

P2P ストリーミング環境における分割データの重要度を考慮した視聴中止端末数削減手法

坂下 卓^{†1,*1} 義久 智 樹^{†2}
原 隆 浩^{†1} 西尾 章 治 郎^{†1}

近年のインターネットの普及にともない、P2P ストリーミング環境に注目が集まっている。P2P ストリーミング環境では、ストリーミングデータをピースに分割し、再生端末（ピア）間でピースを送受信する。これまでに、ピースの重要度を考慮してピースを受信することにより再生途切れ時間を短縮する手法が提案されている。しかし、再生途切れ時間の上限を考慮しておらず、再生途切れ時間がある値を超えるとユーザが視聴を中止するような環境では、視聴を中止するピア数（視聴中止ピア数）が多くなるという問題がある。そこで本論文では、視聴中止ピア数削減手法を提案する。性能評価の結果、提案手法では平均再生途切れ時間を短縮し、視聴中止ピア数を削減できることを確認した。

Methods to Reduce the Number of Peers that Stop Playing Considering the Importance of Divided Data for P2P Streaming Environments

SUGURU SAKASHITA,^{†1,*1} TOMOKI YOSHIHISA,^{†2}
TAKAHIRO HARA^{†1} and SHOJIRO NISHIO^{†1}

Due to the recent proliferation of the Internet, P2P (Peer-to-Peer) streaming systems have been attracted great attention. In P2P streaming systems, streaming data is divided into several pieces and peers transmit them. Some methods to reduce the interruption time by receiving pieces considering importance of the pieces have been proposed. However, these methods do not consider the upper limit for the interruption time and the number of peers that stop playing increases when users whose interruption time exceeds a certain value. In this paper, we propose methods to reduce the number of peers that stop playing. From our evaluation, we confirmed that our proposed method reduces the average interruption time and the number of such peers.

1. はじめに

近年、マルチメディアコンテンツのデジタル化にともない、ビデオオンデマンドや Web 放送のようなストリーミング配信が広く普及している。ストリーミング配信では、ユーザはコンテンツを再生すると同時にこれから先に再生するデータを受信する。従来のサーバ・クライアント型ではユーザ数が増加すると、サーバの通信負荷が増大するため、P2P ストリーミング環境に注目が集まっている。P2P ストリーミング環境では、ユーザ間でコンテンツを送受信することにより、サーバ・クライアント型と比較してサーバの負荷を低減できる。

一般的な P2P ストリーミング環境では、データはピースと呼ばれるいくつかの部分に分割され、再生端末（ピア）は、他のピアからピースを受信する^{1),2)}。ピアはピースの再生開始時刻までにそのピースを受信完了することで、途切れることなくコンテンツを視聴できる。ピースの受信が再生に間に合わない場合、再生が途切れるため、再生途切れ時間の平均値を短縮するいくつかの手法が提案されている^{3),4)}。しかし、これらの研究ではユーザがコンテンツの視聴を中止することを想定していなかった。実環境では、再生途切れ時間が長いユーザはコンテンツの視聴を中止することが考えられ、再生途切れ時間の上限を考慮する必要がある。再生途切れ回数が多い場合にも、ユーザがコンテンツの視聴を中止することが考えられるが、コンテンツの再生開始時刻を遅らせることで再生途切れ回数を少なくできる。たとえば、初めのピースの受信完了と同時にコンテンツの再生を開始すると合計の再生途切れ時間が w 秒になる場合、ユーザが視聴要求を出してから w 秒以上待ってから再生を開始することで再生中に途切れが発生しないようにできる。視聴要求を出してから再生を開始するまでの待ち時間（いわゆるバッファリングの時間）によって再生途切れ回数が増えるため、再生途切れ回数を視聴中止の要因として用いることは困難である。そこで、本論文では、再生途切れ時間にバッファリングの時間も含め、再生途切れ時間を視聴中止の要因として用いる。ユーザは、再生途切れ回数が多い場合にはバッファリングして再生途切れ回数を削減し、このバッファリングの時間も含めて再生途切れ時間がある値以上になると

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Tech., Osaka University

^{†2} 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

*1 現在、トヨタ自動車
Presently with TOYOTA MOTOR CORPORATION

ユーザが視聴を中止するというのが想定するシナリオである。再生途切れ時間を短縮することは途切れのない再生に必要なバッファリングの時間を削減することにつながり、再生途切れ回数を少なくするためにバッファリングを行う場合にも再生途切れ時間を短縮することは意味がある。従来の手法では、再生途切れ時間の平均値を短縮できるがばらつきが大きく、再生途切れ時間が平均値より長いピアが多く存在する。結果として、再生途切れ時間が長くなるとユーザが視聴を中止する場合には、視聴を中止するピア数（視聴中止ピア数）が多くなるという問題があった。

そこで本論文では、視聴中止ピア数削減手法を提案する。本研究では、再生途切れ時間が一定時間以上になるとコンテンツの視聴を中止するものと想定する。提案手法では、既存の BIS 方式を拡張し、各ピアの再生状況によって緊急性または希少性を重視することにより、視聴中止ピア数を削減する。

以下、2章で関連研究について説明し、3章で想定環境について説明する。4章で提案手法を説明し、5章で性能評価の結果を示す。6章で提案手法について議論を行い、最後に7章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

P2P ストリーミングシステムで著名な BitTorrent^{5),6)} では、コンテンツのデータをピースに分割し、レアレストファスト方式を用いてピアどうしでピースを送受信する。レアレストファスト方式では、ピアは P2P ネットワーク内で数が少ないピースを優先的に受信する。しかし、ストリーミング配信の場合、レアレストファスト方式では再生位置を考慮しないため、再生途切れ時間が長くなる。そこで、再生途切れ時間を短縮する手法がいくつか提案されている⁷⁾⁻¹¹⁾。

