

実時間動画像マルチキャストのための動画像品質調整機構の実装と評価

山田 達也[†] 若宮 直紀^{††} 村田 正幸^{††} 宮原 秀夫^{††}

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: †t-yamada@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{wakamiya,murata,miyahara}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 動画像マルチキャストにおいて、それぞれのユーザの通信環境、システム性能、再生動画像に対する好みなどに応じた適切な動画像データを配信するためには、アクティブネットワーク技術を利用して、ネットワーク内で動画像品質調整を行うのが効果的である。本研究では、その実用性、適用性を検証するため、ネットワークプロセッサ上に、MPEG-2 動画像の実時間マルチキャストを対象とした品質調整手法であるローパスフィルタを実装し、実動画像データを用いた通信実験を行った。実験による評価の結果、動画像品質の劣化を抑えつつ、所望のレート制御を実現する動画像品質調整が実現可能であることを示している。

キーワード 動画像マルチキャスト, 動画像品質調整, ネットワークプロセッサ, アクティブネットワーク

Implementation and Evaluation of Video-Quality Adjustment for Real-Time Video Multicast

Tatsuya YAMADA[†], Naoki WAKAMIYA^{††}, Masayuki MURATA^{††}, and Hideo MIYAHARA^{††}

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

E-mail: †t-yamada@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{wakamiya,murata,miyahara}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract By introducing video-quality adaptation mechanisms into intermediate network equipments using active network technologies, we can provide users with video distribution services taking into account client heterogeneity in terms of available bandwidth, performance of client systems, and user's preferences about video quality. In this paper, we implement the lowpass filter which is the quality adjustment technique for real-time multicasting of MPEG-2 video, on the network processor-based network node. We applied the filter to video streams passing through the node and evaluated its practicality and applicability.

Key words heterogeneous video multicast, video quality adjustment, network processor, active network

1. はじめに

アクセス回線のブロードバンド化やコンピュータの高性能化を背景に、近年、ライブ型、ストリーミング型などの多様な動画配信サービスの利用が活発になっている。配信形態を問わず、動画像サーバから複数のユーザに対して動画像を配信する場合には、ユーザごとに異なるアクセス回線容量や網内での利用可能帯域、また、クライアントマシンの性能、さらには再生動画像の品質に対するユーザの好みなどについて考慮し、それぞれのユーザにあった適切な品質、レートの動画像を配信しなければならない。我々の研究グループでは、データ転送遅延に関する厳しい制約のもとで、多数のユーザに同時に動画像を

配信しなければならない動画像マルチキャスト通信について、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同時に満足することができる制御手法の研究を行ってきた。特に文献 [1] 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を用いた効率のよい動画像マルチキャスト通信を行う手法を提案している。

アクティブネットワークは、アクティブルータあるいはアクティブノードと呼ばれる高機能ノードを網内に配置することにより、ネットワークの振る舞いをアプリケーションやユーザの要求に応じて柔軟かつ容易に変更することを可能にする技術である [2]。アクティブノードでは、データパケットに対し、データパケットに付加された、あるいはあらかじめノードに送り込

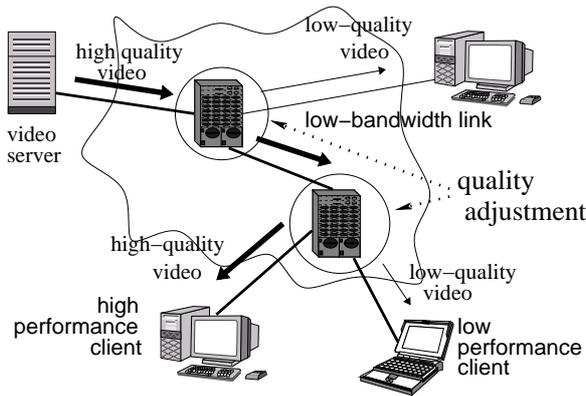


図 1 異種クライアントへの実時間動画マルチキャスト

またプログラムコードを適用し、ユーザや網管理者、アプリケーションの望むパケット処理を施すことができる。また、アクティブノードでは、経路制御など下位レイヤのパケット処理にとどまらず、ペイロードに含まれるアプリケーションデータに対する処理を施すこともできる。文献 [1] における提案手法は、図 1 に示すようにアクティブノードに動画像品質調整機能を導入することにより、下流ノードやクライアントの要求に応じて品質調整、レート制御を行い、効率的かつ効果的な動画像マルチキャスト通信を実現するものである。

