

P2P ストリーミング環境におけるピアの離脱を考慮した再生途切れ時間に関する評価

坂下 卓^{†1} 義久 智樹^{‡2}
原 隆浩^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

近年注目が集まっている P2P ストリーミング配信では、再生端末（ピア）間でストリーミングデータを送受信することで、従来のクライアント・サーバ型の配信に比べてサーバに発生する負荷を軽減できる。これまでに、ピアが常に P2P ネットワークに接続されていると想定したうえで、P2P ストリーミング環境における再生の途切れ時間短縮のための分割データ受信方式が提案されていた。しかし、電源が切れたりネットワーク環境が不安定な場合、P2P ネットワークから離脱することが考えられる。本稿では、ピアの離脱を考慮して再生途切れ時間に関する評価を行い、筆者らが提案した方式の有効性を確認する。

Evaluations of Interruption Time Considering Peer Disconnection in P2P Streaming Environments

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

In recently proliferating P2P (Peer-to-Peer) streaming systems, the load of the server can be reduced by communicating among peers, i.e., clients in P2P systems, compared with conventional server-client systems. Although some methods to reduce the interruption time in P2P systems have been proposed, these suppose that peers always connect to the P2P system. However, when the battery runs down or the network is unstable, peers can disconnect from the P2P system. In this paper, we confirm the effectiveness of our previously proposed method under situations that peers disconnect from the P2P system.

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伴い、ビデオオンデマンド¹⁾のようなストリーミング配信サービスやインターネットラジオ、Web 放送²⁾などのサービスが広く普及している。ストリーミング配信では、ユーザはストリーミングデータ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してしまうため、ストリーミング配信の品質を保証できないという問題点がある。そこで、P2P ストリーミング環境^{3),4)}に注目が集まっている。P2P ストリーミング環境では、ユーザ間でストリーミングデータ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セグメントに分割される。P2P ネットワーク上の再生端末（以降、ピア）は、他のピアからピースを受信する。ピアは再生時刻までにピースを受信することで、データを途切れることなく視聴できる。しかし、ピースの受信が再生に間に合わない場合、コンテンツの再生が途切れるといった問題が発生する。再生が長時間途切れると、ユーザはコンテンツの展開や内容に集中できず、ストレスを感じ、ストリーミング配信の品質が低下する。本稿では、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途切れ時間と定義する。

P2P ストリーミング環境において途切れ時間を短縮するためには、ピースの緊急性と希少性の 2 点を考慮することが重要である。前者に関して、現在の再生位置から近い将来に再生されるピースほど緊急性が高く、より早く受信しなければならない。後者に関しては、P2P ネットワーク内の数が少ないピースを保持するピアに受信要求が集中するため、受信に時間がかかる。したがって、数が少ないピースほど P2P ネットワーク内に早く分散する必要がある。

そこで筆者らは、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である BIS (BiToS + Immediacy and Scarcity) 方式⁵⁾を提案している。BIS 方

†1 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
Department of Multimedia Engineering, Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

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

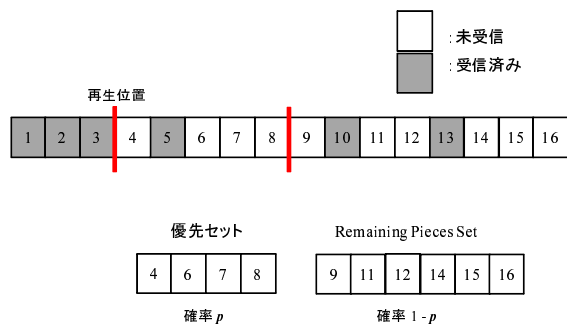


図 1 BiToS におけるセット選択
Fig. 1 Piece selection of BiToS.

