

動画像品質調整機能を組み込んだ プロキシキャッシングシステムの実装と評価

谷口 義明[†] 笹部 昌弘^{††} 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†] 宮原 秀夫[†]

[†] 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

^{††} 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

E-mail: [†]{y-tanigu,wakamiya,murata,miyahara}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}m-sasabe@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし WWW システムで広く用いられているプロキシ技術を適用することにより、システムに大きな負荷を与えることなく、実時間で応答性の高い動画像ストリーミングサービスが実現できると考えられる。さらに、プロキシで蓄積データを適切に品質調整することにより、ネットワークへの接続形態、システム性能、再生動画像に対するユーザの好みなどによりさまざまに異なる要求品質に合わせた動画像配信が実現可能である。我々の研究グループでは、動画像品質調整機能を有するプロキシが通信状態やユーザの要求品質を考慮して、適切に動画像データを取得、蓄積、品質調整、転送するシステムのための効果的なプロキシキャッシング機構を検討している。本稿では、提案手法を実システムへ実装し、処理遅延、再生動画像品質、トラフィック量などの観点から評価を行った。その結果、提案手法を用いることで、利用可能な帯域にあわせて、実時間で動画像品質調整を行う動画像配信が提供可能であることを示した。キーワード 品質調整, 動画像ストリーミングサービス, プロキシキャッシング, MPEG-2

Implementation and Evaluation of Proxy Caching Mechanisms with Video Quality Adjustment

Yoshiaki TANIGUCHI[†], Masahiro SASABE^{††}, Naoki WAKAMIYA[†],

Masayuki MURATA[†], and Hideo MIYAHARA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

^{††} Graduate School of Engineering Science, Osaka University

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

E-mail: [†]{y-tanigu,wakamiya,murata,miyahara}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}m-sasabe@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract The proxy mechanism widely used in WWW systems offers low-delay data delivery by means of “proxy server”. By applying proxy mechanisms to the video streaming system, we expect that high-quality and low-delay video distribution can be accomplished without introducing extra load on a system. In addition, it is effective for proxy to adapt the quality of cached video data to users requests if requests are diverse due to heterogeneity in terms of the available bandwidth, end-system performance, and user’s preferences on the perceived video quality. We have proposed proxy caching mechanisms to accomplish the high-quality and highly-interactive video streaming services. In our proposed system, a video stream is divided into blocks for efficient use of a cache buffer. A proxy server is assumed to be able to adjust the quality of a cached or retrieved video block to a request through video filters. In this paper, to verify the practicality of our mechanisms, we implemented them on a real system and conducted experiments. Through evaluations from several performance aspects, it was shown that our proposed mechanisms can provide users with a video streaming service in a heterogeneous environment.

Key words Quality Adjustment, Video Streaming Service, Proxy Caching, MPEG-2

1. はじめに

近年、コンピュータの高性能化やアプリケーションのマルチメディア化、ネットワークの広帯域化に伴い、ストリーミングサービスなどの動画像データ配信を行うマルチメディアアプリケーションの利用が増加してきている。しかしながら、定期的かつ大量に動画像トラフィックが発生するためネットワークの輻輳が引き起こされ、アプリケーションの要求するデータ転送の実時間性やユーザ操作に対する応答性が低下するとともに、パケット棄却により動画像品質が劣化することが問題となっている。

WWWシステムで今日広く用いられているプロキシ技術は、プロキシサーバと呼ばれる網内の中継システムでクライアントが過去に利用したデータをキャッシュバッファに蓄積しておき、新たなデータ転送要求に対してサーバに代わって蓄積データを転送することにより、サーバからの伝送遅延を隠蔽し、高速なデータ配信を実現する。プロキシ技術を動画像配信システムに適用することにより、ネットワークやサーバの負荷を軽減し、応答性の高い動画像データ配信サービスが提供できると考えられる[1-6]。さらに、プロキシにおいて蓄積データを適切に品質調整することができれば、ネットワークへの接続形態、システム性能、再生動画像に対するユーザの好みなどによりさまざまに異なる要求品質にあわせた動画像をネットワークの負荷状況にあわせて配信することが可能になる。