BiToS (Enhancing BitTorrent for Supporting Streaming Applications)⁷⁾ では、BitTorrent のレアレストファスト方式を改良してコンテンツ再生中に発生する途切れ時間を短縮している。BiToS では、図 1 に示すように未受信のピースを、再生位置に近いピースで構成される優先セット（はじめの $k\%$ の未受信ピース）とそれ以外の低順位セットに区別する。ピアは確率 p で優先セットを選択し、選択されたセットからレアレストファスト方式を用いて受信するピースを選択する。BiToS では、各セット内ではレアレストファスト方式を用いて受信するピースを選択するため、優先セット内のピースのうち、再生位置に近いにもかかわらず P2P ネットワーク内に存在する数が多いピースが長時間受信されない場合がある。

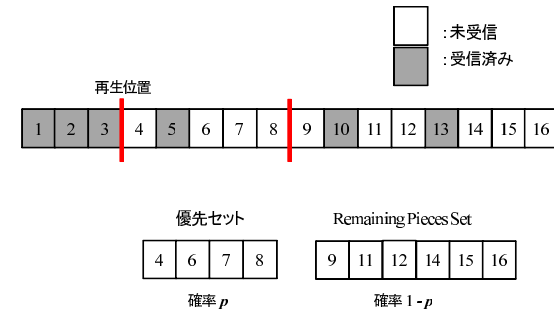


図 1 BiToS におけるピースセットの例
Fig. 1 An example of piece set under BiToS.

文献 8)–10) では、BiToS と同様に、BitTorrent のレアレストファスト方式を改良してコンテンツ再生中の途切れ時間を短縮するストリーミング配信手法を提案している。文献 8) では、接続ピアから受信するピースを確率的に選択する。接続ピアからピースを受信する確率は Zipf 分布に基づいて計算され、再生位置に近いピースほど受信確率が高いため、再生途切れ時間を短縮できる。また、ピースを受信する順序を確率的に決定するため、ピースが P2P ネットワーク内に分散しやすい。文献 9) では、いくつかのピースをまとめたセグメントと呼ぶグループを用いる。ピアは再生位置に最も近いセグメント内のピースをランダムに受信する。受信するピースは再生位置に近いセグメントのピースに制限されるため、セグメントに含まれるピースのうち、P2P ネットワーク内に存在する数が少ないピースを P2P ネットワーク内に分散させつつ再生途切れ時間を短縮できる。文献 10) では、ウィンドウを定義し、受信完了した最後のピースからウィンドウ内にあるピースを受信する。ウィンドウ内のピースを受信する際、ピースの受信方式をレアレストファスト方式とピースを順番に受信する方式とで確率的に変更して受信する。ウィンドウサイズを大きくすることで、セグメントを定義するよりもコンテンツ後半の数が少ないピースを P2P ネットワーク内に分散できる。

筆者らは、P2P ストリーミング環境における途切れ時間を短縮するためのピース受信方式として BIS (BiToS + Immediacy and Scarcity)¹¹⁾ 方式を提案している。BIS 方式では、各ピースに対して、ピースの緊急性と P2P ネットワーク内のピースの希少性を基に計算した重要度を設定し、重要度の高いピースを優先して受信することで、コンテンツの再生途切れ時間を短縮する。

これらの従来手法では、再生途切れ時間の平均値を短縮できるが、再生途切れ時間の上限を考慮しておらず、視聴中止ピア数が多くなるという問題がある。

3. 想定環境

3.1 P2P ストリーミング環境

本節では、想定する P2P ストリーミング環境について説明する。

図 2 に示すように、P2P ストリーミング環境はあるコンテンツを共有するピアとそのネットワークを管理するサーバによって構築される。サーバは P2P ネットワークに参加している各ピアの最大通信帯域、各ピアのピースの取得状況と接続ピアを管理する。ユーザは 1 個のコンテンツのみを視聴すると考えられ、各ピアは 1 つの P2P ネットワークにのみ所属する。ピアが複数の P2P ネットワークに所属することで複数のコンテンツを配信できるが、ユーザが複数のコンテンツを同時に視聴することは少なく、ここでは考えない。

P2P ネットワークに参加したピアは、サーバが保持する各ピアのピースの取得状況のリストを参照し、以下で説明する BIS 方式を用いて受信するピースの候補ピアを選択する。ピアは、サーバが保持する各ピアのコンテンツの取得状況を参照し、候補ピースのいずれかを保持するピア、または候補ピースを現在受信中のピアを候補ピアとして選択する。候補ピアを選択した後、候補ピアの受信速度を計算し、最も受信速度の短い候補ピアと接続しピースを受信する。候補ピアの受信速度は、候補ピアの最大通信帯域と候補ピアの接続状況をサーバから取得し、各リンクの平均通信帯域を受信速度とする。ピースを受信した後、

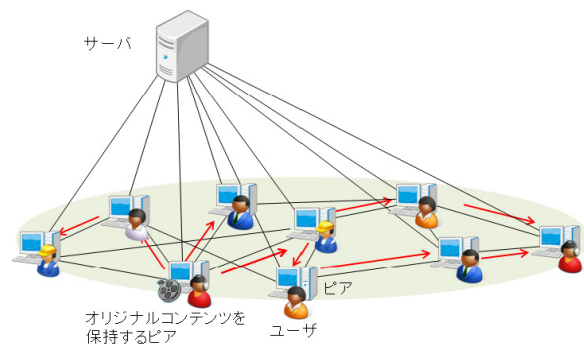


図 2 P2P ストリーミング環境
Fig. 2 P2P streaming environment.