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もと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、コンテンツ再生中の途切れ時間を短縮している。これまでの評価では、各ピアはコンテンツのピースを全て受信し、再生が完了したピアは P2P ネットワーク内でピースの送信のみを行うと想定している。しかし、電源が切れたりネットワーク環境が不安定な場合、コンテンツの再生が完了したピアが P2P ネットワークから離脱する場合が考えられる。ピアが離脱すると、ピースを送受信できるピア数が減少するため、途切れ時間を効率的に短縮できない可能性がある。このため、これまでに提案してきた方式をピアの離脱がある環境でも有効であるか評価する必要がある。そこで本稿では、ピアの離脱を考慮して、再生途切れ時間の評価を行い、提案方式の有効性を確認する。

以下、2章で関連研究について説明し、3章で一般的な P2P ストリーミング環境について説明し、4章で筆者らが提案した BIS 方式について説明する。5章で BIS 方式について評価を行い、6章で考察を行う。最後に本稿をまとめる。

2. 関連研究

P2P ストリーミングシステム^{(6),(7)}で著名な BitTorrent^{(8),(9)}では、ストリーミングデータをピース単位に分割し、レARESTファスト方式を用いてピア同士でピースを送受信する。レARESTファスト方式では、ピアは P2P ネットワーク内の数が少ないピースを優先的に受信する。BitTorrent を用いて途切れ時間を短縮する手法がいくつか提案されている。

BASS (BitTorrent Assisted Streaming System for Video-on-Demand)⁽¹⁰⁾は、専用のス

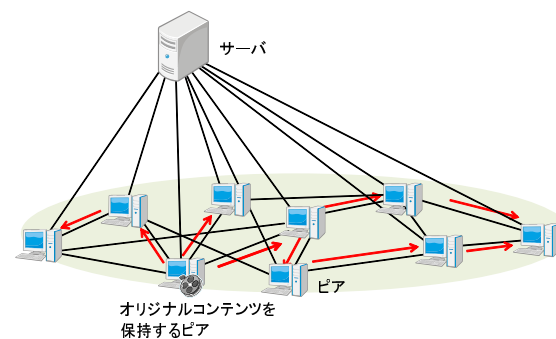


図 2 P2P ストリーミング環境
Fig. 2 P2P streaming environment.

トリーミングサーバとピアによってシステムを構築する。ピアはレARESTファスト方式を用いてピースを受信し、再生開始までに P2P ネットワークからピースを受信できない場合、サーバからピースを受信することで、途切れ時間を短縮する。

BiToS (Enhancing BitTorrent for Supporting Streaming Applications)⁽¹¹⁾は、BitTorrent のレAREST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手法である。BiToS では、図 1 に示すようにコンテンツの未受信のピースを、再生位置に近い優先セットとそれ以外の低順位セットに区別する。ピアは確率 p を用いてピース選択を行うセットを決定し、選択されたセットからレARESTファスト方式を用いて受信ピースを選択する。BiToS では、各セット内ではレAREST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。

筆者らが提案している BIS 方式⁽⁵⁾では、BiToS を改良し、各ピースの希少性と緊急性の両方を考慮したピース選択を行う。しかし、これまでの評価では、ピアがコンテンツを再生終了後に P2P ネットワークから離脱する環境を想定していなかった。

3. P2P ストリーミング環境

本章では、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

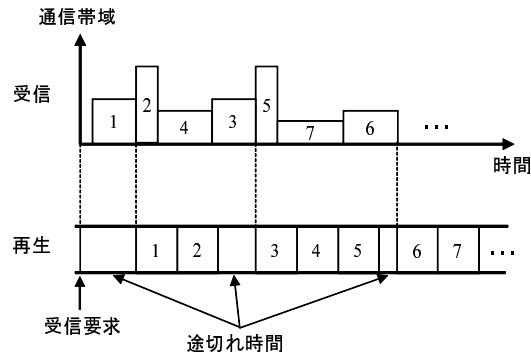


図3 コンテンツ再生の様子
Fig.3 Playing the content.

ピアの通信速度とコンテンツの取得状況を管理している。サーバはデータを配信せず、P2P ネットワークを管理するだけであるため通信負荷が小さいといえる。各ピアは定期的にサーバにアクセスし、P2P ネットワークに参加しているピアの情報を取得する。オリジナルのコンテンツを保持するピアは最初は一だけとする。

ストリーミングデータの再生を開始する際、ピアはまず視聴するコンテンツの配信ソース元を Web ページから調べる。Web ページからデータの情報とサーバのアドレスを取得できる。コンテンツを視聴したいときは、サーバに接続し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、通信ピアを選択しピースを受信する。ピースの受信が完了すると、そのピースを再生できる。