我々の研究グループでは、高品質な動画像データを途切れなくクライアントに提供するための、プロキシキャッシング機構について検討している[7]。動画像品質調整機能を有するプロキシが、通信状態やユーザの要求品質を考慮して、動画像データを取得、蓄積、品質調整、転送するシステムを対象に、効果的な動画像データ取得アルゴリズム、キャッシュ置き換えアルゴリズム、動画像データ先読みアルゴリズムを提案し、実データにもとづくシミュレーションにより提案手法の有効性を示した。しかしながら、シミュレーション評価においては、動画像品質調整に要する処理遅延や、レート制御による受信動画像品質の変化がユーザの感じるサービス品質に与える影響については考慮していない。そこで、本稿では、提案手法にもとづく動画像配信システムを構築し、処理遅延、再生動画像品質、トラフィック量などの観点から評価を行い、提案手法の実用性を検証する。実験の結果、提案手法を用いることで、ネットワークの輻輳状態の変化にあわせて高品質な動画像を途切れなく配信できることを示す。

以下、2章では、動画像品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシング機構の概要を述べ、3章で提案手法の実システムへの実装方法を述べる。4章で実装システムを用い、提案手法の実用性、有効性について検証する。最後に、5章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 動画像品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシングシステムの概要

本章では、我々の提案する、動画像品質調整機能を組み込んだ

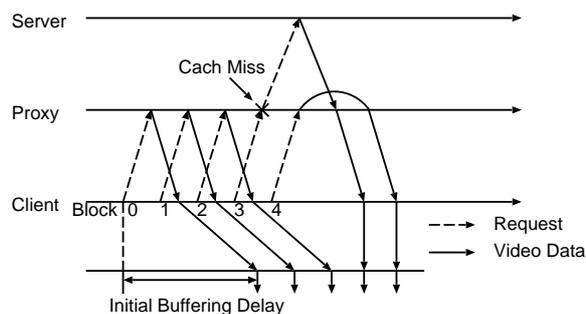


図1 提案手法の基本動作

Fig. 1 Basic Behavior of Proposed Mechanisms

プロキシキャッシングシステムの概要を述べる。なお、提案手法の詳細については、文献[7]を参照されたい。

図1に提案システムの基本動作を示す。動画像ストリームは、キャッシュバッファや伝送帯域の有効利用を図るため、一定時間ごとのブロックに分割される。クライアントは一定間隔ごとにプロキシにブロック単位で動画像データの転送を要求する。転送要求に際しては、求めるブロックを指定するとともに、利用可能な帯域やシステム性能、再生動画像に対するユーザの好みなどにより決定される要求品質を通知する。プロキシは、適切なアルゴリズムにもとづいて動作するブロック取得機構、ブロック先読み機構、キャッシュ内ブロック置き換え機構により、要求品質に応じたブロックをクライアントに提供する。遅延のゆらぎによる再生の途切れを防ぐため、クライアントは受信したブロックを一時バッファリングした後、順次再生する。

クライアントからのブロック転送に対して、要求品質を超える品質のブロックがキャッシュにあれば、キャッシュヒットとなり、プロキシはキャッシュから該当ブロックを読み出し、クライアントの要求品質に応じてブロックの品質を調整し、クライアントに転送する。一方、キャッシュ内に該当するブロックがない、あるいはキャッシュ内のブロックの品質が要求品質に満たない場合は、キャッシュミスとなり、プロキシはサーバ/プロキシ間での利用可能な帯域やクライアントの要求品質、キャッシュされているブロックの再利用性などを考慮して、動画像サーバから取得するブロックの品質を決定し、動画像サーバにブロックの転送を要求する。

