

# 特別研究報告

## 題目

実時間動画像マルチキャストにおける  
フィルタリング手法の実装と評価

## 指導教官

宮原 秀夫 教授

## 報告者

中田 和久

平成 13 年 2 月 22 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

実時間動画像マルチキャストにおける  
フィルタリング手法の実装と評価

中田 和久

内容梗概

サーバから複数のユーザに対して同時にマルチメディアデータを配送するマルチキャスト通信においては、ユーザの受信メディア品質に対する好みや、アクセス回線容量、クライアントシステム性能などにより、ユーザごとに要求する通信品質が異なるという問題がある。目的に応じてその処理を変更可能な中継ノードを導入することにより高機能で柔軟性の高いネットワークの構築を目指したアクティブネットワーク技術は、ユーザからの様々な要求を効率的に満たすことのできるマルチメディア通信を実現するものとして注目されている。

しかしながら、ユーザへ高品質な動画像通信を提供するには、ネットワーク上の適切な位置に配置されたアクティブノードにおいて、下流のユーザの要求品質を考慮したマルチメディアデータの品質調整を実時間で行わなければならない。本報告では、放送・通信・蓄積など幅広い分野に適用可能な符号化圧縮手法である MPEG-2 アルゴリズムを用いて符号化された動画像のための品質調整手法であるフレーム棄却フィルタ、ローパスフィルタ、再量子化フィルタを対象に、アクティブネットワーク技術にもとづいた実時間動画像マルチキャストへの適用を検討する。そのため、それぞれのフィルタリング手法について、ユーザやネットワークの指定した目標レートに応じて適切に動画像品質を調整するアルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を評価する。評価結果にもとづき、動画像品質をあまり劣化させることなく与えられた目標レートを達成することのできる品質調整手法について検討する。レート変動、再生動画像品質、フィルタ処理時間に関する比較評価をとおして、高速なレート調整が求められる場合にはフレーム棄却フィルタを、動画像品質を重視する場合にはローパスフィルタを用いるのがよいことを示す。

また、アクティブネットワーク技術における動画像フィルタリング手法の有効性、実現可能性を検証するため、Intel IXP1200 ネットワーク・プロセッサからなるアクティブルータへの実装についても検討する。

主な用語

動画像マルチキャスト，動画像品質調整，アクティブネットワーク，QoS

## 目次

1	はじめに	7
2	実時間動画像マルチキャストにおけるフィルタリングシステム	9
2.1	アクティブネットワーク技術	9
2.2	アクティブネットワークにおける動画像マルチキャスト	9
3	MPEG-2 動画像符号化手法	12
3.1	ピクチャ層	13
3.2	GoP 層	13
3.3	スライス層	14
3.4	マクロブロック層	14
3.5	ブロック層	14
4	実時間動画像マルチキャストのためのフィルタリング手法	15
4.1	フレーム棄却フィルタ	15
4.2	ローパスフィルタ	16
4.3	再量子化フィルタ	17
5	実時間動画像マルチキャストにおける目標レートに応じた動画像品質調整	19
5.1	GoP データの予測	19
5.1.1	GoP サイズの予測	19
5.1.2	ピクチャサイズの予測	21
5.1.3	GoP 内ヘッダサイズの予測	25
5.2	フレーム棄却フィルタにおけるレート調整	25
5.3	ローパスフィルタにおけるレート調整	28
5.4	再量子化フィルタにおけるレート調整	31
6	フィルタリング手法の比較評価	34
6.1	目標レートに対するフレームレートの変化	36
6.2	目標レートに対するビットレートの変化	41
6.3	目標レートに対するピクチャサイズの変化	50
6.4	目標レートに対する動画像品質の変化	55
6.4.1	PSNR による画質評価	55
6.4.2	MOS 値による動画像品質評価	61

6.5	処理遅延によるフィルタリング手法の比較 . . . . .	68
6.6	実時間動画像マルチキャストのためのフィルタ選択手法 . . . . .	69
7	動画像レート調整可能なルータの実現性	71
8	おわりに	72
	謝辞	73
	参考文献	74

## 目 次

1	動画画像フィルタリングを用いた実時間動画画像マルチキャストシステム . . . . .	10
2	マルチキャストグループの階層構造 . . . . .	11
3	アクティブノードにおける動画画像フィルタリング . . . . .	11
4	MPEG-2 動画画像データの階層構造 . . . . .	12
5	MPEG-2 動画画像の構成例 ( $N=15, M=3$ ) . . . . .	13
6	ジグザグスキャンとオルタネートスキャン . . . . .	15
7	MPEG の符号・復号化, フィルタリング処理の流れ . . . . .	16
8	ローパスフィルタの適用例 . . . . .	17
9	再量子化フィルタの適用例 . . . . .	18
10	CBR 画像における GoP サイズの予測 (hamasaki-1) . . . . .	20
11	VBR 画像における GoP サイズの予測 (utada-8, rocket-6e) . . . . .	21
12	CBR 画像におけるピクチャサイズの予測 (hamasaki-1) . . . . .	22
13	VBR 画像におけるピクチャサイズの予測 (utada-8) . . . . .	23
14	VBR 画像におけるピクチャサイズの予測 (rocket-6e) . . . . .	24
15	A グループ, B グループの形成例 . . . . .	26
16	棄却ピクチャ選択アルゴリズムの動作例 . . . . .	27
17	ピクチャの棄却順序 . . . . .	27
18	ローパスパラメータと圧縮率の関係 . . . . .	29
19	ローパスパラメータ導出式の近似精度 . . . . .	30
20	量子化パラメータと圧縮率の関係 . . . . .	32
21	量子化パラメータ導出式の近似精度 . . . . .	33
22	評価用動画画像データの分類 . . . . .	36
23	フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 1, CBR 画像) . . . . .	38
24	フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 2, CBR 画像) . . . . .	39
25	フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	40
26	フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	40
27	フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, CBR 画像) . . . . .	43
28	フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, CBR 画像) . . . . .	44
29	フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	45
30	フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	45
31	ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (CBR 画像) . . . . .	46
32	ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	47

33	ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	47
34	再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (CBR 画像) . . . . .	48
35	再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	49
36	再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	49
37	ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (CBR 画像) . . . . .	51
38	ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	52
39	ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	52
40	再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (CBR 画像) . . . . .	53
41	再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 1, VBR 画像) . . . . .	54
42	再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 2, VBR 画像) . . . . .	54
43	目標レートと平均動画像品質の関係 . . . . .	57
44	ローパスフィルタにおける動画像品質の変化 . . . . .	58
45	再量子化フィルタにおける動画像品質の変化 . . . . .	59
46	フィルタパラメータと画質の関係 . . . . .	60
47	ローパスフィルタにおける画質の変化例 (sample-1) . . . . .	64
48	再量子化フィルタにおける画質の変化例 (sample-1) . . . . .	65
49	ローパスフィルタにおける画質の変化例 (sample-2) . . . . .	66
50	再量子化フィルタにおける画質の変化例 (sample-2) . . . . .	67
51	フィルタリング処理時間 (50 秒の動画像) . . . . .	69
52	IXP1200 の構成図 . . . . .	71

## 表目次

1	評価用動画像データの特徴 その1 . . . . .	35
2	評価用動画像データの特徴 その2 . . . . .	36
3	MOS 評価結果 (sample-1) . . . . .	62
4	MOS 評価結果 (matrix-16) . . . . .	62
5	MOS 評価結果 (matrix-30) . . . . .	62
6	MOS 評価結果 (sliding-1) . . . . .	63
7	MOS 評価結果 (hamasaki-1) . . . . .	63
8	MOS 評価結果 (utada-8) . . . . .	63
9	MOS 評価結果 (rocket-6e) . . . . .	63

## 1 はじめに

近年の急速なコンピュータの高性能化，ネットワークの広帯域化，アプリケーションのマルチメディア化に伴い，広帯域網における高品質かつ効率のよい動画像通信の実現が求められている．特にビデオ配信やインターネット TV，TV 会議のように一対多，あるいは多対多型なマルチキャスト通信システムでは，ある送信元から複数の受信者に対して同時に同じメディアデータを配送しなければならないため，数多くの問題が生じる．例えば，動画像などマルチメディアデータを利用するアプリケーションは，大量のトラフィックを定常的に生成，送出するため，適切なレート調整制御を行わなければネットワークは容易に輻輳状態に陥る．また，クライアントはネットワークの接続形態，サーバへの経路，端末性能など置かれる環境がそれぞれ異なり，さらに受信データに対するユーザの好みも多様なため，マルチメディアデータへの品質要求はさまざまに異なる．そのため，ネットワークに大きな負荷を与えることなくさまざまな品質要求を満たすことのできるマルチメディアマルチキャスト通信手法に関する研究が数多くなされてきた [1-4]．

文献 [1] では，サーバがクライアントの要求品質に応じた動画像データを複数生成，送出するサイマルキャストにおいて効率的な帯域利用を実現するためのフロー集約制御を，文献 [2] では，階層符号化手法を用いた実時間動画像マルチキャストをそれぞれ提案している．

また，文献 [3, 4] では新しい通信アーキテクチャであるアクティブネットワーク技術に着目し，動画像マルチキャストへの適用可能性や有効性について検討している．アクティブネットワークでは，アクティブノードと呼ばれる高機能なノードに対し，ネットワーク管理者やユーザが必要に応じてその振る舞いを変更するプログラムコードを導入することにより所望のネットワークサービスを実現する．文献 [3, 4] では，アクティブネットワーク技術を利用し，ネットワーク内の適切なアクティブノードで下流のクライアントの要求品質に合わせて動画像データを調整する動画像マルチキャスト手法を提案している．

動画像品質を調整することにより動画像トラフィックのレート制御を実現するフィルタリング手法に関する研究はこれまで数多くなされているが [5-7]，どのような手法やパラメータを用いてフィルタリングを行えば画質劣化を抑えることができ，かつ所望の目標レートを達成することができるかについては明らかになっていない．

そこで本報告では DVD やデジタル TV 放送などのための高品質で効率の高い動画像圧縮アルゴリズムとして広く一般に用いられている MPEG-2 符号化手法 [8] を用いて符号化された動画像を対象に，フレーム棄却フィルタ，ローパスフィルタ，再量子化フィルタの 3 つの品質調整手法を実装，評価する．また，それぞれのフィルタに対し，目標レートに応じてフィルタパラメータを決定し，品質調整するレート制御アルゴリズムを提案する．さらに実験の結果にもとづき，できるだけ高い動画像品質を保ちつつ目標レートを達成することので

きるフィルタの選択手法について検討する。

また、アクティブネットワークにおける動画像品質調整の実現可能性を検証するため、Intel IXP1200 ネットワーク・プロセッサからなるアクティブルータへの実装についても検討する。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、第2章では、本報告で対象とするアクティブネットワークにおける実時間マルチキャストシステムの概要を、第3章では、MPEG-2 動画像符号化手法について述べる。第4章では、本報告で実装、評価の対象とする MPEG-2 動画像品質調整手法の概要を述べる。第5章では、動画像品質をあまり劣化させることなく与えられた目標レートを達成するためのレート調整アルゴリズムを提案し、続く第6章で比較評価を行う。評価結果にもとづき、目標レート、動画像種を考慮したフィルタ選択手法について検討する。第7章では、提案手法の実用性を検証するため、Intel IXP1200 ネットワーク・プロセッサからなるアクティブルータへの実装について検討する。最後に第9章で本報告のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 実時間動画像マルチキャストにおけるフィルタリングシステム

本章では、本報告で研究の対象とするアクティブネットワーク技術を用いた動画像マルチキャストシステムと動画像品質調整に基づく動画像レート制御の概要について述べる。

### 2.1 アクティブネットワーク技術

従来のネットワークでは、中継ノードは経路選択、ヘッダの誤り訂正など簡易な処理のみを行うことで、エンド間的高速データ通信を実現してきた。そのため、アプリケーションの要求する高品質な通信サービスを提供するためには、エンドシステムやネットワークの出入口に位置するノード間でフロー制御や輻輳制御、エラー回復などの高度な制御を行う必要がある。規模が小さい、あるいは狭帯域なシステムではそのようなエンド間制御が有効であったが、システム規模の増大、ネットワークの広帯域化、さらにはエンドシステムの高性能化を背景としたアプリケーションの多様化にともなって、高機能でよりよい通信サービスを提供するネットワークの登場が望まれている。

アクティブネットワーク技術は、目的に応じてユーザや管理者がそのふるまいを変更することのできる中継ノード(アクティブノード)を導入することにより、柔軟で高機能なネットワークの構築を可能にするものである[9]。アクティブノードに到着したパケットは、あらかじめノードに設定された、あるいはパケット自身に書き込まれたプログラムによって処理された後、次段のノードへ転送される。アクティブノードで実行可能な処理は上位のアプリケーション層から下位のネットワーク層まで広範囲にわたり、例えばネットワークの輻輳状態を考慮した経路選択アルゴリズム、信頼性の高いマルチキャストメカニズム、あるいはデータ種別に応じた高度なパケットスケジューリングなどを容易に実現できる。

### 2.2 アクティブネットワークにおける動画像マルチキャスト

多数のクライアントが参加する動画像マルチキャストにおいては、それぞれのクライアントの要求する動画像品質がさまざまに異なるという問題がある。前節で述べたアクティブネットワーク技術を用いることによりネットワーク内での動画像品質調整が可能となり、サーバやネットワークに負荷をかけることなくクライアントのさまざまな要求品質を同時に満たすことのできる動画像マルチキャスト通信が実現できる。

本報告では、図1に示すような一台の動画像サーバがアクティブネットワークを介して複数のクライアントシステムに動画像データを同時にかつ実時間で転送するシステムを対象とする。動画像マルチキャストに参加するクライアントは、アクセス回線容量やシステム性能、再生される動画像品質に対するユーザの好みなどを考慮して、配送を要求する動画像データの品質を決定し、サーバに通知する。サーバではあらかじめ MPEG-2 符号化アルゴリズム

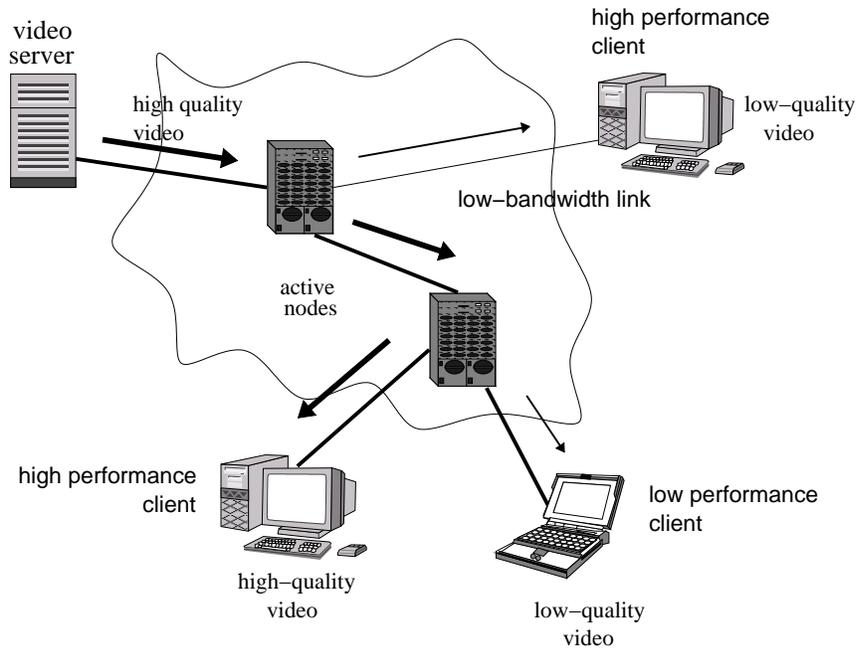


図 1: 動画像フィルタリングを用いた実時間動画像マルチキャストシステム

を用いて符号化された、あるいは実時間で符号化処理を行った動画像データをネットワークに送出する。送出される動画像の品質は、クライアントから通知された要求品質に基づいて決定される。サイマルキャスト手法 [1] では、個々の品質要求に応じて独立した動画像データを、階層符号化を利用した手法 [2] では品質要求の種別に対応した数の階層データを生成しなければならず、サーバや出力回線に与える負荷が大きい。一方、ネットワークでの動画像品質調整が可能なアクティブネットワークでは、もっとも高品質な要求を満たすことのできる動画像データを一つだけ生成し、ある定められたマルチキャストグループに送出すればよい。マルチキャストグループは階層構造をなしており、クライアントは受信したい動画像品質にしたがって適切なマルチキャストグループに参加する。もっとも高品質な動画像を提供するマルチキャストグループはサーバから動画像データを供給される。適切に選択されたアクティブノードはこのマルチキャストグループのメンバとなり動画像を受信し、より低品質な、あるいはより低レートな動画像を要求するクライアントや、さらに下位のマルチキャストグループを構成するアクティブノードのための品質調整を行い、異なるマルチキャストアドレスを用いて送出する (図 2)。

動画像データはサーバでパケット化され、適用されるフィルタプログラムを指定するための適切な識別子とマルチキャストアドレスなどをヘッダに付加された後、送出される。アクティブノードは動画像データパケットを受信すると、ヘッダ情報に基づいて動画像品質調整

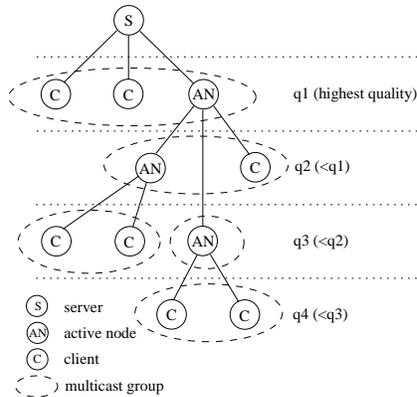


図 2: マルチキャストグループの階層構造

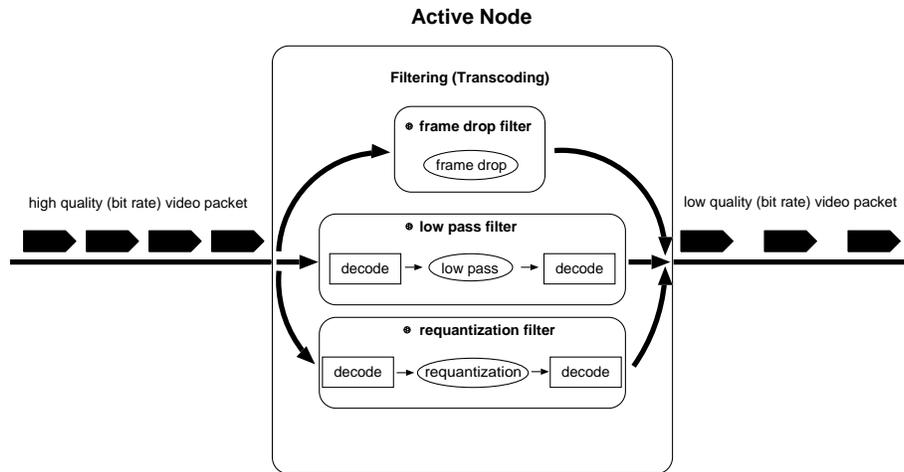


図 3: アクティブノードにおける動画画像フィルタリング

のためのフィルタプログラムを選択し、動画データに適用する。品質調整された動画データ packets はそのあて先マルチキャストアドレスを書き換えられ、再度ネットワークに送出される (図 3)。ただし、本報告ではフィルタリング手法の基本性能の評価と設定された目標レートを達成するフィルタ選択アルゴリズムの検討を目的としており、実験ではハードディスクに蓄積された MPEG-2 動画データにフィルタを適用し、再度蓄積されたものを復号化、再生し、動画品質を評価する。

### 3 MPEG-2 動画像符号化手法

本報告では、動画像の符号化圧縮方式として広く用いられている MPEG-2 (Moving Picture Experts Group) [8] を利用した動画像通信アプリケーションを対象とした評価を行なっている。

MPEG-2 動画像シーケンスは図 4 に示す階層構造となっている。シーケンスは複数のピクチャの集合である GoP (Group of Pictures) の繰り返しからなり、動画像再生時には GoP を単位とした早送り、巻き戻しなどのランダムアクセスが可能である。GoP はそれぞれ符号化アルゴリズムの異なる 3 種類のピクチャ(I, P, B) の組み合わせにより構成されており、さらにピクチャはスライスに分割される。スライスは複数のマクロブロックが水平方向に並んだものである。それぞれのマクロブロックは  $8 \times 8$  画素のブロックで構成されており、MPEG-2 ではブロックを単位とした離散コサイン変換 (DCT: Discrete Cosine Transform)、量子化、および可変長符号化を行なうことにより情報の圧縮を行なう。各層を区別するために、シーケンス層からスライス層までには、32 ビットのスタートコードが与えられている。以下ではピクチャ層、GoP 層、スライス層、マクロブロック層、ブロック層の順に概要を述べる。