我々の研究グループでは、さまざまな品質要求を同時に満たすことのできる実時間動画像マルチキャストのための動画像品質調整手法（以降ではフィルタリング手法とよぶ）を提案、比較評価し、動画像データの高周波数成分を除去することによりデータ量やレート、動画像品質を調整するローパスフィルタが、レート調整能力や動画像品質劣化の抑制などの点において最も効果的であることを示した [3]。しかしながら、提案手法は、パケット単位の処理に適したメカニズムでない、ネットワーク機器における処理能力、メモリ容量などの制約を考慮していないなど、そのまま実際のシステムに適用することはできない。

そこで、本稿では、網内での動画像品質調整の実用性、実現性を評価、検証するため、パケット処理に特化したアーキテクチャを有し、プログラマブルなネットワークシステムを構成可能なネットワークプロセッサ上に、提案する動画像フィルタリング手法を実装し、実験を行う。

以下に本稿の構成を示す。2 章で MPEG-2 符号化手法の概要と、提案するローパスフィルタおよびレート制御アルゴリズムを述べる。3 章で実装に用いた Intel IXP1200 ネットワークプロセッサの概要と実装方法について述べる。4 章で実験結果にもとづく実現性、実用性の評価を行い、最後に 5 章では、まとめと今後の課題を述べる。

2. MPEG-2 動画像フィルタリング

2.1 MPEG-2 動画像符号化手法

本稿では、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 により符号化された動画像データの配信を対象とする。MPEG-2 は図 2 に示す階層構造となっており、最上位はシーケンス層と呼ばれる。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、GoP

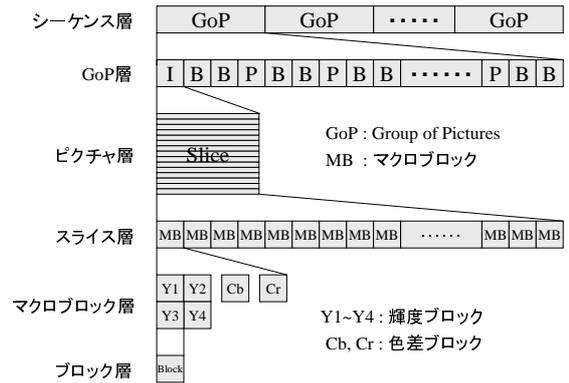


図 2 MPEG2 動画像の構造

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いる。I ピクチャは単一ピクチャ内の情報のみを用いて符号化を行い、P ピクチャは時間的に過去に位置する直前の I または P ピクチャから予測符号化を行う。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う。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。

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。MPEG-2 では、早送りや巻き戻し、エラー回復のためにシーケンスからスライスまでの各層の先頭に 32 ビットのスタートコードを与えている。スライスは 1 個以上のマクロブロックから構成される。マクロブロックは 16×16 画素の領域に対応し、それぞれ 8×8 画素の 4 つの輝度ブロック (Y) と、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。輝度ブロックまたは色差ブロックは離散コサイン変換 (DCT) により周波数成分に変換された後、低周波数の DCT 係数から順に並べられる。

2.2 ローパスフィルタ

本稿では、MPEG-2 を対象としたフレーム棄却、ローパス、再量子化といった様々なフィルタリング手法のうち、再生動画像品質、レート制御の柔軟性の最も高いローパスフィルタを用いる。ローパスフィルタは、目標とするデータ転送レートに応じて、輝度または色差ブロックを構成する 64 個の DCT 係数のいくつかを削除する品質調整、レート制御手法である。提案手法では、残される DCT 係数の個数をローパスパラメータと呼び、符号化アルゴリズムの異なる I, P, B ピクチャそれぞれについて、以下に示す式を用いて適切なローパスパラメータ l_I, l_P, l_B を求める。

$$l_I = -6.17329 + 59.7498r_{G_i} - 112.427r_{G_i}^2 + 111.905r_{G_i}^3 \quad (1)$$

$$l_P = -11.8626 + 85.5488r_{G_i} - 159.667r_{G_i}^2 + 139.499r_{G_i}^3 \quad (2)$$

$$l_B = -71.9536 + 360.75r_{G_i} - 590.353r_{G_i}^2 + 353.265r_{G_i}^3 \quad (3)$$