動画像サーバから取得したブロックを蓄積するのに十分な空きがキャッシュバッファにない場合、プロキシはキャッシュ内ブロックの置き換えを行う。キャッシュ内の各ブロックはクライアントが要求中のブロックからの距離や動画像ストリーム中での位置などに応じてキャッシュに残される優先度が定められる。プロキシは、まず、優先度の最も低いブロックに対して品質調整を施すことにより、新たに取得したブロックを蓄積するための空きを作る。品質調整により十分な空きが生まれなかった場合は、そのブロックを棄却する。新たに取得したブロックが蓄積可能になるまで、優先度の低いブロックから順に品質調整、棄却を繰り返す。

キャッシュヒットの場合、サーバ/プロキシ間の帯域を利用してブロックの先読みを行う。また、キャッシュミスの場合で

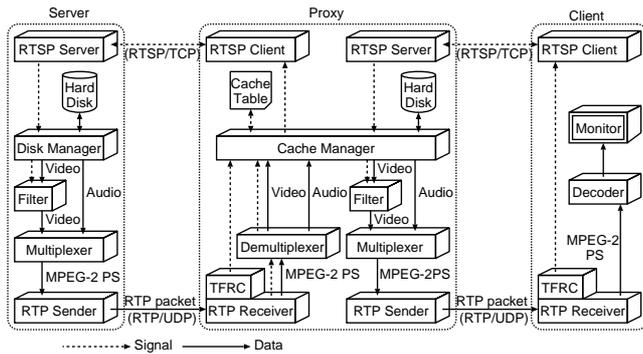


図 2 実装システムの構成

Fig. 2 Modules Constituting System

も、サーバ/プロキシ間の帯域が十分に大きければ、帯域に空きが生じるため先読みを行うことができる。クライアントからのブロック転送要求を受信すると、プロキシは、要求されたブロックをクライアントに提供すると同時に、続くいくつかのブロックについて蓄積状態を調べる。キャッシュされたブロックの品質が要求品質を下回る、もしくはキャッシュされていないブロックがある場合には、サーバ/プロキシ間の余剰帯域を用いてあらかじめ動画像サーバからブロックを取得し、キャッシュミスを防ぐ。先読みされるブロックの品質は、キャッシュミス発生時のブロック取得と同様に、帯域、要求品質、再利用性を考慮して適切に決定される。

3. 動画像品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシングシステムの実装

本章では、提案手法の実システムへの実装方法を述べる。実装システムの構成を図 2 に示す。図中、それぞれの四角は制御モジュールを表しており、プロキシを構成するモジュール郡はクライアントごとに生成される。また、実線の矢印は動画像データの流れを、破線の矢印は制御情報の流れを示している。実装システムでは、動画像配信制御に RTSP (Real Time Streaming Protocol) [8] / TCP を、動画像データ転送に RTP (Realtime Transport Protocol) [9] / UDP を用いている。また、動画像フォーマットは MPEG-2 PS (Program Stream) とした。サーバ/プロキシ間、プロキシ/クライアント間で動画像転送に利用可能な帯域は、TCP との公平性を考慮したマルチメディア通信のためのレート制御手法である TFRC (TCP-Friendly Rate Control) [10] により決定されるものとする。本システムはネットワークの負荷状態や通信能力に応じて変化する TFRC のレートを要求品質とする。要求品質にしたがって動画像ブロックを加工する動画像品質調整手法としては、ローパスフィルタ [11] を用いる。

3.1 MPEG-2 PS 動画像の分離

MPEG-2 PS では 1 本の動画像ストリームに映像データと音声データが多重化されている。動画像品質調整は映像データのみにも適用されるため、プロキシの RTP Receiver を介して受信された動画像ブロックは、Demultiplexer により音声ブロックと映像ブロックに分離され、それぞれキャッシュバッファに蓄