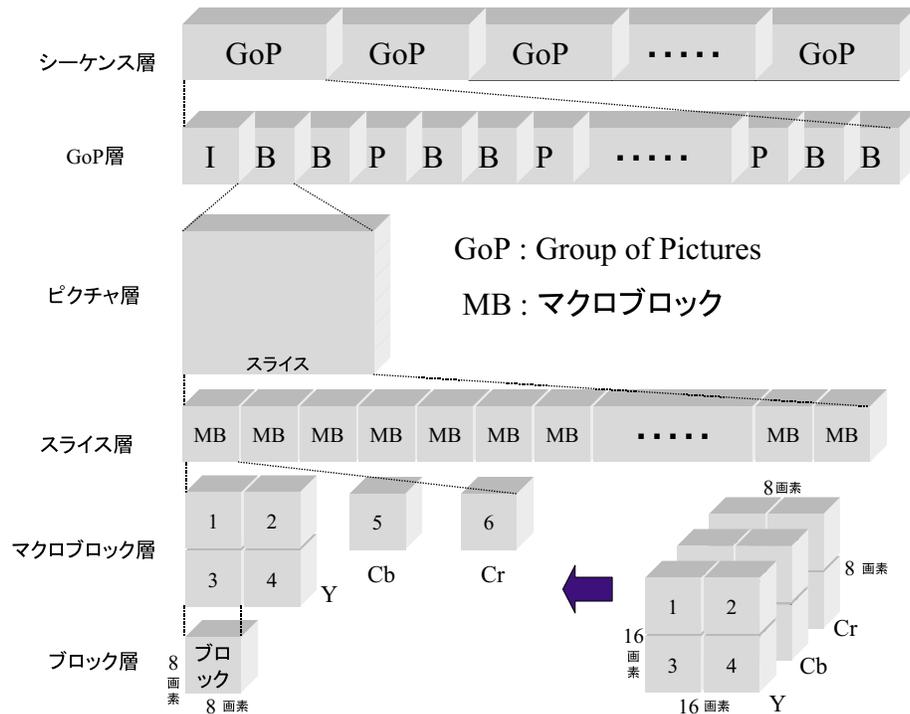


図 4: MPEG-2 動画像データの階層構造

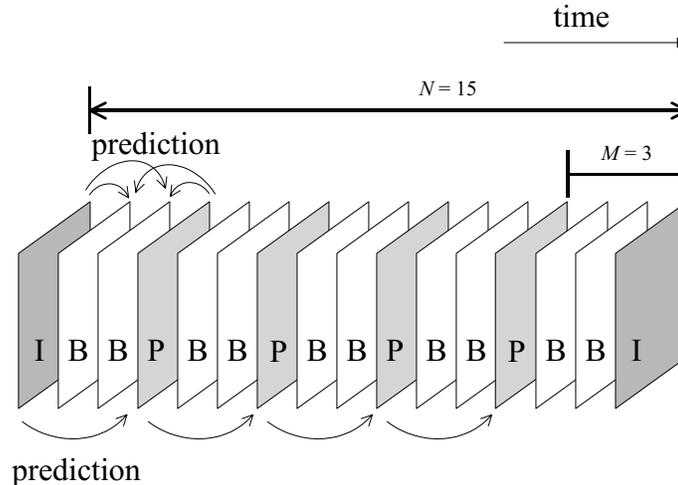


図 5: MPEG-2 動画像の構成例 ( $N=15$ ,  $M=3$ )

### 3.1 ピクチャ層

MPEG-2 符号化手法には、高い符号化効率を得るために符号化アルゴリズムの異なる I (Intra-coded) ピクチャ、P (Predictive-coded) ピクチャ、B (Bidirectionally predictive-coded) ピクチャの 3 つのピクチャ符号化タイプがある。ピクチャはプログレッシブ走査ではフレームに、インタレース走査 (飛び越し走査) ではフレームまたはフィールドに相当する。

I ピクチャは単一ピクチャ内の情報のみを用いて画面内 (イントラ) 符号化を行なう。したがって、他のピクチャと独立して符号、復号化が可能である。ただし、符号化されたピクチャのデータサイズは P、B ピクチャと比較して一般的に大きい。そこで、P ピクチャでは、ピクセルデータを符号化するだけでなく、時間的に過去に位置する直前の I または P ピクチャからの予測符号化を行なうことにより圧縮効率を高めている (図 5)。前方向予測符号化を行う P ピクチャは、物体が画面内でなめらかに動いているような動画像において、画質をそれほど劣化させることなく、I ピクチャに比べ高い符号化効率を得ることができる。B ピクチャは、時間的に前後に位置する I または P ピクチャを用いた両方向予測符号化を行なうことでさらに高い圧縮率を得る。B ピクチャは、物体が消失、出現するような動画像に対しても、的確に予測符号化を行なうことができ、符号化効率を大きく向上させることができる。

### 3.2 GoP 層

図 5 に示すとおり、ひとつの GoP は I ピクチャから始まる複数のピクチャから構成される。GoP の構成は、GoP サイズ、すなわち I ピクチャの間隔を表わすパラメータ  $N$  と I または P ピクチャの間隔を表わすパラメータ  $M$  によって定められる。例えば、図 5 に示す GoP

構成例では、 $N = 15$ 、 $M = 3$ である。

3.1 節で述べたように、I ピクチャは他のピクチャと独立して符号、復号化が可能であるため、周期的に配置された I ピクチャをランダムアクセスの開始点やエラー回復ポイントとして用いることができる。MPEG-2 符号化された動画データを用いた動画通信において、I ピクチャの全て、あるいは一部が失われると、その I ピクチャを参照する GoP 内の全てのピクチャの復号化に大きな影響を与え、再生動画品質が劣化する。したがって、高品質な動画通信を実現するためにはできる限り GoP のサイズを小さくし、シーケンス中の I ピクチャの出現頻度を高めることが望ましい。しかしながら、3.1 節で述べたとおり、I ピクチャのサイズは比較的大きいため、不用意に GoP サイズを小さくすると動画トラヒックの平均レートが高くなり、かえってネットワークの輻輳を招いてしまう場合もある。

### 3.3 スライス層

ピクチャは高さ 16 画素の帯状の領域に分割され、これをスライスと呼ぶ。スライスは 1 個以上のマクロブロックから構成され、その開始位置や長さは自由でピクチャごとに変更可能である。ただし、エラー耐性を向上させるため MPEG-2 では複数の行にまたがるスライスは設定できない。

### 3.4 マクロブロック層

ひとつのマクロブロックは  $16 \times 16$  画素の領域に対応し、それぞれ  $8 \times 8$  画素の 4 つの輝度ブロック (Y) と、空間的に対応した 2 つの色差ブロック (Cb, Cr) の 6 つのブロックから構成される。マクロブロック層ではマクロブロックの位置や符号化モード、量子化スケールなどの情報が設定される。

### 3.5 ブロック層

$8 \times 8$  画素の輝度信号または色差信号は離散コサイン変換 (DCT) された後、低周波数の DCT 係数から順にブロックの左上から右下へと配置される。さらに DCT 係数はマクロブロックごとに指定された量子化スケール値を用いて量子化される。ただし、画面内符号化されたブロックの最も低周波な DCT 係数は DC (Direct Current) 成分と呼ばれ、他の DCT 係数 (AC 成分と呼ばれる) とは区別して扱われる。量子化された AC 成分はジグザグスキャンまたはオルタネートスキャンにより低周波から高周波へと並べられ (図 6)、連続したゼロ係数の個数 (ラン) と次にあらわれる非ゼロ係数 (レベル) の対によってラン-レベル表現され、2 次元可変長符号化される。

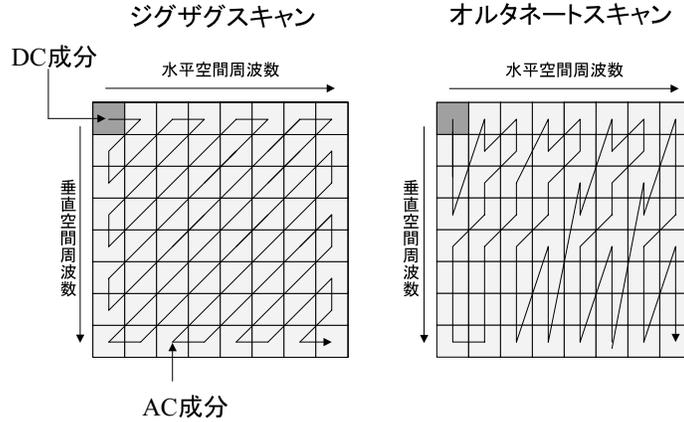


図 6: ジグザグスキャンとオルタネートスキャン

#### 4 実時間動画像マルチキャストのためのフィルタリング手法

動画像品質調整 (フィルタリング) は符号化された動画像データを部分的に復号, 加工した後, 再符号化することにより実現される [5-7]. アクティブノードでは実時間で受信パケットを処理する必要があるため, 本報告では比較的簡易かつ高速なフィルタリング手法であるフレーム棄却 [6], ローパス [5], 再量子化 [5] の3種類について検討する. 図7に MPEG-2 動画像の符号化, 復号化処理の手順と, フィルタ処理の適用領域を示す. 図中, 領域 A~E は動画像データの構造に対応しており, A は無圧縮の画像データである. B は A を DCT 処理することにより周波数成分に変換したものであり, 再量子化フィルタはこの状態のデータに対して適用される. C は DCT 係数を量子化してデータ量を圧縮したものであり, これをラン-レベル符号化することで D が得られる. ローパスフィルタはラン-レベル符号化された量子化 DCT 係数を任意個数棄却することにより品質調整を行うものである. さらに D をエントロピ符号化することで MPEG-2 動画像データである E が得られる. フレーム棄却フィルタは MPEG-2 動画像データのピクチャを単位とした選択的棄却を行うことによりデータ量を調整する. 各領域をまたぐ符号化, 復号化処理は  $8 \times 8$  画素からなるブロックを単位として行われる.

##### 4.1 フレーム棄却フィルタ

フレーム棄却フィルタは, 復号化, 再符号化処理を必要とせず, ピクチャを単位とした動画像データの棄却を行うことにより, 動画像品質を下げ, 動画像トラフィック量を減らす品質調整手法である. したがって, 他のフィルタと比較して処理負荷は小さく, 高速なフィルタ

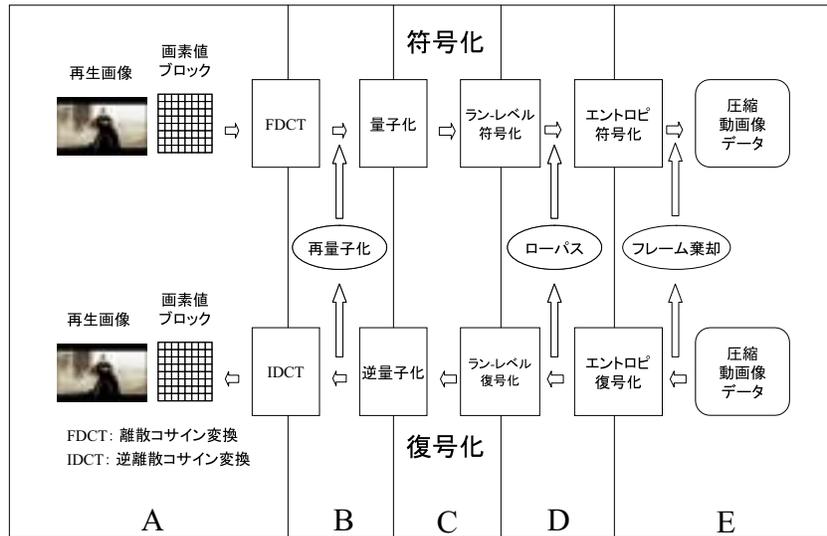


図 7: MPEG の符号・復号化, フィルタリング処理の流れ

リングが期待できる．ピクチャを棄却する際にはピクチャ間の依存関係や，ピクチャを間引くことによる時間解像度，すなわち再生動画像における動きのなめらかさの劣化について考慮しなければならない．

3.1 節で述べたとおり，I ピクチャは GoP 内の残る全てのピクチャによって直接的，あるいは間接的に参照されるため，I ピクチャを棄却すると GoP 全体の復号化が困難となり，復号できたとしても動画品質が著しく劣化する．P ピクチャも同様に後続の P ピクチャや前後の B ピクチャに参照されるため，棄却による画質劣化を引き起こす．一方で B ピクチャは前後の I または P ピクチャからの予測符号化を行うが，それ自身は他から参照ピクチャとして用いられないため，いずれの B ピクチャを棄却しても画質には影響を与えない．したがって，フレーム棄却フィルタでは，まず GoP 内の B ピクチャをバランスよく棄却し，さらに P ピクチャを参照順を考慮して GoP の最後から順に棄却していくのがよいと考えられる [6]．

#### 4.2 ローパスフィルタ

ローパスフィルタは，ブロックをエントロピ復号化することで得られるラン-レベル表現された量子化 DCT 係数のうち，周波数の高い成分を削除することによって動画品質を調整する．したがって DCT 係数の棄却順はスキャン方法 (図 6) に依存する．図 7 の領域 D では量子化 DCT 係数がゼロ係数の個数 (ラン) と非ゼロ係数 (レベル) の対で表されているた

ローパスパラメータ = 54

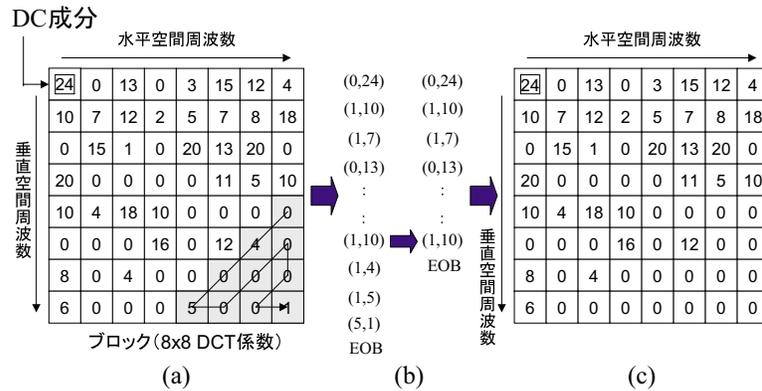


図 8: ローパスフィルタの適用例

め、目標とする個数に応じて量子化 DCT 係数を削除することができる。ローパスフィルタは符号化データのうち画質に与える影響の少ない高周波成分を削除することにより、動画再生の滑らかさを失うことなくデータ量を減らすことができるが、フレーム棄却フィルタと比較して処理遅延や処理負荷が大きくなる。

図 8 にジグザグスキャンされたブロックにおけるローパスフィルタの適用例を示す。図 8(a) に示されたイントラ符号化されたあるブロックにおける量子化 DCT 係数の並びはラン-レベル符号化され、図 8(b) が得られる。例えばローパスフィルタのパラメータとして 54 が与えられた場合、フィルタは 64 個ある量子化 DCT 係数より 10 個を削除する (図 8(a) 中網かけ部)。連続するゼロ係数の個数と続く非ゼロ係数の値を用いるラン-レベル表現ではそれぞれの項が (ラン+1) 個の量子化 DCT 係数に対応するため、これを適当な数だけ削除し、それ以降の係数がゼロであることを示す EOB (End of Block) 符号に置き換えればよい。ローパスフィルタを適用することにより、図 8(a) のブロックは図 8(c) のようになる。ただし、イントラ符号化されたブロックの左上隅に位置する DC 成分についてはこれを棄却しない。一方、非イントラブロックはすべての量子化 DCT 係数が失われる場合があり、その際はブロックがないことを示す情報を設定する。

### 4.3 再量子化フィルタ

再量子化フィルタはブロックをエントロピ復号化、ラン-レベル復号化、逆量子化することにより得られた DCT 係数をより高い度合いで量子化し、動画品質を調整するものである。再量子化フィルタはローパスフィルタと同様に時間解像度を保ちつつ、量子化によりゼロ係数を増やすことでラン-レベル符号化によるデータ量圧縮を実現する。ただし、復号化、

再復号化処理が多く、3つのフィルタ中最も多く処理時間とCPU処理を要する。

再量子化ではラン-レベル復号化により得られた量子化DCT係数に対し、マクロブロックごとに設定された量子化スケールをかけあわせて逆量子化する。その後、量子化スケールをフィルタパラメータとして指定された分だけ大きくし、これでDCT係数を除算することにより再量子化データを得る(図9)。ただし、ローパスフィルタと同様、イントラブロックのDC成分はフィルタの適用外とし、非イントラブロックではブロック全体が失われる場合がある。

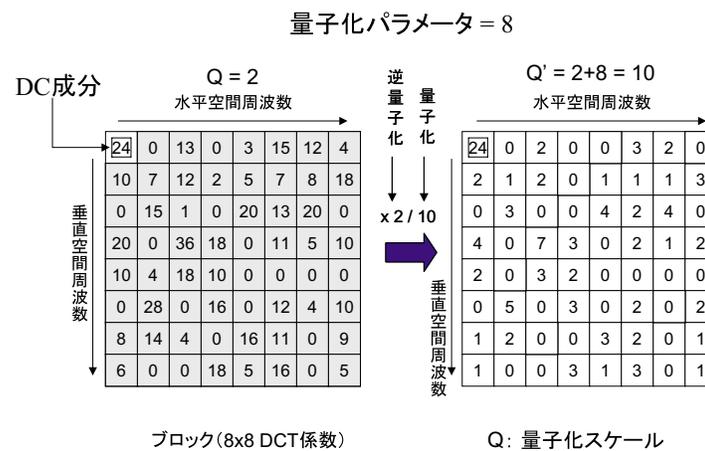


図 9: 再量子化フィルタの適用例

## 5 実時間動画像マルチキャストにおける目標レートに応じた動画像品質調整

アクティブノードにおいて下流のノードやクライアントの要求品質，利用可能な帯域に応じた動画像データを転送するためには，それぞれの動画像フィルタリング手法について与えられた目標レートを考慮した動画像品質調整を行わなければならない．例えば，符号化パラメータとして与えられた設定レートに従って MPEG-2 動画像符号化を行う Test Model 5 (TM5) 方式では，仮想的なバッファの動画像データ蓄積量に応じて量子化スケールを動的に変更し，GoP ごとの平均レートが目標レートに合致するようレート制御を行う [10]．アクティブノードに TM5 を実装すれば，高精度なレート調整が可能となるが，プログラムサイズが大きく，またレート調整のためには MPEG 動画像を完全に復号化した後，再符号化しなければならないため，実時間動画像マルチキャストのための動画像品質調整アルゴリズムとしては不相当である．そこで本章では先に述べた 3 つのフィルタリング手法について，動画像品質をそれほど劣化させることなく与えられた目標レートを達成するための，動画像品質調整にもとづくレート調整アルゴリズムについて検討する．ただし，MPEG-2 動画像データの構造を考慮して，レート調整の単位を TM5 と同様に GoP とする．また，動画像符号化パラメータである GoP サイズ  $N$ ，GoP 内の I および P ピクチャの間隔  $M$  や，動画像データの先頭に位置する GoP のデータサイズと GoP 内の各ピクチャのサイズはあらかじめサーバからアクティブノードに通知されているものとする．

### 5.1 GoP データの予測

GoP を単位として目標レートを達成するには，アクティブノードで受信した GoP データ全体をバッファリングし，データサイズを求め，適切に設定したフィルタパラメータを用いて動画像品質を調整すればよい．しかしながら，実時間動画像マルチキャスト通信を実現するためには，アクティブノードは受信したパケットごとにフィルタ処理を施し，次段のノードに転送しなければならない (図 3)．したがって，アクティブノードでは受信したパケットの属する GoP やピクチャのサイズを適切に予測することが必要となる．本節では GoP，ピクチャ，GoP ヘッダのサイズを予測するアルゴリズムをいくつか提案し，実際の動画像データを用いてその有効性を評価する．ただし，動画像データとしては，TM5 などのレート制御符号化アルゴリズムを用いて生成された CBR (Constant Bit Rate) 画像と固定の量子化スケールを用いて符号化する VBR (Variable Bit Rate) 画像を用いる．

#### 5.1.1 GoP サイズの予測

MPEG-2 動画像データのサイズ変動の予測手法についてはいくつかの提案がなされているが [11, 12]，ここでは実装の容易さから指数移動平均法を用いるものとする．GoP サイズ

の予測式として，過去の予測値と直前の GoP サイズのいずれを重視するかによって異なる 2 通りについて考える．

- 予測式 1

$$GoP\_predict_i = \frac{7}{8}GoP\_predict_{i-1} + \frac{1}{8}GoP\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (1)$$

- 予測式 2

$$GoP\_predict_i = \frac{1}{8}GoP\_predict_{i-1} + \frac{7}{8}GoP\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (2)$$

ただし， $GoP\_size_i$  (bit) は  $i$  番目の GoP サイズの実測値， $GoP\_predict_i$  (bit) は  $i - 1$  番目の GoP サイズの予測値を表す．また， $GoP\_predict_1 = GoP\_size_0$  とする．

CBR 画像 (hamasaki-1)，VBR 画像 (utada-8，rocket-6e) に対して予測式 1，2 をそれぞれ適用した場合の実サイズと予測値の関係を図 10，11 に示す．図 10 より，CBR 画像では予測式による差はほとんどない．一方，図 11 より，予測式 2 の方が VBR 画像の GoP サイズ変動をよりよく反映した予測が行えていると考えられ，予測値と実測値についての平均二乗誤差も例えばシーケンス utada-8 では，予測式 1 では  $0.5 \text{ (Mbit}^2\text{)}$  に対し予測式 2 では  $0.3 \text{ (Mbit}^2\text{)}$  と小さくなる．しかしながら，予測式 2 は直前の GoP から急激にサイズが変化した場合には，予測値と実測値に大きな差が生じる．そこで，6 章で両方の予測式を用いた比較評価を行い，より適切なものを選択する．

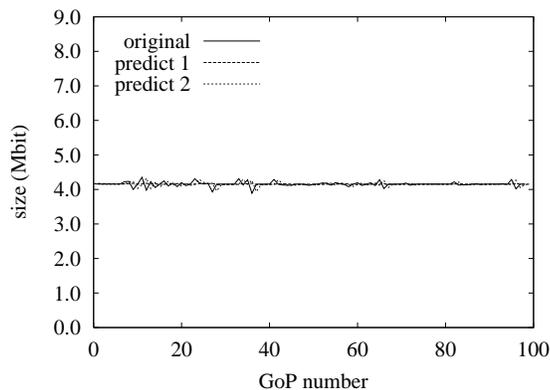


図 10: CBR 画像における GoP サイズの予測 (hamasaki-1)