ピアはサーバに対してピースの受信完了のメッセージを送信する。その後、同様にサーバとの通信を行い、次に受信するピースと受信時間が最も短くなる接続ピアを決定し、ピースを受信する。また、接続ピアの実際の受信時間が長い場合、再生途切れ時間が増加してしまうため、ピアの接続にはタイムアウトを設定する。タイムアウトまでにピースを受信完了できない場合、接続ピアとの通信を中止し、新たに接続ピアを選択する。本研究では視聴中止ピア数の削減を目的としており、ピアは再生途切れ時間の合計が一定時間 (T_r) 以上になるとコンテンツの視聴を中止する。再生途切れ時間にバッファリングの時間も含めているため、ユーザがバッファリングを行う場合には、 T_r 秒分のバッファリングを行っており、バッファがなくなると画面が途切れてユーザが視聴を止めてしまう状況と等価である。

3.2 コンテンツの視聴

音楽ライブやスポーツ中継のような生放送の場合、ピアはあらかじめデータを受信できないため、本研究では、配信開始時点でファイルとして完成しているコンテンツを想定する。コンテンツは n 個のピースに分割される。ピアはコンテンツを先頭のピースから順番に再生するものとし、早送りや巻き戻しは行わない。

ピアがコンテンツを視聴する際、まずそのコンテンツの配信サーバを Web ページから調べる。Web ページから配信サーバのアドレスを取得し、配信サーバからピースを保持するピアのリストを取得する。ピアはピアリストを参照して、接続するピアを選択してピースの受信を開始する。ピースの受信が完了すると、そのピースを再生できる。これは、BitTorrent と同様の環境であり、現実的な想定と考える。

図 3 に、ピアがピースを受信して再生する様子を示す。図の上段は、コンテンツを要求

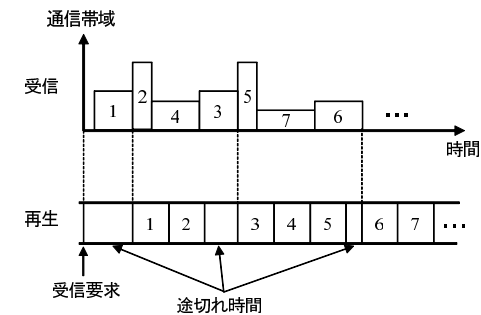


図 3 コンテンツ再生の様子
Fig. 3 An image for playing a content.

してからピースを受信する様子を表す。下段は、受信したピースを一定の再生レートで再生する様子を示す。理解しやすくするため、ピースの受信中は通信帯域は変化しないものとしている。各ピースにはピース ID が割り当てられており、ピースの受信を完了するとそれを再生できる。しかし、再生開始までピースを受信できない場合、そのピースの受信が完了するまでコンテンツの再生が途切れる。たとえば、ピース 1 の受信時よりピース 2 の受信時の方が通信帯域が大きいため、ピース 2 の方が速く受信できている。再生レートは等しいため、ピース 1 と 2 の再生には同じ時間がかかっている。ピース 2 の受信完了後は、レアルレストファスト方式によりピース 3 よりもピース 4 が優先され、ピース 4 を受信している。ピース 4 の受信後、再生開始位置に近いピース 3 の受信を開始している。しかし、ピース 3 の受信が完了するのは、ピース 2 の再生終了より遅いため、ピース 2 の再生終了後途切れが発生する。同様に、ピース 6 についても再生開始までに受信を完了できないため、ピース 6 を受信完了するまで再生に途切れが発生している。

本論文では、最初のピースを受信するまでの時間とコンテンツの再生中に発生する途切れ時間の和を再生途切れ時間と定義する。また、再生途切れ時間が一定時間以上になると、ユーザはコンテンツの視聴を中止し、P2P ネットワークから離脱するものとする。

3.3 BIS (BiToS + Immediacy and Scarcity) 方式

本研究では、既存の BIS (BiToS + Immediacy and Scarcity) 方式¹¹⁾ を拡張した方式を提案するため、本節では BIS 方式について説明する。BIS 方式では、BiToS と同様に未受信のピースを 2 つのセットに分割する。優先セットから受信するピースを選択する際、ピアはセット内の全ピースに対する重要度を算出し、重要度の高いピースを選択する。低順位セットが選択された場合、セット内のピースは再生されるまでに余裕があるため、BiToS と同様にレアルレストファスト方式を用いる。各セットからピースを選択する際、優先セットのサイズの $m\%$ のピースで構成されるウィンドウを定義し、ウィンドウに入る重要度の高いピースを候補ピースとする。

ピースの重要度は、緊急性と希少性の 2 点を考慮することが重要である。緊急性とは、どれほど緊急にピースを受信しなければならないかを示し、現在の再生位置に近いほどその度合いは大きくなる。希少性とは、P2P ネットワーク内にあるピースの数を示し、少ないほどその度合いは大きくなる。ピース i ($1 \leq i \leq n_p$) に対する重要度 D_i を以下のように定義する。

$$D_i = cI_i + (1 - c)S_i \quad (1)$$

I_i はピース i に対する各ピアの緊急性、 S_i はピース i の P2P ネットワーク内における希少

性、 c ($0 \leq c \leq 1$) は重み係数を表す。重要度の最も高いピースが複数存在する場合には、再生位置に近いピースを選択する。

以下では、ピース i に対する各ピアの緊急性 I_i と、ピース i の P2P ネットワーク内における希少性 S_i について、それぞれ説明する。

- 各ピアの緊急性 I_i

ピース i に対する各ピアの緊急性 I_i は、各ピアのピースの再生位置によって異なる。したがって、ピース i に対する各ピアの緊急性 I_i を、次式のような線形関数で定義する。

$$I_i = \begin{cases} 0 & (i = 0, \dots, h - 1) \\ 1 - \frac{i - h}{n} & (i = h, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

h は次に再生されるピース ID、 n はコンテンツの最後に再生されるピース ID を表す。すでに再生済みのピース、受信済みのピースに対する I_i は 0 とする。

