

# 動画像品質調整可能なプロキシキャッシュのための キャッシングメカニズム

笹部 昌弘† 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

Phone: 06-6850-6588, Fax: 06-6850-6589

E-mail: {m-sasabe, wakamiya,  
miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ 大阪大学 サイバーメディアセンター  
〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-30

Phone: 06-6879-8793, Fax: 06-6879-8794

E-mail: murata@cmc.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、クライアントごとの QoS 要求にもとづいた動画像配信が実現可能である。本稿では、クライアントの要求品質を考慮した高品質で高速な動画像配信を提供するプロキシキャッシュシステムを実現するため、プロキシにおける動画像データ取得、先読み、置き換え手法について検討した。シミュレーションによる評価の結果、提案手法を用いることにより、より少ないキャッシュバッファで、ネットワークに与える負荷が小さく低遅延な動画像配信が提供可能であることを示した。

和文キーワード プロキシキャッシュ, 動画像配信, QoS, 品質調整

## Caching mechanisms for proxy cache with quality adaptation

Masahiro Sasabe† Naoki Wakamiya† Masayuki Murata‡ Hideo Miyahara†

† Graduate School of Engineering Science, Osaka  
University

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

Phone: +81-6-6850-6588, Fax: +81-6-6850-6589

E-mail: {m-sasabe, wakamiya,  
miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ Cybermedia Center, Osaka University

1-30 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043,  
Japan

Phone: +81-6-6879-8793, Fax: +81-6-6879-8794

E-mail: murata@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** The proxy mechanism is now widely used in WWW system in order to offer low-delay data delivery with an assistance of the "proxy server". By applying the proxy mechanism to video transfer, we can expect a low-delay and interactive video streaming service provided without introducing extra load on the stream. In addition, if the proxy appropriately adapts the quality of cached video data to the requested quality, video streams can be delivered to users by considering their heterogeneous QoS requirements. In this paper, we consider mechanisms of data retrieval, prefetching and replacement for the proxy cache. Through simulation experiments, we show that our proposed proxy caching mechanism achieves a high-quality and low-delay video distribution which meeting user's demand.

**key words** proxy cache, video streaming, QoS, quality adaptation

## 1 はじめに

近年のコンピュータの高速化やネットワークの広帯域化にともない、ストリーミングサービスなどの動画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、定常的かつ大量の動画トラフィックによりネットワークの輻輳が発生し、データ転送遅延が増大するため、マルチメディアアプリケーションの実時間性や応答性が満たせなくなることが問題となっている。

ネットワークの負荷を抑え、データ配送遅延を小さくすることでアプリケーションの応答性を高める手段として WWW システムで広く用いられているプロキシ技術がある。動画配信システムにおいても、プロキシ技術を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、応答性の高い動画データ配信サービスが実現できると考えられる。しかしながら、現在のプロキシ技術はテキストや静止画像といったファイルを単位とした取得、蓄積を行うため、ひとつのファイルが数十ギガバイトにもなる動画データにはそのまま適用できない。また、ネットワークへの接続形態やシステム性能、あるいはユーザの再生動画に対する好みによって様々な異なる動画品質への要求をクライアントごとに考慮しなければならない。

そこで本稿では、ネットワークやサーバに負荷を与えることなく動画配信サービスの応答性を高めると同時に、様々な異なるクライアントの要求品質を考慮した動画データ配信を行うプロキシキャッシングシステムを提案する。プロキシではフレーム棄却、ローパス、再量子化といった動画品質調整技術 [1] を利用し、クライアントの要求品質にもとづいてサーバから取得した、あるいはキャッシュ内に蓄積された動画データの品質を適切に調整し、クライアントに提供する。また、提案システムではいくつかのピクチャをひとまとめとした単位で動画データを取り扱うことにより、キャッシュバッファの効率的な利用を図る。

サービス利用開始から再生開始までの時間を短くすることで応答性を高めると同時に高品質な動画を提供可能な動画配信サービスを実現するためには、サーバからどのような品質の動画データを取得し、どのように蓄積し、クライアントに提供するかについて検討しなければならない。また、有限なキャッシュバッファを効率的に利用するためには、新たに取得した動画データを蓄積するためキャッシュデータを適切に置き換えるアルゴリズムが必要となる。さらに、データ転送遅延を低く抑えるためには、キャッシュデータ