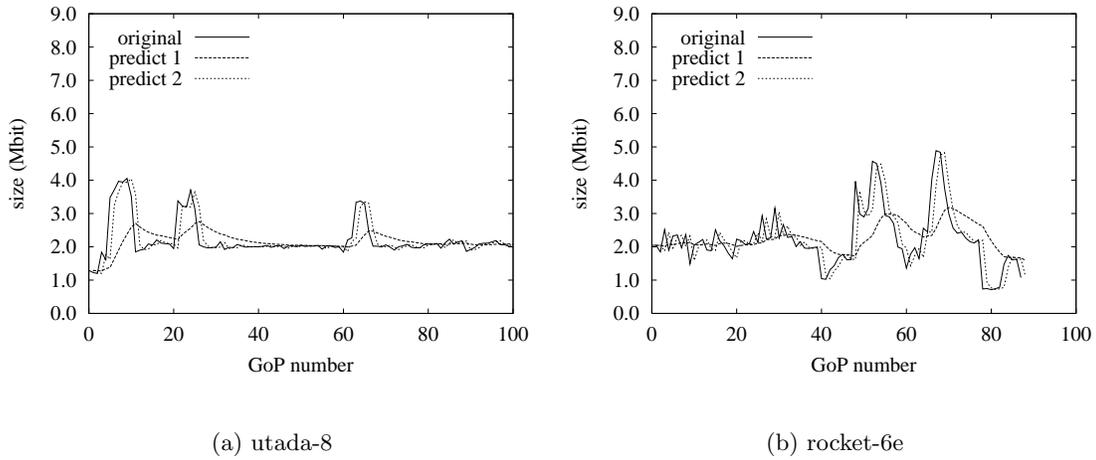


図 11: VBR 画像における GoP サイズの予測 (utada-8 , rocket-6e)

### 5.1.2 ピクチャサイズの予測

フレーム棄却フィルタでは適切な枚数のピクチャを棄却することにより所望の目標レートを達成するため、GoP を構成する各ピクチャのサイズを予測しなければならない。ピクチャサイズの予測手法としては GoP と同様に次の 2 種類について検討する。ピクチャタイプ間のサイズの違いは非常に大きいいため、ピクチャタイプごとに予測を行う。

- 予測式 1

$$I\_predict_i = \frac{7}{8}I\_predict_{i-1} + \frac{1}{8}I\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (3)$$

$$P\_predict_i = \frac{7}{8}P\_predict_{i-1} + \frac{1}{8}P\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (4)$$

$$B\_predict_i = \frac{7}{8}B\_predict_{i-1} + \frac{1}{8}B\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (5)$$

- 予測式 2

$$I\_predict_i = \frac{1}{8}I\_predict_{i-1} + \frac{7}{8}I\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (6)$$

$$P\_predict_i = \frac{1}{8}P\_predict_{i-1} + \frac{7}{8}P\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (7)$$

$$B\_predict_i = \frac{1}{8}B\_predict_{i-1} + \frac{7}{8}B\_size_{i-1}, i \geq 2 \quad (8)$$

ただし、 $I\_predict_i$ 、 $P\_predict_i$ 、 $B\_predict_i$  (bit) はそれぞれ  $i - 1$  番目までのピクチャサイズの予測値、 $I\_size_j$ 、 $P\_size_j$ 、 $B\_size_j$  (bit,  $0 \leq j \leq i - 1$ ) から導出される  $i$  番目の

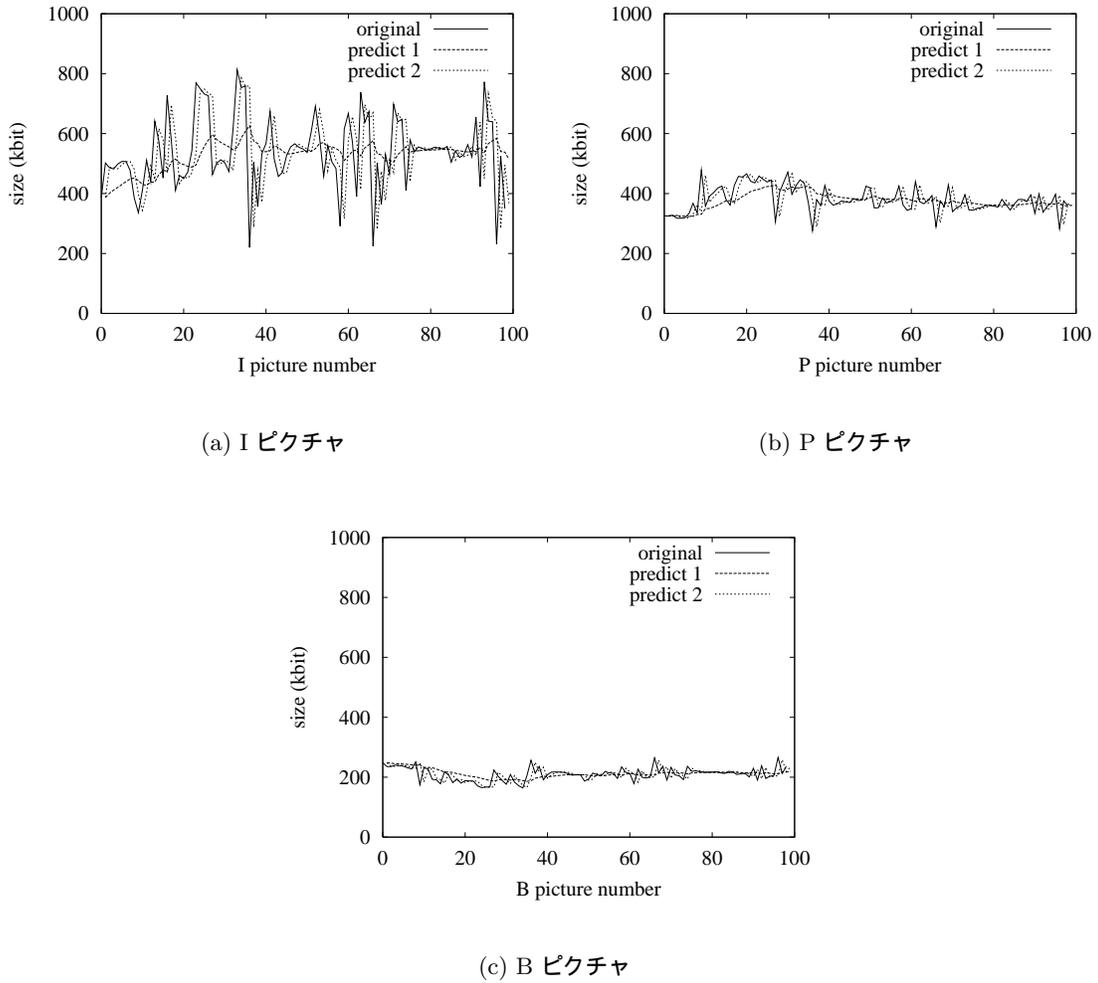
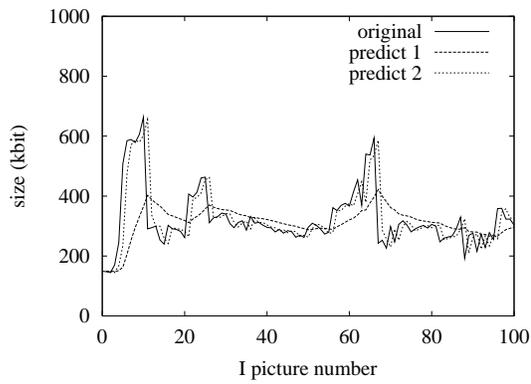


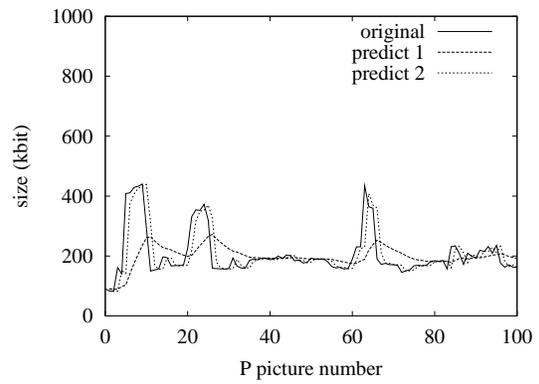
図 12: CBR 画像におけるピクチャサイズの予測 (hamasaki-1)

$I$ ,  $P$ ,  $B$  ピクチャの予測値を表す。また,  $I\_predict_1 = I\_size_0$ ,  $P\_predict_1 = P\_size_0$ ,  $B\_predict_1 = B\_size_0$  である。

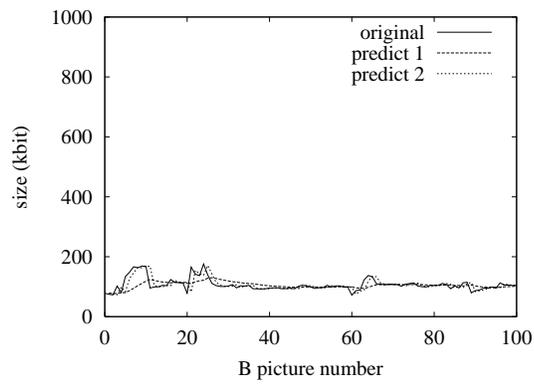
CBR 画像 (hamasaki-1) に対する結果を図 12 に, VBR 画像 (utada-8, rocket-6e) に対する結果を図 13, 14 にそれぞれ示す。ピクチャサイズは符号化アルゴリズムによらず変動が大きい, 予測式 1 では GoP サイズに適用した場合と同様に, 予測式 1 ではピクチャサイズの中, 長期的な変動が, 予測式 2 では短期的な変動が予測値に表れている。ピクチャサイズの予測式についても 6 章で比較評価を行う。



(a) I ピクチャ

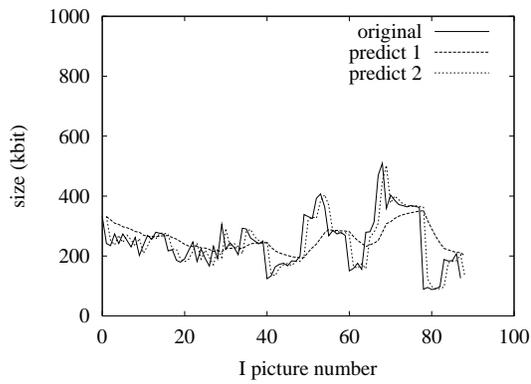


(b) P ピクチャ

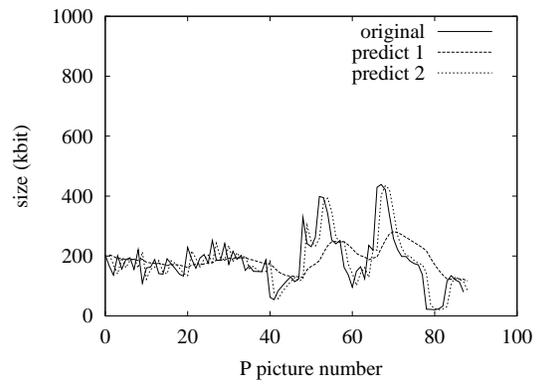


(c) B ピクチャ

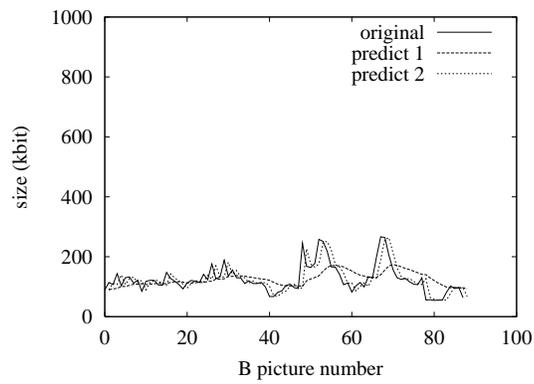
図 13: VBR 画像におけるピクチャサイズの予測 (utada-8)



(a) I ピクチャ



(b) P ピクチャ



(c) B ピクチャ

図 14: VBR 画像におけるピクチャサイズ予測 (rocket-6e)

### 5.1.3 GoP 内ヘッダサイズの予測

ローパスフィルタや再量子化フィルタは，予測値にもとづいて符号化データである DCT 係数に対する削除，圧縮処理を行うことによりデータ量を調整する．このようなフィルタ処理の対象外である GoP，ピクチャ，スライス，マクロブロックごとのヘッダ情報の GoP サイズに占める割合は大きいいため，レート調整に際してはあらかじめ GoP サイズの予測値から GoP 内のヘッダサイズの予測値を差し引いた値にもとづいてフィルタパラメータを設定しなければならない．GoP 内ヘッダサイズはほぼ一定で，動画像を通して大きな変化はないため， $i$  番目の GoP 内ヘッダサイズの予測値  $Header\_predict_i$  (bit) は直前の GoP 内ヘッダサイズの実測値  $Header\_size_{i-1}$  (bit) から下式で与えられるものとする．

$$Header\_predict_i = Header\_size_{i-1}, i \geq 1 \quad (9)$$

### 5.2 フレーム棄却フィルタにおけるレート調整

フレーム棄却フィルタは，先に述べた GoP サイズ，ピクチャサイズの予測手法により導出された予測値と目標レートにもとづいて，ピクチャを選択的に棄却することによりレート調整を実現するものである．ただし，いずれのフィルタにおいても，動画像ビットレートを与えられた目標レートに一致させることを目的とするのではなく，動画像データ全体のサイズを適当な比率で圧縮することにより，平均レートを目標レートにあわせるレート調整制御を行う．したがって，VBR 画像を CBR 画像に変換するようなレート調整は行われない．

フレーム棄却フィルタでは，まずサーバから指定された目標レート  $Target\_rate$  (bit) より  $i$  番目の GoP への割当ビット数  $Target\_bit_i$  (bit) を算出する．ただし，動画像トラヒックの平均レートが目標レートと一致するよう，過去のレート調整において生じた調整ビット数  $adjust\_bit_i$  (bit) と GoP 内ヘッダサイズの予測値  $Header\_predict_i$  (bit) を減ずる．

$$Target\_bit_i = \frac{Target\_rate \times N}{frame\_rate} - adjust\_bit_i - Header\_predict_i \quad (10)$$

次に，GoP サイズの予測値よりヘッダサイズの予測値を差し引いたもので割当ビット数を除算したものが，GoP の圧縮率  $GoP\_ratio_i$  となる．

$$GoP\_ratio_i = \frac{Target\_bit_i}{GoP\_predict_i - Header\_predict_i} \quad (11)$$

次に，目標となる圧縮率を達成するために必要なピクチャの棄却枚数を求める．まず， $B$  ピクチャの棄却枚数  $Bdrop_i$  を次式により導出する．

$$Bdrop_i = \min\left(N - \frac{N}{M}, \left\lceil \frac{(GoP\_predict_i - Header\_predict_i) - Target\_bit_i}{B\_predict_i} \right\rceil\right) \quad (12)$$

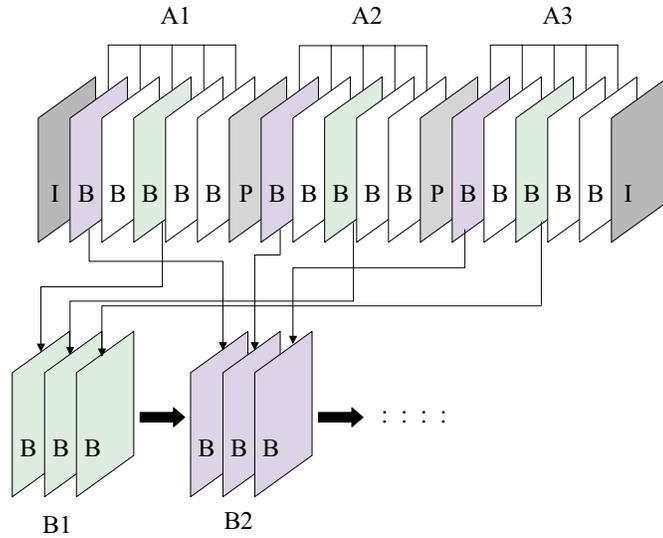


図 15: A グループ, B グループの形成例

すべての B ピクチャを棄却しても圧縮率が達成できない場合には, P ピクチャも棄却する. P ピクチャの棄却枚数  $Pdrop_i$  を次式により導出する.

$$Pdrop_i = \min\left(\frac{N}{M} - 1, \left\lceil \frac{(GoP\_predict_i - B\_predict_i \times Bdrop_i - Header\_predict_i) - Target\_bit_i}{P\_predict_i} \right\rceil\right) \quad (13)$$

ただし, 全ての B, P ピクチャを棄却しても圧縮率を達成できない場合にも, 滑らかな動画再生を行うため I ピクチャは棄却しない.

次に棄却する B ピクチャの位置を求める. GoP 内で B ピクチャをバランスよく棄却するためのアルゴリズムを提案する. まず, 2 枚の I あるいは P ピクチャに挟まれた B ピクチャの集合をひとまとまりのグループとし, これを A グループと呼ぶ. それぞれの A グループ内での B ピクチャ棄却順を後述する棄却ピクチャ選択アルゴリズムにもとづき決定する. GoP 内の全 A グループより, 棄却順ごとに B ピクチャを取り出し集合を形成する. これを B グループと呼び, それぞれ  $\frac{N}{M}$  枚の B ピクチャを含む  $M - 1$  の B グループが得られる. B グループ内のピクチャは時間順に並べられる. A グループ, B グループが形成される様子を図 15 に示す.  $Bdrop_i$  に達するまで棄却順にしたがって B グループを選択し, ピクチャを棄却していく. ただし, グループ内のピクチャ棄却順についても棄却ピクチャ選択アルゴリズムに従うものとする. すべての B ピクチャを棄却しても所望の棄却枚数に達しない場合は, GoP 内の後ろの P ピクチャから順に棄却する.

#### 棄却ピクチャ選択アルゴリズム

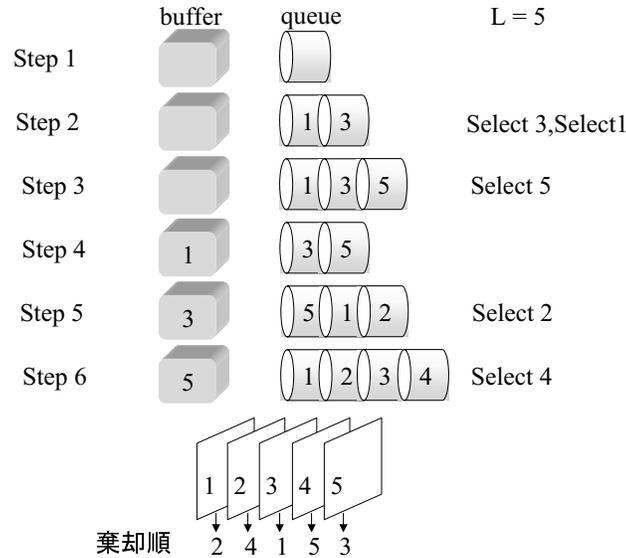


図 16: 棄却ピクチャ選択アルゴリズムの動作例

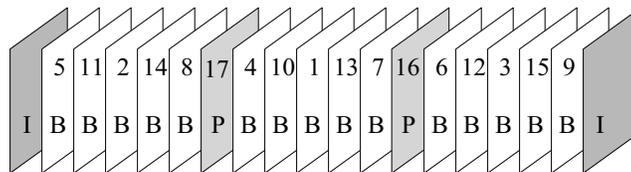


図 17: ピクチャの棄却順序

グループ内のピクチャ棄却順は以下のアルゴリズムにもとづいて決定される．ここではグループ内のピクチャ枚数を  $L$  とする (A グループの場合は  $L = M - 1$  , B グループの場合は  $L = \frac{N}{M}$ ) . また , アルゴリズムでは FIFO (First In First Out) キューと , バッファをそれぞれ一つずつ用いる . 図 16 に  $L = 5$  とした場合のアルゴリズムの動作例を示す .

