

## P2MVID: ピア・ツー・ピア型モバイル・ビデオ・オンデマンド

佐藤克彦<sup>1</sup> 勝本道哲<sup>11</sup> 三木哲也<sup>111</sup>

<sup>1</sup>日本無線株式会社 <sup>11</sup>情報通信研究機構 <sup>111</sup>電気通信大学

時間と場所の制約を排除し、無限に多様な映像の発信、享受を可能とする1つの新しい分散マルチメディア情報流通の形態、ピア・ツー・ピア・モバイル・ビデオ・オンデマンド(P2MVID)を提案する。P2MVIDは、分散・偏在し、かつ移動する複数の情報源から、移動するクライアントに、ピア・ツー・ピアによるオンデマンド映像ストリーミング配信を行うモデルであり、マルチキャストVOD技術のアプローチから1つの効果的実現方法を提示する。映像コンテンツを分割し、複数のクライアントが各部分を保持、ブロードキャストすることによって、移動クライアントの経路制御オーバーヘッドとP2Pの脆弱性を克服すると同時に、各部分を共有受信することにより、ブロードキャストによるトラフィックの増加を抑制する。理論的解析により配信トラフィックのふるまいを明らかにし、分割共有化によるトラフィック低減効果と範囲を示した。

### P2MVID: Peer-to-Peer Mobile Video on-demand

Katsuhiko Sato<sup>1</sup> Michiaki Katsumoto<sup>11</sup> Tetsuya Miki<sup>111</sup>

<sup>1</sup>Japan Radio Co., Ltd. <sup>11</sup>The University of Electro-Communications

<sup>111</sup>National Institute of Information and Communications Technology

This paper proposes a new form of distributed multimedia communication, which enable users to share an unlimited number of diverse video content without spatial and time constraints. P2MVID allows moving clients to receive streaming data on demand from ubiquitously distributed and moving source in peer-to-peer architecture. We show a scheme to realize it through multicast VOD techniques, which overcomes mobile routing overhead and service vulnerability in peer-to-peer model by segmenting content and broadcasting it one another. Numerical analysis shows the characteristic of that broadcast traffic on the mobile network and indicates the effectiveness and range of the proposed scheme.

#### はじめに

広帯域無線アクセス技術とモバイルネットワーク技術の発展は、高品位マルチメディアコンテンツと広範なサービスをモバイルユーザに提供可能にする。通信と放送サービスの融合はその1つの形であり、モバイルユーザへ映像コンテンツをライブ放送形式で提供する。しかし、通信サービスの本質はピア・ツー・ピア(P2P)といった個対個の情報交換であり、放送サービスの新たな要求は時間制約のない視聴サービスの提供であると考え、P2Pによる情報の流通は、無数のユーザが情報源になることによって、従来のサーバ・クライアントモデルのような一極集中する情報と運用の負荷を分散させ、無限に多様な情報の流通を可能にする。一方、撮像機やメモリのダウンサイジングはユーザのモビリティを一層高め、モバイル環境におけるP2P型情報流通が期待される。

本論文では、ピア・ツー・ピア・モバイル・ビデオ・オンデマンド(P2MVID)を提案する。P2MVIDは、分散・偏在し、かつ移動する情報源から、移動するクライアントに、P2Pによるオンデマンド型映像ストリーミング配信を行う。自由な移動を許容されるモバイルデバイスが分割された映像コンテンツの各部分を分散データベースの状態で保持し、ランダムな要求生起に応じてそれぞれが保持するコンテンツの各部分をブロードキャストによって提供、享受する。位置と時間に関係なく無限に多様な映像コンテンツをユーザが共有することが可能となる。

より具体的には、マルチキャストを利用するオンデマンド映像配信手法、Patching<sup>6-10)</sup>をベースとするP2Cast<sup>11)</sup>とFragmented Patching<sup>12)</sup>を応用して実現する。Patchingはマルチキャスト利用により配信トラフィックを激減させることが可能であるが、映像コンテンツを保持する移動クライアントが他の複数の移動クライアントに配信を提供する場合、ネットワーク上の配信経路制御のオーバーヘッドが大きな問題となる。また、P2Pによるクライアントからの配信サービスは、提供者となるクライアントの継続的な配信責任をどのように保証するかというP2Pの一般的な脆弱性問題がある。P2MVIDでは、前者の課題を解決するために、映像コンテンツを固定サイズのセグメントに分割してブロードキャストするという手段を取る。ブロードキャストは爆発的なトラフィックの上昇を招くが、クライアント間で同時に受信可能なセグメントを可能な限り共有受信させることでトラフィック増加の相殺を図る。後者の問題に対しては、コンテンツを分割したことでコンテンツの配信責任を複数のクライアントに分散する。コ

