情報処理学会論文誌 Vol.54 No.2 529–537 (Feb. 2013)

報酬付け P2P VoD ストリーミングのための受益値を用いたピース・レンディング方式

遠藤 伶[1,a)] 高山 和幸[1] 重野 寛[1,b)]

受付日 2012年5月14日, 採録日 2012年11月2日

概要：P2P VoD ストリーミングでは，ピアに積極的にデータを送信させて配信サーバの送信負荷を下げるために，データ送信量に応じた量だけデータ受信を許可するという，報酬付けアルゴリズムが広く導入されている．しかし，既存の P2P VoD 向け報酬付け手法では，サービスに参加直後のピアが，配信サーバによる補助なしにピア間のピース交換に参加できない．本論文では，新規参加ピアにデータの受信権を貸し付けて，後からその分の貢献を取り立てる仕組を導入することで，ピアの送信帯域使用率を向上させるピース・レンディング方式を提案する．ピース・レンディング方式では，連続再生可能な受信済みピース量として定義される受益値を用いた報酬付けにより，ピース貸付の仕組を実現する．また，シミュレーションを行い，ピース・レンディング方式の有用性をピア帯域使用率，再生開始遅延などの点から示す．

キーワード：Peer-to-Peer（P2P），動画配信，ピース・スケジューリング，ピース・レンディング方式

Piece Lending Scheme Using Benefit Value for Incentivized P2P VoD Streaming

Rei Endo[1,a)] Kazuyuki Takayama[1] Hiroshi Shigeno[1,b)]

Received: May 14, 2012, Accepted: November 2, 2012

Abstract: Many P2P systems introduce incentivized algorithms to provide a motivation for peers to send many data. In the incentivized algorithms, a peer's benefit, which is how many data the peer can receive, depends on the peer's contribution, which is how many data the peer sent. Existing incentivized algorithms for P2P VoD, however, cannot utilize peers' uplink capacities because initial peers cannot send video data without a support of a video server. This paper proposes a piece lending scheme to increase a fraction of peers' utilized uplink capacity. In the scheme, a peer's benefit value is defined as how much video data the peer can watch continuously, and the benefit value is used for incentive mechanism. We show that the piece lending scheme utilizes the uplink capacity and decreases a start up latency by a computer simulation.

Keywords: Peer-to-Peer (P2P), Video-on-Demand (VoD), piece scheduling, piece lending scheme

1. はじめに

Video on Demand（VoD）ストリーミング・サービスは，視聴者が各々の好きなタイミングで動画を視聴可能な，インターネット動画配信サービスである．一般的には，動画配信者の用意した配信サーバが，すべてのユーザ端末に動画データの送信を行う，サーバ・クライアント・モデルの配信システムが用いられる．そのようなシステムでは，配信する動画のデータ量や，同時視聴者数に応じたデータ送信能力が配信サーバに求められる．したがって，大規模な動画配信を実現するには，配信者が配信規模に応じた性能のサーバを用意する必要があり，金銭的コストが高くなる．そのため，一般のエンドユーザなどの，極端に高性能なサーバを用意できない配信者には不向きである．そこで本研究では，そのようなエンドユーザでも動画を配信可能な VoD システムの実現を目指す．

1 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan
a) endo@mos.ics.keio.ac.jp
b) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

© 2013 Information Processing Society of Japan

上記の問題を解決するため，Peer-to-Peer（P2P）ネットワークを用いたVoDストリーミングが広く研究されている [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]．P2P VoDでは，視聴者端末をピアと呼び，ピアは動画データの受信だけでなく，他ピアへの送信も行いサーバの配信の一部を肩代りすることで，配信サーバの送信負荷を削減する．このようなP2P VoDでは，ピアのデータ送信量に応じて配信サーバ負荷が減るため，各ピアに対し，どのようにデータ送信を促すかが重要となる．一般的なP2Pデータ配信では，報酬付けアルゴリズムを用いて各ピアにデータ送信を促す [10]．報酬付けアルゴリズムでは，各ピアは，データ送信という貢献に対する報酬として，データ受信権を得られる．そして，このような報酬付けアルゴリズムをP2P VoDにも適用する手法が研究されている [4], [5], [6], [7], [8], [9]．また，P2P VoD独特の特徴として，動画データはピースと呼ばれる断片データに分割され，動画上での再生時刻順にIDが割り振られる．各ピアは相手が保持していないピース，すなわち未保持ピースを相互に送信しあう．そして，動画再生を途切れさせないために，ピアは現在再生しているピースの近傍ピースを優先して連続的に取得する．そのようなピースを本論文では連続ピースと呼ぶ．逆に，すぐには使用しないが将来必要になるピースを不連続ピースと呼ぶ．また，ある動画のピースのうち比較的前半に位置するピースを序盤ピース，後半に位置するピースを終盤ピースと呼ぶ．

しかし，既存のP2P VoD向け報酬付けアルゴリズム [7] では，サービス参加直後のピアは，配信サーバによる補助がなければピア間のピース交換に参加できない．P2P VoDでは，ピアどうしのピース交換の際に，相手ピアが過去に十分な量のピース送信を行っていない場合には送信を見合わせるなどの方法で，報酬付けの仕組を実現する．しかし，この方式では，送信可能なピースのない新規参加ピアは，ピース送信量を増やせないためピアどうしのピース交換に何らかの補助を必要とする．また，P2P VoDでは動画データを先頭から順番に収集し再生するが，このような特性は一般のP2P報酬付けアルゴリズムでは考慮されていない．そこで既存方式 [7] は，配信サーバが新規参加ピアに対し，貢献と無関係に終盤ピースを不連続ピースとして配布することで，その問題を解決する．しかしこの手法では，各ピアは，サーバによる補助で取得したピースの分だけ，ピース交換に参加しないため，ピアの帯域使用率が低い．さらに，新規参加ピアは，配信サーバからピースを受信するまでピース交換に参加できず，配信サーバの送信能力が低い場合は，動画再生の待ち時間が増大する．