初期状態ではキュー , バッファともに空である (Step 1) . まず , グループの中央に位置する  $\frac{L}{2}$  番目のピクチャを棄却する . 本例ではピクチャ 3 が選ばれる . 続いて先頭のピクチャ 1 が選択される . 同時に棄却状態を保持するためのキューに  $1, \frac{L}{2}$  の順でピクチャ番号を格納する (Step 2) . 次に  $L$  を棄却し , キューにピクチャ番号を格納する (Step 3) . 続けてキューの先頭のピクチャ番号をとりだしてバッファに格納し (Step 4) , さらにキューよりピクチャ番号を取り出し , バッファに格納されたピクチャ番号との

平均をとり，これを次に棄却するピクチャ番号とする．したがって図 16 の例では  $\frac{1+3}{2}$  よりピクチャ 2 が選択される．その後，バッファ内のピクチャ番号と，棄却されたピクチャの番号がキューに，残るピクチャ番号がバッファにそれぞれ格納される (Step 5)．以下にキューとバッファを用いた同様の手順を繰り返す．

図 15 に示す GoP 構成での B ピクチャ，P ピクチャの棄却順序は図 17 のようになる．以上述べたアルゴリズムを用いてピクチャを選択的に棄却すれば目標ビットを達成するフレーム棄却フィルタが実現されることが考えられるが，実際には GoP，ピクチャサイズの予測誤差のため，フィルタ後の GoP サイズが割当ビット数を超過する可能性がある．そこで，動画像トラフィックの平均レートが目標レートに一致するように，調整誤差による過不足ビット数を続く 5 つの GoP に割り振る．GoP<sub>*i*</sub> に割り当てられる調整ビット数 *adjust\_bit<sub>j</sub>* は，過去 5GoP で発生した過不足ビット数より以下の式を用いて算出される．

$$adjust\_bit_i = \sum_{k=\max(0,i-5)}^{i-1} \frac{Target\_bit_i - filteredGoPsize_i}{5} \quad (14)$$

ただし，*filteredGoPsize<sub>i</sub>* はレート調整の結果生成された GoP<sub>*i*</sub> のサイズを表す．

### 5.3 ローパスフィルタにおけるレート調整

ローパスフィルタでは，1 ブロックあたり 64 個からなる DCT 係数を目標レートにしたがって削除することによりレート調整を行う．残す DCT 係数の個数 (ローパスパラメータ) は，DCT 係数の個数とデータサイズの関係，サイズの予測値にもとづくレート調整と調整結果との誤差などを考慮して動的に変更する．図 18 に符号化動画像データ (sliding-1) におけるローパスパラメータと GoP およびピクチャサイズの関係を示す．ただし，データサイズは DCT 係数を削除しない場合を 1 として正規化した値 (圧縮率と呼ぶ) で表す．図 18 において，ローパスパラメータがある値 (例えば 36) で急激に圧縮率が減少していることがわかる．これは，ジグザグスキャンまたはオルタネートスキャン順に並んだ DCT 係数のうち，垂直空間周波数，水平空間周波数が低いものが削除される個所で発生しており，これらの量子化 DCT 係数は他と比較して大きく，エントロピ符号化において長い符号語が割り当てられているためである．

図 18 から最小二乗近似により導出した以下の近似式を用いることで，所望の圧縮率を達成するためのローパスパラメータを設定することができる．式中，*l<sub>I</sub>* *l<sub>P</sub>* *l<sub>B</sub>* および *r<sub>I</sub>* *r<sub>P</sub>* *r<sub>B</sub>* はそれぞれ I, P, B ピクチャに適用されるローパスパラメータと圧縮率である．

$$l_I(r_I) = [-6.17329 + 59.7498r_I - 112.427r_I^2 + 111.905r_I^3] \quad (15)$$

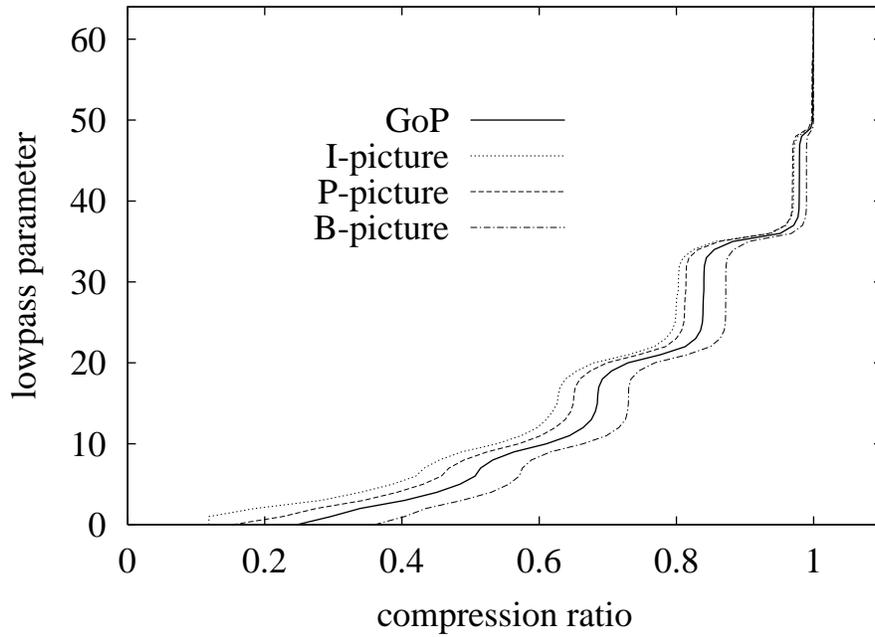


図 18: ローパスパラメータと圧縮率の関係

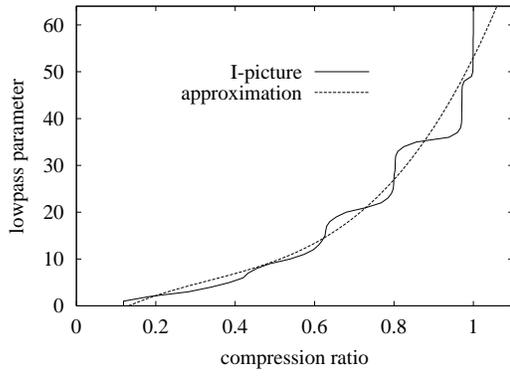
$$l_P(r_P) = [-11.8626 + 85.5488r_P - 159.667r_P^2 + 139.499r_P^3] \quad (16)$$

$$l_B(r_B) = [-71.9536 + 360.75r_B - 590.353r_B^2 + 353.265r_B^3] \quad (17)$$

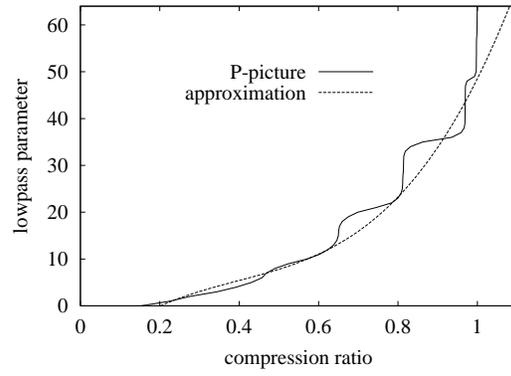
近似式と実際のデータとの比較結果を図 19 に示す．図に示されるとおり近似精度はそれほど高くない．また，対象とする動画データにより適切な近似式は異なる．しかしながら，式 (15) ~ (17) より導出されたローパスパラメータを初期値として用い，レート調整結果に応じてマクロブロック単位で動的にローパスパラメータを変更することにより，高い制御効果を得ることができる．

ローパスフィルタでも，まず式 (10)，(11) を用いて目標とする圧縮率  $GoP\_ratio_i$  を求める．GoP 中の全てのピクチャの圧縮率は GoP の圧縮率にしたがうものとし ( $r_I = r_P = r_B = GoP\_ratio$ )，式 (15) ~ (17) を用いてローパスパラメータの初期値を導出する．例えば  $GoP\_ratio_i = 0.5$  の場合，I ピクチャでは 17，P ピクチャでは 14，B ピクチャでは 7 となる．

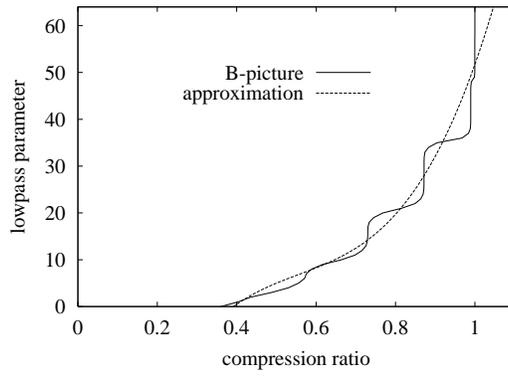
GoP サイズの予測誤差，ローパスパラメータ算出式の近似誤差による圧縮データ量の過



(a) I ピクチャ



(b) P ピクチャ



(c) B ピクチャ

図 19: ローパスパラメータ導出式の近似精度

不足を考慮し，マクロブロック単位でローパスパラメータを以下のように増減する．

$$l_j = \begin{cases} l_{j-1} - 1 & , \quad targetMB_{j-1} - filteredMB_{j-1} > 0 \\ l_{j-1} + 1 & , \quad targetMB_{j-1} - filteredMB_{j-1} < 0 \\ l_{j-1} & , \quad targetMB_{j-1} - filteredMB_{j-1} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

ただし， $l_j$  は  $j$  番目のマクロブロックに適用されるローパスパラメータ， $targetMB_j$  はフィルタ前のマクロブロックサイズ  $originalMB_j$  と GoP の圧縮率  $GoP\_ratio_i$  の積で表される目標マクロブロックサイズ， $filteredMB_j$  はフィルタリング後のマクロブロックサイズを表す．

最後に GoP 内の全てのピクチャに対するフィルタリング処理の終了後，フレーム棄却と同様に過不足ビット数を求め，続く GoP に割り振る調整ビット数を求める．

#### 5.4 再量子化フィルタにおけるレート調整

再量子化フィルタは目標レートと予測サイズにもとづいて，新たに適用する量子化スケールの増分 (量子化パラメータと呼ぶ) をマクロブロック単位で調整し，レート制御を行う．図 20 に，前節で用いた動画データ (sliding-1) における量子化パラメータと圧縮率の関係を示す．また，図 21 から得られる次の近似式による近似値と実測値との比較結果を図 21 に示す．ただし，近似を容易にするため， $x$  軸方向への移動を行っている．

$$q_I(r_I) = \left\lfloor -2.48863 + \frac{3.16293}{r_I} + \frac{0.0125172}{r_I^2} \right\rfloor \quad (19)$$

$$q_P(r_P) = \left\lfloor -8.04467 + \frac{3.00808}{r_P} + \frac{0.0413831}{r_P^2} \right\rfloor \quad (20)$$

$$q_B(r_B) = \left\lfloor -2.08088 + \frac{1.16466}{r_B} \right\rfloor \quad (21)$$

それぞれの式中， $q_I$ ， $q_P$ ， $q_B$  および  $r_I$ ， $r_P$ ， $r_B$  は I，P，B ピクチャに適用される量子化パラメータと圧縮率である．式 (19) ~ (21) を用いることにより圧縮率から量子化パラメータの初期値を決定し，ローパスフィルタと同様にマクロブロック単位で調整する．

再量子化フィルタでも他のフィルタリング手法と同様，まず  $GoP_i$  の圧縮率  $GoP\_ratio_i$  を求める．GoP 内のピクチャの圧縮率は  $GoP\_ratio_i$  で与えられ， $x$  軸方向の移動を考慮して， $r_I = GoP\_ratio_i - 0.1$ ， $r_P = GoP\_ratio_i - 0.13$ ， $r_B = GoP\_ratio_i - 0.35$  とする．例えば  $GoP\_ratio_i = 0.5$  の場合，I ピクチャでは 5，P ピクチャでは 8，B ピクチャでは 5 となる．

GoP サイズの予測誤差，量子化パラメータ算出式の近似誤差による圧縮データ量の過不足を考慮し，マクロブロック単位で量子化パラメータを以下のように増減する．

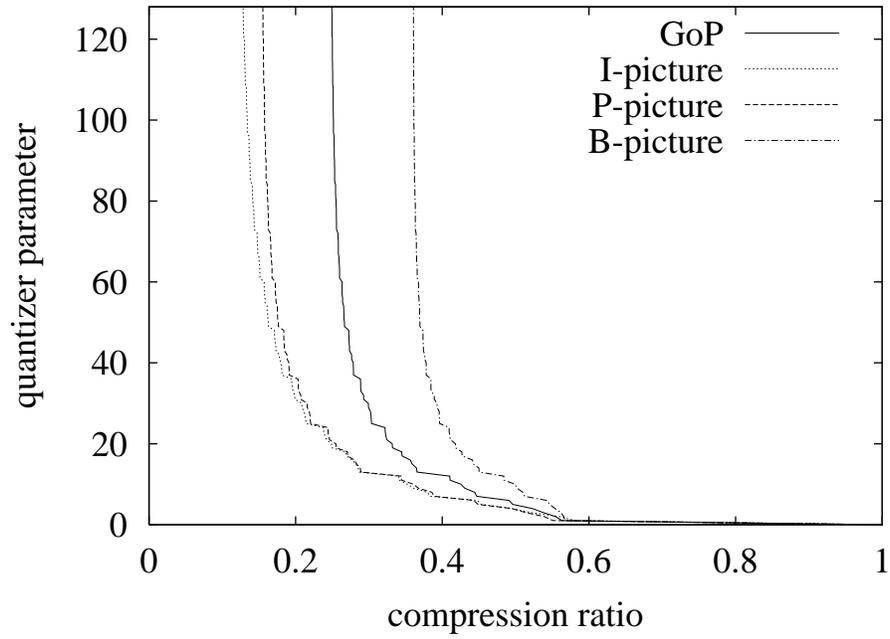
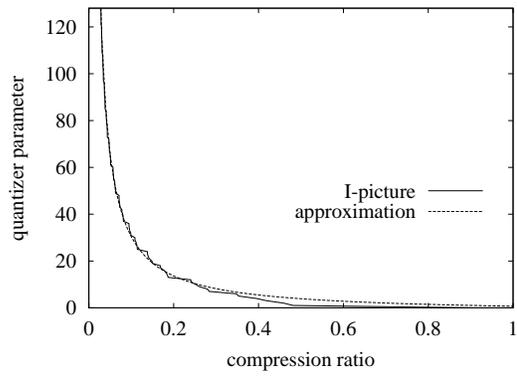


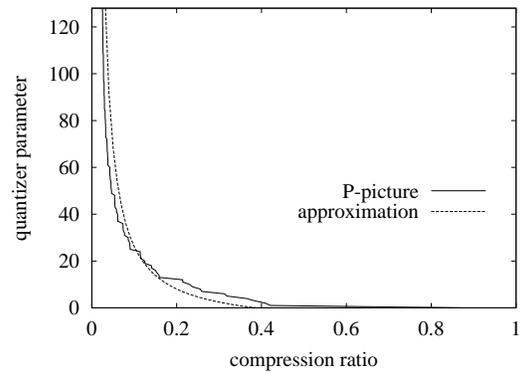
図 20: 量子化パラメータと圧縮率の関係

$$q_j = \begin{cases} q_{j-1} + 1 & , \text{ targetMB}_{j-1} - \text{filteredMB}_{j-1} > 0 \\ q_{j-1} - 1 & , \text{ targetMB}_{j-1} - \text{filteredMB}_{j-1} > 0 \\ q_{j-1} & , \text{ targetMB}_{j-1} - \text{filteredMB}_{j-1} > 0 \end{cases} \quad (22)$$

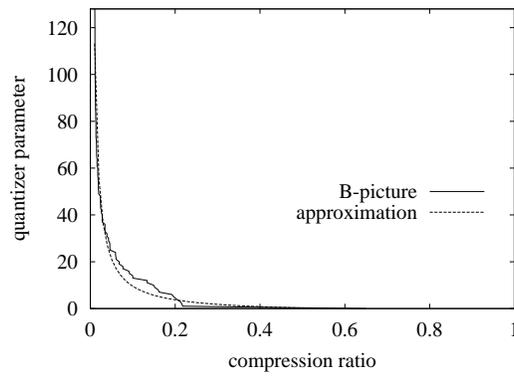
ただし,  $q_j$  は  $j$  番目のマクロブロックに適用される再量子化パラメータを表す. 最後に, 続く GoP に適用される調節ビット数を求める.



(a) I ピクチャ



(b) P ピクチャ



(c) B ピクチャ

図 21: 量子化パラメータ導出式の近似精度

## 6 フィルタリング手法の比較評価

本章では、フィルタリング処理を様々な動画データに適用し、動画品質やフレームレート、ビットレートの変化およびフィルタリング処理遅延について、比較評価を行う。評価に用いた動画データの特徴を表 1 および 2 に示す。いずれも画面解像度は  $720 \times 480$  画素、時間解像度 (フレームレート) は 30 fps (frame per sec)、GoP 内のピクチャ数  $N$  を 15、GoP 内の I, P ピクチャ間隔  $M$  を 3 とした。表中のビットレートには、CBR 画像の場合には符号化の際に用いた設定レートを、VBR 画像の場合には平均レートを示している。

それぞれの原画像データを、画面の複雑さと動きの激しさでおおまかに分類したものを図 22 に示す。sliding は比較的動きが少なく、sample の画面は平板であるが若干の動きがある。matrix-16, matrix-30 は映画内の特に動きの激しいアクションシーンから生成されたデータで、比較的複雑な画面が含まれる。音楽のプロモーションビデオから生成された hamasaki, kuraki, utada は、最も画面が複雑で、動きも激しい。中央に位置する matrix-29, rocket はいずれも映画の 1 部分からなり、平均的な特性を有している。このように様々な特徴の異なる動画を対象とした評価を行うことにより、フィルタリング手法の適用範囲や有効性を明らかにする。

また、5 章で述べた GoP、ピクチャサイズの予測式の比較評価もあわせて行う。CBR 画像においては GoP のサイズ変動がほとんどないため、図 10 に示されるように予測式間の差は小さい。そのため、ローパスフィルタ、再量子化フィルタについては予測式 1 を用いて GoP サイズを予測するものとする。

表 1: 評価用動画像データの特徴 その 1

原画像名	ビットレート	GOP の数	構成	内容
sample-1	4Mbps	30	CBR	様々なフルーツの紹介
sample-2	8Mbps	30	CBR	会話
sliding-1	8Mbps	30	CBR	会話
sliding-2	8Mbps	30	CBR	会話
sliding-5	8Mbps	30	CBR	魚が泳いでいる
matrix-16	8Mbps	50	CBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16b	6Mbps	50	CBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16c	4Mbps	50	CBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16d	2Mbps	50	CBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16e	1Mbps	50	CBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16f	8.2Mbps	50	VBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-16g	4.1Mbps	50	VBR	空手 (映画: マトリックスの一部)
matrix-29	8Mbps	50	CBR	銃撃 (映画: マトリックスの一部)
matrix-29b	4Mbps	50	CBR	銃撃 (映画: マトリックスの一部)
matrix-29c	1Mbps	50	CBR	銃撃 (映画: マトリックスの一部)
matrix-29d	8.3Mbps	50	VBR	銃撃 (映画: マトリックスの一部)
matrix-30	8Mbps	50	CBR	一騎打ち (映画: マトリックスの一部)
matrix-30b	4Mbps	50	CBR	一騎打ち (映画: マトリックスの一部)
matrix-30c	1Mbps	50	CBR	一騎打ち (映画: マトリックスの一部)
matrix-30d	6.3Mbps	50	VBR	一騎打ち (映画: マトリックスの一部)
matrix-30e	4.4Mbps	50	VBR	一騎打ち (映画: マトリックスの一部)
rocket-10d	8.4Mbps	50	VBR	ロケット騒動 (映画: ロケッティアの一部)
rocket-10e	4.1Mbps	50	VBR	ロケット騒動 (映画: ロケッティアの一部)
rocket-6d	8.4Mbps	50	VBR	ロケット発射 (映画: ロケッティアの一部)
rocket-6e	4.4Mbps	50	VBR	ロケット発射 (映画: ロケッティアの一部)

表 2: 評価用動画データの特徴 その 2

原画像名	ビットレート	GOP の数	構成	内容
kuraki-1	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-2	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-3	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-4	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-5	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-6	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
kuraki-7	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
hamasaki-1	8.3Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
hamasaki-2	8Mbps	50	CBR	プロモーションビデオ
utada-8	4.3Mbps	50	VBR	コンサート

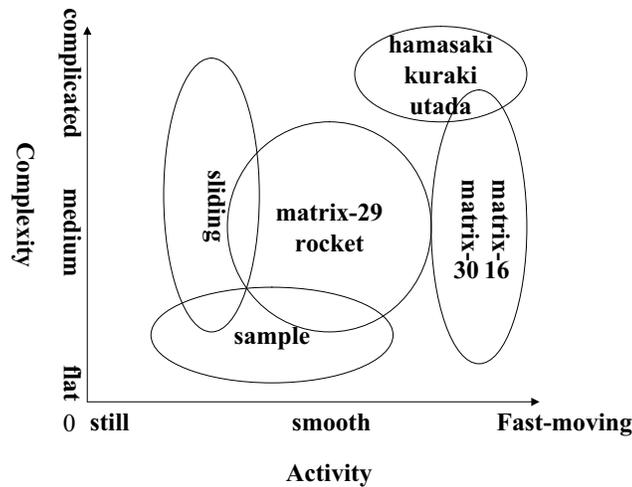


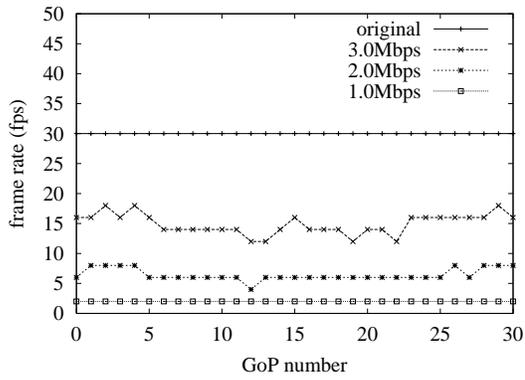
図 22: 評価用動画データの分類

### 6.1 目標レートに対するフレームレートの変化

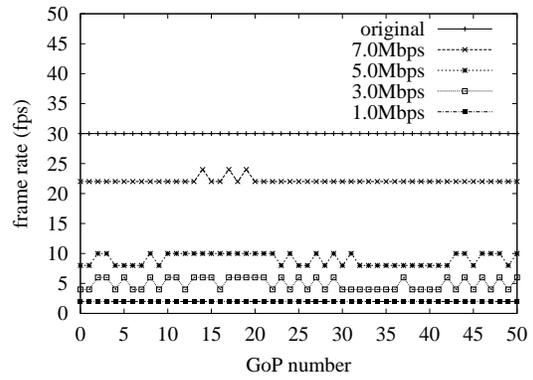
本節では CBR, VBR 画像を対象に, フレーム棄却フィルタにより, 動画のフレームレートが目標レートに応じてどのように変化するかについて評価する.