- P2P ネットワークにおける希少性 S_i

ピース i の P2P ネットワーク内における希少性 S_i は、ピース i を保持している P2P ネットワーク内のピア数の少なさを表す。そこで、P2P ネットワーク内におけるピース i の希少性 S_i は次式のように定義する。

$$S_i = \frac{N - m}{N} \quad (3)$$

ここで、 N は P2P ネットワークに接続している全ピア数、 m はピース i を保持しているピア数を表す。 N 、 m は、サーバから取得できる。

4. 視聴中止端末数削減のためのピース受信方式

本章では、BIS 方式¹¹⁾ を拡張し、視聴中止ピア数を削減するためのピース受信方式について説明する。

4.1 提案手法

BIS 方式では、再生途切れ時間の平均値を短縮できるが各ピアの再生途切れ時間にはばらつきが大きく、再生途切れ時間が平均値より長いピアが多く存在する。このようなピアが再生途切れ時間の上限値を超えて視聴を中止すると、P2P ネットワーク内のピア数が減少し、必要なピースを長時間受信できず再生途切れ時間が長くなる。これは、再生中に途切れ時間が変化するが、再生途切れ時間の長さにかかわらずパラメータ p 、 k 、 c を一定に保っていたためである。パラメータを一定にするよりも、視聴を中止する再生途切れ時間の上限、

つまり、デッドラインまでの再生途切れ時間を考慮してパラメータを変化させることで、再生途切れ時間を上限以下に抑えられる場合が多くなり、視聴中止ピア数を削減できるものと考えられる。そこで、BIS方式において視聴を中止するまでの再生途切れ時間のデッドラインを考慮するように拡張する。BIS方式ではピースの緊急性と希少性を考慮しており、再生途切れ時間がデッドラインに近い場合には緊急性、デッドラインまでまだ余裕がある場合には希少性を重視することでP2Pネットワーク内にピースを配布しつつ再生途切れ時間を短縮できる。このため、拡張手法では、緊急性、希少性および両方の重みを再生途切れ時間に応じて動的に変化させる3つの手法を提案する。以下に、各手法の詳細を説明する。

4.1.1 BIS-I 方式

再生途切れ時間が長くなるとユーザが視聴を中止する場合、視聴を中止しないためには、再生位置に近いピースを優先的に受信することが有効であると考えられる。

そこで、BIS-I (BIS considering Interruption time) 方式では、緊急性を重視し、再生途切れ時間が T_a 秒以上になる場合、重み係数 c を1に変更して重要度に緊急性のみを含めるようにする。緊急性のみが考慮されるため、優先セットが選択された際、再生位置に近いピースを受信することになる。

緊急性を重視するピース受信方式として、重み係数 c を1に変更して重要度に緊急性のみを含めるようにする方法と、再生途切れ時間に応じて重み係数 c を線形に増加させ重要度に緊急性を徐々に含める方法があるが、予備実験の結果、重み係数 c を1に変更して重要度に緊急性のみを含めるようにする方法が最も視聴中止ピア数を削減できることを確認したため、BIS-I方式では c を1に変更する。

4.1.2 BIS-E 方式

コンテンツの視聴中止を考慮する場合、コンテンツの再生が途切れるまでの余裕時間が長いピアは、他のユーザが視聴を中止しないために、希少性を考慮してピースを受信することが有効と考えられる。ここで、余裕時間とはコンテンツの再生が途切れるまでの時間の余裕を示し、現在の再生時刻から連続して受信できているピースまでの時間として表す。これにより、P2Pネットワーク内のピース数の偏りが少なくなり、他のピアの再生途切れ時間を短縮できる。

そこでBIS-E (BIS considering Extra time) 方式では、優先セットの選択確率 p を変更する。 c を変更することも考えられるが、この場合、余裕時間と無関係に希少性を考慮してしまうため、再生途切れ時間を効率的に短縮できない。このことは準備実験により確認している。残りの再生時間が短い場合、これから再生するピースの数が少なく未受信のピースの

数も少なくなって、優先セットに含まれるピースの数が、残りの再生時間が長い場合に比べて少なくなる。このため、低順位セットに含まれるピースの再生を開始するまでの時間が短くなり、低順位セットが優先セットと同様に扱われ、受信するピースの決定に与える p の影響が小さくなる。残りの再生時間が短いほど p を小さくすることで優先セットが選択される確率が小さくなって、 p の影響が残りの再生時間に比較的依存しないようにできる。そこで、余裕時間が T_b より長くなった場合に、デフォルトの p の値 p_f から、 T_b を残りの再生時間 T_c で除した値を減算する。 T_c は T_b のとりうる最長の値である。こうすることで、残りの再生時間が短いほど p を小さくして後の方のピースを受信する確率を高める。

$$p = p_f - \frac{T_b}{T_c} \quad (0.5 \leq p_f \leq 1) \quad (4)$$

p_f は最初にシステムが設定する優先セットの選択確率、 T_c はコンテンツの残り再生時間を表す。 $p_f < 0.5$ の場合、低順位セットを選択する確率のほうが優先セットの選択確率よりも高くなり、再生が長時間途切れる場合が多いため、 $0.5 \leq p_f \leq 1$ として、 $0.5 \leq p \leq p_f$ の範囲で p が変化するようにする。

4.1.3 BIS-IE 方式

BIS-I方式およびBIS-E方式はそれぞれ独立しており、これらを組み合わせた方式が考えられる。BIS-IE (BIS considering Interruption time and Extra time) 方式は、BIS-I方式とBIS-Eを組み合わせたピース受信方式である。ピースあたりの再生が T_a 秒以上途切れているピアは再生位置に近いピースを受信し、余裕時間が T_b 秒以上のピアは希少性を考慮して受信する。