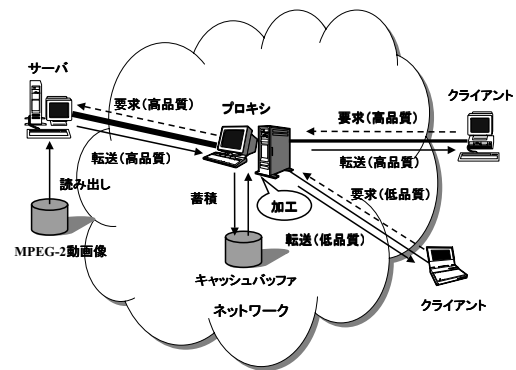


図 1: プロキシキャッシュを用いた MPEG-2 動画ストリーミング配信システム

でクライアントの要求品質が満たされる場合などに生じるサーバ-プロキシ間の空き帯域を利用して、将来必要になると思われる動画データを適切な品質であらかじめ先読みするのも有効であると考えられる。このような、動画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における様々な検討課題について、効果的な手法を提案し、それらをキャッシュバッファ内データ量、動画再生開始までの遅延、動画品質などにもとづいて比較評価することにより適用範囲や有効性を示す。

以下、2 章では、本稿で対象とするプロキシキャッシングを用いた動画配信システムの概要と、本稿で提案した、動画品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシングメカニズムについて述べ、3 章でシミュレーションによりその性能を評価する。最後に、4 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2 プロキシキャッシュを用いた動画ストリーミング配信システム

本稿では、図 1 に示すような一台の動画サーバと複数のクライアントがプロキシを介して接続されたシステムでの MPEG-2 動画配信サービスを対象とする。クライアントはあらかじめ指定されたプロキシとの間に動画通信セッションを確立することで動画配信サービスの利用を開始し、プロキシに動画データの転送を要求する。プロキシからクライアントに配信する動画の品質は、クライアントシステムの性能や利用可能な帯域、あるいは再生動画品質に対するユーザの好みなどによって決定されるが、本稿では比較的高性能なクライアントシステムと、動画品質に対して寛容なユーザを仮定し、プロキシ-クライアント間で利用可能な帯域のみによってクライアントの要求品質

が決定されるものとする。利用可能な帯域は下位層のレート制御によって決定されるデータ転送レートに従うものとし、マルチメディアデータ通信のためのレート制御手法である MPEG-TFRC (TCP-Friendly Rate Control Protocol for MPEG video transfer) [2, 3] や TFRC (TCP Friendly Rate Control) [4] を用いる。ただし、システム性能やユーザの好みは、提供する動画品質の上限値と下限値としてそれぞれ与えることにより、本稿で提案するプロキシキャッシングメカニズムで取り扱うことができる。

## 2.1 動画品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシングメカニズム

提案メカニズムでは MPEG-2 動画ストリームのデータ構造やキャッシュデータの再利用性を考慮して GoP (Group of Pictures) を単位としたデータ配信を行う。クライアントは定期的に GoP を単位としてプロキシにデータ転送を要求する。プロキシは、クライアントからのデータ転送要求受信時にプロキシ-クライアント間で利用可能な帯域から、クライアントに転送する動画データの品質を決定する。ただし、TFRC などのレート制御間隔は往復伝播遅延に応じて定められるため、動画データの転送要求の到着間隔とは一致しない。そこで、プロキシやサーバへのデータ転送要求到着時の TFRC のデータ転送レートを動画配信に利用可能な帯域とみなす。また、動画品質は MPEG-2 の符号化パラメータである量子化スケールの逆数によって表されるものとし、量子化スケールと平均レートの関係から容易に決定可能であるものとする [5]。

プロキシは扱う動画ストリームごとに表 1 に示すようなキャッシュ内に蓄積された GoP のデータサイズと品質の対応表を保持しており、これと要求品質とを比較する。キャッシュデータの品質がクライアントの要求品質を下回る場合はキャッシュミス、上回る場合はキャッシュヒットとなる。ただし、キャッシュにない GoP の品質は 0 とする。キャッシュヒットの場合には、再量子化フィルタ [1] などを用いてキャッシュデータをクライアントの要求品質に合わせて加工し、クライアントに転送する。