CBR 画像に対して GoP, ピクチャサイズの予測にそれぞれ予測式 1 を用いてフレーム棄却を行った際の目標レートとフレームレートの関係を図 23 に, 予測式 2 を用いた場合の結

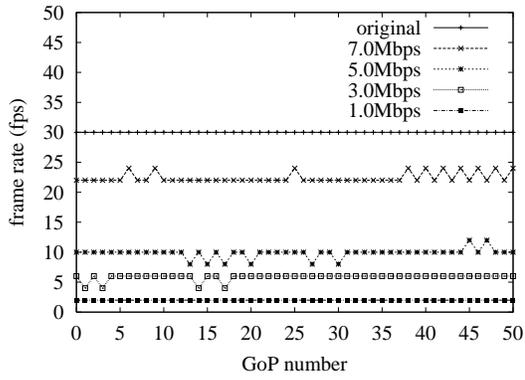
果を図 24 に、また VBR 画像に適用した場合の結果をそれぞれ図 25、26 に示す。図 23 より、CBR 画像において若干のフレームレートの変動がみられるものの、どの目標レート、動画像についてもおおむね安定した滑らかさの動画像を提供できることがわかる。一方、図 25 に示されるとおり VBR 画像ではフレームレートの変動が大きくなる。これは、量子化スケールを固定して符号化を行う VBR 画像では、シーンの複雑さによって生成される動画像データサイズが大きく異なるため、適切なピクチャ数が変化することによる。また、図 23 と図 24、図 25 と図 26 をそれぞれ比較することにより、GoP、ピクチャサイズの予測には中長期的なデータサイズの変動にもとづく予測式 1 を用いる方がより安定した動画像を生成可能であることがわかる。ただし、ここではフレームレートが 30fps であるのに対し、GoP のピクチャ枚数  $N$  を 15 としているため、I ピクチャを除く全てのピクチャを棄却したとしてもフレーム棄却フィルタにより達成されるフレームレートの下限は 2fps となる。



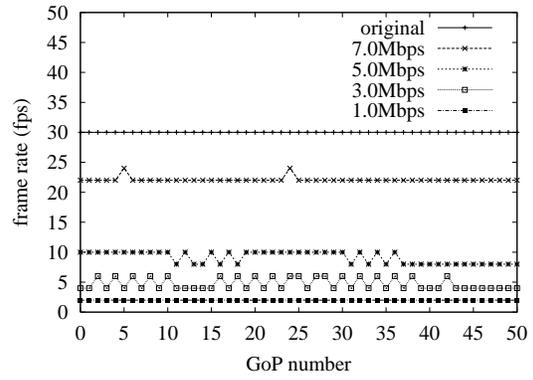
(a) sample-1



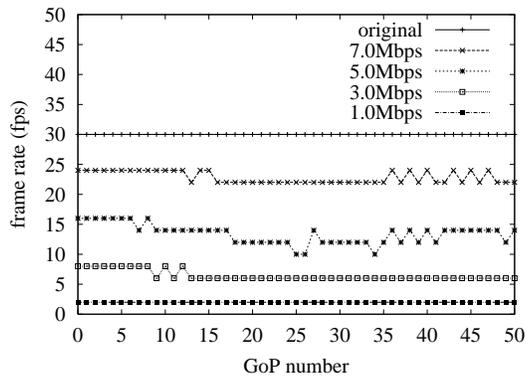
(b) matrix-16



(c) matrix-30

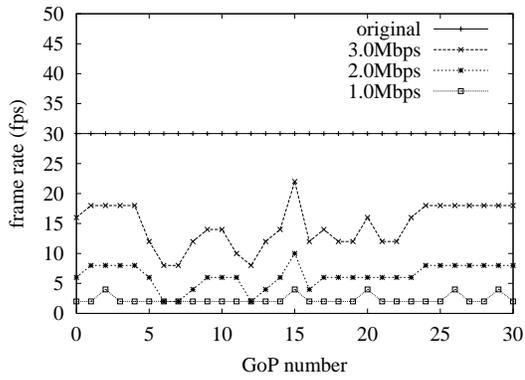


(d) sliding-1

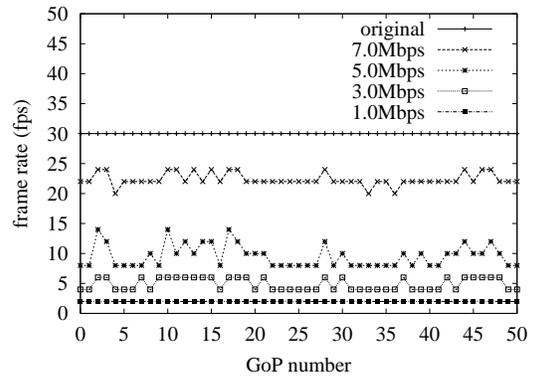


(e) hamasaki-1

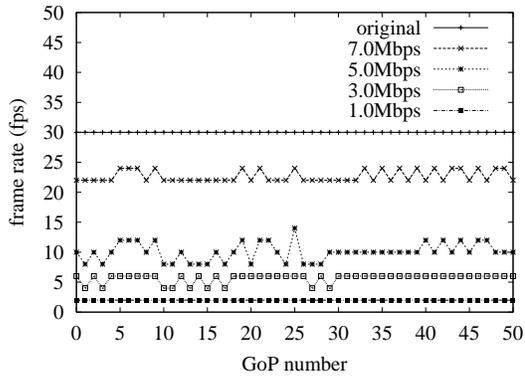
図 23: フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 1, CBR 画像)



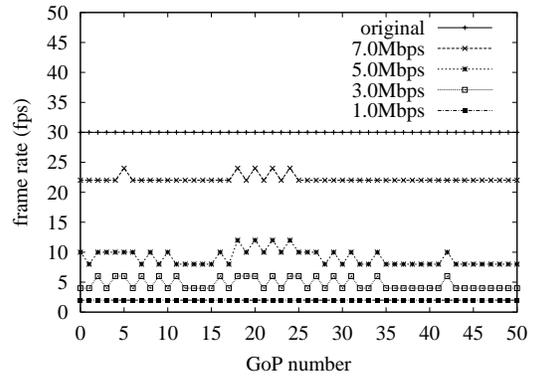
(a) sample-1



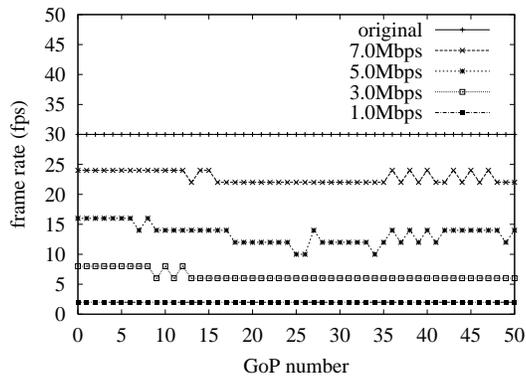
(b) matrix-16



(c) matrix-30

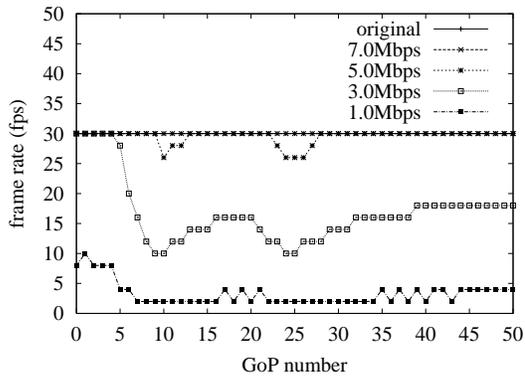


(d) sliding-1

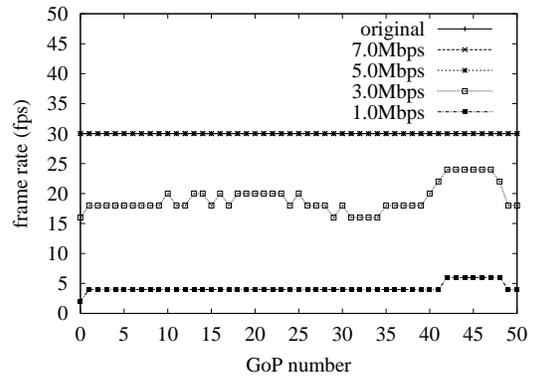


(e) hamasaki-1

図 24: フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 2, CBR 画像)

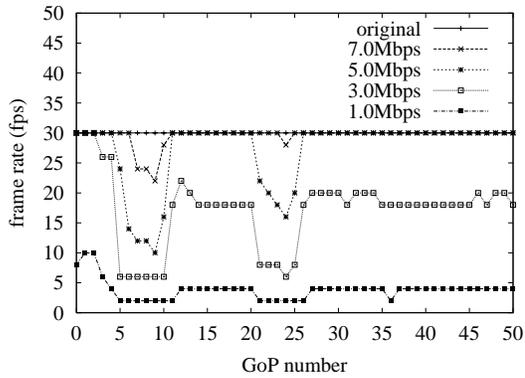


(a) utada-8

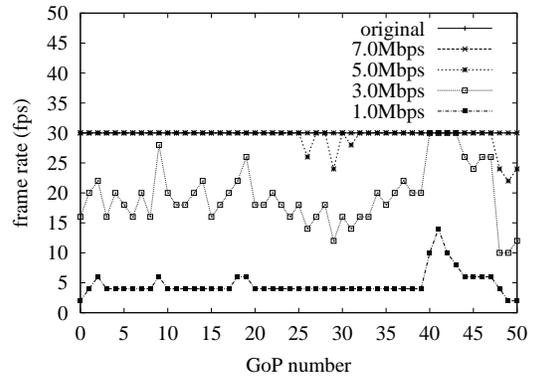


(b) rocket-6e

図 25: フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 1, VBR 画像)



(a) utada-8



(b) rocket-6e

図 26: フレーム棄却フィルタにおけるフレームレートの変動 (予測式 2, VBR 画像)

## 6.2 目標レートに対するビットレートの変化

本節では CBR 画像，VBR 画像を対象にフレーム棄却，ローパス，再量子化フィルタを適用した動画像のビットレートに関する評価を行う。

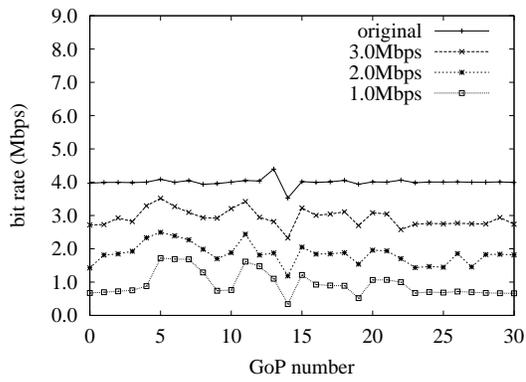
前節と同様に，CBR 画像，VBR 画像に対して予測式 1 および 2 を用いてフレーム棄却フィルタによるレート調整を行った結果を図 27～30 に示す。予測式によらず，VBR 画像よりも CBR 画像の方がよく目標レートを達成している。しかしながらフレーム棄却フィルタではピクチャ単位とした制御を行うため，レート調整の柔軟性に欠け，レート変動は大きい。また，先に述べたとおり，フレームレートに下限があるため，レート調整能力には限界がある。例えば GoP 内ピクチャ枚数  $N$  を大きくすれば，GoP に占める I ピクチャのデータサイズの割合が小さくなり，より低いビットレートへの対応も可能となるが，I ピクチャ間の距離が広がると P，B ピクチャで用いられる予測符号化の効率が低くなるため，動画像品質の劣化や P，B ピクチャサイズの増大を招く。動画像 utada-8 で顕著にみられるように，GoP サイズが急激に変化した際には，予測式 1 では緩やかに動画像レートが目標レートに近づくのに対し (図 29(a))，予測式 2 では即座に適切なレート調整が行えていることがわかる (図 30(a))。ただし，6.1 節で述べたとおり，予測式 2 では GoP 間のフレームレート変動が大きいため，再生動画像品質に与える影響について考慮する必要がある。

次にローパスフィルタの適用結果を図 31～33 に示す。図より，マクロブロックを単位としたレート調整により，フレーム棄却フィルタと比較してより柔軟にレートが調整され，GoP 間のレート変動も小さいことがわかる。ただし，4.2 節で述べたとおり DC 成分などフィルタ処理の対象としないデータがあるため，達成できる圧縮率に限界があり，1Mbps の目標レートを達成できない動画像が多い。また，フレーム棄却フィルタと同様に予測式 2 の方がデータサイズの変化に敏感である。

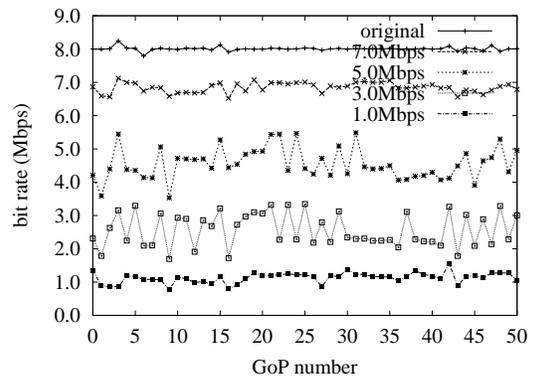
最後に再量子化フィルタの適用結果を図 34～36 に示す。目標レートにあわせて再量子化された動画像のレート変動はローパスフィルタよりも大きい。これは図 18 と図 21 に示されるとおり，特に圧縮率が高い領域においては，フィルタパラメータあたりの圧縮率変化量が再量子化フィルタの方が大きいためである。ローパスフィルタと同様に，再量子化フィルタでも処理対象でないデータがあるため，達成できるレートに下限がある。

以上より，動画像の種類，符号化アルゴリズムによらず，目標レートに応じた動画像品質調整による動画像レート制御としては，フレーム棄却フィルタ，再量子化フィルタ，ローパスフィルタの順で性能が高いといえる。また，GoP，ピクチャサイズの予測には直前のサイズをより重視する予測式 2 を用いることにより急激にデータサイズが変化した場合にもすばやく目標レートを達成するフィルタパラメータ設定が行える。しかしながら，圧縮率の変動にともなって再生画像品質が GoP 間で大きく変化することが予想される。例えば図

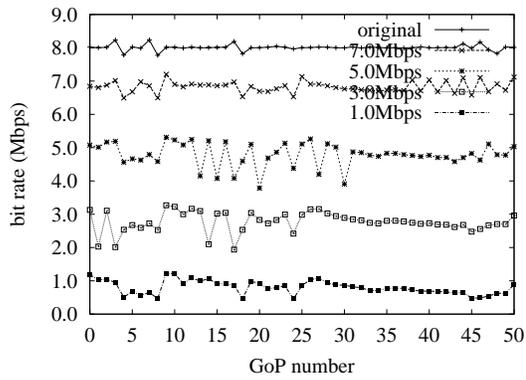
32(a) と図 35(a) では目標レート 2Mbps に対する平均動画像レートがそれぞれ 2.045Mbps , 2.047Mbps であり , 動画像全体でみた場合のレート調整の効果は , 予測式によらずほぼ同じであるといえる . したがって予想される動画像品質の変動や急激なレート調整がネットワークに与える影響を考慮すると緩やかにレート制御を行う予測式 1 を用いるのがよいと考えられる . ただし , 動画像品質については 6.4 節で評価する .



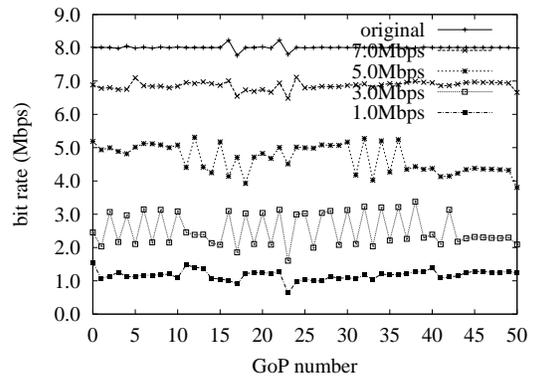
(a) sample-1



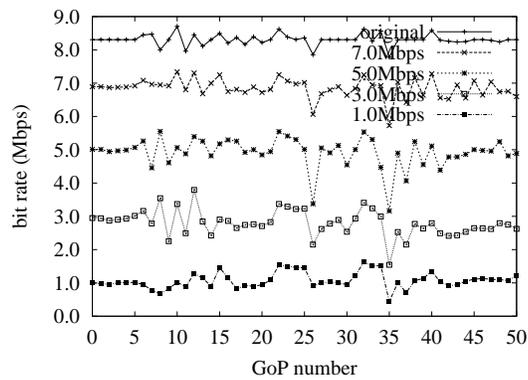
(b) matrix-16



(c) matrix-30

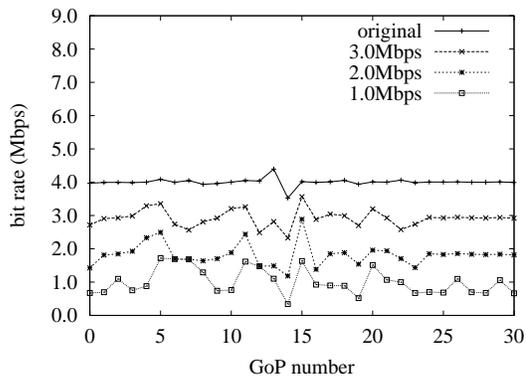


(d) sliding-1

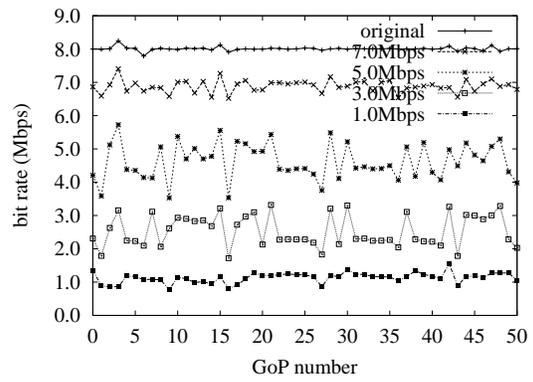


(e) hamasaki-1

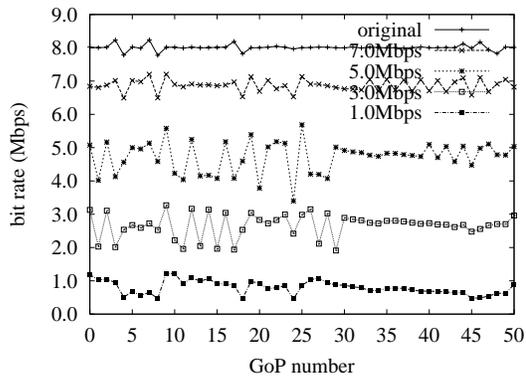
図 27: フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, CBR 画像)



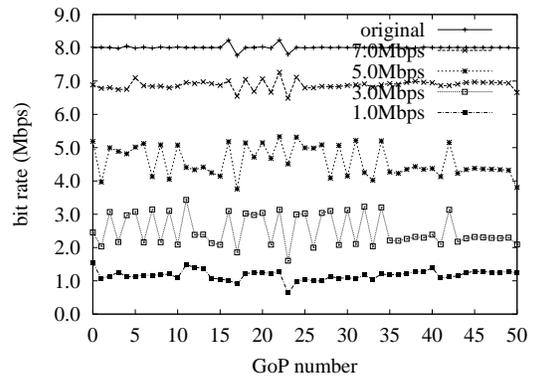
(a) sample-1



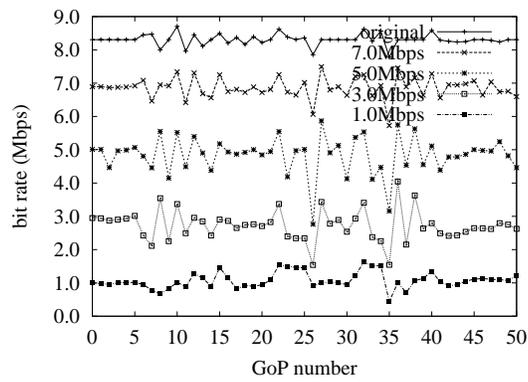
(b) matrix-16



(c) matrix-30

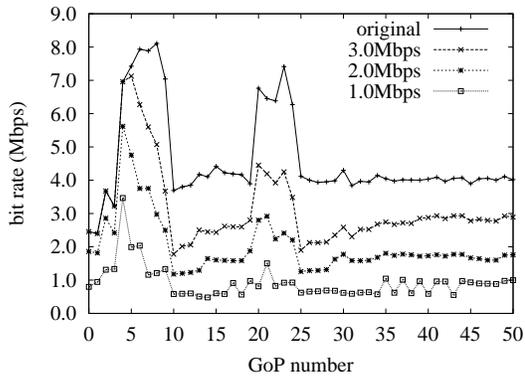


(d) sliding-1

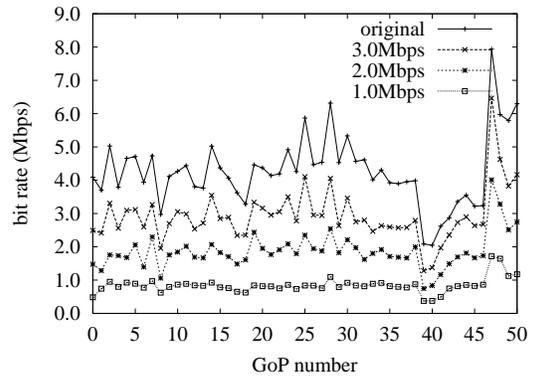


(e) hamasaki-1

図 28: フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, CBR 画像)