5. 性能評価

本章では、BIS-I、BIS-E、BIS-IE方式の有効性をシミュレーション実験により評価する。

5.1 シミュレーション環境

特に明記しない限り、表1に示すパラメータを用いてシミュレーション実験を行う。コンテンツはMPEG2でエンコードされた60分のドラマを想定し、シミュレーション開始時にはP2Pネットワーク内にオリジナルコンテンツを保持するピアが1つのみ存在するものとする。このピアはピースの送信のみ行い、実験が終了するまでP2Pネットワーク内に滞在する。ピースのサイズは1,024 Kbyteとする。各ピアの通信帯域は6 Mbpsとし、複数の接続ピアから受信要求がある場合、各接続ピアに割り当てられる通信帯域は等分割されるものとする。また、ピアの接続にはタイムアウトが設定されており、ピースの受信開始から

表 1 シミュレーション実験のパラメータ
Table 1 Experimental parameters.

| パラメータ | 値 |
|----------------|---------------|
| コンテンツ長 | 3,600 [秒] |
| ビットレート | 2 [Mbps] |
| ピースサイズ | 1,024 [Kbyte] |
| オリジナルコンテンツ数 | 1 [個] |
| ピア数 | 2,000 [個] |
| 平均要求到着間隔 | 10 [秒] |
| 最大通信帯域 | 6 [Mbps] |
| ピース受信要求のタイムアウト | 30 [秒] |

30 秒が経過した時点で受信完了できていない場合、接続ピアとの通信を中断し、新たな接続ピアと通信を行い、受信途中のピースの受信を再開する。ピアの到着数の総数が 2,000 になるまでシミュレーションを実行する。ピアのコンテンツ視聴要求はポアソン過程に従うものとし、平均要求到着間隔をポアソン分布で与える。ピアは他のピアにピースを送信するために再生後のピースを保持するものとし、コンテンツをすべて視聴後、P2P ネットワークから離脱する。3 章に記述したとおり、ユーザは再生途切れ時間が T_r 以上発生する場合に、コンテンツの視聴を中止し、P2P ネットワークから離脱する。

5.2 評価指標

シミュレーション実験では、視聴中止ピアの割合と平均再生途切れ時間について評価を行う。視聴中止ピアの割合とは、P2P ネットワークに参加した総ピア数 2,000 個のうち、再生途切れ時間が T_r 以上になってコンテンツの視聴を中止したピアの数の割合を示す。平均再生途切れ時間とは、コンテンツをすべて視聴したユーザの再生途切れ時間の平均を示す。

5.3 パラメータの決め方

従来の BIS 方式のパラメータには、優先セットの選択確率 p 、優先セットのピースの割合 k 、緊急性の重み係数 c がある。文献 11) に示されているように、これらのパラメータには再生途切れ時間を最短にする値がある。本論文では文献 11) と同様に、これらのパラメータを独立に変化させて再生途切れ時間を求め、再生途切れ時間が最短になるように p, k, c の値を決定した。さらに提案する BIS-I, BIS-E, BISIE 方式では、 c を変更する再生途切れ時間の閾値 T_a, p を変更する余裕時間の閾値 T_b もパラメータとなる。これらの値を変化させて視聴中止ピアの割合と平均再生途切れ時間をシミュレーションした結果を図 4, 図 5 に示す。 p, k, c は BIS 方式において再生途切れ時間が最短になるように与え、 $T_r = 100$ 秒とした。BIS-I 方式では T_b は影響を与えず p が一定であるため、結果は $T_b = 3,600$ 秒

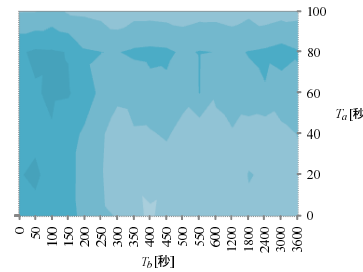


図 4 T_a, T_b と視聴中止ピアの割合
Fig. 4 T_a, T_b and the ratio of peers that stop playing.

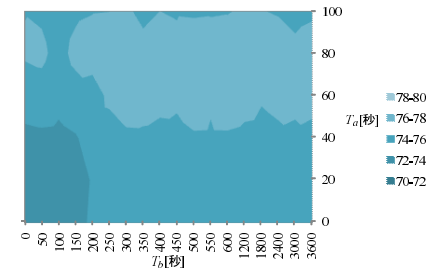


図 5 T_a, T_b と平均再生途切れ時間
Fig. 5 T_a, T_b and the average interruption time.

の場合に相当し、BIS-E 方式では T_a は影響を与えず c が一定であるため、結果は T_a が T_r と等しい 100 秒の場合に相当する。

この評価結果より、視聴中止ピアの割合を最小にする T_a, T_b があることが分かる。これは、 T_a が短すぎると再生途切れ時間が少し発生するだけで緊急性のみ考慮することになって P2P ネットワーク内にピースが分散しにくくなり、逆に長すぎると再生途切れ時間が長くなって長時間緊急性が考慮されないためである。また、 T_b が短すぎると再生途切れが発生する直前まで p が変更されず再生位置に近いピースが受信されず、逆に長すぎると再生に途切れが発生するまで時間に余裕があるにもかかわらず再生位置に近いピースを受信して P2P ネットワーク内にピースが分散しにくくなるためである。この場合、BIS-I 方式では $T_a = 80$ 秒、BIS-E 方式では $T_b = 80$ 秒、BIS-IE 方式では $T_a = 60$ 秒、 $T_b = 100$ 秒のときに視聴中止ピアの割合を最小にしている。

T_a や T_b は視聴中止ピアの割合を削減するために導入したものである。以降の評価では、要求到着間隔や T_r 、コンテンツ長が変わるたびに、 T_a を 0 から T_r まで、 T_b を 0 からコンテンツ長まで、変化させて視聴中止ピアの割合を求め、各手法それぞれで視聴中止ピアの割合が最小になるように T_a, T_b の値を決定した。このため、 T_a, T_b に関しては方式によって異なる値を使用してる。

5.4 要求到着間隔の影響

ピアのコンテンツ視聴の要求到着間隔が変化すると、P2P ネットワーク内に存在するピア数が変化するため、P2P ネットワーク内のピースの数も変化し、視聴中止ピアの割合も変化する。そこで、ピアの平均要求到着間隔を 1 秒から 30 秒まで変化させた場合の視聴中

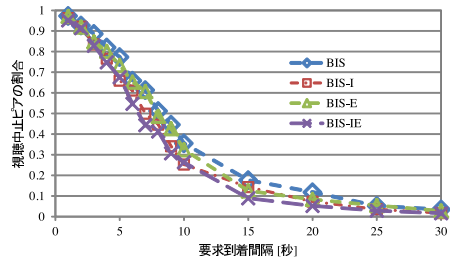


図 6 平均要求到着間隔と視聴中止ピア数

Fig.6 The average request arrival interval and the number of peers that stop playing.