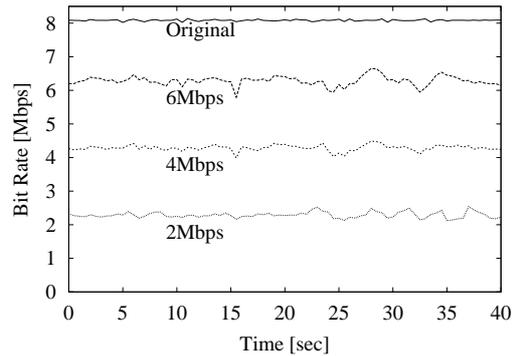


図 3 ローパスフィルタによるレート調整

Fig. 3 Video Rate Adjustment by Lowpass Filter

積される。キャッシュヒットの場合には、キャッシュバッファ内から映像ブロックと音声ブロックを読みだし、必要に応じて映像ブロックに品質調整を施し、Multiplexer を用いて両者を動画像ブロックに多重化した後、クライアントに転送する。

クライアントは RTSP の PLAY メッセージを送出することにより、動画像ブロックの転送を要求する。実装システムでは MPEG-2 動画像のデータ構造および PLAY メッセージによるブロック指定の容易さを考慮し、MPEG-2 におけるデータ単位のひとつである GoP (Group of Pictures) ごとに動画像ストリームをブロックに分割する。本システムでは、ひとつの GoP は 30 枚のフレームからなる。実験では 30 フレーム毎秒の動画像ストリームを用いているため、ひとつの GoP は 1 秒分の動画像に相当し、PLAY メッセージの Range フィールドを用いて時間範囲を指定することにより、必要なブロックを要求することができる。

3.2 TFRC によるレート制御

TFRC は「同一ネットワークパス上における、非 TCP コネクションの得るスループットと TCP コネクションの得るスループットが等しい」という TCP-friendly の概念に基づき、帯域使用において TCP と公平なマルチメディア通信を実現するレート制御手法である [10]。TFRC では適当な時間間隔ごとに、RTT やパケット棄却率といったネットワーク状態をあらゆるフィードバック情報にもとづき、同一パス上の TCP セッションの得るスループットを予測し、データ送出レートを決定する。TFRC では RTCP (Real-Time Control Protocol) によりフィードバック情報を得て、送信側システムがセッションのスループット予測を行うが、実装システムでは、プロキシからクライアントへのデータ転送レートを TFRC アルゴリズムによりクライアントが定め、これを要求品質として PLAY リクエスト内の Bandwidth フィールドを用いてプロキシに伝える。

3.3 動画像品質調整

MPEG-2 動画像の品質調整手法としては、フレーム棄却、ローパス、再量子化といった様々な手法があるが、本システムでは、再生動画像品質、レート制御の柔軟性、処理時間に関してよい性能を示すローパスフィルタを用いる [12]。ローパスフィルタは、動画像データ中の高周波成分を一部削除すること

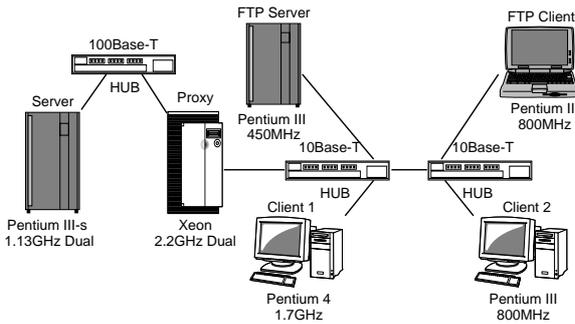


図 4 実験システム構成

Fig. 4 Configuration of Experimental System

によって、動画像品質およびデータ量を調整する手法である。8 Mbps で符号化された動画像ストリームをローパスフィルタを用いて 2, 4, 6 Mbps に品質調整を行った例を図 3 に示す。

3.4 ブロック取得機構

プロキシは、*Cache Table* と呼ばれるブロックの番号と品質の対応表を用いて、キャッシュでのブロック蓄積状態を管理している。クライアントからのブロック転送要求に対し、*Cache Manager* は *Cache Table* を参照し、キャッシュミスの場合には、*RTSP Client* を通じてクライアントの要求を満足することのできるブロックの転送を動画像サーバに要求する。