ただし、 r_{G_i} は、 i 番目の GoP の目標圧縮率である。例えば、 $r_{G_i} = 0.5$ の場合、ローパスパラメータは $l_I = 17$, $l_P = 14$, $l_B = 7$ となる。 r_{G_i} は以下の式で与えられる。

$$r_{G_i} = \frac{T_i}{G_i - H_i} \quad (4)$$

G_i は i 番目の GoP の予測サイズ (bit) を表し, $i-1$ 番目の GoP の実測サイズ g_{i-1} (bit) を用いた以下の式によって導き出される.

$$G_i = \frac{7}{8}G_{i-1} + \frac{1}{8}g_{i-1}, \quad (i \geq 2, \quad G_1 = g_0) \quad (5)$$

H_i は, フィルタ処理の対象外であるヘッダ部分の予測値であり, i 番目の実測値 h_i (bit) を用いた以下の式によって導き出される.

$$H_i = h_{i-1}, \quad (i \geq 1, \quad H_i = h_0) \quad (6)$$

また, 式 (4) 中, T_i は, i 番目の GoP への割り当てビット数を示し, 目標とするビットレート R (bit), GoP 内のピクチャ数 N (frame), フレームレート F (fps) を用いて以下の式で求める.

$$T_i = \frac{R \times N}{F} - a_i - H_i \quad (7)$$

a_i は予測誤差を修正するための調整ビット数を表し, フィルタ後の k 番目の GoP サイズ f_k (bit) を用いて以下の式で求める.

$$a_i = \sum_{k=\max(0, i-5)}^{i-1} \frac{T_k - f_k}{5} \quad (8)$$

さらに, レート制御の精度を上げるために以下の式によってマクロブロック単位でローパスパラメータを増減させる. ただし, l_j を 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, 目標圧縮率を r_{G_i} , フィルタ前後のマクロブロックサイズを $o_{MB_{i-1}}$, $f_{MB_{i-1}}$ とする.

$$l_j = \begin{cases} l_j + 1 & , r_{G_i} \times o_{MB_{j-1}} - f_{MB_{j-1}} > 0 \\ l_j - 1 & , r_{G_i} \times o_{MB_{j-1}} - f_{MB_{j-1}} < 0 \\ l_j & , r_{G_i} \times o_{MB_{j-1}} - f_{MB_{j-1}} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

以上のアルゴリズムを用いることにより, それぞれのマクロブロックごとにピクチャタイプや予測誤差を考慮したローパスパラメータを適切に決定し, 目標レートにあった動画フィルタリングを行うことができる.

3. IXP1200 へのローパスフィルタの実装

3.1 IXP1200 の概要

本稿で用いた IXP1200 ネットワークプロセッサ [4-6] は, 200 MHz で動作する Intel StrongARM プロセッサコアと, 同じく 200 MHz で動作する 6 つのマイクロエンジンからなる (図 3). 1 つのマイクロエンジンは, 4 つのスレッドを並列実行可能であり, 6 つのマイクロエンジンで合計 24 個のスレッドを動作させることができる. マイクロエンジンはパケット転送などの単純な処理を対象としたシンプルな RISC プロセッサであるため, レジスタ数や命令行数などの制限が大きく, 動画品質調整のような高度なパケット処理を行うためには StrongARM プロセッサコアとマイクロエンジンの連携, 分散処理, メモリ管理など, さまざまな検討が必要となる.