本論文では，連続再生可能な受信済ピース量を受益値と定義し，それを報酬付けアルゴリズムに利用するピース・レンディング方式を提案する．ピース・レンディング方式は，他ピアへの貢献量に応じたピース受信権を各ピアへ与える報酬付けP2P VoDの一種であり，配信サーバの負荷を大きく抑え，ピアの送信帯域使用率の向上，再生開始遅延の短縮を目的とする．提案手法では，P2Pシステムが新規参加ピアに対しピース受信権を貸し付ける，すなわち，新規参加ピアに対し他ピアあるいはサーバより自身の貢献と無関係に終盤ピースを不連続ピースとして受信することを許す．そして，新規参加ピアが十分な連続ピースを集めた際には，貸し付けた受信権を得るために本来必要だった貢献をP2Pシステムが取り立てる，すなわち，そのピアが過去に貢献と無関係に受信した分と同量のピースを，新たな別の新規参加ピアに対して相手の貢献と関係なく送信させる．このような，ピアにピース受信権を貸し付けて，後からその分の貢献を取り立てるピース・レンディングの仕組を導入することで，配信サーバのみに頼るのではなく，ピアも含めたP2Pシステム全体で新規参加ピアのピース交換参加を補助する．また，配信サーバによるピース配布の処理をピア間に分散したことにより，ピアの帯域使用率が向上，再生開始遅延が短縮される．

以下，2章で関連研究とその問題点を明らかにし，3章でその問題を解決する新方式を提案する．そして4章で性能評価を行い提案方式の有用性を示し，5章に結論を示す．

2. P2P VoDの関連研究

P2P VoDストリーミングでは，各ピアが動画データの受信だけでなく，他ピアへの送信も行いサーバの配信の一部を肩代わりすることで，配信サーバの送信負荷を削減する．一般に，動画データはピースと呼ばれる断片データに分割され，動画の再生時刻順に各ピアはピースを取得する [4], [5], [6], [11], [12]．そして，各ピアはすべてのピース取得を待たずに，受信したピースから順次再生していくことで，短い再生開始遅延で動画を視聴する．また，すべてのピース受信を完了したピアはP2Pネットワークから離脱する．そのため，動画終盤に位置するピースを保持するピアを発見するのが難しく，そのようなピースを他ピアから受信するのが難しいという問題があるが，再生時刻順のピース収集と並行して，早いうちから再生時刻の遅い終盤ピースをピアが取得することで解決する [7], [13]．

一般のP2Pデータ配信では，ピアがデータ送信に協力しない場合，配信サーバにデータ転送リクエストが集中し，データ配信に必要な時間が増える．P2P VoDストリーミングの場合は，動画の再生開始遅延の増加や，ピースの受信速度が動画の再生に追いつかないことによる再生品質の低下が発生する．したがって，各ピアに対して，どのようにデータ送信を促すか，すなわち報酬付けが重要となる．

2.1 P2P VoD向け報酬付けアルゴリズム

P2Pファイル共有アプリケーションのために提案された報酬付けアルゴリズムTit-For-Tat（TFT）[10] などを

© 2013 Information Processing Society of Japan

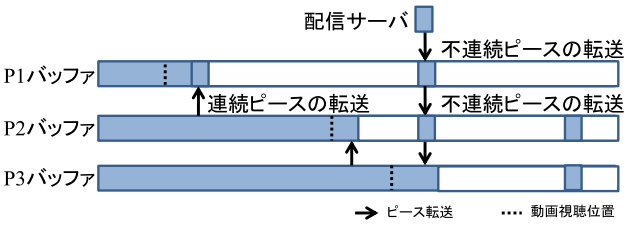


図 1　サーバ・プッシュ方式におけるピース交換
Fig. 1　A Piece exchanging in server-push method.

P2P VoD ストリーミングに適用する手法がいくつか提案されている [7], [8], [9]．報酬付けアルゴリズムでは，各ピアは，データ送信という貢献に対する報酬として，データ受信権が得られる．この仕組により，ピアはすべての動画データを受信するという目的のために，他ピアへのデータ送信を積極的に行う．典型的な報酬付け手法では，各ピアの受信可能ピース量は過去のピース送信量に応じて決定される [8], [9]．それによって，動画を視聴したいピアに対して，一定量以上のピース送信を促す．また，ピースを 1 つも保持していない新規参加ピアが最初のピースを取得できるように，受信可能ピース量をピース送信量よりも大きく設定するのが一般的である．他の報酬付け手法としては，ピアが必ずお互いに交換し合う形でピースを送受信することで，ピース受信と同量のピース送信を要求する手法も用いられる [7]．しかし，VoD ストリーミングではファイル共有と違い，基本的にすべてのピアが動画の再生時刻順にピースを収集しようとする．したがって，ネットワーク中の大半のピアが序盤ピースを早めに取得してしまうため，新規参加ピアは，自分の保持している序盤ピースを欲しがっているピアを見つけるのが難しい．そして，ピースを他ピアへ送信しなければ新たなピース受信ができないため，新規参加ピアはピースの収集に時間がかかる．

そこでサーバ・プッシュ方式では，配信サーバが新規参加ピアに対し，貢献と無関係にピースを配布する [7]．この方式では，配信サーバは新規参加ピアに優先的にピース送信を行い，また送信するピースは再生時刻の遅い終盤ピースを用いる．終盤ピースは多くのピアが未保持である可能性が高いため，新規参加ピアはその終盤ピースを他ピアへ送信することで，ピア間のピース交換にスムーズに参加できる．**図 1** にサーバ・プッシュ方式におけるピース交換の流れを示す．同じ動画を視聴する新規参加ピアと先行ピアの受信バッファの状態を図示しており，左方が序盤ピース，右方が終盤ピースを表す．また，各ピアは P3，P2，P1 の順にサービスに参加しており，P1 が最も新しく参加したピアである．配信サーバは新規参加ピア P1 に対して終盤ピースを不連続ピースとして送信し，P1 は終盤ピースと交換する形で P2 より連続ピースを受信できる．しかしこの手法では，各ピアは，サーバによる補助で獲得したピースの量の分だけ，ピース交換に参加する必要がなくなってしまう．また，新規参加ピアは，配信サーバからピースを受信するまでピース交換に参加できないため，配信サーバの送信能力が低い場合は，動画再生の待ち時間が増大してしまう．