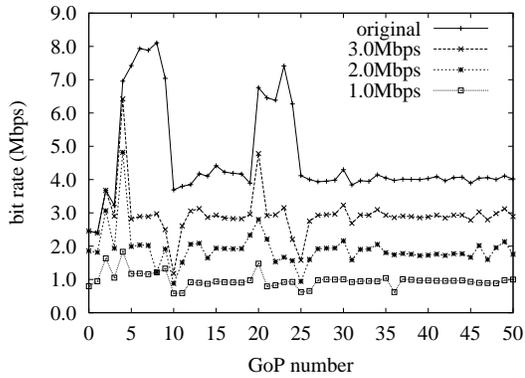


(a) utada-8

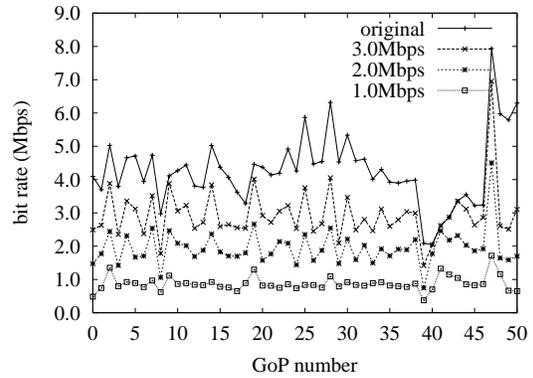


(b) rocket-6e

図 29: フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像)

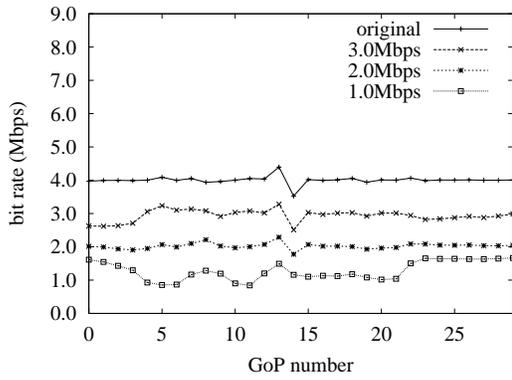


(a) utada-8

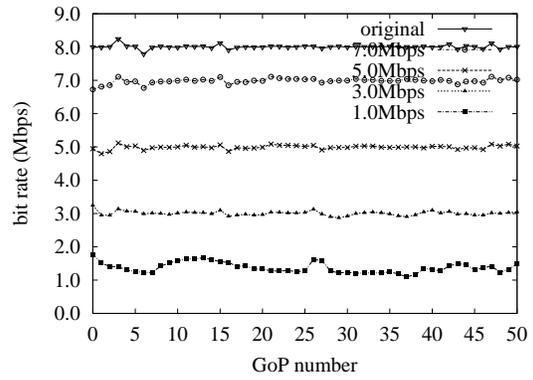


(b) rocket-6e

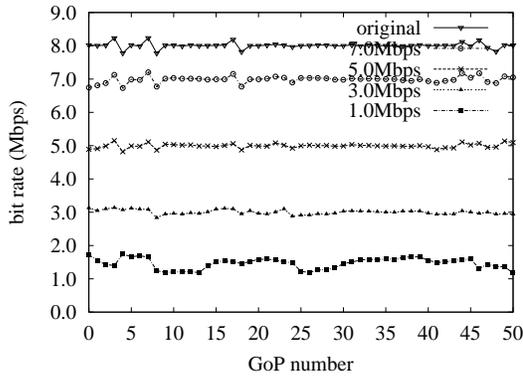
図 30: フレーム棄却フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像)



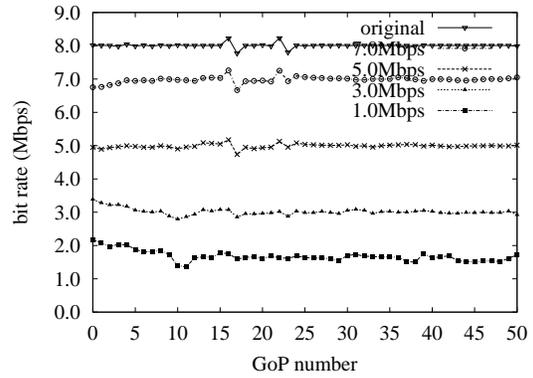
(a) sample-1



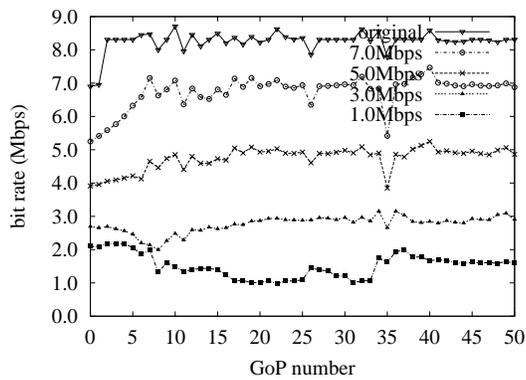
(b) matrix-16



(c) matrix-30

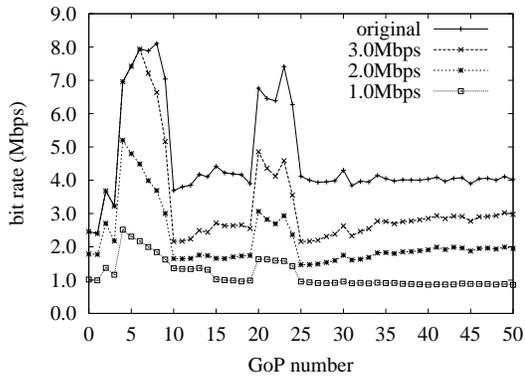


(d) sliding-1

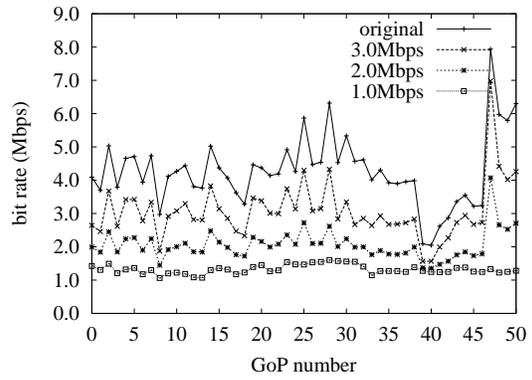


(e) hamasaki-1

図 31: ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (CBR 画像)

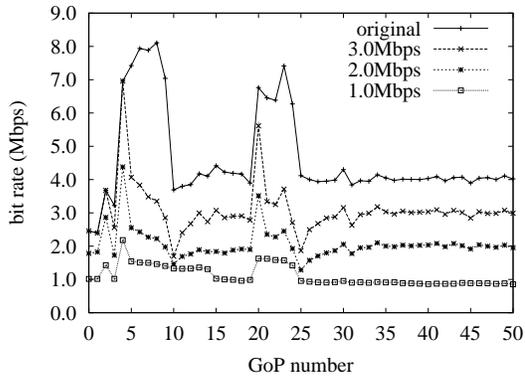


(a) utada-8

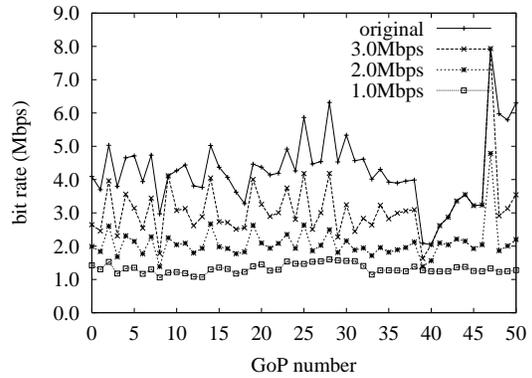


(b) rocket-6e

図 32: ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像)

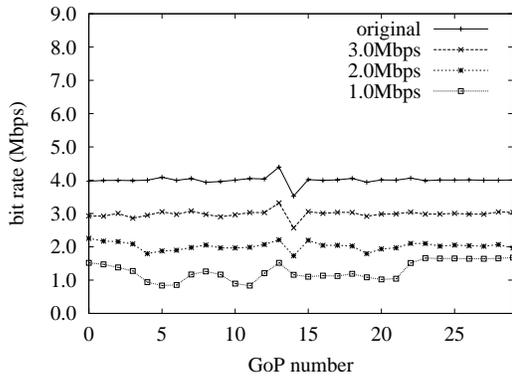


(a) utada-8

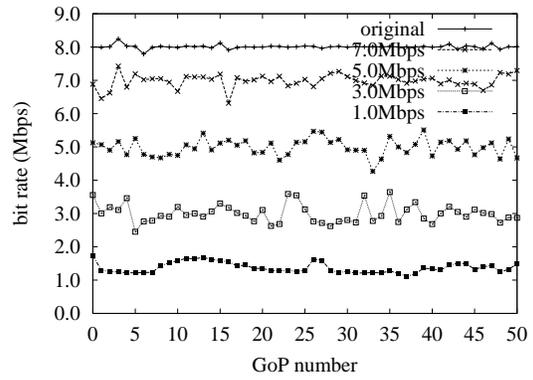


(b) rocket-6e

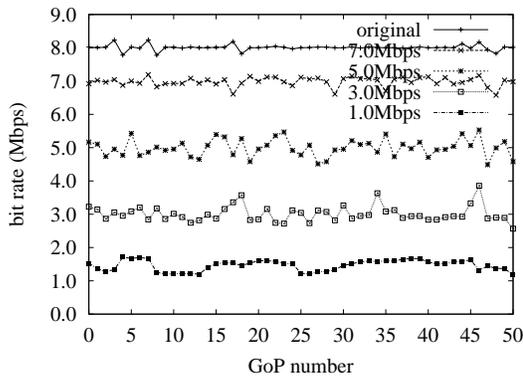
図 33: ローパスフィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像)



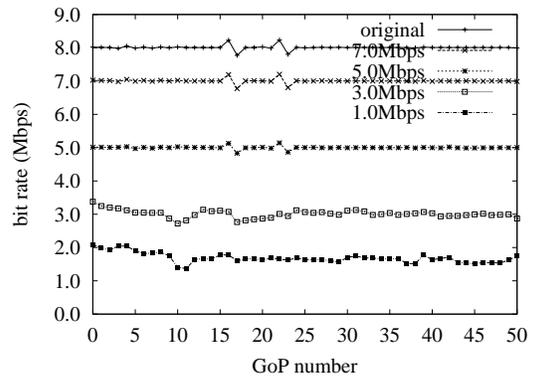
(a) sample-1



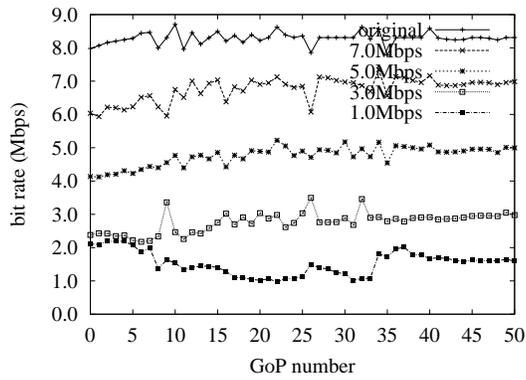
(b) matrix-16



(c) matrix-30

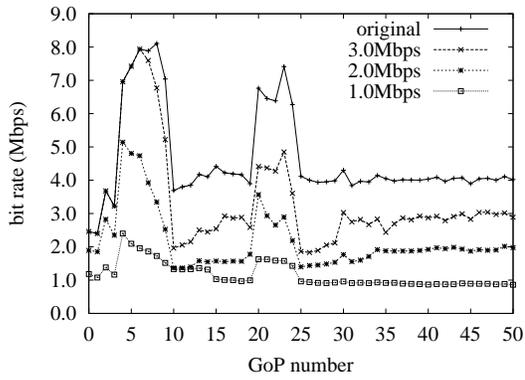


(d) sliding-1

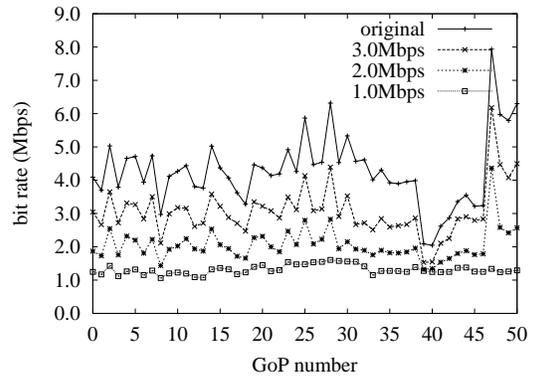


(e) hamasaki-1

図 34: 再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (CBR 画像)

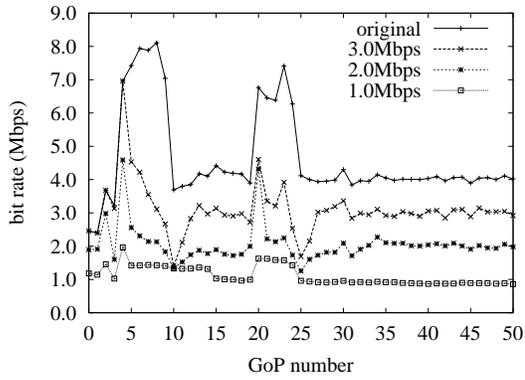


(a) utada-8

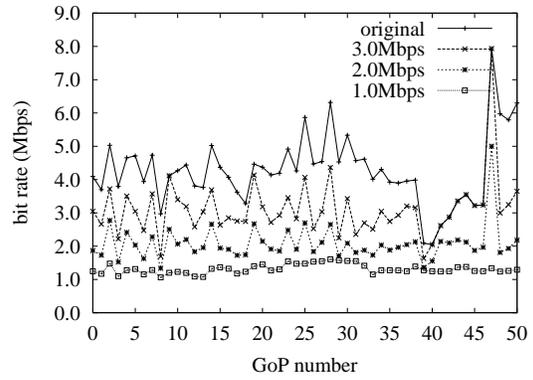


(b) rocket-6e

図 35: 再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 1, VBR 画像)



(a) utada-8

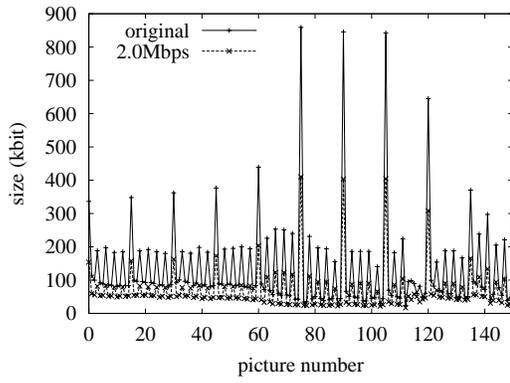


(b) rocket-6e

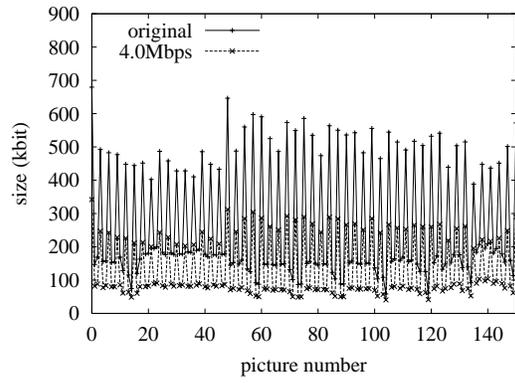
図 36: 再量子化フィルタにおけるビットレート変動 (予測式 2, VBR 画像)

### 6.3 目標レートに対するピクチャサイズの変化

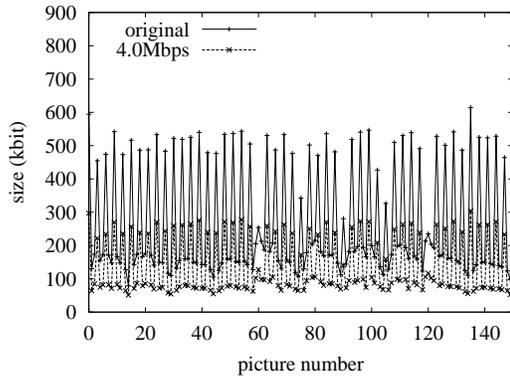
本節ではローパスフィルタ，再量子化フィルタのより詳細なふるまいを観測するため，両フィルタを適用した際のピクチャサイズの変動について検討する．図 37～39 にローパスフィルタを用いて動画データビットレートを半分にした場合のピクチャサイズの変化を，図 40～42 に再量子化フィルタを用いた場合の結果をそれぞれ示す．ただし，1 つの GoP は 15 枚のピクチャで構成されている．図 37，40 より，GoP 間のサイズ変動の小さい CBR 画像では，アルゴリズムどおりいずれのピクチャについても同程度の圧縮率が達成されていることがわかる．したがって，フィルタ処理前後のピクチャ単位でみた動画レート変動の様子は変わらない．また，例えば図 37(e) と図 40(e) を比較するとローパスフィルタの方がピクチャ間のサイズ差が少なく，よりビットレートが安定すると考えられる．VBR 画像では，アルゴリズムよりも予測式の違いによる影響が大きい．6.2 節で述べたとおり，予測式 2 を用いるとデータサイズの変動にともなって急激に圧縮率を変化させるため，例えば utada-8 (図 39(a) および図 42(a)) では 60～74 番目のピクチャに相当する GoP のサイズがそれ以前と比べて大きく変わるため，75 番目のピクチャから急激に圧縮率が高められ，サイズが小さくなるなど，トラヒックのバースト性が高い．一方，予測式 1 ではゆるやかにピクチャサイズが変化する．



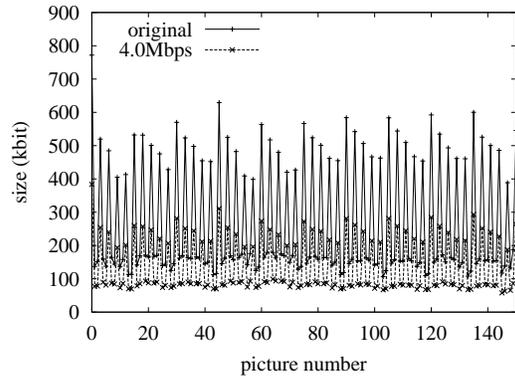
(a) sample-1



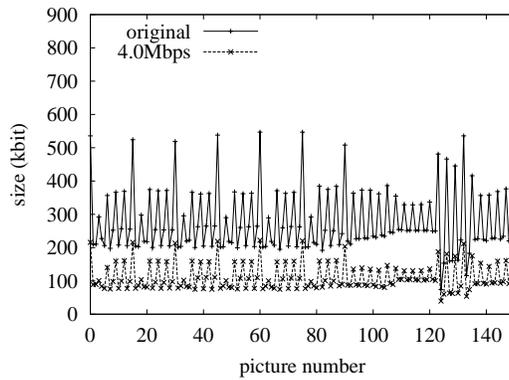
(b) matrix-16



(c) matrix-30

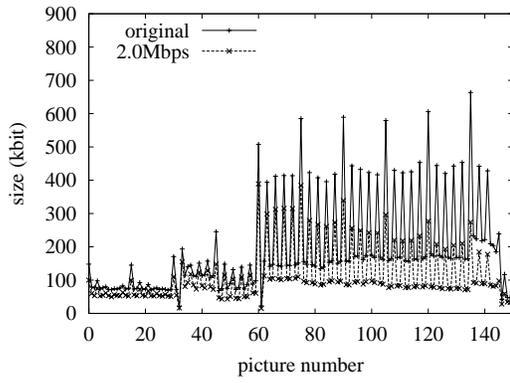


(d) sliding-1

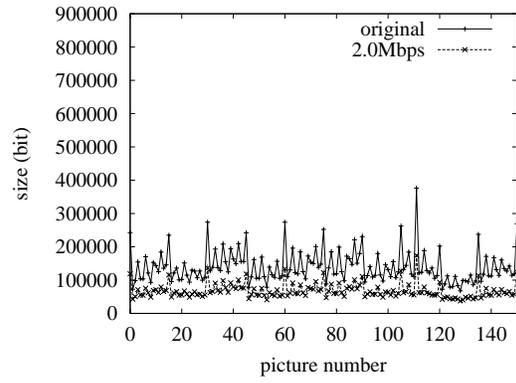


(e) hamasaki-1

図 37: ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (CBR 画像)

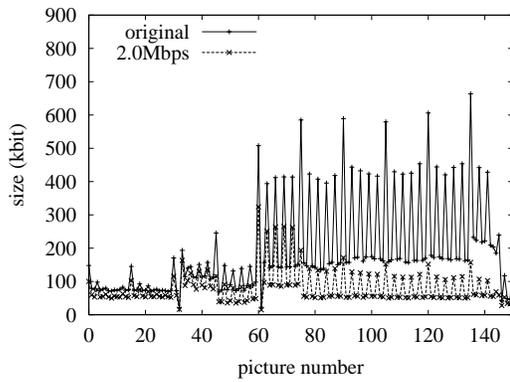


(a) utada-8

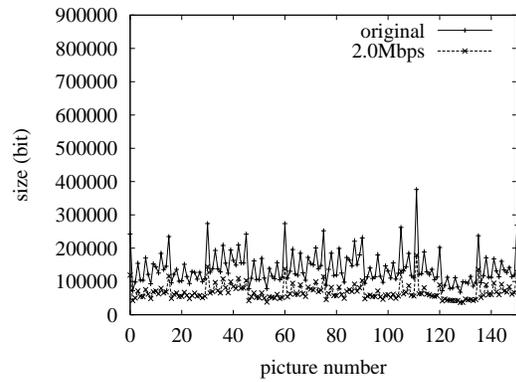


(b) rocket-6e

図 38: ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 1, VBR 画像)