動画像サーバは、最も高い品質のブロックを保持しており、動画像品質調整により、プロキシからのさまざまな品質でのブロック転送要求に対応する。動画像サーバの *Disk Manager* は、*RTSP Server* を介してプロキシからのブロック転送要求を受け取り、映像、音声ブロックを読みだし、*Filter* を用いて映像ブロックに品質調整を施した後、*Multiplexer* により音声ブロックと多重、*RTP Sender* を介してプロキシに転送する。

プロキシの *Cache Manager* は、*RTP Receiver* と *Demultiplexer* を介して音声ブロックと映像ブロックを受け取り、クライアントに適切な品質のブロックを転送すると同時に、音声、映像ブロックを *Hard Disk* に蓄積する。

3.5 ブロックの先読み機構

Cache Manager は、クライアントからのブロック転送要求を受信すると、要求されたブロックの後に続く P 個のブロックについて蓄積状態を調べ、必要ならばクライアントの要求品質にあわせてブロックの先読みを行う。ただし、動画像サーバでは、先読みが重要性、緊急性の高いブロック転送に影響を与えないようにするため、先読みによる転送要求をキャッシュミスによる転送要求より優先度を低くして取り扱う。

3.6 キャッシュ内ブロックの置き換え機構

キャッシュバッファは有限のため、*Cache Manager* は新たに取得したブロックが蓄積可能になるまで、クライアントの参照ブロック、要求品質、ブロックの位置などにもとづいてキャッシュ内ブロックの品質調整および廃棄を行い、ブロックを置き換える。そのため、*Cache Manager* はキャッシュ内ブロックの総量を管理している。

4. 実装システムの実験評価

本章では、クライアントにおける受信レート変動、再生動画像品質、およびプロキシでのブロック処理遅延の観点から提案手法の実用性を評価する。

実験システムの構成を図 4 に示す。実験には、8 Mbps の符号化レートで符号化された 720×480 画素、30 フレーム毎秒、30 分間の動画像ストリームを 1 本用いる。動画像ブロックは 1 GoP に相当し、GoP は 30 フレームからなる。動画像サーバには、符号化レート 8 Mbps の動画像ストリーム全体が蓄積されている。一方、プロキシは 450 MByte のキャッシュバッファを有しており、3 Mbps に品質調整された動画像ストリームが先頭から 20 分だけあらかじめ蓄積されている。なお、先読みブロック数 P は 5 に設定した。クライアント 1 の先頭の動画像ブロックに対する転送要求の送出時刻を 0 とし、600 秒後に転送要求の送出を停止する。また、時刻 180 秒から 780 秒まで、クライアント 2 が同じ動画像に対する転送要求を行う。なお、先頭ブロックに対する要求品質は 1 Mbps とした。いずれのクライアントも 4 MByte 分のブロックの受信完了後に、早送り、巻戻し、一時停止といった操作なしに、先頭ブロックから順に再生し、ブロック転送要求の停止と同時に受信、再生を終了する。時刻 360 秒からは FTP サーバ/クライアント間で TCP セッションによる 40 MByte のファイルの転送を行う。

比較の対象として、常に 6 Mbps の品質の動画像ブロックを要求し、TFRC にもとづくレート制御、および動画像品質調整を行わない場合についてもあわせて評価した。ただし、ブロック取得遅延の累積による極端な再生の途切れを防ぐため、プロキシには 6 Mbps に品質調整した動画像をあらかじめ蓄積しておく。

4.1 受信レート変動の評価

クライアント 1、および 2 の *RTP Receiver* における動画像データ受信レートの変動を、提案手法を用いた場合についてそれぞれ図 5(a), (b)、レート制御を行わなかった場合について図 6(a), (b) に示す。また、図 5(c) および図 6(c) には、FTP によるファイル転送における受信レート変動を示す。