ンテンツの提供が困難になったクライアントは他の配信可能なクライアントに責任を譲ることが可能である。セグメントがブロードキャストされることによって、クライアントは、分割されたコンテンツを複数クライアントから享受することが容易になり、またどのクライアントもコンテンツの提供者となることが容易となる。

以降、本論文では、従来研究と課題について述べ、提案するP2MVIDの原理と制御方法を詳細に示す。そして実装すべき次世代移動通信網をモデルとするネットワークを定義して、トラフィック量(Erlang)を用いた理論的解析を行う。ブロードキャストによるトラフィックのふるまいを確認し、方法論の有効性と範囲を明らかにする。

#### 従来研究

多数のユーザへ映像といった大量データを高効率に配信する手法の追及は長年行われてきた。とりわけ、時間的制約を受けないオンデマンド型映像配信の研究は盛んであり、近年はインターネット上での配信に議論の主要が移されている。概ねリアクティブ配信<sup>3-14)</sup>とプロアクティブ配信<sup>1-4)</sup>との2つのアプローチに分類することができる。前者においては、サーバは要求発生時刻が近傍するクライアントを集約し、映像コンテンツをマルチキャスト配信することで、サーバとネットワークに要求される帯域資源を共有化する。クライアントの映像即時視聴を可能にしていることが特徴である。後者は、クライアントが視聴要求をするものではなく、サーバが定期的に映像コンテンツをマルチキャスト配信する。要求されるサーバとネットワーク帯域資源は視聴しているクライアントの数に依存せず、極小化することができるが、クライアントは映像の視聴を即時に行えず、視聴までの時間と要求される帯域はトレードオフの関係にある。

Patching手法<sup>6-10)</sup>はリアクティブ配信アプローチの代表である。Patchingの基本は、配信時刻が近傍する複数の受信システム間で、配信期間内で共通するデータ部分の配信をマルチキャスト配信として集約する(共有フローと呼ばれる)。そして、マルチキャスト配信に含まれなかった部分(すなわち共有フローの先頭部分)のデータはユニキャストで個別に配信する(パッチフローと呼ばれる)。受信システムでは、マルチキャストによる配信データとユニキャストによる配信データを同時に受信し、ユニキャストで配信されたデータを再生してからマルチキャストで配信されたデータを再生する。直ちに再生されないマルチキャストで配信され

たデータは蓄積しておく。最近では、Patching をベースとした新しい手法が提案されている。P2Cast<sup>11)</sup>は Patching 手法の概念を P2P 環境に応用した。クライアントがアプリケーションレベルのマルチキャストツリーを形成し、クライアントはパッチフローをキャッシュし、後続のクライアントにパッチフローを提供する。この方法によれば、配信サーバにおけるパッチフロー配信の負担を各クライアントに分散させることができる。Fragmented Patching<sup>12)</sup>では、パッチフローをセグメントと呼ぶ単位に細分化し、パッチフローの配信においてクライアント間で同時に受信可能なセグメントを可能な限り共有させる。この方法によれば、ネットワーク上のトラフィックをそれまでの Patching と比較して更に低減することができる。

#### モバイル経路制御オーバーヘッドと P2P の脆弱性

Patching 手法では、パッチフローをユニキャスト、共有フローをマルチキャスト配信することを基本としている。移動環境におけるパッチフローのユニキャスト配信は、移動する各クライアントに対して個別に移動制御する必要があり、IP 網のように位置に依存するアドレスに基づくルーティングの場合、ネットワークへの負担が増大する。例えば、Mobile IP のような気付アドレスによる移動制御は、ネットワーク帯域資源の有効利用するという点で三角経路を排除する経路最適化処理が必須である。また、CoA のバインドと経路制御完了までの時間が大きいと、受信してから直ちに再生されるパッチフローの再生の連続性を保つことは困難になる。このような経路制御のオーバーヘッドは、要求生起率の上昇、及びクライアントの移動頻度(基本的には計画されたセルサイズと移動速度に依存する)の上昇に伴って増大する。