一方、キャッシュミスの場合には、すでにそのクライアントに対するサーバからの動画データ取得のためにサーバ-プロキシ間に確立されたセッションを用い、なければ新しくセッションを確立して、適切な品質の動画データをサーバから取得する。サーバから取得する動画データの品質は、クライアントの要求品質

表 1: キャッシュデータ管理リスト

GoP	サイズ	品質	受信中の品質
1	a	A	B
2	b	C	0
3	0	0	D
⋮	⋮	⋮	⋮

やキャッシュデータの再利用性を考慮して決定するが、詳細なアルゴリズムについては次節で検討する。サーバから取得した動画データはそのまま蓄積し、クライアントの要求品質に合わせて加工、転送される。

## 2.2 クライアントの要求品質を考慮した動画データ取得

キャッシュミス発生時にプロキシがサーバに要求する動画データの品質は、取得したデータの再利用性や、クライアントの要求品質、サーバ-プロキシ間の帯域を考慮して決めなければならない。ただし、サーバからの動画データ取得に利用可能な帯域は、プロキシ-クライアント間の利用可能な帯域とは無関係に決定されるため、クライアントからの要求品質を満たすデータ取得に十分であるとは限らない。そこで、キャッシュデータやサーバから取得する動画データによりプロキシが提供可能な動画品質のクライアントの要求品質に対する比  $\alpha$  に基づいて制御を行う。

$$\alpha = \frac{\max(Q_{sp}(i, j), Q_{cache}(i, j))}{Q_{pc}(i, j)} \quad (1)$$

ここで、 $i$  はクライアント番号、 $j$  はクライアント  $i$  が要求している GoP の番号とする。またクライアント  $i$  に対してサーバ-プロキシ間に確立されたセッションで 1 GoP 時間内に転送可能な GoP <sub>$j$</sub>  の品質を  $Q_{sp}(i, j)$  と表す。 $Q_{sp}(i, j)$  はサーバ-プロキシ間で利用可能な帯域から決定される量子化スケールの逆数として与えられる。同様に、プロキシ-クライアント間で転送可能な動画品質を  $Q_{pc}(i, j)$  とし、これがクライアント  $i$  の GoP <sub>$j$</sub>  に対する要求品質となる。また、 $Q_{cache}(i, j)$  はキャッシュされた GoP <sub>$j$</sub>  の品質を表し、キャッシュに該当する GoP がない場合には 0 となる。本節では、キャッシュデータが要求品質を満たせない場合について検討しているため、 $Q_{cache}(i, j) < Q_{pc}(i, j)$  である。

プロキシの提供可能な動画データがクライアントの要求を満たせる場合 ( $\alpha \geq 1$ ) にサーバに要求する動画品質の決定には、データの再利用性、キャッシュバッファ容量を考慮したいくつかの手法が考えられる。

手法 1: 後から同じ動画像ストリームを見るユーザーのため、できる限り高品質な動画像データを取得、蓄積しておき、キャッシュミスの発生率を低く抑える。この場合、サーバに要求する動画像の品質  $Q_{req}(i, j)$  は、以下ようになる。

$$Q_{req}(i, j) = Q_{sp}(i, j) \quad (2)$$

手法 2: 手法 1 では、プロキシ-クライアント間に比べてサーバ-プロキシ間の利用可能な帯域が極端に大きい場合には、不必要に高品質な動画像データを取得、蓄積してしまうため、帯域やキャッシュバッファの有効利用が図れない。そこで、手法 2 では GoP<sub>j</sub> に対して要求される品質を予測して、サーバへの要求品質を決定する。クライアント  $i$  自身とより過去の GoP を参照しているクライアントの集合を  $S$  とすると  $Q_{req}(i, j)$  は以下の式で与えられる。

$$Q_{req}(i, j) = \min\left(\max_{k \in S, 0 \leq l \leq j} Q_{pc}(k, l), Q_{sp}(i, j)\right) \quad (3)$$