図 5 より、提案手法においては TFRC によるレート制御の結果、クライアント間および TCP セッションとの帯域共有が実現されていることがわかる。一方、レート制御を行わない場合には (図 6)、クライアント 1 は平均 6 Mbps の動画像データを受信しはじめるが、クライアント 2 への動画像配信、FTP によるファイル転送により輻輳が引き起こされ、パケット棄却が発生し、受信レートが低下するとともに激しく変動する。また、動画像配信セッションが 6 Mbps の動画像データを送出し続けるのに対し、TCP はネットワークの輻輳状態に応じてレート制御を行うため、スループットが低下する。その結果、動画像配信が TFRC アルゴリズムにもとづく動画像品質調整によるレート制御を行う場合には FTP が約 60 秒でファイルを転送し終えるのに対し、レート制御を行わない場合にはファイル転送完了までに約 140 秒かかる。

したがって、ネットワークの輻輳状態に応じて動画像品質調

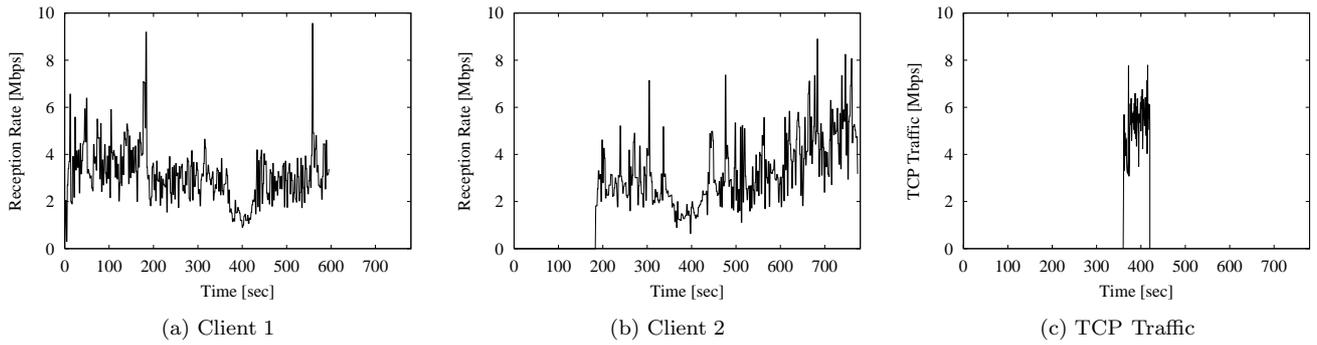


図 5 提案手法における受信レート変動

Fig. 5 Reception Rate Variation with Proposed Mechanisms

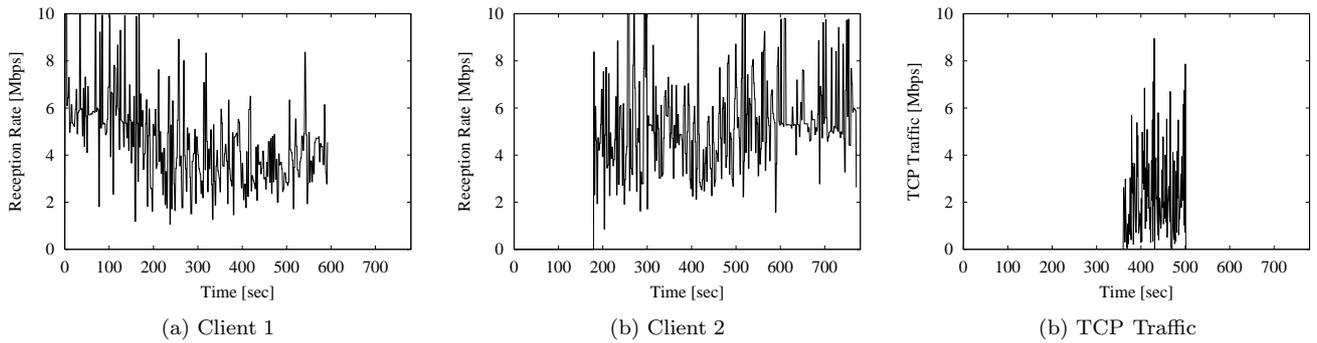


図 6 一定品質の動画配信における受信レート変動

Fig. 6 Reception Rate Variation with Fixed-Quality Request

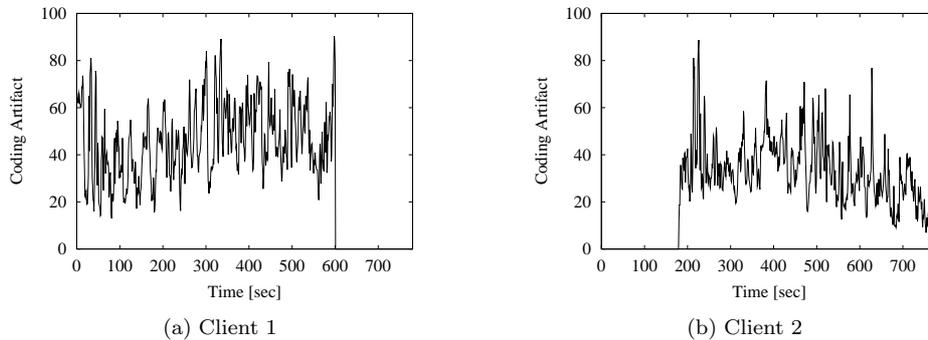


図 7 提案手法における動画品質変動

Fig. 7 Video Quality Variation