3.2 マイクロエンジンによる分散処理

IXP1200 はマルチスレッド環境であるなど, 分散処理を得意としたアーキテクチャとなっており, ローパスフィルタを実装する場合においても, 品質調整処理を適切に分割しマイクロエンジン間で分散して処理させるようにすれば性能向上が期待できる. ただし, フィルタリング処理は非常に複雑なため, 簡単な処理を大量にこなすことを得意とするマイクロエンジンと, 複雑な処理をこなすことができる汎用プロセッサの StrongARM とを連携させる必要がある.

マイクロエンジンと StrongARM との処理分担について検討するため, コンピュータを用いた実験を行った結果, 例えば 8 Mbps の MPEG-2 動画は, ブロック層以下のデータが総データの約 75% を占め, また, DCT 係数の処理に約 56% の処理時間が費やされていることが分かった. さらに, ブロック層での処理に必要な命令ステップ数はマイクロエンジンで動作可能な 2048 ステップ以下であり, レジスタ数も十分であることが分かった. そこで, 本稿では, マイクロエンジンにブロック層での処理を行わせるものとし, 6 個のマイクロエンジンが並列動作するよう実装した.

3.3 動画品質調整のための動画データ分割

実時間動画マルチキャストにおいては, データ転送遅延に関する制約が厳しいため, アクティブノードでの動画品質調整にかかる処理遅延はできるだけ小さく抑えなければならない. したがって, パケット単位で受信, 蓄積, 調整, 送出処理を行うための動画データ分割が必要となる.

MPEG-2 符号化手法では, 可変長符号が用いられているため, ローパスフィルタの適用が容易なよう動画データを分割するためには, スタートコードを区切りとするのがよい. 2.1 節で述べたとおり, MPEG-2 符号化手法においてスタートコードの付加される最小データ単位はスライスであるため, 本稿ではスライスごとにパケット化し, 動画品質調整を行うこととする. 例えば MP@ML と呼ばれる動画フォーマットは, 720×576 画素, 30 fps であるので, 8 Mbps で符号化された場合, 1 ピクチャあたり 36 スライス, 1 スライスあたりおよそ 7 Kbit となる.

3.4 StrongARM とマイクロプロセッサの連携

ネットワークインタフェース (図 3 中 “Ethernet Ports”) から受信したパケットはバスを經由して StrongARM のメモリ空間に置かれる. StrongARM とマイクロエンジンとのデータ共有, 情報交換のため, StrongARM の内蔵キャッシュや仮想

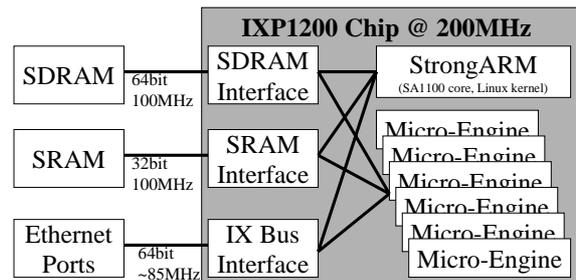


図 3 IXP1200 の構成図

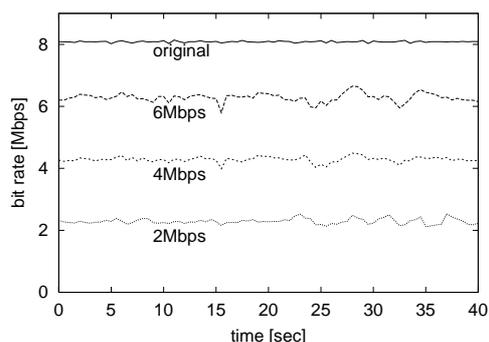


図4 ローパスフィルタによるレート調整

メモリ機構の影響を受けない物理メモリ空間上にデータを移動させる。

4. 実験と評価

IXP1200 に実装したローパスフィルタに対して、IP パケット化された MPEG-2 動画データを送信し、品質調整することにより、動画品質調整によるレート制御の精度、動画品質変動などについて評価し、実用性を検証する。なお、実験には、192 Kbps の音声データを含む 8 Mbps の動画データ (720×480 画素, 30 fps) を用いた。