手法 3: キャッシュバッファの容量が非常に小さい場合には、より多くの GoP データを蓄積しておくことによりキャッシュデータの再利用性を高めることができると考えられるため、クライアント  $i$  からの要求品質どおりの動画像データをサーバに要求する。

$$Q_{req}(i, j) = Q_{pc}(i, j) \quad (4)$$

プロキシの提供可能な動画像データがクライアントの要求品質を満たせない場合 ( $\alpha < 1$ ) には、転送遅延が増大するが要求品質を満たす動画像データを提供する手法と、要求品質を満たせないが 1 GoP 時間内で転送可能な動画像データを提供する手法が考えられる。ユーザーの動画像配信サービスに対する要求を表す指標である、提供される動画像品質の要求品質に対する比  $\beta$  にもとづいて制御する。 $\beta$  の値が 0 に近いほどユーザーが高速な実時間性の高いサービスを望んでいることを、1 に近いほど利用可能な帯域の範囲内でできるだけ高品質な動画像を要求することをあらわす。

まず、キャッシュデータが要求品質をほぼ満たせる場合 ( $\beta \leq \frac{Q_{cache}(i, j)}{Q_{pc}(i, j)} \leq \alpha < 1$ ) にはキャッシュデータを送り、サーバへの動画像データ転送要求は行わない。キャッシュデータの品質が低い帯域は比較的大きい場合 ( $\frac{Q_{cache}(i, j)}{Q_{pc}(i, j)} < \beta \leq \frac{Q_{sp}(i, j)}{Q_{pc}(i, j)} = \alpha < 1$ ) には、可能な限り高い品質の動画像データを要求する。

$$Q_{req}(i, j) = Q_{sp}(i, j) \quad (5)$$

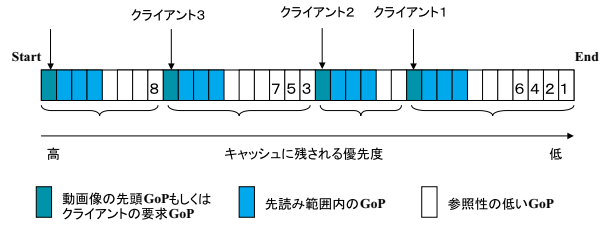


図 2: キャッシュ内データの置き換え順

また、プロキシの提供可能な動画像品質がクライアントの要求品質を満たせない場合 ( $\alpha < \beta$ ) には、最低限の品質の動画像データをサーバに要求する。ただし、 $\beta \cdot Q_{pc}(i, j) > Q_{sp}(i, j)$  であり、転送遅延が大きくなる。

$$Q_{req}(i, j) = \beta \cdot Q_{pc}(i, j) \quad (6)$$

### 2.3 動画像データ先読みメカニズム

キャッシュミス発生時のデータ再取得による遅延を抑えるため、クライアントが近い将来必要とする動画像データをあらかじめキャッシュに先読みする。クライアント  $i$  が要求している GoP の番号を  $j$ 、先読み検索の対象とする GoP 数を  $P$  とすると、 $GoP_k (j + 1 \leq k \leq j + P)$  について管理リスト (表 1) にもとづきキャッシュ内データの品質  $Q_{cache}(i, k)$  と受信中のデータ品質  $Q_{rec}(i, k)$  を、将来キャッシュミスを起こさないための最低限度の動画像品質  $\beta \cdot Q_{pc}(i, j)$  と比較し、これを下回る最も手前の GoP をサーバ-プロキシ間に確立されたセッションの空き帯域を用いてサーバから先読みする。サーバに要求する動画像データの品質は、キャッシュミス時の動画像品質決定アルゴリズムにしたがう。

### 2.4 キャッシュデータ置き換えアルゴリズム

バッファ容量が有限な場合には、キャッシュミスや先読みによりサーバから取得した動画像データ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という問題が生じる可能性がある。そのため、本節ではデータサイズや品質、参照性を考慮したキャッシュデータの置き換えアルゴリズムを提案する。

まず、キャッシュ内データに参照性を考慮した優先度を定める。キャッシュ内データのうち、クライアントが参照、要求中の GoP は最も優先度が高く、置き換えの対象としない。また、動画像ストリームの先頭に位置する GoP も優先度を高くする。次に、これらの GoP から先読み範囲  $P$  個の GoP については 2 番目に優先度が高いものとする。その結果、図 2 に示されるように優先度の高い GoP に囲まれた領域ができる。これらのうち、より領域が大きく、動画像ストリーム

