3.3	DCT 係数削除によるスケーリング	13
3.4	スケーリング対画質特性 (flower garden)	16
3.5	スケーリング対画質特性 (table tennis)	17
3.6	スケーリング対画質特性 (susie)	18
3.7	スケーリング対画質特性 (football)	19
3.8	画質劣化パターン	21
3.9	実画像の比較 (football)	26
3.10	実画像の比較 (flower garden)	27
3.11	実画像の比較 (susie)	28
4.1	シーンごとの画質劣化特性	30
4.2	時間分割された伝送スケジュール	30
4.3	切替処理に伴う帯域損失	32
4.4	合計使用帯域の変動	33
4.5	帯域ロス率の推移	33
4.6	調整終了までのタイムラグ	34
4.7	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 4 本)	35
4.8	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 6 本)	35
4.9	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 8 本)	36
4.10	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 10 本)	36
4.11	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 20 本)	37
4.12	最適な帯域割当てとの差 (ストリーム数: 50 本)	37
4.13	グルーピングの弊害	38
4.14	ストリーム数の増大による劣化 (n を変動させた場合)	42
4.15	ストリーム数の増大による劣化 (B を変動させた場合)	42
4.16	ストリーム数の増大による劣化 (S を変動させた場合)	43
4.17	ストリーム数の増大による劣化 (G を変動させた場合)	43
4.18	ストリーム数の増大による劣化 (R を変動させた場合)	44
4.19	グルーピングによる劣化増加 (g を変動させた場合)	46

4.20	グルーピングによる劣化増加 (B を変動させた場合)	46
4.21	グルーピングによる劣化増加 (R を変動させた場合)	47
4.22	グルーピングによる劣化増加 (N を変動させた場合)	47
4.23	グループ数と劣化	51
5.1	システム内のプロセス構成	53
5.2	実験環境	54
5.3	実装システムによる実験結果	55
6.1	システムモデル	57
6.2	PSNR 情報の付加	58
6.3	サーバの動作	59
6.4	ルータの動作	60
6.5	ビットレート-PSNR 特性	63
6.6	単一回線モデル	64
6.7	ビットレート及び PSNR の時間変化	65
6.8	ビットレート及び PSNR の時間変化 (特性変動あり)	66
6.9	広域ネットワークモデル	68
6.10	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)	69
6.11	ビットレート, PSNR 及び帯域使用量の時間変化 (特性変動・帯域変動あり)	71
6.12	ビットレートの時間変化 (特性変動・帯域変動あり)	73

表 目 次

3.1	各動画像のパラメータ	15
3.2	均等割当てと提案方式の性能比較	25
4.1	D_s の偏回帰係数と標準偏回帰係数	44
4.2	D_s の説明変数間の相関行列	44
4.3	D_g の偏回帰係数と標準偏回帰係数	48
4.4	D_g の説明変数間の相関行列	48
6.1	シミュレーション条件	63
6.2	各回線の帯域容量と存在するストリーム	68

本研究に関する発表論文

学会論文

- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “動画像のマルチチャネル伝送における動的帯域割当方式”, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.J84-B, no.6, pp.1087–1098, June 2001.
- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “画質の均質化を尺度としたマルチチャネル動画像伝送システムの実装”, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.J86-B, no.2, pp.162–173, Feb. 2003.
- K. Ogawa, A. Kobayashi, K. Yamaoka, Y. Sakai : “Distributed QoS control based on fairness of quality for video streaming,” IEEE Trans. on Multimedia Special Issue on Streaming Media. (投稿中)

国際会議

- K. Ogawa, K. Yamaoka, Y. Sakai : “An adaptive QoS control method in the multi-channel communication of the MPEG video data streams,” ICC 2001, session:G24.3, Helsinki, June 2001.
- K. Ogawa, A. Kobayashi, K. Yamaoka, Y. Sakai : “Design of the Multi-channel Communication System for the MPEG Video Data Streams Using Adaptive QoS Control,” ICC 2003, session:GN2-2, Alaska, May 2003.
- K. Ogawa, A. Kobayashi, K. Yamaoka, Y. Sakai : “An Autonomously Distributed QoS Control Method for Video Streaming,” GLOBECOM 2003, San Francisco, Dec. 2003. (投稿中)

国内学会発表 (研究会)

- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “動画像のマルチチャネル通信における適応 QoS 制御方式”, 電子情報通信学会技術報告, **SSE99-59**, **IN99-40**, **CS99-81**, pp.31–36, Sept. 1999.
- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “動画像のマルチチャネル通信における動的帯域割当方式”, 電子情報通信学会技術報告, **SSE99-211**, **IN99-174**, pp.31–36, March 2000.

- 小川 賢太郎, 小林 亜樹, 山岡 克式, 酒井 善則: “ストリーミングメディアに対する分散型 QoS 制御”, 電子情報通信学会技術報告, **CS2002-116**, **IN2002-104**, pp.7-12, Dec. 2002.

国内学会発表（電子情報通信学会 全国大会, 総合大会, ソサイエティ大会）

- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “画質を考慮した多重映像伝送における最適帯域割り当て法の検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, **B-7-91**, Sept. 1999.
- 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則: “伝送スケジュールに沿った複数動画像伝送に伴う帯域ロス”, 電子情報通信学会春季総合大会, **B-7-146**, March 2000.
- 小川 賢太郎, 野生須 久幸, 小林 亜樹, 山岡 克式, 酒井 善則: “動的帯域割当方式を用いたマルチチャネル動画像伝送システム”, 電子情報通信学会春季総合大会, **B-7-125**, March 2001.