整を行う提案手法を用いることにより、他のトラフィックに大きな影響を与えることのない動画配信を実現可能である。しかしながら、受信レートの変動が比較的大きく、また、スループットも TCP と比較して低い。これは、本評価の実験環境が小規模であり、それぞれのセッションのレート制御が互いに大きな影響を与え合うため、RTT やパケット棄却率が激しく変動することによる。より多数のセッションが混在する大規模なネットワークでは、より安定したレートで公平性の高い動画配信が可能になると考えられる。

4.2 動画品質変動の評価

提案手法を用いた場合の動画品質の変動を図 7(a) および (b) に示す。また、8 Mbps、2 Mbps で符号化された動画ストリームの画質変動を図 8 に示す。評価には、KDD メディアウィル製画質評価装置 VP2000A を利用して測定した、デジタ

ル動画符号化による動画品質劣化の度合いを表す Coding Artifact を用いた。Coding Artifact は、0 ~ 100 の値をとり、数値が高いほど動画品質劣化が大きいことを示している。

提案手法では、ネットワークの負荷状態に応じて動画品質調整を行うため、図 7 に示されるとおり動画品質が時間によって大きく変化するが、図 5 に示される受信レートの増減と動画品質の変動は一致していない。これは、シーンや画面の複雑さによって符号化効率が異なるため、図 8 に示されるように一定レートで符号化された動画データにおいても画質変動があること、また、ローパスフィルタによる動画品質調整では、調整前後のレートの差が大きいほど調整による品質劣化が大きくなるため、プロキシに蓄積された動画ブロックの品質のばらつきが提供されるブロックの品質に影響を与えることなどによるものと考えられる。