位置に依存しないアドレスを使うマルチキャストでは、移動クライアントは移動先から枝を接木するというリバースパスツリーを構築し、本質的にはクライアントの移動に対して適用的であるといえよう<sup>15-17)</sup>。移動先に既にフローを共有する他のクライアントが存在すれば、新たに枝を接木する必要もない。しかし、動的に枝を接木したり切木したりしなければならないというオーバーヘッドは依然存在し、配信要求から視聴開始までの期間において、接木するために要するネットワークの処理時間を考慮しておかななくてはならない。接木頻度は要求生起率の上昇ともない増加するが、クライアントの移動頻度の増大は、接木頻度の増加を助長する。共有フローとパッチフロー共にマルチキャスト配信する Fragmented Patching では、接木頻度の爆発的な増大を許してしまうことが指摘されている。

加えて、マルチキャスト配信においては、マルチキャスト送信元が移動する際に生じる経路制御オーバーヘッドも考慮するべきであろう。P2P 環境において移動するクライアント自身が共有フローやパッチフローを提供するようになると、マルチキャスト送信元が移動することになる。マルチキャスト配信ツリーの構成形態には共有木と始点木がある。共有木は送信元が移動する環境においても、送信元は移動先から固定された結合点に対してデータを送信すればよく、ツリーを再構成する必要がないものの、結合点と始点の間で冗長な折り返し経路を生み無駄なトラフィックの発生を許してしまう。一方、始点木は、送信元の移動に伴い、始点木を構築するノードが始点木を再構築しなければならず、更に送信元の移動を高速に検出することも要求される。文献 19)では、送信元情報の広告機構を使わずに、移動する送信元自身が移動元から移動先までの間の経路情報を更新する方法を提案し(注:最小木は維持されない)、送信元の移動に伴うネットワーク上の経路制御オーバーヘッドを極小化する手法を示した。しかし、当該方法においても経路制御のオーバーヘッドは依然存在し、パッチフローさえもマルチキャスト配信する Fragmented Patching では、その経路制御オーバーヘッドの大きさは現実的ではなくなる。

P2P によるクライアントからのコンテンツ配信は、提供者となるクライアントの配信責任をどのように保証するかという問題

も存在する。共有フローの配信は映像コンテンツ全体に及ぶため、これを担うクライアントは長時間の配信持続を負わされる。パッチフローの提供においても、コンテンツの一部分の配信を特定のクライアントに固定的に責任を負わせることは、そのクライアントに著しい負担を強いることになる。とりわけ移動通信環境ではクライアントシステムのバッテリー節約も考慮に入れる必要があり、共有フロー及びパッチフローの継続的な配信をどのように保証するかという課題がある。

#### P2MVID

提案する P2MVID は、サーバだけでなくコンテンツを保持しているクライアントならば Patching 手法を基本とする VOD サービスを他のクライアントに提供することを許す。加えて、P2Cast のように、パッチフローを取得したクライアントらは、それをキャッシュしさらに後続のクライアントにそれを提供可能とする。送信、受信するクライアント双方が移動する環境において、Patching のパッチフロー(ユニキャスト)と共有フロー(マルチキャスト)の経路制御オーバーヘッド解消するために、P2MVID では、当該フローをブロードキャストによって配信することを試みる。ブロードキャストによる配信は、一旦配信ツリーが構築されてしまえば、ツリーを維持するための制御の他に、送信クライアントと受信クライアント双方が移動してもいかなる経路制御を要求しない。一方、ブロードキャストによる配信は、要求するクライアントが存在しない下流リンクへもフローが配信される結果、相対的にトラフィックの上昇を招くことは自明である。Fragmented Patching では、パッチフローをセグメントと呼ぶ単位に細分化し、クライアント間で同時に受信可能なセグメントを可能な限り共有させることでトラフィックの低減を図った。この方法を用いれば、ブロードキャストによって増加したトラフィックをある程度相殺することが期待できよう。