4.1 レート制御アルゴリズム

図4は8 Mbpsの動画データに対し、目標レートをそれぞれ2, 4, 6 Mbpsとしてローパスフィルタを適用し、動画品質調整によるレート制御を行った結果である。すべてにおいてレートの変動も少なくおよそ所望のレートが達成できていることがわかる。

4.2 動画品質の変動

図5は、8 Mbpsの動画と2 Mbpsを目標としてフィルタを適用した動画の同一ピクチャを示している。ローパスフィルタは、DCT係数のうち、画質に与える影響の比較的小さい高周波成分を除去することにより、動画品質調整、レート制御を行うフィルタリング手法であるため、エッジ部分のぼけなど画質の精細さが低下していることがわかる。

図6は、動画の品質変動を表したグラフである。評価には、KDDメディアウィル製画質評価装置VP2000Aを利用した。評価尺度として、デジタル動画の劣化度を示す Coding Artifact を用いた。Coding Artifactは0~100の値をとり、高い数値ほど動画が劣化していることを示している。図より、元の動画データの符号化レートに対して目標レートが半分以下になると急激に画質が劣化することがわかる。これは、低い目標レートにあわせてローパスパラメータが小さくなり、高周波成分だけでなく低周波の成分も除去しなければならなくなるためである。図には示していないが、目標レートを1 Mbpsに設定した場合には、ヘッダなどローパスフィルタの適用できないデータの割合が大きくなり、フィルタ後の出力レートが1.5 Mbps程度になる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、MPEG-2 動画の実時間マルチキャストを対象と



図5 キャプチャ画像

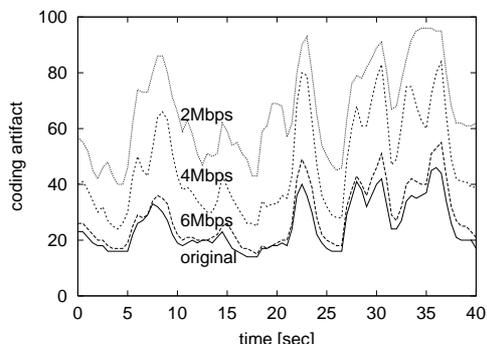


図6 ローパスフィルタによる動画品質変動

した品質調整手法であるローパスフィルタを、Intel IXP1200 ネットワークプロセッサを搭載したネットワーク機器に実装する方法を検討するとともに、ネットワーク上での動画品質調整の実現性、実用性を検証した。実験による評価の結果、IXP1200 ネットワークプロセッサを用いた MPEG-2 動画品質調整は十分なレート調整能力を有することが示された。ただし、すべてのマイクロエンジンをブロック処理に割り当てているため通常のパケット転送処理を StrongARM で行わなければならない、複数の動画データのフィルタリングによる負荷増大に対応していない、など、処理能力、処理効率の問題があり、性能向上については今後の課題としたい。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] H. Akamine, N. Wakamiya and H. Miyahara, "Heterogeneous video multicast in an active network," IEICE Transactions on Communications, vol.E85-B, no.1, pp.284-292, January 2002.
- [2] J. Smith, K. Calvert, S. Murphy, H. Orman, and L. Peterson, "Activating networks: A progress report," IEEE Computer, vol.32, no.4, pp.32-41, April 1999.
- [3] H. Akamine, K. Nakada, N. Wakamiya, M. Murata and H. Miyahara, "Implementation and evaluation of video filtering mechanisms for real-time multicast," 電子情報通信学会 技術研究報告 (NS 2001-50), pp.13-18, June 2001.
- [4] Intel Corporation, "Intel IXP1200 Network Processor Family Hardware Reference Manual," August 2001.
- [5] T. Spalink, S. Karlin, and L. Peterson, "Evaluating Network Processors in IP forwarding," Tech. Rep. TR-626-00, Department of Computer Science, Princeton University, November 2000.
- [6] 東條晴基, 長谷川剛, 村田正幸, "ネットワークプロセッサを用いた実験用ネットワークエミュレータシステムの構築," 電子情報通信学会 技術研究報告 (NS2001-227, IN2001-183), pp.25-32, January 2002.