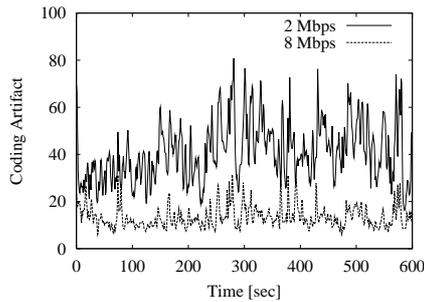


図 8 一定レートで符号化された動画の画質変動
Fig. 8 Video Quality Variation of CBR Stream



図 9 再生動画例
Fig. 9 Playback Video

また、動画品質調整によるレート制御を行わない場合には、輻輳によるパケット棄却、転送遅延の増大により、動画再生の途切れ、こま落ち、ブロックノイズが発生した。図 9 に、提案手法を用いた場合とレート制御を行わない場合のそれぞれについて、フレームの再生例を示す。提案手法においては、ネットワークの負荷状態にあわせた適切なレートで動画品質が調整された後、動画ブロックが送出されるため、パケット棄却の発生が抑えられ、図 9(a) に示されるとおり高品質な動画を再生することができる。一方、図 9(b) に示されるとおり、一定品質の動画ブロックを要求する場合には、パケット棄却の影響が大きく、画質が劣化する。

4.3 処理遅延の評価

動画再生の途切れなどを防ぐためには、プロキシは、それぞれのブロックをその要求間隔である 1 秒以内に処理しなければならない。2 台のクライアントに対する動画配信において、動画ブロックの品質調整にかかった処理時間の最悪値は約 0.5 秒であったため、ブロック取得、置き換え、転送を 0.5 秒以内に終わることができれば、クライアントに途切れなく動画ブロックを提供し続けることができると考えられる。ただし、品質調整の処理時間は、調整対象となるブロックの大きさに依存すること、また、クライアント数の増加によりプロキシの負荷が増大することなどから、より大規模なシステムでのさらなる評価が必要である。

5. おわりに

本稿では、動画品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシング技術の実システムへの実装を行い、トラヒック、動画品質、処理遅延の観点から提案手法の実用性、実現性について検証した。実験による評価の結果、ネットワークの輻輳状態の変化やユーザの要求品質に応じて動的に動画品質調整を行うことにより、低遅延かつ高品質な動画配信が実現可能であることを示した。ただし、プロキシが複数の動画ストリームを提供する場合におけるキャッシュバッファの共有機構、大規模なネットワークにおける手法の有効性などについては引き続き検討、評価を行う必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費先導的研究等の推進、および通信・放送機構創造的情報通信技術研究開発推進制度によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] K.-L. Wu, P. S. Yu, and J. L. Wolf, "Segment-based proxy caching of multimedia streams," in *Proceedings of the 10th International WWW Conference*, pp. 36–44, 2001.
- [2] R. Rejaie, H. Yu, M. Handley, and D. Estrin, "Multimedia proxy caching mechanism for quality adaptive streaming applications in the internet," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, March 2000.
- [3] M. R. F. Hartanto and K. W. Ross, "Interactive video streaming with proxy servers," in *Proceedings of First International Workshop on Intelligent Multimedia Computing and Networking*, vol. 2, pp. 588–591, February 2000.
- [4] W. hsiu Ma and D. H. Du, "Reducing bandwidth requirement for delivering video over wide area networks with proxy server," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, March 2000.
- [5] R. Rejaie and J. Kangasharju, "Mocha: A quality adaptive multimedia proxy cache for internet streaming," in *Proceedings of NOSSDAV 2001*, March 2001.
- [6] M. Andrews and K. Munagala, "Online algorithms for caching multimedia streams," in *Proceedings of European Symposium on Algorithms*, pp. 64–75, 2000.
- [7] M. Sasabe, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "Proxy caching mechanisms with video quality adjustment," in *Proceedings of ITCOM 2001*, vol. 4519, pp. 276–284, August 2001.
- [8] H. Schulzrinne, A. Rao, and R. Lanphier, "Real Time Streaming Protocol (RTSP)," *Internet Request for Comments 2326*, April 1998.
- [9] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for real-time applications," *Internet Request for Comments 1889*, January 1996.
- [10] M. Handley, J. Padhye, S. Floyd, and J. Widmer, "TCP friendly rate control (TFRC): Protocol specification," *Internet draft draft-ietf-tsvwg-tfrc-04.txt*, April 2002.
- [11] 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, September 1996.
- [12] T. Yamada, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "Implementation and evaluation of video-quality adjustment for heterogeneous video multicast," submitted to *APCC 2002*, September 2002.