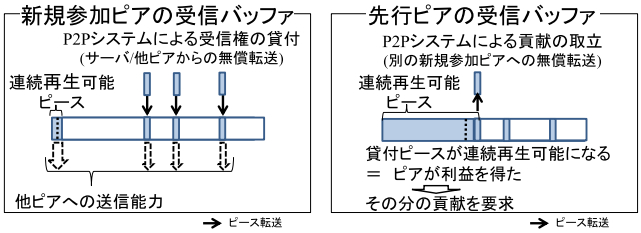
3.　提案方式

本論文は，連続再生可能な受信済ピース量を受益値として定義し，それを報酬付けアルゴリズムに利用するピース・レンディング方式を提案する．ピース・レンディング方式は，他ピアへの貢献量に応じたピース受信権を各ピアへ与える報酬付け P2P VoD の一種であり，配信サーバの負荷を大きく抑え，ピアの送信帯域使用率の向上，再生開始遅延の短縮を目的とする．提案方式における P2P VoD システムは，視聴者が所持する PC である複数のピアと，動画配信者が用意する配信サーバから構成されるものである．ピアの役割は，他ピアあるいはサーバよりピースを受信し動画再生を可能にすること，および他ピアへピースを送信することである．また，配信サーバの役割は動画配信の初期ソースとなること，およびピア間のピース交換を補助することである．ピース・レンディング方式では，新規参加ピアに対し P2P システムがピース受信権を貸し付ける，すなわち，新規参加ピアに対し他ピアあるいはサーバより自身の貢献と無関係に終盤ピースを不連続ピースとして受信することを許す．そして，新規参加ピアが十分な連続ピースを集めた際には，貸し付けた受信権を得るために本来必要だった貢献を P2P システムが取り立てる，すなわち，そのピアが過去に貢献と無関係に受信した分と同量のピースを，新たな別の新規参加ピアに対して相手の貢献と関係なく送信させる．このような，P2P システムが新規参加ピアにピース受信権を貸し付けて，後からその分の貢献を取り立てるピース・レンディングの仕組を導入することで，配信サーバのみに頼るのではなく，ピアも含めた P2P システム全体で新規参加ピアのピース交換参加を補助する．配信サーバによるピース配布の処理をピア間に分散することにより，ピアの帯域使用率が向上，再生開始遅延が短縮される．

3.1　貢献値を用いたピース・レンディング

図 2 は，動画を視聴するあるピアの受信バッファの状態を示しており，(a) が新規参加ピアのバッファ，(b) がある程度の連続ピースを取得した先行ピアのバッファを表す．ピース・レンディングのコンセプトは，新規参加ピアに対しては P2P システムがピース受信権を貸し付けて，その代わりに，十分に連続ピースを受信したピアからは，貸し付けた受信権分の貢献を取り立てることで，新規参加ピアへの不連続ピースの配布を配信サーバのみに頼るのではなく，ピアを含めた P2P システム全体で実現することである．新規参加ピアにピース受信権を貸し付ける，すなわち，

© 2013 Information Processing Society of Japan



(a) 新規参加ピアに対する受信権貸付による送信能力増強　(b) 先行ピアに対する過去に貸付した受信権分の貢献取立て

図 2 ピース・レンディングのコンセプト

Fig. 2 Concept of piece lending.

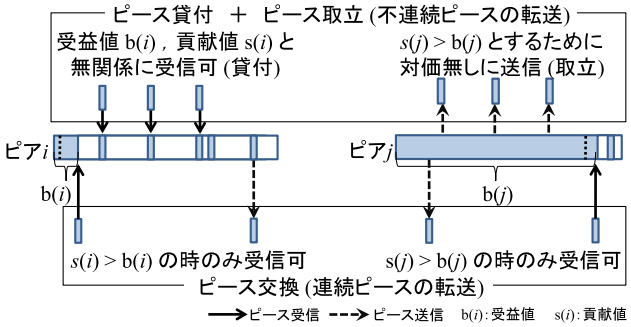


図 3 受益値を用いたピース・レンディング方式

Fig. 3 Piece lending method using benefit value.

新規参加ピアが他ピアやサーバより自身の貢献とは無関係に不連続ピースを受信できるようにする．それにより，新規参加ピアはピース送信ができていなくても新たなピースを受信でき，送信可能なピース数が増え，ピア間のピース交換にスムーズに参加できる．また，ピアが十分な連続ピースを受信し，貢献とは無関係に受信したピースが連続ピースとなった時点で，P2P システムはそのピアより貢献を取り立てる，すなわち，P2P システムを維持するため他ピアに対し対価なしにピースを送信させる．この取立ての際に，ピースの送信相手が新規参加ピアとなるようにすることで，新規参加ピアへの不連続ピースの配布を P2P システム全体で補助するというピース・レンディングのコンセプトを実現できる．