3.1 ピース選択

P2P ストリーミング環境において、ピアはピアリストから選択したピアから必要なピースを受信する。BitTorrent に従って 2 つのポリシーを利用して、ピアは定期的に接続するピアを更新する。一つは送信速度の速いピアと接続する方法である。P2P ネットワーク内のピア間の通信帯域は異なるので、送信速度の速いピアと接続することでピースを早く受信でき、途切れ時間を短縮できる。しかし、レARESTFAST方式によって、数が少ないピースを保持するピアとのみ、接続しようとするのが考えられる。そこで、二つ目のポリシーとして、ピアリストからランダムに 1 ピアと接続する。さらに、データ配信を効率的に行うために、ピースを受信するピア数は制限されている。例えば、ピアが 4 ピアと接続する

とき、各ピアは 3 ピアを一つ目の方法から選択し、残りの 1 ピアを二つ目の方法から選択する。

ピアは接続するピアを選択した後、サーバからピアが保持するピースの情報を取得し、ピースを要求する。ピアがピースを受信する順序は、再生途切れ時間に影響を与える。例えば、P2P ネットワーク内の数が少ないピースを保持するピアに対して多くのピアが受信要求する場合、ピースの受信速度が低下する。このため、提案方式では、途切れ時間が短くなるように受信するピースを決定する。また、同時に通信できるピア数は限られているため、制限数以上の受信要求が発生する場合、他のピアが受信を完了するまでピースの受信を待機しなければならない。

3.2 コンテンツの再生

図3に、ピアがピースを受信し、それを再生する様子を示す。図の上段は、コンテンツを要求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。各ピースにはピースIDが割り当てられており、ピースの受信が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。

4. BIS 方式

本章では、BIS方式について説明する。BIS方式は、P2P ストリーミング環境における再生中断時間短縮手法であり、文献⁵⁾において、ピアが離脱しない環境での有効性が確認されている。BIS方式の詳細は文献⁵⁾に記載されているため、ここでは簡単に説明する。

4.1 想定環境

取り扱うデータは映画やドラマなどのコンテンツである。データが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、配信されるコンテンツは配信開始時点でファイルとして完成しているものとする。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。ピアは再生を終えると、P2P ネットワークから離脱する。

4.2 BIS (BiToS+IS) 方式

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して受信する。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、緊急性を考慮する必要はない。そこで、低順位セットが選

択された場合は、BiToS と同様にレアレストファスト方式を用いて受信ピアを選択する。ピアの重要度は、1 章で説明したように、緊急性と希少性の 2 点が重要である。そこで、ピア $i(1 \leq i \leq n_p)$ に対する重要度 D_i は以下のように定義する。

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

I_i はピア i に対する各ピアの緊急性、 S_i はピア 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アが複数存在する場合には、再生位置に近いピアを選択する。

以下では、ピア i に対する各ピアの緊急性 I_i と、ピア 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。

4.2.1 各ピアの緊急性 I_i

ピア i に対する各ピアの緊急性 I_i は、各ピアのピアの再生位置によって異なる。したがって、ピア 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ア ID、 n はコンテンツの最後に再生されるピア ID を表す。既に再生済みのピア、受信済みのピアに対する I_i は 0 とする。

4.2.2 P2P ネットワーク内における希少性 S_i

ピア i の P2P ネットワーク内における希少性 S_i は、ピア 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ア 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 はピア 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。

4.3 具体例

ここでは、ピアが重要度を計算する方法を具体的に説明する。

配信されるコンテンツは 60 分、2Mbps のデータとする。ピアサイズが 1024Kbyte の場合、コンテンツは 900Mbyte であるため、900 個のピアに分割できる。全ピアの重み係数は $c = 0.5$ とする。ここで、 P_i はピア i ($i = 0, \dots, 899$) を表す。

まず、初めてピアがコンテンツを受信する場合、サーバからコンテンツのピアを保持す

るピアのリストを受信する。最初は P2P ネットワーク内にオリジナルのコンテンツを保持するピア一つしか存在しないため、そのピアからピアを受信し、ピアは全ピアに対する重要度を計算する。この場合、ピアはまだピアを一つも受信していないため、先頭のピアの緊急性は $I_0 = 1 - \frac{0-0}{900} = 1$ と求められる。先頭のピアの希少性は、オリジナルのコンテンツを保持するピア以外にピアを保持するピアが存在しないため、 $S_0 = \frac{1-1}{1} = 0$ と計算される。したがって、この例では、 D_0 は $1 \times 0.5 + 0 \times (1 - 0.5) = 1$ である。同様に、 $I_1 = 0.998$ 、 $S_1 = 0$ から $D_1 = 0.998$ と計算できる。このように全ピアに対する重要度 D_i を計算する。その結果、 D_0 の重要度が一番高いため、ピアは先頭ピア P_0 を受信する。 P_0 を受信完了すると、同様に新しいピアの重要度を計算し、選択する。