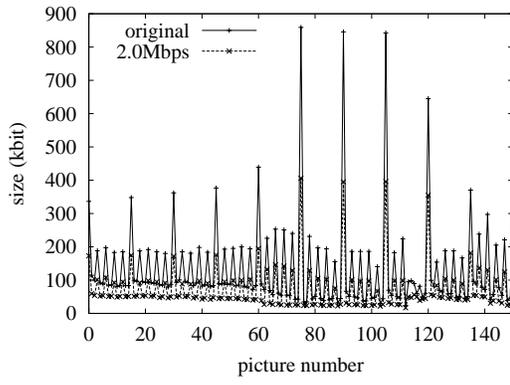


(a) utada-8

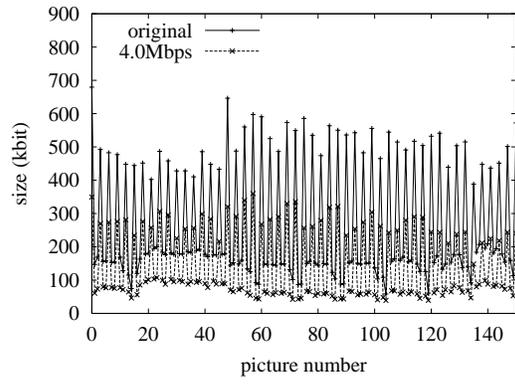


(b) rocket-6e

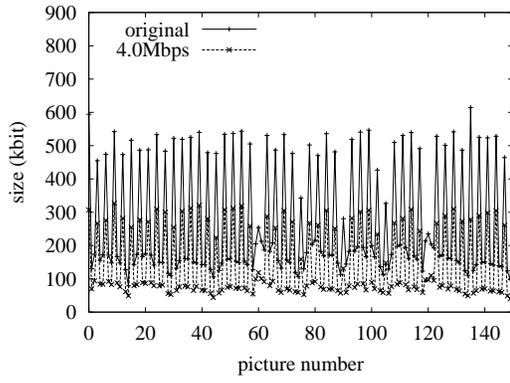
図 39: ローパスフィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 2, VBR 画像)



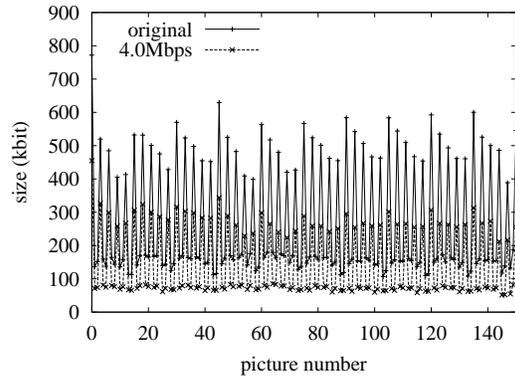
(a) sample-1



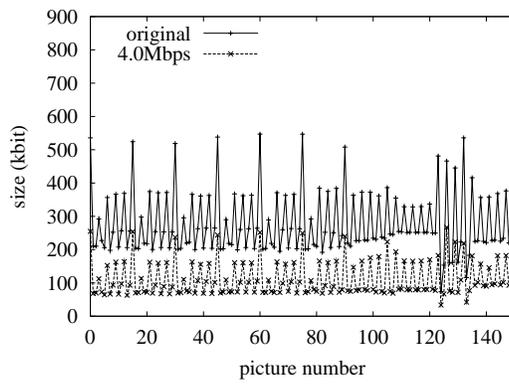
(b) matrix-16



(c) matrix-30

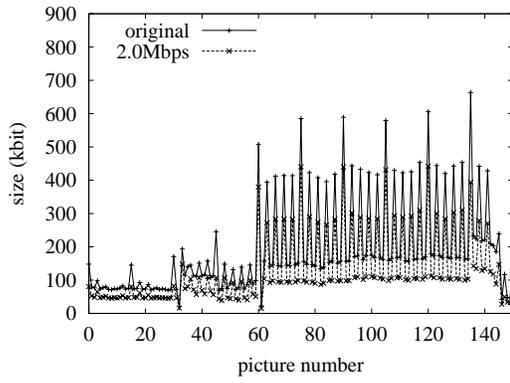


(d) sliding-1

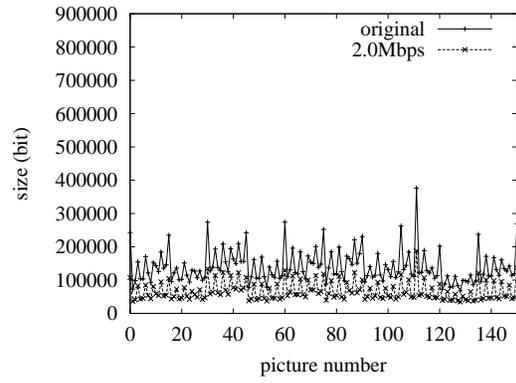


(e) hamasaki-1

図 40: 再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (CBR 画像)

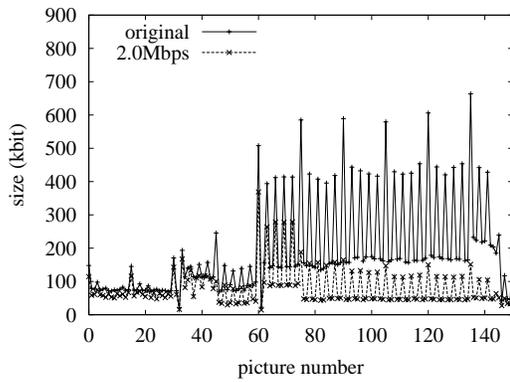


(a) utada-8

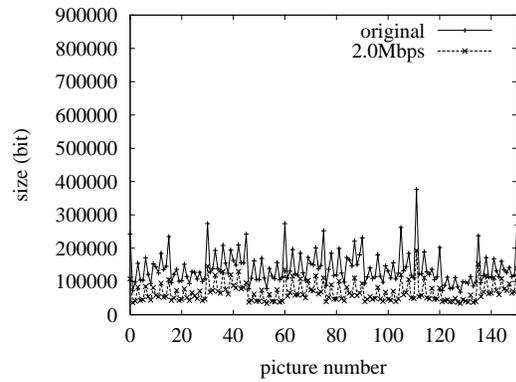


(b) rocket-6e

図 41: 再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 1, VBR 画像)



(a) utada-8



(b) rocket-6e

図 42: 再量子化フィルタにおけるピクチャサイズの変化 (予測式 2, VBR 画像)

## 6.4 目標レートに対する動画像品質の変化

本節では、フィルタ処理後の動画像を受信、再生して得られる動画像品質を客観評価値 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) と主観評価値 MOS (Mean Opinion Score) を用いて評価する。また、CBR 画像については与えられた設定レートにしたがってレート制御符号化を行う TM5 についても評価する。

### 6.4.1 PSNR による画質評価

本節では、PSNR を用いて、フィルタリングが動画像品質に与える影響を評価する。PSNR の計算式を以下に示す。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MAX^2}{MSE} \quad [dB] \quad (23)$$

$$MAX = \text{画素値の最大値} \quad (24)$$

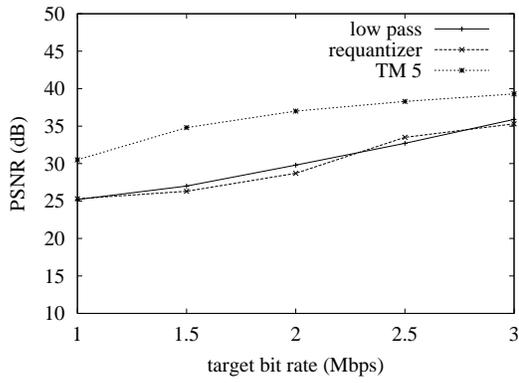
$$MSE = \frac{\sum (\text{原画像の画素値} - \text{評価画像の画素値})^2}{\text{総画素数}} \quad (25)$$

PSNR は評価画像の原画像に対する忠実度を表す尺度であり、おおよそ PSNR=40 dB では原画像と見分けがつかないくらい美しく、30 dB では劣化が目につく。さらに、20 dB では、非常に汚く、見るに耐えない画像であるといえる。なお、計算式に表されるとおり PSNR はピクチャ単位の画質の指標であるため、ピクチャを選択的に棄却することによりレート調整を行うフレーム棄却フィルタの動画像品質評価には適用できない。ただし、ここでは原画像をフィルタ処理への入力として与えられる MPEG-2 動画像とし、フィルタ処理による画質劣化を評価する。

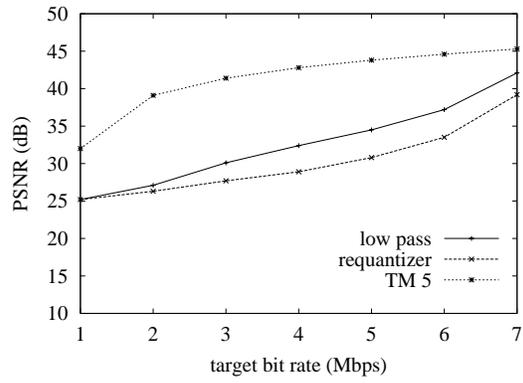
図 43 に、CBR 画像 ((a), (b)), VBR 画像 ((c) ~ (f)) に対してローパスフィルタ、再量子化フィルタ、TM5 を適用した場合の目標レートと得られる動画像の平均 PSNR の関係を示す。これらの結果より、符号化アルゴリズムや動画像の種類によらず、ほとんどの場合においてローパスフィルタの方が同じ目標レートで提供される動画像品質が高いことがわかる。ただし、TM5 による CBR 動画像はいずれの場合においても高い品質を達成している。したがってアクティブノードにおける動画像品質調整手法として、TM5 のようなレート制御符号化アルゴリズムを用いれば品質劣化の少ないレート調整が可能となるが、TM5 は図 7 の領域 A で適用される技術であるため、動画像データパケットを実時間処理しなければならない動画像フィルタリングとしては不適當である。

また、それぞれの適用結果における動画像品質の変化の様子をローパスフィルタについて図 44 に、再量子化フィルタについては図 45 に示す。これらの図より再量子化フィルタの方がピクチャ間の品質変動が大きいことがわかる。

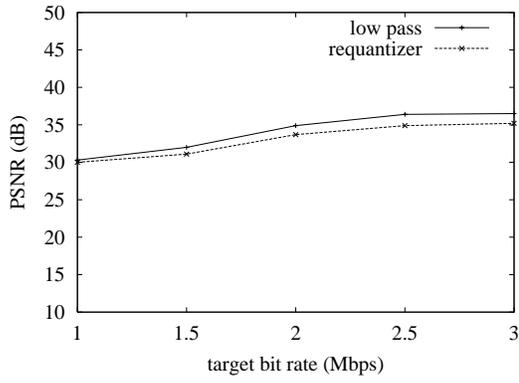
また、平均 PSNR に関する予測式による差はほとんど見られないが、動画像のレート変化に応じて急激に圧縮率を調整する予測式 2の方がピクチャ単位の画質変動が大きいことが図 44, 45よりわかる。特にローパスフィルタと比較して再量子化フィルタではフィルタリングパラメータあたりの画質の変化量が大きいため(図 46)、ピクチャ単位の画質変動はより激しくなる。したがって PSNR で評価した画質の安定性を考慮すると、ローパスフィルタによる予測式 1を用いたレート調整を行うのがよいといえる。



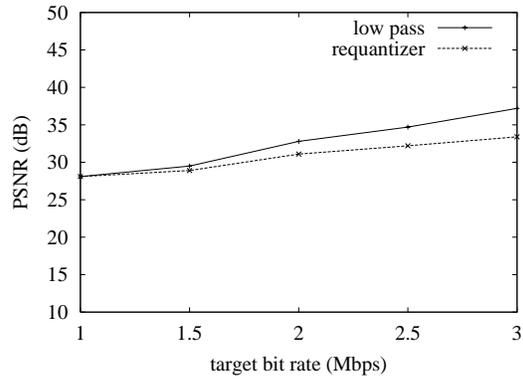
(a) sample1



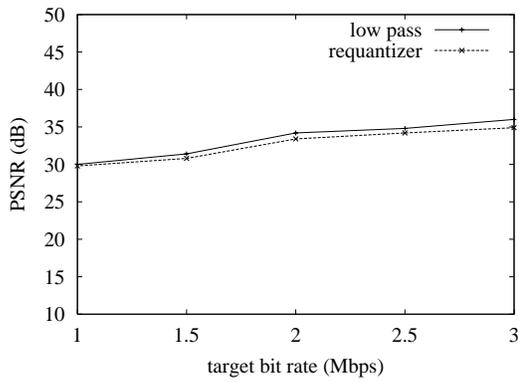
(b) matrix16



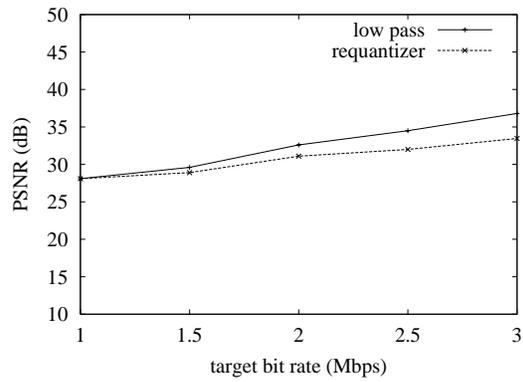
(c) utada8 (予測式 1)



(d) rocket6e (予測式 1)

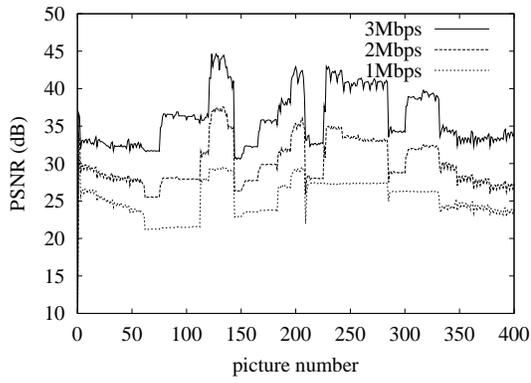


(e) utada8 (予測式 2)

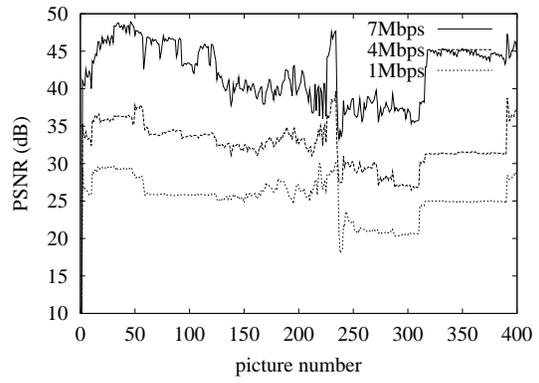


(f) rocket6e (予測式 2)

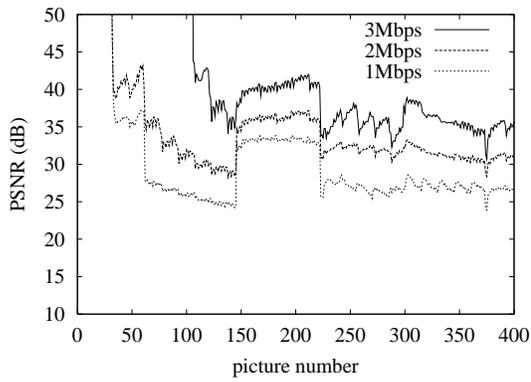
図 43: 目標レートと平均動画品質の関係



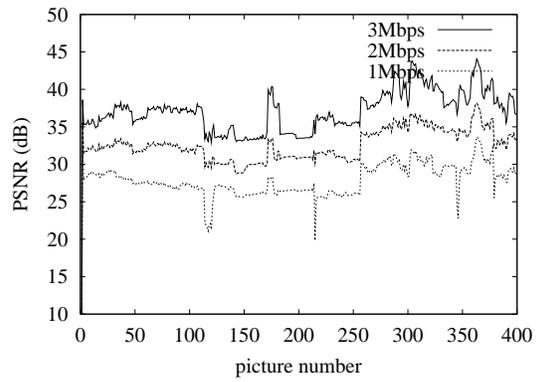
(a) sample1



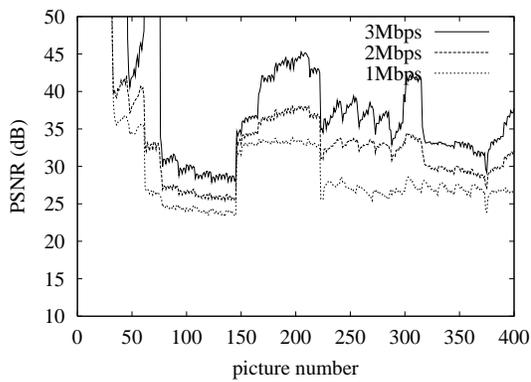
(b) matrix16



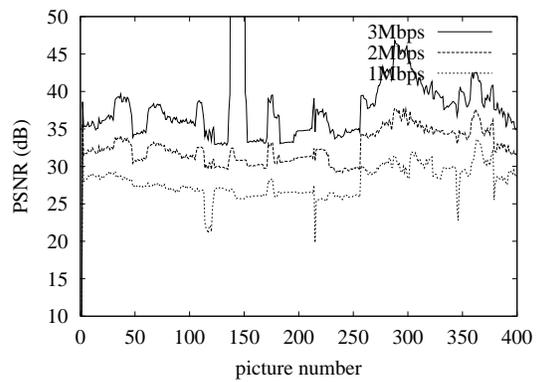
(c) utada8 (予測式 1)



(d) rocket6e (予測式 1)

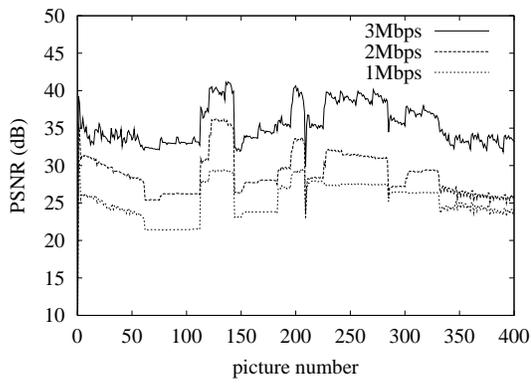


(e) utada8 (予測式 2)

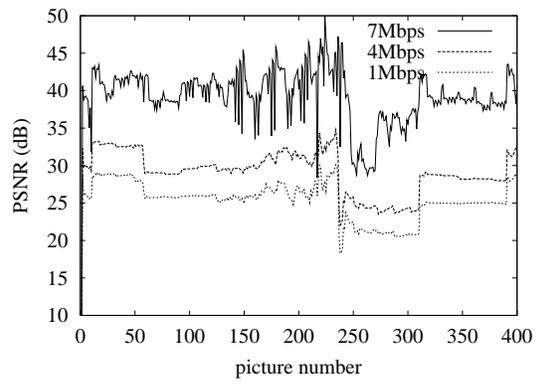


(f) rocket6e (予測式 2)

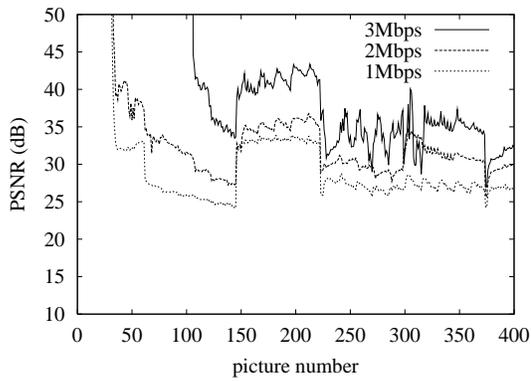
図 44: ローパスフィルタにおける動画品質の変化



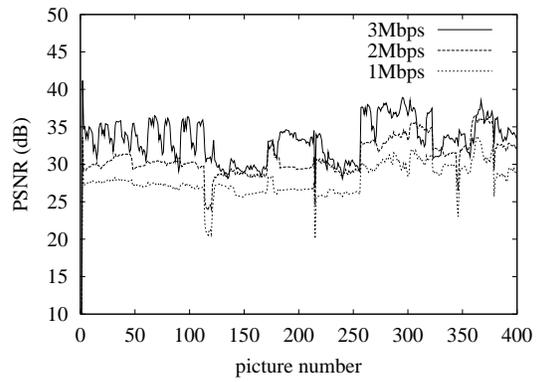
(a) sample1



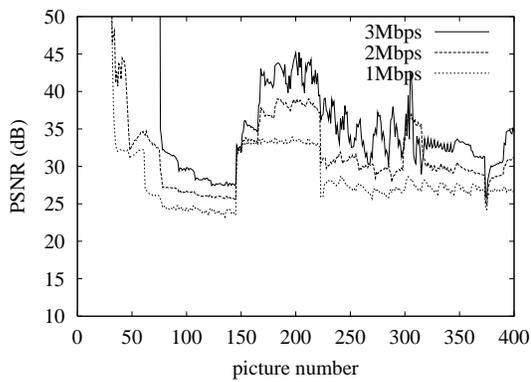
(b) matrix16



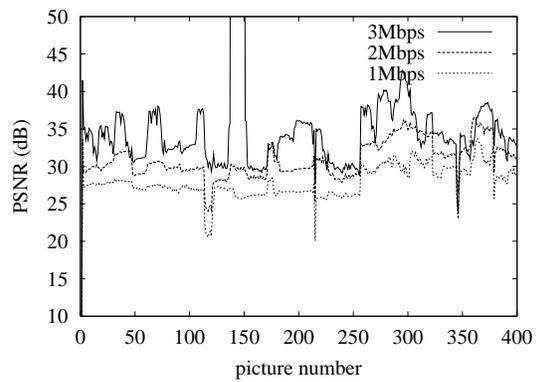
(c) utada8 (予測式 1)