ピース・レンディングのコンセプトを実現するには，新規参加ピアのうちはピース送信なしのピース受信を許しつつ，ピース受信が進むにつれてより多くのピース送信量を要求していき，最終的にはピース送信量と受信量を釣り合わせる必要がある．提案方式では，報酬付けアルゴリズムに用いる P2P システムから得た報酬の量を，連続再生可能な取得済みピース量として定義し，それを受益値と呼ぶ．また，ピアが P2P システムに対しどれだけ貢献したかを示す量を，そのピアが過去に他ピアへ送信したピース量の合計として定義し，それを貢献値と呼ぶ．提案方式はこの受益値と貢献値を利用した報酬付けアルゴリズムを使用することで，ピース・レンディングのコンセプトを実現する．提案方式では，ピアはピースを受信しただけでは報酬を得たと見なされず，そのピースを利用しての動画連続再生が可能になったときに初めて報酬を得たと見なされる．これにより，新規参加ピアは貢献をしなくても不連続ピースを受信することができる．そして，不連続ピースを基にピース交換を繰り返し，連続ピースを取得していく．また，不連続に受信したピースが連続再生可能になった時点で，受益値に加算される．ここで，報酬付けアルゴリズムの制御により，各ピアは受益値以上の貢献値がなければ新たなピースを取得できない．そのため，先行ピアに対し，初期に貢献なしに受信したピース量の分だけピース送信を求めることができる．

図 3 に受益値を利用したピース・レンディングの仕組を示す．$b(i)$，$s(i)$ はピア i の受益値，貢献値をそれぞれ表し，また，左が新規参加ピア i，右が十分な連続ピースを取得済みの先行ピア j の受信バッファを表す．新規参加ピア i は，自身の貢献値 $s(i)$ に関係なく，不連続ピースを入手できる．そして，入手した不連続ピースを送信する代わりに，連続ピースを受信する．また，各ピアはどんな場合でも貢献値が自身の受益値よりも多くなければ，次のピース受信ができないようピース・レンディング方式はデザインされる．先行ピア j は貢献値 $s(i)$ が受益値 $b(j)$ を下回っている場合，新規参加ピアへの不連続ピース送信を行うことで貢献値を稼ぐ．そして，$s(i) > b(j)$ となった時点で，連続ピースを受信可能となる．

3.2 ピース送信アルゴリズム

ピース・レンディング手法では，2 種類のピース転送を使用する．相手の貢献値と受益値に従ってピースを送信する In-Order ピース転送（IN 転送）と，相手の貢献値と受益値に関係なくピースを送信する Out-of-Order ピース転送（OUT 転送）である．IN 転送は受信側ピアの受信要求から開始するピース転送であり，受信側にとっての連続ピースを送信する，一般的な P2P VoD でも用いられる転送手法である．IN 転送では，受信側が欲しいピースを送信してもらうことができる代わりに，受信側には一定量以上の貢献値が求められる．一方，OUT 転送は送信側ピアの送信要求から開始するピース転送であり，新規参加ピアに新規参加ピアにとっての不連続ピースを送信するために用いられる．OUT 転送では，受信側が特定のピースを要求できない代わりに，受信側の貢献値と受益値とは無関係にピースを取得できる．各ピアは自身の送信帯域 u を 2 つに分割し，IN 転送，OUT 転送のためにそれぞれ割り当てる．IN 転送用送信帯域を u_{in}，OUT 転送用送信帯域を u_{out} としたとき，各帯域は $u_{in} = u(1 - r_o)$，$u_{out} = ur_o$ $(0 \leq r_o \leq 1)$ となる．ここで，r_o は OUT 送信帯域割当率であり，各ピアが帯域をどれだけ新規参加ピアへの不連続ピース送信のために使用するかを表す．

© 2013 Information Processing Society of Japan

3.2.1 In-Order ピース転送（IN 転送）

IN 転送では，貢献値 s_i が受益値 b_i より多いピア i に対してのみピースが送信される．どのピースが送信されるかは，受信側のピア i の受益値 b_i より決定される．

本手法では既存手法 [7] と同様にランダム・メッシュ型のトポロジを持つ P2P ネットワーク構築し，各ピアは P2P ネットワーク上の隣人ピアと，あるピアがどのピースを保持しているかを示すバッファ・マップを定期的に交換する．その情報を基に，ピア i は ID が $b_i + 1$ のピースを保持するピアに対して，貢献値 s_i を含んだ，リクエスト・メッセージを送信する．本手法では，各ピースの ID は再生時刻の早い順に割り振られるため，ID の小さい順にピースを受信することで，全ピースの受信完了を待たずに動画のストリーミング再生を行える．受益値 b_i は，ピア i が ID が 0 のピースから連続して保持しているピースの個数を表しているため，ID$b_i + 1$ のピースがピア i が次に受信するべきピースとなる．隣人ピアの中に IN 転送を要求可能なピアが複数いる場合は，そのうちの 1 つのピアをランダムに選択しリクエスト・メッセージを送信する．そして選択したピアに要求を拒否された場合は，別の要求可能ピアにリクエスト・メッセージを再び送信する．また，隣人ピアの中に $b_i + 1$ を所持するピアがいないか，もしくは所持するすべてのピアに要求を拒否された場合は，サーバに対してリクエスト・メッセージを送信する．メッセージを受け取ったピアは，メッセージを送信したピア i の貢献値 s_i と，バッファ・マップより受益値 b_i を確認し，$s_i > b_i$ の場合にのみピースを送信する．また，複数のピアからメッセージを受け取った場合は，IN 転送用送信帯域に余裕がある限り要求を受け付けるが，余裕がなければ要求を拒否する．各ピアが同時に実行可能なピース送信/受信数はピアの帯域性能を基にピース送信/受信可能数としてあらかじめ決定されており，その可能数を実行中のピース送信/受信数が上回っていなければ余裕があると判断する．この際に，OUT 転送用送信帯域に余裕があり，かつ OUT 転送を要求可能なピアが隣人にいない場合は，OUT 転送用送信帯域を IN 転送のために使用する．なお，本手法では配信サーバはピアとほぼ同様に動作するが，IN 転送の要求を受信した場合に相手ピアの s_i，b_i の値を確認せず，送信帯域に余裕があれば無条件で要求を受入れる点でピアと異なる．