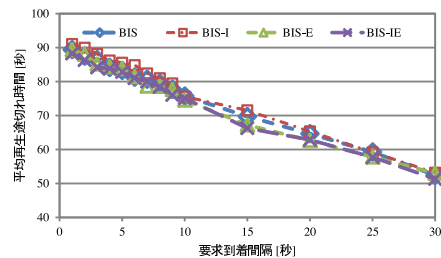


図 7 平均要求到着間隔と平均再生途切れ時間

Fig.7 The average request arrival interval and the average interruption time.

止ピアの割合, 平均再生途切れ時間の結果を図 6, 図 7 に示す. $T_r = 100$ 秒とした.

図 6 から, いずれの提案方式も BIS 方式よりも視聴中止ピアの割合が低くなるのが分かる. これは, 各ピアが自身の再生状況から, ピース選択の際に緊急性と希少性のどちらを重視するかを動的に決定しているためである. 要求到着間隔が特に短い場合, P2P ネットワーク内に多くのピアが存在して通信量が多くなり, 通信帯域を圧迫するとピースの受信に時間がかかるため, BIS-I 方式を用いて緊急性を重視してピースを受信する方が視聴中止ピアの割合が低くなるのが分かる. 一方, 要求到着間隔が長い場合, P2P ネットワーク内に存在するピア数が少なく通信量も多くなり, 通信帯域に余裕ができるため, BIS-E 方式を用いて余裕時間の長いピアが希少性を重視してピースを受信することで視聴中止ピアの割合を低減させることができる.

図 7 から, 要求到着間隔にかかわらず, BIS-I 方式は BIS 方式よりも平均再生途切れ時間が長く, BIS-E 方式と BIS-IE 方式は BIS 方式よりも平均再生途切れ時間が短くなるのが分かる. これは, BIS-I 方式では緊急性を重視することで P2P ネットワーク内にピースが分散しにくく, 他のピアの再生途切れ時間が増加するためである. 一方, BIS-E 方式と BIS-IE 方式では, 余裕時間の長いピアが希少性を重視してピースを受信するため, 他のピアの再生途切れ時間の増加を抑制できる. 要求到着間隔が長い場合, P2P ネットワーク内に存在するピア数が少なく通信量も多くなり, 通信帯域に余裕ができるため再生途切れ時間が短くなる.

5.5 コンテンツの視聴を中止する途切れ時間 T_r の影響

コンテンツの視聴を中止する途切れ時間 T_r が変化すると, ピアが P2P ネットワーク内に存在できる時間が変化するため, 視聴中止ピアの割合が変化する. そこで, ユーザがコン

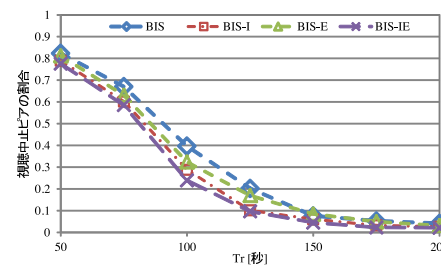


図 8 視聴を中止する途切れ時間 T_r と視聴中止ピア数
Fig.8 T_r and the number of peers that stop playing.

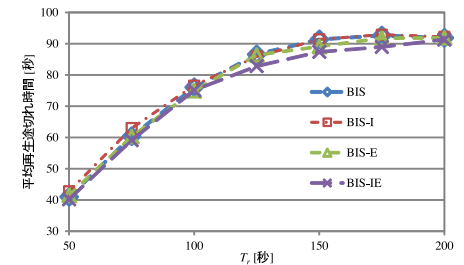


図 9 視聴を中止する途切れ時間 T_r と平均再生途切れ時間
Fig.9 T_r and the average interruption time.

テンツの視聴を中止する途切れ時間 T_r を 50 秒から 200 秒まで 25 秒ずつ変化させて評価した結果を図 8, 図 9 に示す.

図 8 から, いずれの提案手法も, BIS 方式よりも視聴中止ピアの割合が低いことが分かる. これは, BIS 方式では, ピアは自身の再生状況を考慮しておらず, 再生途切れ時間が長い場合でも, 再生位置に近いピースを受信しない場合があるためである. T_r が特に短い場合, 再生途切れ時間がすぐに上限値に達してしまうため視聴中止ピアの割合が高い. 一方, T_r が長い場合, 緊急性と希少性を変化させなくても多くのピアがコンテンツをすべて視聴できるため, 各方式を比較しても視聴中止ピアの割合の差が小さい.

また, 図 9 から, BIS-I 方式は BIS 方式と比較して平均再生途切れ時間が長くなるのが分かる. これは, コンテンツをすべて視聴できるピアは再生途切れ時間を低く抑えることができる一方で, 優先セットが選択された際, 緊急性のみを考慮して受信するピースを選択するため, P2P ネットワーク内にピースが分散しにくくなり, 他のピアの再生途切れ時間が増加するためと考えられる. 一方, BIS-E 方式と BIS-IE 方式は T_r にかかわらず, BIS 方式よりも平均再生途切れ時間が短くなるのが分かる. これは, コンテンツの再生が途切れるまで余裕のあるピアがコンテンツ後半のピースを受信しやすく, 他のピアは再生位置に近い位置のピースを受信しやすいためである.