(d) rocket6e (予測式 1)

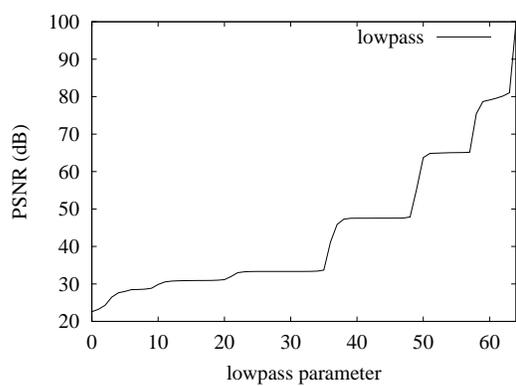


(e) utada8 (予測式 2)

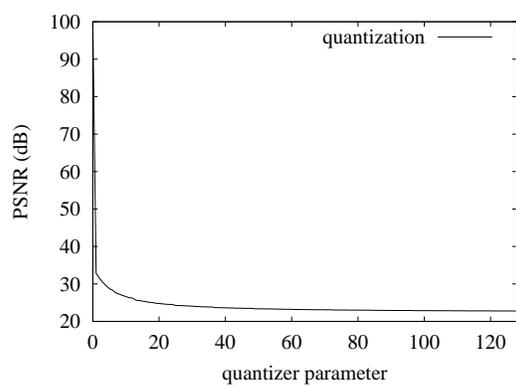


(f) rocket6e (予測式 2)

図 45: 再量子化フィルタにおける動画品質の変化



(a) ローパスフィルタ



(b) 再量子化フィルタ

図 46: フィルタパラメータと画質の関係

#### 6.4.2 MOS 値による動画像品質評価

本節ではフレーム棄却フィルタによる時間解像度の劣化とローパスフィルタ、再量子化フィルタによる画質劣化をあわせて比較評価するため、MOS (Mean Opinion Score) を動画像品質の指標として用いる。

MOS 評価は、心理測定法の一つであり、評価画像の品質を原画像の品質と照らし合わせて、“劣化が全く感じられない ~ 劣化がかなり気になる” の 5 段階で評価する。それぞれに 5~1 点の評点を与え、多数の被験者による投票率にしたがって加重平均値を求めたものを MOS と呼ぶ。実際にシステムを使用するユーザの評価を直接得られる等の利点があるが、試験条件の設定には十分な配慮が必要である。MOS 値は次式により導出される。

$$MOS = \sum_{i=1}^5 i \times \frac{i \text{ 点に投票した被験者数}}{\text{総被験者数}} \quad (26)$$

フレーム棄却フィルタでは、時間解像度が失われる一方でピクチャ単位の画質は劣化しないので、画面の変化がなくそれぞれのピクチャの品質が重要な動画像に適していると予想され。高周波の DCT 係数が削除されるローパスフィルタでは、物体の輪郭が荒れるなど、画面の精細さが失われると予想される。また再量子化フィルタではローパスフィルタと比較して、安定したレート調整が行えないため、目標レートが低いとブロックノイズが目立つこと予想される。

図 22 のすべての領域から選んだいくつかの動画像データについて 7~10 名の被験者により MOS 評価を行った結果を表 3~9 に示す。いずれの場合においてもローパスフィルタが良好な結果を得ている。また、再量子化フィルタはレートの変動の大きい VBR 画像 (表 8, 9) や画面の複雑な画像 (表 7) において評価が低い。フレーム棄却フィルタは動きやシーンの変化の激しい動画像 (表 4, 7) での評価が高く、動きのゆるやかな動画像 (表 3, 6) では品質の劣化が激しい。これは動きのゆるやかな動画像ではピクチャ棄却による時間解像度の劣化が画面内の物体の消失や移動などとして認識されやすく、アクションシーンやビデオクリップのように変化の激しい動画像では気が付きにくいためであると考えられる。また、本報告で評価に用いた動画像データには含まれていないが、インタビュー映像やニュースのように静止状態の多い動画像ではコマ落ちの影響が少なくフレーム棄却フィルタが有効であることが予想される。

一方、ローパスフィルタと再量子化フィルタはほとんどの場合においてローパスフィルタの方が評価が高い。これは、輪郭など画像の詳細な部分から順に画質が劣化していくローパスフィルタ (図 47, 49) と比較して、画面全体の解像度が序々に失われていく再量子化フィ

ルタ (図 48, 50) の方が, 品質劣化がブロックノイズとして現れ, 認識されやすいためである。さらに, レート調整の柔軟性の劣る再量子化フィルタではブロック間の品質差が生じやすく, ピクチャ内で画質が均一でなくなる。

また, いずれのフィルタにおいても目標レートが動画データ本来のビットレートの半分を下回ると, 大きく品質が劣化する。CBR 画像の場合には TM5 などのレート制御符号化手法を用いることで低ビットレートでも高品質な動画画像を得ることができる。しかしながら, 6.4 節で述べたとおり TM5 は多数のクライアントに実時間で動画画像マルチキャストサービスを提供するには適さない。

表 3: MOS 評価結果 (sample-1)

sample-1 CBR, 4Mbps		目標レート		
		3Mbps	2Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	3.50	2.75	1.87
	ローパス	5.00	3.12	1.75
	再量子化	5.00	2.62	1.50
	TM5	5.00	4.25	2.12

表 4: MOS 評価結果 (matrix-16)

matrix-16 CBR, 8Mbps		目標レート			
		7Mbps	5Mbps	3Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	5.00	3.25	1.75	1.00
	ローパス	4.08	3.00	2.33	1.00
	再量子化	4.08	2.75	1.58	1.00
	TM5	4.25	4.29	3.50	1.44

表 5: MOS 評価結果 (matrix-30)

matrix-30 CBR, 8Mbps		目標レート			
		7Mbps	5Mbps	3Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	4.80	3.80	2.80	1.00
	ローパス	4.90	3.90	2.40	1.00
	再量子化	3.70	3.20	1.50	1.20

表 6: MOS 評価結果 (sliding-1)

sliding-1 CBR, 8Mbps		目標レート			
		7Mbps	5Mbps	3Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	4.32	2.62	1.50	1.12
	ローパス	4.75	3.25	1.87	1.00
	再量子化	4.87	3.25	1.25	1.00

表 7: MOS 評価結果 (hamasaki-1)

hamasaki-1 CBR, 8Mbps		目標レート			
		7Mbps	5Mbps	3Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	5.00	4.25	2.62	1.75
	ローパス	4.87	3.37	2.00	1.00
	再量子化	3.00	2.75	1.00	1.00

表 8: MOS 評価結果 (utada-8)

utada-8 VBR, 4.3Mbps		目標レート		
		3Mbps	2Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	3.82	2.91	1.22
	ローパス	4.44	3.62	1.00
	再量子化	3.00	2.22	1.00

表 9: MOS 評価結果 (rocket-6e)

rocket-6e VBR, 4.4Mbps		目標レート		
		3Mbps	2Mbps	1Mbps
フィルタリング手法	フレーム棄却	3.33	2.83	1.41
	ローパス	3.58	2.25	1.00
	再量子化	2.16	1.33	1.16



(a) 原画像 4Mbps



(b) 目標レート 3Mbps



(c) 目標レート 2Mbps



(d) 目標レート 1Mbps

図 47: ローパスフィルタにおける画質の変化例 (sample-1)



(a) 原画像 4Mbps



(b) 目標レート 3Mbps



(c) 目標レート 2Mbps



(d) 目標レート 1Mbps

図 48: 再量子化フィルタにおける画質の変化例 (sample-1)



(a) 原画像 8Mbps



(b) 目標レート 7Mbps



(c) 目標レート 5Mbps



(d) 目標レート 3Mbps



(e) 目標レート 1Mbps

図 49: ローパスフィルタにおける画質の変化例 (sample-2)



(a) 原画像 8Mbps



(b) 目標レート 7Mbps



(c) 目標レート 5Mbps



(d) 目標レート 3Mbps



(e) 目標レート 1Mbps

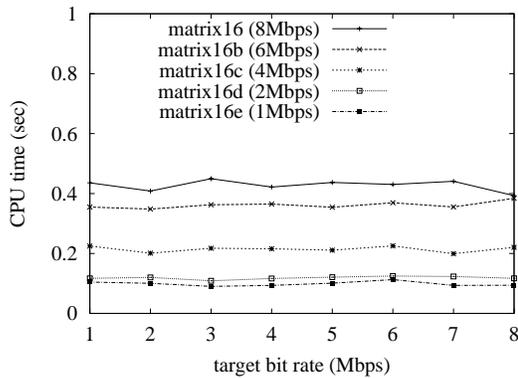
図 50: 再量子化フィルタにおける画質の変化例 (sample-2)

## 6.5 処理遅延によるフィルタリング手法の比較

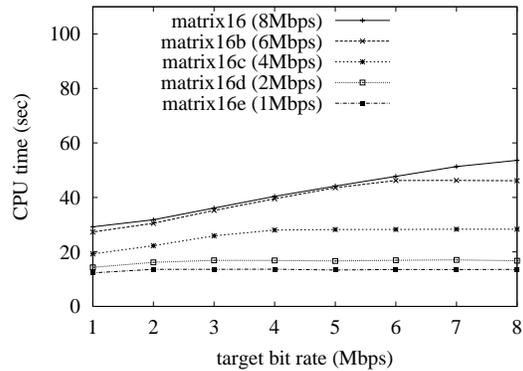
本節ではフィルタリング処理に必要な CPU 処理時間を計測することにより、実時間動画通信における実用性について考察する。CPU 処理時間計測には gprof [13] を用いた。gprof はプログラムの CPU 使用時間を関数や手続き単位で計測するツールで、入出力デバイスの I/O 処理や他のプロセスによる割り込み時間は含まれない。

それぞれレートの異なる 5 種類の動画像について目標レートを 1~9Mbps と変化させ、50 秒間の動画像データのフィルタリングに必要な処理時間を計測した。図 51 にそれぞれ 10 回ずつの計測の平均値を示す。ただし、評価には PentiumIII 1GHz プロセッサを有するコンピュータを用いた。フィルタは C プログラムとして実装されている。図 51 より、フレーム棄却フィルタでは圧縮率によらず処理時間がほぼ一定であるのに対し、他のフィルタではもとのレートに対して目標レートが小さくなるほど扱うデータ量が少なくなるため、処理時間が短くなる。また、処理時間はもとの動画像レートに比例して増大する。ただし、gprof の出力にはプログラムの実行時間に依存した誤差が含まれており、処理時間の短いフレーム棄却フィルタでは約 15%、その他のフィルタでは約 2%のずれが生じる。

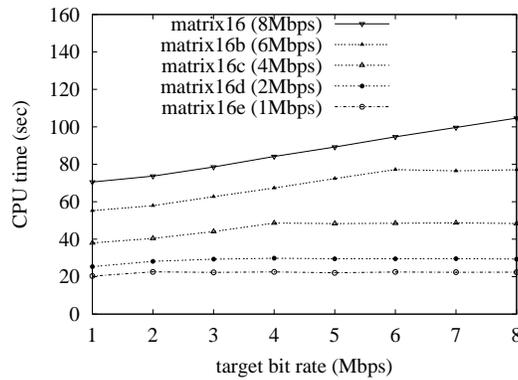
選択的にピクチャを棄却するフレーム棄却フィルタは他のフィルタと比較して極端に処理時間が短く、実時間処理は容易である。また、ローパスフィルタも評価データでの最大処理時間は約 53 秒であり、プログラムの最適化などにより実時間処理が可能であると考えられる。一方、再量子化フィルタはより高性能なアーキテクチャを利用するなどの処理の高速化が必要と思われる。ただし、フィルタ処理の実用性を評価するためには、アクティブルータや動画像データパケットなど実際の使用環境のもとでピクチャやパケットあたりの処理時間を計測する必要がある。例えば、アクティブルータがパーソナルコンピュータで実現された場合には、本報告で用いたフレーム棄却フィルタ、ローパスフィルタ、またある程度までのビットレートについては再量子化フィルタのプログラムをもとにフィルタ処理機構を作成することで、実時間動画像フィルタリング処理によるレート調整が可能であると予想される。



(a) フレーム棄却フィルタ



(b) ローパスフィルタ



(c) 再量子化フィルタ

図 51: フィルタリング処理時間 (50 秒の動画像)

## 6.6 実時間動画マルチキャストのためのフィルタ選択手法

本節では、目標レートに対するビットレートや画質の変化、フィルタリング処理時間を考慮して、与えられた目標レートを達成すると同時に画質劣化を抑えるためのフィルタリング手法の選択について検討する。これまでの評価結果より、フレーム棄却フィルタは、処理時間が短く画質が劣化しないが、細かなレート制御が行えず、また時間解像度が失われることが明らかとなっている。一方、ローパスフィルタは、実時間処理が比較的容易であり、GoP間、ピクチャ間のレートの変動も小さく柔軟なレート調整が可能であるが、画質がやや劣化する。また、再量子化フィルタは、GoP間の変動が小さく柔軟なレート調整が可能であるがフィルタリング処理時間が比較的長く、また画質も劣化する。したがって、アクティブノー

ドにおけるレート調整には柔軟性，再生動画像品質，処理時間のすべてに関してローパスフィルタを用いて品質調整するのがよいといえる．ただし，変化のまったくない，あるいは変化の激しい動画像に処理の簡易さからフレーム棄却フィルタを適用するのも有効である．

また，アクティブノードでの処理負荷軽減を図るため，時間解像度の劣化に寛容なユーザやアプリケーションの場合には，あらかじめフレーム棄却フィルタを用いてある程度ピクチャ枚数を減らし，ローパスフィルタを適用するなど複数のフィルタリング手法を組み合わせるのも効果的であると考えるが，適切なフィルタ組み合わせ手法に関しては今後の課題とする．

## 7 動画像レート調整可能なルータの実現性

インターネットの利用者数の増大や多様なアプリケーションの登場を背景に、新しい通信サービスへの要望が高まりつつある中、従来の専用ハードウェアで構成されたネットワーク機器にとってかわる、より柔軟で拡張性の高いアーキテクチャとしてネットワークプロセッサが開発された。Intel社のIXP1200ネットワーク・プロセッサ(図52)は、ネットワーク機器に求められる機能を容易に実現可能なよう設計されており、システム開発者は目的に応じた処理メカニズムをソフトウェアとして実装できる、IXP1200は独立動作可能な6個の160MHz RISCマイクロエンジンと制御用のStrongARMコアと呼ばれるネットワークエンジンからなる。1000MIPSの処理能力を有するマイクロエンジンは4つのスレッドを管理可能で、4.2Gbpsの伝送能力を持つバスを介して他とデータをやり取りする。マイクロエンジンを用いることにより、高度な経路制御や高機能なパケット処理が可能となるため、コロムビア大やプリンストン大、ユタ大などでネットワークプロセッサを利用したアクティブネットワークの構築に関する研究が活発に行われている。

本報告で提案したフィルタリング手法をマイクロエンジン上で動作するプログラムとして実装すれば、動画像品質調整可能なアクティブノードを実現可能であるが、効率よくかつ高速に動作させるためにはマイクロエンジンやスレッドへのフィルタリング処理の割当などに関する検討が必要である。またアクティブネットワークアーキテクチャによって異なるが、フィルタプログラムサイズには限界があるため、プログラムの最適化が必要である。

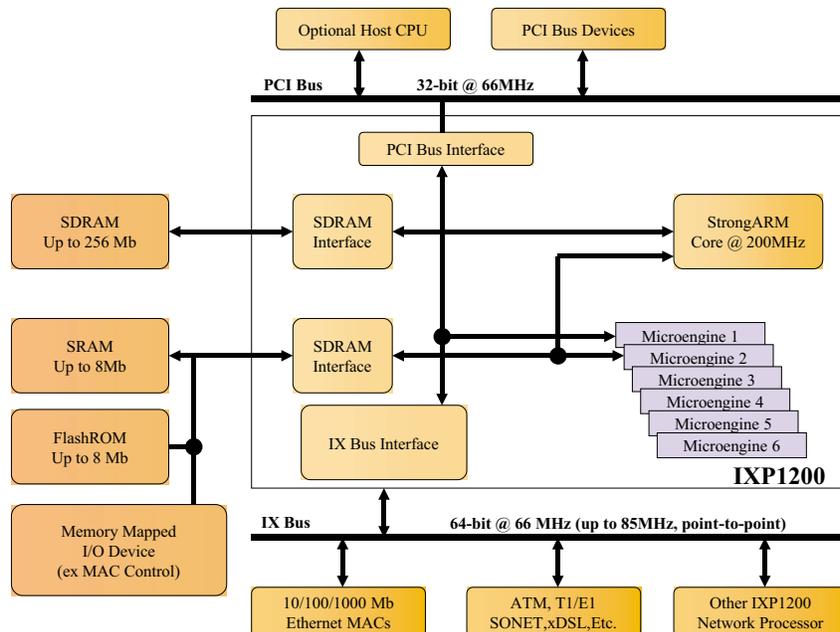


図 52: IXP1200 の構成図

## 8 おわりに

本報告では、アクティブネットワークにおけるユーザのさまざまに異なる要求品質を考慮した動画像マルチキャストにおける動画像品質調整の有効性について検討するため、MPEG-2符号化手法を用いて符号化された動画像を対象に、フレーム棄却フィルタ、ローパスフィルタ、再量子化フィルタの3つの品質調整手法の実装、評価を行った。それぞれのフィルタに対し、目標レートに応じてフィルタリングパラメータを決定し、品質調整するレート調整アルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を示した。さらに、実験結果にもとづいて与えられた目標レートを達成しつつ動画像品質の劣化を抑えることのできるフィルタリング手法の選択法について検討した。

ただし、本報告ではパケットを単位とした動画像データの処理については検討していない。動画像種や目的に応じたフィルタ手法の使いわけについてもより多くの動画像データについて分類、評価、検討が必要である。また、フィルタリング処理プログラムの最適化やネットワークプロセッサへの実装などについても今後の課題としたい。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり，御指導，御教授を頂いた宮原秀夫教授に深く感謝致します．また，本報告において終始直接御指導頂いた村田正幸教授，若宮直紀講師に深く感謝致します．

並びに日頃から適切な助言を頂いたサイバーメディアセンターの下條真司教授，大阪府立看護大学医療技術短期大学の菅野正嗣助教授，大阪市立大学の藤川和利講師，サイバメディアセンター馬場健一助教授，神戸商船大学の鎌原淳三講師，サイバーメディアセンターの大崎博之助手，長谷川剛助手，奈良先端科学技術大学院大学の奥田剛助手，大阪市立大学の阿多信吾助手，経済学部の荒川伸一助手，国際公共政策研究科の植田和憲助手に心から感謝致します．

最後に，終始適切な助言を頂いた Héctor Akamine 氏をはじめ御協力頂いた宮原研究室および村田研究室の皆様心からお礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “Effective algorithms for multicast video transport to meet various QoS requirements,” *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers of Japan(B)*, vol. E-81-B, pp. 1599–1607, Aug. 1998.
- [2] N. Wakamiya, K. Fukuda, M. Murata, and H. Miyahara, “On multicast transfer of hierarchically coded video with QoS guarantees,” in *Proceedings of Internet Workshop’99*, pp. 294–300, Feb. 1999.
- [3] H. Akamine, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “An approach for heterogeneous video multicast using active networking,” in *Proceedings of Second International Working Conference on Active Networks (IWAN2000)*, pp. 157–170, Oct. 2000.
- [4] H. Akamine, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, “On the construction of heterogeneous multicast distribution trees using filtering in an active network,” in *Proceedings of Quality of future Internet Services Workshop (QofIS 2000)*, pp. 272–284, Sept. 2000.
- [5] N. Yeadon, F. García, D. Hutchinson, and D. Shepherd, “Filters: QoS support mechanisms for multipeer communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 1245–1262, Sept. 1996.
- [6] M. Hemy, U. Hengartner, P. Steenkiste, and T. Gross, “MPEG system streams in best-effort networks,” in *Proceedings of Packet Video 99*, Apr. 1999.
- [7] S. Gopalakrishnan, D. Reininger, and M. Ott, “Realtime MPEG system stream transcoder for heterogenous networks,” in *Proceedings of Packet Video 99*, Apr. 1999.
- [8] ISO/IEC DIS 13818-2, “MPEG-2 Video.” ISO Standard, 1996.
- [9] D. Tennenhouse, J. Smith, D. Sincoskie, D. Wetherall, and G. Minden, “A survey of active network research,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, pp. 80–86, Jan. 1997.
- [10] ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11, “Test model 5,” Jan. 1994.

- [11] A. Adas, "Using adaptive linear prediction to support real-time VBR video under RCBR network service model," in *Proceedings of IEEE/ACM Trans.Networking*, vol. 6, pp. 635–644, Oct. 1998.
- [12] S. Feng and R. Sankar, "Limitation of and improvement to linear prediction and smoothing-based bandwidth allocation for VBR traffic," in *Proceedings of Global Telecommunications Conference - Globecom'99*, pp. 209–213, Dec. 1999.
- [13] J. Fenlason and R. Stallman, "GNU gprof - the GNU profiler." available at <http://www.gnu.org>.