送信側がバッファ・マップより得られる受益値 b_i に基づいて送信ピースを決定することで，ピア i が受益値 b_i を本来より小さく申告して，ピース送信なしにピースを受信する行為を防げる．仮に，受益値 b_i を本来より小さく申告しても，送信されるピースはピア i がすでに取得済みのピースになるため，虚偽の申告をする意味がない．また，本論文では特別な考慮はしないが，貢献値 s_i について虚偽の申告をするケースも考えられる．その対策として単純な方法では，トラッカと呼ばれる特別な常駐ノードを使用して，各ピアの送信量をモニタリングする方法や，あるいは評判メカニズム [14], [15] を使用して求まる各ピアの情報の真偽値を参照するなどの方法が考えられる．

3.2.2 Out-of-order ピース転送（OUT 転送）

OUT 転送では，$b_i < fE$（$0 \leq f \leq 1$）のピア i に対してのみピースが送信される．ここで，E は配信動画の分割ピース数，f は OUT 受信可能割合を表し，b_i が一定値より低いピアにのみ OUT 転送によるピース送信が行われることを表す．b_i の小さな新規参加ピアに対し OUT 転送によるピース送信を行うことで，ピアどうしの IN 転送によるピース交換に早く参加できる．どのピースが送信されるかは，Rarest-first アルゴリズム [10] によって決定される．

各ピアはバッファ・マップを参照し，$b_i < fE$ となるピア i がいた場合に OUT 転送によるピース送信を行う．隣人の中に対象となるピアが複数いる場合は，OUT 転送用送信帯域に余裕がある限りはリクエスト・メッセージを出し続ける．対象となるピアの数が OUT 転送用送信帯域の送信可能数よりも多い場合は，どのピアにメッセージを出すかはランダムに決定される．この際に，IN 転送を優先することで動画の連続再生をより途切れにくくすること，他ピアに IN 転送を要求されるタイミングをあらかじめ把握するのは困難であることなどの理由から，IN 転送用送信帯域に余裕があったとしても，それを OUT 転送のためには使用しない．送信するピースの ID は，自身が持つ複数のピアのバッファ・マップを参照して，受信側ピアが保持していないピースのうち最も普及度の低いピースを選択する．これにより，新規参加ピアは周囲のピアが保持していないピースを取得でき，ピアどうしのピース交換に参加しやすくなる．また同時に受信側の事情に関係なく普及度の低い ID のピースを送信することで，十分なピース送信をせずにピース受信を行う Free-rider ピア [17] に対する抑止力にもなっている．Free-rider ピアとは，ピース送信を行わなずにピース受信だけをしようとするピアであり，Free-rider ピアが増加すると P2P システム全体の性能が落ちる [17]．動画のストリーミング配信では，ID が連続したピースを揃えなければ動画を正常に再生することができない．OUT 転送では，Free-rider ピアに対してもピース送信が行われてしまうが，連続したピースを得ることができないため，Free-rider ピアは OUT 転送を利用しても動画を正常に視聴することができない．

4. 性能評価

4.1 シミュレーション環境

提案したピース・レンディング方式と既存研究であるサーバ・プッシュ方式 [7] を比較評価するために，ラウンド・ベースのシミュレータを実装した．**表 1** に使用したシミュレーション・パラメータを示す．各項目の値は P2P

© 2013 Information Processing Society of Japan

表 1　シミュレーション・パラメータ
Table 1　Simulation parameter.

ピア送信帯域 u	10 pieces/round
ピア受信帯域 d	20 pieces/round
配信サーバ送信能力 u_s	10 pieces/round
ピア参加率 j	5 peers/round
配信動画サイズ V	500 pieces
配信動画のビット・レート B_v	10 pieces/round
OUT 受信可能割合 f	0.05
OUT 送信帯域割当率 r_o	0.9
ピア最大隣人数	40 peers
ピア最小隣人数	20 peers
シミュレーション時間	1,500 rounds

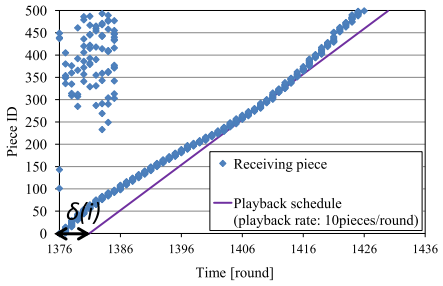


図 4　あるピアのピース受信時刻と再生開始遅延 σ
Fig. 4　Receiving pieces and start up latency σ of a peer.

VoD ストリーミングに関する研究で一般的に用いられる値を使用している [2], [7], [9], [12]．シミュレーションではラウンドごとに j ピアがネットワークに参加し，各手法のアルゴリズムに従ったピース送受信を開始する．そして，各ピアは動画データを構成するすべてのピースを取得した時点で，ネットワークより離脱する．また，ピアと同じ性能を持った配信サーバ 1 台で 1 つの動画を配信するものとする．

4.2　評価項目

ピアの平均送信帯域使用率と平均再生開始遅延について，ピース・レンディング方式とサーバ・プッシュ方式を比較評価した．平均送信帯域使用率 F_u は次式により表される．

$$F_u = \frac{\sum_{i\in\psi} \frac{U_{send}(i)}{u(i)t(i)}}{|\psi|}. \tag{1}$$

ここで，ψ はすべての離脱ピアの集合，$u(i)$ はピア i の送信能力，$t(i)$ はピア i が P2P ネットワークに参加していた期間，$U_{send}(i)$ はピア i が送信したデータ量をそれぞれ表す．

平均再生開始遅延 σ は，受信動画を途切れることなく連続再生するために必要な遅延時間である．図 4 は，時刻 1376 にネットワークに参加したピアの，各ピースの受信時刻を表す．このピアが動画を連続再生するには σ だけ再生開始を遅らせる必要がある．σ は次式によって表される．

$$\sigma = \frac{\sum_{i\in\psi} \sigma(i)}{|\psi|} \tag{2}$$

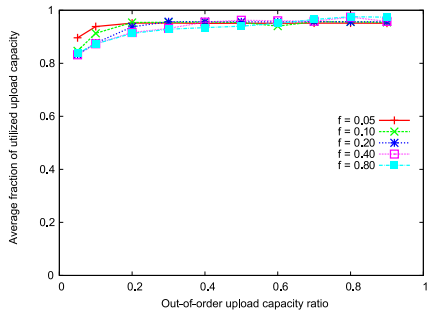


図 5　OUT 送信帯域割当率 o と OUT 受信可能割合 f の平均帯域使用率への影響
Fig. 5　Impact on bandwidth utilization of out-of-order upload capacity ratio o and gettable out-of-order pieces ratio f.