たとえば, $T_r = 100$ 秒の場合, 従来の BIS 方式では視聴中止ピアの割合は 0.397, 再生途切れ時間は 76.4 秒となっている. 一方, 提案する BIS-I 方式では視聴中止ピアの割合は 0.295, 平均再生途切れ時間が 77.1 秒, BIS-E 方式では視聴中止ピアの割合は 0.334, 平均再生途切れ時間が 75.0 秒となっている. BIS-IE 方式では視聴中止ピアの割合が 0.242, 平均再生途切れ時間が 74.6 秒となっており, 視聴中止ピアの割合が 0.397 から 0.242 に最も

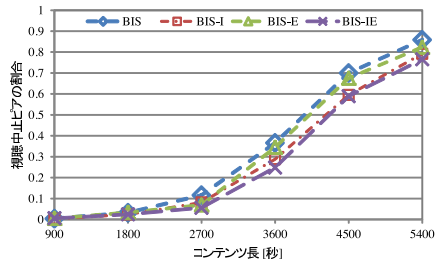


図 10 コンテンツ長と視聴中止ピアの割合

Fig. 10 The content duration and the number of peers that stop playing.

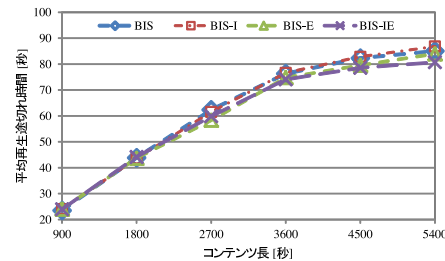


図 11 コンテンツ長と平均再生途切れ時間

Fig. 11 The content duration and the average interruption time.

減っている．提案する BIS-E 方式，BIS-IE 方式では従来の BIS 方式に比べて視聴中止ピアの割合と平均再生途切れ時間を削減できており，有用であることが分かる．BIS-I 方式では BIS 方式に比べて視聴中止ピアの割合を削減でき，再生途切れ時間が長くなっているが，その増加は数秒以内と大きくない． T_r の把握の方法は非常に難しく，実環境ではコンテンツの視聴を中止するタイミングはユーザによって異なる．このため，本研究では，すべてのユーザは再生途切れ時間が T_r 以上になるとコンテンツの視聴を中止するものと想定したが，実際にはユーザが要求する再生途切れ時間やシステム環境によって適切なパラメータ T_a と T_b を設定する必要がある．動的なパラメータの割当ては今後の課題である．

5.6 コンテンツ長の影響

コンテンツ長が変化すると，コンテンツを構成するピース数が変化するため，P2P ネットワーク内のピア数とピースの分散が変化し，視聴中止ピアの割合が変化する．そこで，コンテンツ長を 900 秒から 5,400 秒まで 900 秒ずつ変化させた場合の結果を図 10，図 11 に示す． $T_r = 100$ 秒とした．

図 10 から，いずれの提案手法も BIS 方式よりも視聴中止ピアの割合を低くできることが分かる．コンテンツ長が長い場合，特に BIS-I 方式と BIS-IE 方式の視聴中止ピアの割合が低くなる事が分かる．これは，コンテンツの再生時間が長いため，P2P ネットワーク内に多くのピアが存在し，ピースの受信速度が低下するため，緊急性を重視してピースを受信することで現在の再生途切れ時間の増加を抑制でき，視聴中止ピアの割合を低減させることができる．コンテンツ長が短い場合，必要なピース数が少ないため，BIS-E 方式を用いて余裕時間の長いピアが希少性を重視してピースを受信することで，視聴中止ピアの割合が低くなる事が分かる．

また，図 11 から，コンテンツ長が長いほど平均再生途切れ時間が上限値に近づき，BIS-E 方式と BIS-IE 方式は BIS 方式よりも平均再生途切れ時間が短いことが分かる．これは，余裕時間の長いピアが希少性を重視してピースを受信し他のピアの再生途切れ時間の増加を抑制できるためである．

6. 考 察

6.1 各方式の特徴

各方式における視聴中止ピアの割合と平均再生途切れ時間について，BIS-I 方式では， $T_a = 80$ の場合，視聴中止ピアの割合は 0.295，平均再生途切れ時間が 77.1 秒となる．BIS-E 方式では， $T_b = 100$ の場合，視聴中止ピアの割合は 0.334，平均再生途切れ時間が 75.0 秒となる．BIS-IE 方式では， $T_a = 60$ ， $T_b = 100$ の場合，視聴中止ピアの割合が 0.242，平均再生途切れ時間が 74.6 秒となる．この結果より，BIS-IE 方式が視聴中止ピアの割合が低く，平均再生途切れ時間が短くなる事が分かり，再生途切れ時間と余裕時間の両方を考慮して動的に緊急性と希少性の両方の重みを変化させることが有効であることが分かる．これは，提案手法では再生途切れ時間の上限を考慮することで再生途切れ時間のばらつきを抑えられているためである．たとえば， T_r を無限大として再生途切れ時間の上限を考慮しない場合の再生途切れ時間の分散は 685.758 となる．一方，視聴中止ピアの割合を最も削減できる BIS-IE 方式では， $T_r = 100$ 秒の場合，再生途切れ時間の分散は 301.994 となっており，再生途切れ時間のばらつきを抑えられていることが分かる．

6.2 ストリーミング配信の品質

本研究では，ユーザがコンテンツの視聴を中止する基準として再生途切れ時間を用いたが，途切れ回数が増えるとコンテンツの視聴を中止することも考えられる．しかし，端末側でバッファを行い，ある程度の時間を待って再生を開始することで途切れ回数を削減できる．本研究では，コンテンツの視聴を開始するまでの待ち時間とコンテンツ再生中の途切れ時間の合計を再生途切れ時間と定義しているため，再生途切れ時間を短縮することは，このバッファにかかる時間を短縮することに相当し，バッファする場合にも有効である．