のより後ろに位置するものほど優先度が低いものとし、優先度の低い GoP から順に置き換えの対象とする。

サーバからのデータ取得に際し、キャッシュバッファに十分な空きがない場合には、最も優先度の低い GoP に品質調整処理を施すことによりデータサイズを小さくする。ただし、キャッシュデータの再利用性を考慮し、式 (3) により与えられる品質まで下げても十分な空きが生まれず場合には、GoP データそのものを棄却する。新たに取得した動画データが蓄積可能になるまで、優先度の低い GoP から順に、品質調整によるデータサイズ削減、および棄却を行なう。図 2 に GoP の処理順の例を数字で表す。

### 3 シミュレーションによる評価

本章では、必要となるキャッシュ内データ量、再生開始までの待ち時間、および受信動画品質について提案手法の評価を行う。また、比較の対象として、品質調整機能を持たず、クライアントからの要求通りの品質の動画データがキャッシュにない場合にキャッシュミスとなる手法（従来手法と呼ぶ）についても評価を行う。シミュレーション時間は 29,000 秒とし、クライアントあたりの動画データ再生時間は 7,200 秒である。10 台のクライアントがプロキシに接続しており、それぞれ同じ動画を先頭から最後まで順に見るものとする。サービス利用の到着間隔は平均 1,800 秒の指数分布に従う。動画全体のデータサイズは 8.6 ~ 194.5 Gbit である。サーバ-プロキシ間とプロキシ-クライアント間の往復伝搬遅延時間はそれぞれ 200 ms, 50 ms とする。また、サーバ-プロキシ間とプロキシ-クライアント間でそれぞれ利用可能な帯域は、ns-2 [6] による TFRC セッションのシミュレーション結果より与えられる。利用可能な帯域の変化の様子を拡大したものを図 3 に示す。

プロキシに対するクライアントからの動画データの転送要求は GoP 時間ごとに定期的な送信されるが、キャッシュヒットやミス、利用可能な帯域によって動画データの到着間隔は大きく変動する。したがって、動画ストリームの先頭から最後までデータ受信の待ち合わせなく滑らかに動画を再生するためには、セッション開始時にある程度の受信データを蓄積してから再生を始めることが必要となる。クライアント  $i$  の再生開始までの待ち時間  $W(i)$  は、動画全体を通した転送遅れの最大値で表される。

$$W(i) = \max_{1 \leq j \leq GoP_{end}} (T(i, j) - I(i, j)) \quad (7)$$

ただし、 $j$  は GoP 番号、 $GoP_{end}$  は動画ストリームの最後の GoP 番号を表す。また、 $T(i, j)$  は GoP $_j$  の到着時刻、および  $I(i, j)$  は GoP $_j$  の理想的な到着時刻を表しており、 $I(i, j) - I(i, j - 1) = 1$  GoP 時間、 $I(i, 1) = T(i, 1)$  である。

次に、クライアント  $i$  の受信動画品質に対する満足度  $S(i)$  を次式のように定義する。

$$S(i) = \frac{1}{GoP_{end}} \sum_{j=1}^{GoP_{end}} \frac{Q_{act}(i, j)}{Q_{pc}(i, j)} \quad (8)$$

ただし、 $Q_{act}(i, j)$  はクライアント  $i$  に提供された GoP $_j$  の品質である。

なお、本稿では紙幅の制限上、手法 2 を用いて動画データを取得する場合についてのみ示す。無限大のキャッシュバッファを仮定したシミュレーションの結果、10 台のクライアントに動画配信サービスを提供するためには、従来手法では 166.6 Gbit、提案手法では 52 Gbit のバッファ容量が必要であることがわかった。また、動画品質調整、先読みを行なうことにより従来手法より低遅延な動画配信が可能であることが示された。

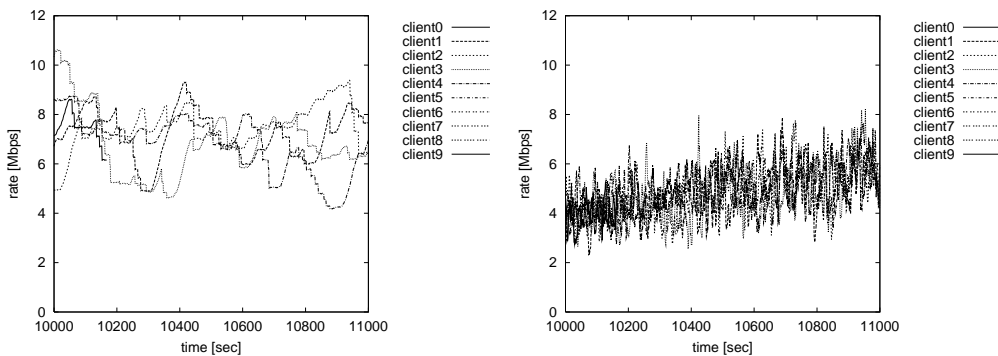
そこで、キャッシュデータの置き換えアルゴリズムの有効性を評価するため、クライアントがある程度画質に対して寛容である ( $\beta = 0.6$ ) と仮定し、バッファサイズを 20 Gbit とした結果を図 4 に示す。ただし、従来手法では  $\beta = 1$ 、バッファサイズ無限とした。