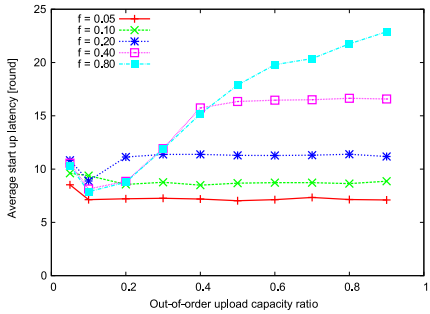


図 6　OUT 送信帯域割当率 o と OUT 受信可能割合 f の平均再生開始遅延 σ への影響
Fig. 6　Impact on latency σ of out-of-order upload capacity ratio o and gettable out-of-order pieces ratio f.

$$= \frac{\sum_{i\in\psi} \max_{k=0}^{E}(t(i,k) - \frac{k\frac{V}{E}}{B_v})}{|\psi|}, \tag{3}$$

ここで，$\sigma(i)$ はピア i の再生開始遅延，E は動画の分割ピース数，$t(i,k)$ はピア i がサービスに参加してからピース k を受信するまでにかかった時間，$\frac{V}{E}$ は 1 つのピースのサイズ，B_v は動画ビット・レートをそれぞれ表す．この σ はピアがすべてのピースを受信してからでなければ計算できない値であるが，遅延なしに再生開始したときに合計でどれだけ連続再生が途切れるかを表す値と同値である．

4.3　OUT 送信帯域割当率 r_o と OUT 受信可能割合 f

図 5，図 6 は，提案されたピース・レンディング方式において，OUT 送信帯域割当率 r_o と OUT 受信可能割合 f を変化させた際の，平均帯域使用率，再生開始遅延 σ をそれぞれ示す．r_o の増加にともない，平均帯域使用率が向上する．これは新規参加ピアが OUT 転送によるピース受信をしやすくなるためと，OUT 転送では Rarest-first で送信するピースを決定しているためである．P2P データ配信では，普及度の低いデータを優先して転送することで性能が向上する [16]．ただし，o を増加させ OUT 転送の割当帯域を増加させると，IN 転送に使用できる帯域が減少することで，ピースを順序どおりに受信するのが難しくなる．

© 2013 Information Processing Society of Japan

表 2　ピース・レンディング方式，サーバ・プッシュ方式それぞれにおける平均送信帯域使用率

Table 2　Average fraction of utilized upload capacity for proposal and existing.

ピース・レンディング方式	サーバ・プッシュ方式
95.1%	67.1%

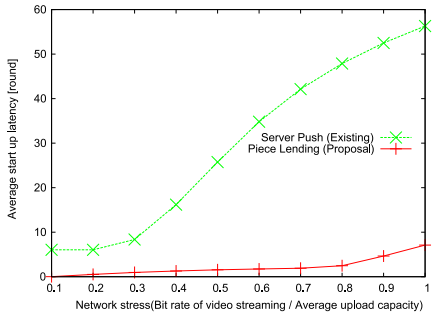


図 7　平均再生開始遅延 σ に対するネットワーク・ストレス ϱ の影響

Fig. 7　Average start up latency σ versus network stress ϱ.

したがって連続再生するために必要な σ が増加する．しかし，十分に f が小さい場合は，o が大きい場合でも σ が大きくならない．したがって，帯域使用率を向上させるために o を大きくとり，再生開始遅延 σ を短縮するために f を小さくとるべきである，これは，OUT 転送によるピース受信をできるピアを制限することにより，OUT 転送によるピース送信が減少し，その余剰分は IN 転送のために使用されるためである．以後は，ピース・レンディング方式に関しては $f = 0.05$，$o = 0.9$ として評価を行う．

4.4　平均送信帯域使用率

表 2 に提案されたピース・レンディング方式，既存のサーバ・プッシュ方式それぞれにおける平均送信帯域使用率を示す．提案方式における帯域使用率は 95.1%であり，既存方式の 67.1%に対して，41.7%向上した．提案方式では，新規参加ピアがサーバからではなく，他ピアからの OUT 転送を利用して不連続ピースを受信できる．その新規参加ピアが OUT 転送で受信したピースを基に IN 転送によるピース交換を繰り返す．そして，連続ピースを十分に集めた後は，初期に OUT 転送で受信したピースの分だけ，別の新規参加ピアに対しピースを OUT 転送で送信する．このようなピース・レンディングの仕組により，サーバの補助なしの報酬付けアルゴリズムが実現され，結果としてピアの帯域使用率が向上した．

4.5　再生開始遅延 δ に対するネットワーク・ストレス ϱ の影響

図 7 に提案方式，既存方式それぞれにおける，ネットワーク・ストレス ϱ を変化させた際の再生開始遅延 σ を示す．ネットワーク・ストレス ϱ は，配信動画のビット・レート B_v とピア平均送信帯域 u の比率であり，次式で示される．

$$\varrho = \frac{B_v}{u}. \tag{4}$$

ピアの平均送信帯域 u が大きいほど ϱ の値は小さくなる．また，本モデルでは $\varrho < 1$ のとき，すなわち送信帯域が動画のビット・レートに対して余裕がある場合に，ピアの送信帯域をロスなく活用でき，ピアが一定速度でピースを受信できるなら，動画の連続再生するために必要な δ は 0 になる．図より，提案方式の再生開始遅延 σ はつねに既存方式よりも小さい．また，ϱ が増加するとピアの送信能力に余裕がなくなるため，両手法とも σ が大きくなる．提案方式では新規参加ピアは配信サーバに頼らず，ピアから不連続ピースを受信できる．そのため配信サーバの送信能力がボトルネックとならず，σ が小さい．特に $\varrho = 1$ のとき，提案方式の σ は既存方式の 56.3 round より，87.4%短縮される．