しばらくして、P2P ネットワーク内に 50 ピアが存在し、次に P_{50} を再生するピアがいる場合を考える。そのピアは接続ピアから P_{50} 、 P_{51} 、 P_{52} を受信できるとする。各ピアを保持するピア数は $P_{50} = 40$ 、 $P_{51} = 10$ 、 $P_{52} = 30$ とする。このとき、重要度は $D_{50} = 0.51$ 、 $D_{51} = 0.889$ 、 $D_{52} = 0.698$ である。その結果、ピアは最も重要度が高い P_{51} を選択して受信する。このように、ピアは各ピアに対する重要度を計算し、全ピアを受信するまでピアを受信する。全ピアの受信が完了すると、接続ピアとの通信を切断し、P2P ネットワークから離脱する。

5. 性能評価

本章では、性能評価のために行ったシミュレーション実験について説明する。シミュレーション実験では、P2P ストリーミング配信を評価するために頻繁に利用されている GPS¹⁴⁾ を利用した。

5.1 シミュレーション環境

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った。ピアはポアソン分布に従って P2P ネットワークに参加する。ピアは他のピアにピアを送信するために再生後のピアも保持し、コンテンツを再生終了後、P2P ネットワークから離脱する。また、ピアはピアを受信するために十分な記憶容量を保持する。これは、近年のコンピュータがハードディスクのような大容量の記憶容量を保持していることから現実的と考える。P2P ストリーミング環境では、途切れ時間は性能評価の重要な基準であるため、途切れ時間と平均途切れ時間について評価を行う。

5.2 比較方式

シミュレーション実験では、BiToS と BIS 方式を比較する。BiToS は BIS 方式において

表 1 実験のパラメータ
Table 1 Experimental parameters.

パラメータ	値
コンテンツ長 [秒]	3600
ビットレート [Mbps]	2
ピースサイズ [Kbyte]	1024
オリジナルコンテンツ数 [個]	1
ピア数 [個]	400
最大通信帯域 [Mbps]	8
同時に通信可能なピア数 [個]	4
通信ピアの切り替え間隔 [秒]	10

重み定数 $c = 0$ とした場合に対応する。オリジナルの BiToS では、ピースの受信がコンテンツの再生に間に合わない場合、対応するピースの再生をスキップし、次のピースを再生する。再生を飛ばしたピースに対しては以降、受信要求を出さないが、本研究では再生中の途切れ時間について評価するため、ピースの受信がコンテンツの再生に間に合わない場合、そのピースの受信が完了するまで待機するものとする。

5.3 パラメータの影響

BIS 方式では優先セットの長さや優先セットの選択確率によって途切れ時間が変化する。そこで、コンテンツ長に対する優先セットの長さ $k\%$ と優先セットの選択確率 p を変化させて平均途切れ時間を調べた。例えば、60 分のコンテンツで $k = 1$ の場合、優先セットの長さは $60 \times 0.01 = 0.6$ 分となる。また、 $p = 0.8$ の場合、ピアは優先セットを 80% の確率で選択する。

まず、優先セットの長さを 1% で固定し、確率 p を 0.5 から 1 の間で 0.1 ずつ変化させた場合の平均途切れ時間を、図 4 に示す。コンテンツを受信するピアの要求到着間隔は 60 秒である。図 4 から、 $p = 0.8$ の場合、平均途切れ時間が最も短いことがわかる。これは、 $p < 0.8$ の場合、再生位置に近いピースを受信しやすくなるためである。一方、 $p > 0.8$ の場合、 p が増加するほど平均途切れ時間が長くなることがわかる。これは、コンテンツ前半のピースを選択するため、コンテンツ後半のピースを保持するピアが少なくなり、それらのピースを受信するまでに時間がかかるためである。

次に、 p を 0.8 に固定し、 k を 0 から 5 の間で 1 ずつ変化させた場合の平均途切れ時間を図 5 に示す。図 5 から、 $k = 1\%$ の場合、平均途切れ時間が最も短いことがわかる。これは、優先セットの選択確率を変化させた場合と同様に、優先セットの長さが短いほど、再生位置に近いピースを受信しやすくなるためである。一方、 $k < 1\%$ の場合、平均途切れ時間