図 4 より、バッファ有限の場合にも先読みを行なうことにより、従来手法（図中、“traditional”）より動画再生までの待ち時間が小さく、ほぼクライアントの要求通りの動画データが提供されていることがわかる。

以上のとおり、提案手法を用いることにより、低遅延で高品質な動画配信が提供可能であることが明らかとなった。

### 4 おわりに

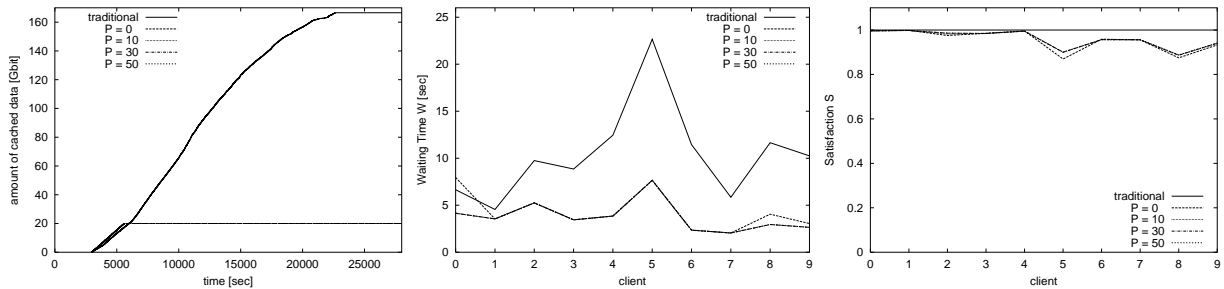
本稿では、動画ストリーミングサービスにおいて、クライアントへの応答性の向上やネットワークの負荷軽減をはかるための、動画品質調整機能を組み込んだプロキシキャッシングメカニズムを提案した。シミュレーションにより、プロキシにおいてネットワーク環境やキャッシュバッファ容量などを考慮して効果的な制御を行なう提案手法の有効性を示した。特に、バッファサイズが小さい場合にも、配送される動画データの品質に対する制約をゆるやかにすることで、待ち時間や動画品質に関する性能をそれほど劣化させる



(a) サーバ-プロキシ間

(b) プロキシ-クライアント間

図 3: 利用可能な帯域の変化



(a) キャッシュ内データ量の変化

(b) 再生までの待ち時間

(c) 受信動画像品質に対する満足度

図 4: 提案手法 (手法 2) と従来手法の比較

ことなく、効率のよい動画配信サービスをクライアントに提供できることが明らかとなった。ただし、動画品質に対する制約が厳しい場合にも性能劣化の度合いの少ない制御アルゴリズムについて今後検討する必要がある。また、本稿ではユーザは動画ストリームを先頭から最後まで順に見ることを仮定したが、早送り、巻き戻しといった操作についても考慮しなければならない。さらに、複数の動画ストリームを扱うプロキシではキャッシュバッファを共有するストリーム間の公平性を考慮する必要がある。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "TCP-friendly video transfer," in *Proceedings of SPIE International Symposium on Information Technologies 2000*, November 2000.
- [3] M. Miyabayashi, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "Implementation of video transfer with TCP-friendly rate control," in *Proceedings of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications 2000*, vol. 1, pp. 117–120, July 2000.
- [4] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, "Equation-based congestion control for unicast applications: the extended version," *International Computer Science Institute technical report TR-00-03*, March 2000.
- [5] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "QoS mapping between user's preference and bandwidth control for video transport," in *Proceedings of IFIP IWQoS '97*, pp. 291–302, May 1997.
- [6] "UCB/LBNL/VINT Network Simulator - ns (version 2)." available at <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/>.