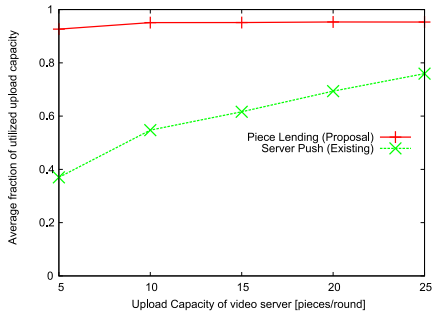


図 8　配信サーバ送信帯域 u_s の平均帯域使用率への影響

Fig. 8　Average fraction of utilized upload capacity versus upload capacity of server u_s.

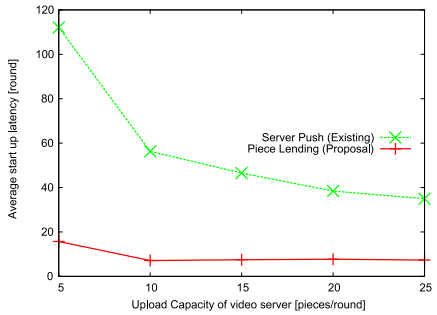


図 9　配信サーバ送信帯域 u_s の σ への影響

Fig. 9　Average start up latency σ versus upload capacity of server u_s.

4.6　配信サーバの送信帯域 u_s の影響

図 8，図 9 に，配信サーバの送信帯域 u_s を変化させた場合のピアの平均送信帯域使用率，平均再生開始遅延 σ をそれぞれ示す．本研究では，一般のエンドユーザでも動画配信が可能なシステムを目的としているため，配信サーバの性能はピアと同等か，極端に高くないものを想定している．既存方式では，u_s が小さくなるにつれ帯域使用率が大

© 2013 Information Processing Society of Japan

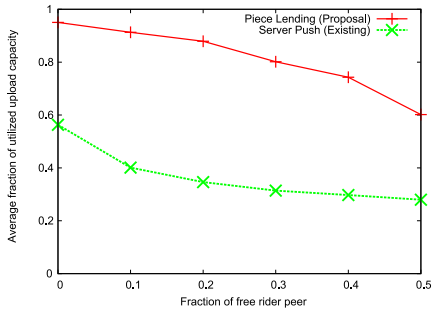


図 10　Free rider 参加率の平均帯域使用率への影響
Fig. 10　Average fraction of utilized upload capacity versus fraction of free rider.

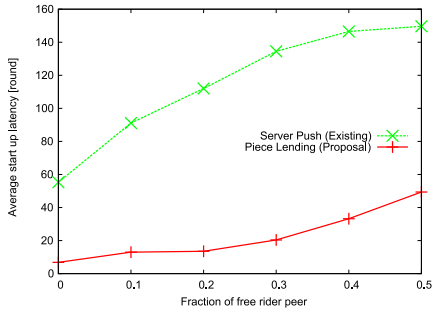


図 11　Free rider 参加率の u_s の σ への影響
Fig. 11　Average start up latency σ versus fraction of free rider.

きく低下し，σ も大きくなる．これは，新規参加ピアが配信サーバにピースを貰うまで，ピアどうしのピース交換に参加できないためである．そのため，u_s が小さい場合は，新規参加ピアがピアどうしのピース交換に参加するまでの遅延が発生する．一方，提案方式における帯域使用率は，u_s の影響をほとんど受けていない．これはピース・レンディング方式では，新規参加ピアは配信サーバに頼らずに，ピアから不連続ピースを受信することで，迅速にピアどうしのピース交換に参加できるためである．また，ある時点における提案方式を用いた P2P システムの非連続ピース配布能力は，その時点の先行ピア数や各ピアのピース収集完了率，ピアおよびサーバの送信帯域などによって制限される．u_s が 5 pieces/round の場合に提案方式の性能が若干低下しているのは，P2P システムの非連続ピース配布能力がピアの参加レートに対して不足しているためだと考えられる．同様に，動画公開時などのように，多数のピアがいっせいに動画視聴を開始するような状況において，新規参加ピア数が P2P システムの非連続ピース配布能力を上回ると，それらのピアの平均再生開始遅延は大きくなる．ただし，ある程度の数のピースを受信した後は，そのピアは配布を行う側になるため P2P システムの配布能力が増加する．したがって，ピアの参加レートが長期にわたって急増し続けるような特殊な状況を除き，一時的に新規参加ピアの平均再生開始遅延が大きくなったとしても時間経過にともない解消されると考えられる．

4.7　Free-rider ピアの影響

図 10，図 11 に，Free-rider ピアが参加した場合のピアの平均送信帯域使用率，平均再生開始遅延 σ をそれぞれ示す．両手法ともに，Free-rider ピアの参加割合が増えるにつれ，帯域使用率は低下し，σ は増加する．既存方式では貢献をしないピアは他ピアからピースをまったく取得できないが，配信サーバからのピース受信は可能なため，Free-rider ピアの割合が増えると，通常ピアが配信サーバからピースを取得するのに時間がかかるようになり，帯域使用率が低下する．一方，提案方式では，OUT 転送を利用して Free-rider もピースを取得できるため，ピアの送信帯域が Free-rider に使われてしまう．しかし，それでも既存方式に比べると，新規参加ピアに対する非連続ピースの配布の処理がピア間に分散されているため，多くの送信帯域を通常ピアへのピース送信に使用できる．また，提案方式における OUT 転送は，OUT 受信可能割合 f によって制限され，かつ Rarest-first アルゴリズムに従って送信ピースが決定されるため，Free-rider ピアはわずかなピースを非連続に集めることしかできない．したがって，スムーズに動画を視聴することはできないため，ピースを送信しない Free-rider ピアとしてのネットワーク参加を抑制できる．