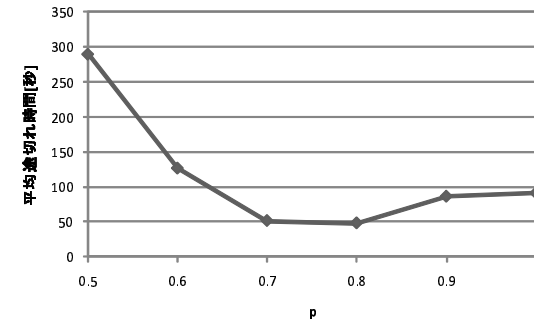


図 4 BIS 方式におけるセット選択確率の影響
Fig. 4 Effect of set selection probably for BIS.

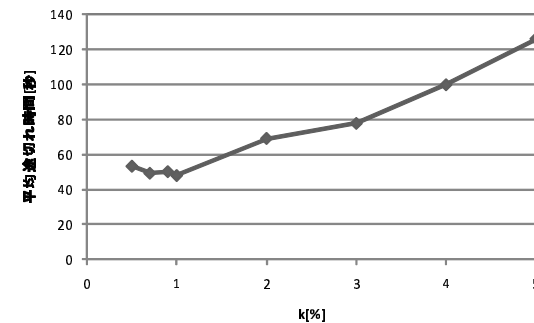


図 5 BIS 方式における優先セットの長さの影響
Fig. 5 Effect of high priority set size for BIS.

が $k = 1\%$ の場合よりも、平均途切れ時間が長くなることがわかる。これは優先セット内のピースがほとんど受信中になっているためである。例えば、 $k = 1\%$ 、 $p = 0.8$ の場合、平均途切れ時間は 48.0 秒である。これは BiToS よりも 16.7% 短い。

以降の評価では、最も平均途切れ時間が短かった $k = 1\%$ 、 $p = 0.8$ を用いる。

5.4 同時に通信可能なピア数の影響

同時に通信可能なピア数が変化すると、送受信するピースが変化し、P2P ネットワーク内のピースの分布が変化するため、平均途切れ時間が変化する。そこで、BIS 方式における

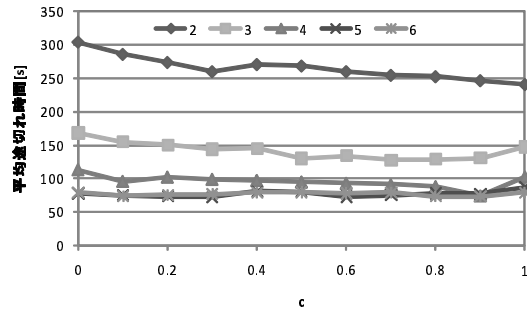


図 6 同時に通信可能なピア数と平均途切れ時間

Fig. 6 The number of peers connecting simultaneously and the average interruption time.

重み定数 c を 0 から 1 まで変化させ、同時に通信できるピア数を 2 から 6 まで異なる場合の平均途切れ時間の変化を調べた結果を図 6 に示す。コンテンツを受信するピアの要求到着間隔は 30 秒である。

図 6 から、BIS 方式は BiToS と比較して、特に同時に通信可能なピア数が少ない場合に、平均途切れ時間が短くなるのがわかる。これは、BIS 方式では、優先セットからピースを受信する際、再生位置に近いピースと P2P ネットワーク内に存在するピース数を考慮して受信できるためだと考えられる。同時に通信可能なピア数が少ない場合、各ピアに割り当てられる通信帯域は大きくなるが、P2P ネットワーク内にピースが分散しにくくなるため、重み定数 c が変化することによって平均途切れ時間が短くなる。特に、同時に通信可能なピア数が 2 の場合は、送信ピアと受信ピアが 1 対 1 の通信になるため、再生位置に近いピースを優先的に受信するほうが途切れ時間が短くなる。一方、同時に通信可能なピア数が多い場合、通信ピア数が多くなり P2P ネットワーク内にピースが分散しやすいが、各ピアに割り当てられる通信帯域が小さくなり、再生開始までにピースが受信できない場合があるため、重み定数 c による影響が小さくなると考えられる。