6.3 配信するコンテンツの数

本論文では，P2P ネットワーク内で配信されるコンテンツは 1 種類のみと想定して評価を行ったが，複数のコンテンツを配信する場合，コンテンツごとに P2P ネットワークを構築することで可能になる．この場合，各 P2P ネットワークにサーバが必要であるため，管理コストが増加する．ドラマの 1 回目と 2 回目といった，続けて再生する等関連のある複

数のコンテンツを配信する場合には、これらのコンテンツの視聴状態を把握することで再生途切れ時間を短縮することが考えられる。関連がない場合には、独立した P2P ネットワークで配信することが考えられる。

7. おわりに

本論文では、P2P ストリーミング環境において、コンテンツの視聴を中止するピア数を削減するピア受信方式を提案した。提案手法では、各ピアの再生状況に注目し、途切れ時間や余裕時間が長い場合、パラメータを変更して、視聴中止ピア数を削減する。提案手法の有効性を検証するため視聴中止ピアの割合と平均再生途切れ時間についてシミュレーション評価を行った。シミュレーション評価の結果、提案手法は平均再生途切れ時間の増加を抑えつつ、視聴中止ピア数を削減できていることを確認した。

今後の課題として、複数コンテンツを配信する環境や、早送りや巻き戻し、一時停止といったユーザの操作を考慮した場合に再生途切れ時間を短縮する方式を考えている。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（S））（課題番号：21220002）、および科学研究費補助金（若手研究（A））（課題番号：23680007）によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Vratonjić, N., Gupta, P., Knežević, N., Kostić, D. and Rowstron, A.: Enabling DVD-like features in P2P video-on-demand systems, *Proc. ACM Workshop on Peer-to-peer Streaming and IP-TV 2007*, pp.329–334 (Aug. 2007).
- 2) Choe, Y.R., Schuff, D.L., Dyaberi, J.M. and Pai, V.S.: Improving VoD server efficiency with bittorrent, *Proc. Int'l Conf. on ACM Multimedia*, pp.117–126 (Sep. 2007).
- 3) Zhang, X., Liu, J., Li, B. and Yum, T.-S.P.: CoolStreaming/DoNet: A data-driven overlay network for efficient live media streaming, *Proc. INFOCOM'05*, Vol.3, pp.2102–2111 (Mar. 2005).
- 4) 義久智樹, 西尾章治郎: 端末伝送型インターネット放送における再生中断時間短縮手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.50, No.4, pp.1–10 (2009).
- 5) BitTorrent, available from (<http://www.bittorrent.com/>).
- 6) Cohen, B.: Incentives build robustness in BitTorrent, *Proc. P2PECON'03* (June 2003).
- 7) Vlavianos, A., Iliofotou, M. and Faloutsos, M.: BiToS: Enhancing bittorrent for supporting streaming applications, *Proc. INFOCOM'06*, pp.1–6 (Apr. 2006).

- 8) Carlsson, N., Eager, D.-L. and Mahanti, A.: Peer-assisted on-demand video streaming with selfish peers, Book Chapter, *NETWORKING (Book Series: Lecture Notes in Computer Science)*, pp.586–599, Springer-Verlag (2009).
- 9) Annapureddy, S., Guha, S. and Gkantsidis, C.: Is high-quality VoD feasible using P2P swarming?, *Proc. IEEE WWW 2007*, pp.903–912 (May 2006).
- 10) Borghol, Y., Ardon, S., Carlsson, N. and Mahanti, A.: Toward efficient on-demand streaming with BitTorrent, Book Chapter, *NETWORKING (Book Series: Lecture Notes in Computer Science)*, pp.53–66, Springer-Verlag (2010).
- 11) 坂下 卓, 義久智樹, 原 隆浩, 西尾章治郎: P2P ストリーミング環境における再生途切れ時間短縮方式, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.3, pp.1045–1054 (2011).

(平成 23 年 3 月 23 日受付)

(平成 23 年 9 月 12 日採録)



坂下 卓 (正会員)

2009 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2011 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。P2P ストリーミング環境およびインターネット放送に興味を持つ。日本データベース学会の学生会員。



義久 智樹 (正会員)

2002 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2003 年同大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程を修了し、2005 年同専攻博士後期課程修了。博士（情報科学）。2005 年京都大学学術情報メディアセンター助教。2008 年大阪大学サイバーメディアセンター講師を経て、2009 年より同准教授となり、現在に至る。この間、カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。2007 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2010 年本学会山下記念研究賞受賞。放送通信融合環境、センサネットワークに興味を持つ。電子情報通信学会、IEEE、日本データベース学会の各会員。



原 隆浩（正会員）

1995年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後，同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手，2002年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手，2004年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり，現在に至る。工学博士。1996年本学会山下記念研究賞受賞。2000年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003年本学会研究開発奨励賞受賞。2008年，2009年本学会論文賞受賞。データベース，モバイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE，ACM，電子情報通信学会，日本データベース学会の各会員。



西尾章治郎（フェロー）

1975年京都大学工学部数理工学科卒業。1980年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手，大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授，大阪大学大学院工学研究科教授を経て，2002年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，現在に至る。2000年より大阪大学サイバーメディアセンター長，2003年より大阪大学大学院情報科学研究科長，2007年より2011年まで大阪大学理事・副学長を歴任。この間，カナダ・ウォータールー大学，ビクトリア大学客員。データベース，マルチメディアシステムの研究に従事。現在，Data & Knowledge Engineering等の論文誌編集委員。本会では理事を歴任し，論文賞，功績賞を受賞。電子情報通信学会フェローを含め，ACM，IEEE等8学会の各会員。