5.　おわりに

既存の P2P VoD 向け報酬付けアルゴリズムでは，サービス参加直後のピアへの非連続ピース送信を，配信サーバに依存していたため，ピアの送信帯域使用率が低いという問題があった．本論文では，P2P システムが新規参加ピアにピース受信権を貸し付け，後からその分の貢献を取り立てる仕組を導入したピース・レンディング方式を提案する．ピース・レンディング方式では，連続再生可能な受信済みピース量として定義される受益値を用いた報酬付けにより，ピース貸付の仕組を実現する．それにより，配信サーバだけでなく P2P システム全体で，新規参加ピアがピアどうしのピース交換へスムーズに参加できるよう補助する．シミュレーションより，ピース・レンディング方式は平均送信帯域使用率に関して，既存手法の 67.1%から 41.7%向上した 95.1%を達成した．また再生開始遅延に関しても，ネットワーク・ストレス $\varrho = 1$ の際に既存手法の 56.3 round より 87.4%短縮し，P2P VoD 向け報酬付けアルゴリズムとしての有用性を示した．

参考文献

[1]　Xuanjia, Q., Chuan, W., Xiaola, L. and Francis, C.M.L.: InstantLeap: Fast Neighbor Discovery in P2P VoD Streaming, *Proc. ACM 19th NOSSDAV*, pp.19–24 (2009).
[2]　Chao, L., Zhenghua, F., Yong, L. and Chai, W.W.: Incentivized Peer-Assisted Streaming for On-Demand Ser-

© 2013 Information Processing Society of Japan

vices, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.21, No.9, pp.1354–1363 (2010).
[3] Danqi, W. and Chai, K.Y.: Superchunk-Based Efficient Search in P2P-VoD System, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.13, No.2, pp.376–387 (2011).
[4] Yufeng, S. and Kalyanaraman, S.: Hybrid video downloading/streaming over peer-to-peer networks, *Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, Vol.2, p.II-665-8 (2003).
[5] Sharma, A., Bestavros, A. and Matta, I.: dPAM: A distributed prefetching protocol for scalable asynchronous multicast in P2P systems, *Proc. IEEE INFOCOM*, Vol.2, pp.1139–1150 (2005).
[6] Yi, C., Baochun, L. and Nahrstedt, K.: oStream: Asynchronous streaming multicast in application-layer overlay networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.22, No.1, pp.91–106 (2004).
[7] Huguenin, K., Kermarrec, A.-M., Rai, V. and Van Steen, M.: Designing a tit-for-tat based peer-to-peer video-on-demand system, *Proc. ACM 20th NOSSDAV*, pp.93–98 (2010).
[8] Choe, Y.R., Schuff, D.L., Dyaberi, J.M. and Pai, V.S.: Improving VoD Server Efficiency with BitTorrent, *Proc. ACM MM*, pp.117–126 (2007).
[9] Annapureddy, S., Guha, S. and Gkantsidis, C.: Is high-quality VoD feasible using P2P swarming?, *Proc. IEEE WWW*, pp.903–912 (2007).
[10] Cohen, B.: Incentives Build Robustness in BitTorrent, bittorrent.org (2003).
[11] Fujimoto, T., Endo, R., Matsumoto, K. and Shigeno, H.: Video-Popularity-based Caching Scheme for P2P Video-on-Demand Streaming, *Proc. 25th IEEE International Conference on AINA*, pp.748–755 (2011).
[12] Jian-Guang, L., Qian Z., Yun, T. and Shi-Qiang, Y.: A Trace-Driven Approach to Evaluate the Scalability of P2P-Based Video-on-Demand Service, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.20, No.1, pp.59–70 (2009).
[13] Champel, M.L., Kermarrec, A.M. and Le Scouarnec, N.: Phosphite: Guaranteeing out-of-order download in P2P video on demand, *Proc. IEEE 9th International Conference on P2P*, pp.281–290 (2009).
[14] Srinivasan, A., Teitelbaum, J. and Wu, J.: DRBTS: Distributed Reputation-Based Beacon Trust System, *Proc. IEEE International Symposium DASC*, pp.277–283 (2006).
[15] Kamvar, S.D., Schlosser, M.T. and GarciaMolina, H.: The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks, *Proc. International Conference on WWW*, pp.640–651 (2003).
[16] Matsumoto, K., Endo, R. and Shigeno, H.: CAS: P2P file sharing method considering rarity problem of blocks, *IPSJ Journal*, Vol.51, No.6, pp.1310–1319 (2010).
[17] Chen, X., An, N., Kang, J., Deng, Z. and Zhang, Y.: A novel method to anti-free-rider in the unstructured P2P networks, *Proc. IEEE ICPA*, pp.394–399 (2011).

遠藤 伶 （学生会員）

2008 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業．2010 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了．現在，同大学院博士後期課程在学中．P2P を利用したファイル共有サービス，VoD サービス等の研究に従事．

高山 和幸 （学生会員）

2011 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業．現在，同大学大学院修士課程在学中．P2P Live Streaming の研究に従事．

重野 寛 （正会員）

1990 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業．1997 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了．現在，同大学理工学部教授．博士（工学）．情報処理学会学会誌編集委員，同論文誌編集委員，同マルチメディアと分散処理研究会幹事等を歴任．現在，情報処理学会高度交通システム研究会幹事，同モバイルコンピューティングとワイアレス通信研究会運営委員，電子情報通信学会英文論文誌 B 編集委員，同ネットワークシステム研究専門委員会委員．Vice Chair of IEEE ComSoc Asia Pacific Board Technical Affair Committee．ネットワーク・プロトコル，モバイルコンピューティング，ITS 等の研究に従事．著書『コンピュータネットワーク』（オーム社），『ユビキタスコンピューティング』（オーム社）等．電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．

© 2013 Information Processing Society of Japan