6. 考 察

6.1 ピアが保持できるデータサイズ

本稿では、各ピアがハードディスクドライブのような十分な記憶領域をもっていると想定し、評価を行った。しかし、ピアが他のデータも保持している場合には、P2P ストリーミ

ング配信で用いる記憶領域の大きさを制限する必要がある。この場合、記憶領域が不足しないように、再生が完了したピースから削除していくことが考えられる。P2P ネットワーク内のピース数が減少するため途切れ時間が増加するため、各ピアが将来キャッシュするピースを考慮して受信するピースを選択するような手法の拡張や、キャッシュしているピースの最適な削除手法を今後検討する。

6.2 配信されるコンテンツの数

本稿では、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いる。P2P ネットワーク内に複数のコンテンツを配信する場合、コンテンツ毎に複数の P2P ネットワークを構築する必要がある。この場合、各 P2P ネットワークにサーバが必要であるため、管理のコストが増加する。一つの P2P ネットワークで複数のコンテンツを配信する状況は、今後の検討課題である。

7. 結 論

本稿では、ピースの緊急性と希少性を考慮した重要度を定義し、重要度の高いピースを優先的に受信することで途切れ時間を短縮するピース受信方式について、ピアの離脱を考慮して再生途切れ時間に関して評価した。シミュレーション実験より、ピアが P2P ネットワークから離脱する場合でも、従来の手法と比較して途切れ時間を短縮できていることを確認した。例えば、コンテンツを受信するピアの要求到着間隔が 60 秒の場合、BIS 方式の途切れ時間は 48.0 秒で、BiToS よりも 16.7% 途切れ時間を短縮できる。

今後は、ピアがキャッシュできるデータ量に制限がある場合、配布するコンテンツが複数ある場合などに対応できるように提案方式を拡張することを考えている。

謝辞 本研究の一部は度総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」の研究助成による成果である。また一部は、科学研究費補助金(基盤研究(S))「モバイルセンサネットワークのための効率的なデータ処理機構に関する研究」(課題番号: 21220002) および科学研究費補助金(若手研究(B))によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) BBTB,
<http://www.bbtb.com/>.
- 2) YouTube,

<http://jp.youtube.com/>.

- 3) Hefeeda, M., Habib, A., Botev, B., Xu, D. and Bhargava, B.: Promise: A peer-to-peer media streaming system, *Proc. MULTIMEDIA'03*, pp.45–54 (Nov. 2003).
- 4) Guo, Y., Suh, K., Kurose, J. and Towsley, D.: A peer-to-peer on-demand streaming service and its performance evaluation, *Proc. ICME'03*, Vol.2, pp.649–652 (July 2003).
- 5) 坂下 卓, 北島信哉, 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分割データの重要度を考慮した再生途切れ時間短縮方式, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集 *DICOMO'09*, Vol.2009, No.1, pp.424–430 (July 2009).
- 6) 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).
- 7) PeerCast,
<http://www.peercast.org/jp/>.
- 8) BitTorrent,
<http://www.bittorrent.com/>.
- 9) Cohen, B.: Incentives build robustness in BitTorrent, *Proc. P2PECON'03*, (June 2003).
- 10) Dana, C., Li, D., Harrison, D. and Chuah, C.-N.: BASS: Bittorrent assisted streaming system for video-on-demand, *Proc. MMsP'05*, pp.1–4 (Oct. 2005).
- 11) Vlavianos, A., Iliofotou, M. and Faloutsos, M.: BiToS: Enhancing bittorrent for supporting streaming applications, *Proc. INFOCOM'06*, pp.1–6 (Apr. 2006).
- 12) Hefeeda, M., Bhargava, B. and Yau, D.K.-Y.: A hybrid architecture for cost-effective on-demand media streaming, *Computer Networks*, No.3, p.44 (Feb. 2004).
- 13) Veoh, URL: <http://www.veoh.com/>.
- 14) Yang W. and Ghazaleh N.-A.: GPS: A General peer-to-peer simulator and its use for modeling BitTorrent, *Proc. MASCOTS'05*, pp.425–432 (Sept. 2005).
- 15) Jiang, X., Dong, Y., Xu, D. and Bhargava, B. : Gnustream: A P2P media streaming system prototype, *Proc. ICME'03*, Vol.2, pp.325–328 (July 2003).