映像コンテンツを提供するクライアントはセグメントに分割されたコンテンツ全体を共有フローとしてブロードキャストする。共有フローまたはパッチフローによってセグメントを受信したクライアントはそれをキャッシュし、更にパッチフローとしてそれをブロードキャストする。クライアントは、共有フローやパッチフロー内のセグメントを他の複数のクライアントによって提供されても良いし、また、どのクライアントが提供しても良い。P2P アーキテクチャの欠点はコンテンツを提供する側のクライアントの配信責任が保証されないことにある。提案する P2MVID では共有フローやパッチフローの送信が困難になったクライアントは他のクライアントに代わることができる。また、ブロードキャストすることにより、どの地点においてもこれらをフローを送信、受信することが可能である。

#### コンテンツの分割とブロードキャストによる共有受信

図 1 は当該手法を説明する。クライアント 1~5 が順番に要求を発生している。要求の生起率は  $\lambda$  であり、要求は等間隔  $1/\lambda$  に発生したとする。最初に要求を発生したクライアント 1 は、共有フローのみを受信し、クライアント 2~5 は、共有フローと同時にパッチフローを受信する。コンテンツは同サイズのセグメントに分割され、先頭から  $s_1, s_2, \dots, s_n$  と表現する。1 セグメントのサイズ(配信時間)は  $1/\lambda$  とする。クライアント 4 を注目しよう。先頭の要求から  $3/\lambda$  時間後に要求を発生したクライアント 4 はパッチフローとしてセグメント  $s_1, s_2, s_3$  を受信する必要がある。セグメント  $s_2$  は既に先行するクライアント 3 に対して配信されることになっており、クライアント 4 はこれを受信することが可能である。したがってクライアント 4 は新たに  $s_1$  と  $s_3$  だけを配信してもらえばよい。このように図中では共有可能で新たに配信される必要がないセグメントは灰色で示しており、 $n$  番目のセグメント  $s_n$  は  $n/\lambda$  周期で配信されればよいことが分かる。

さて、クライアント 1 は受信した  $s_1$  を後続のクライアント 2

に提供する。クライアント 2 は、受信した  $s_1$  をクライアント 3 に、 $s_2$  をクライアント 3 と 4 に提供する。更にクライアント 3 は、受信した  $s_1$  をクライアント 4 に、 $s_3$  をクライアント 4 と 5 に提供する。後続のクライアントに提供されるセグメントはブロードキャストにより配信されるので、特定のクライアントから特定のクライアントに受信されるための経路制御を行う必要はない。

このようにコンテンツを分割し、各セグメントを可能な限り共有受信させることで、配信トラフィックを最小化するとともに、ブロードキャストすることでクライアント間のセグメント配信を極めて容易にするのである。

### 配信制御

図 1 の例では要求の生起間隔が等しく示されているが、実際の要求はランダムに生起する。期待される時刻よりも早く生起した要求は、先行するクライアントとより多くのセグメントを共有受信することができ、期待される時刻より遅く生起した要求は後続して要求するクライアントとより多くのセグメントを共有することができる結果、要求がランダムに発生した場合もトラフィックの削減効果は図 1 とほぼ同等になることが期待できる<sup>12)</sup>。ただし、各セグメントの配信タイミングは不規則になるため、あるルールに基づいて各クライアントが自律的配信を制御することは困難である。図 2 では制御サーバを定義し、クライアント間の配信を制御する。

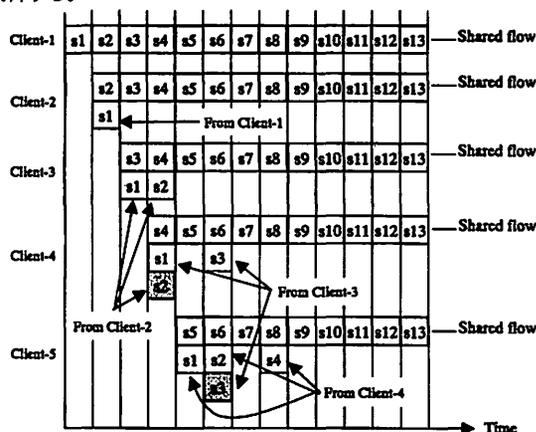


Figure 1 Segmentation and broadcast in P2MVID.

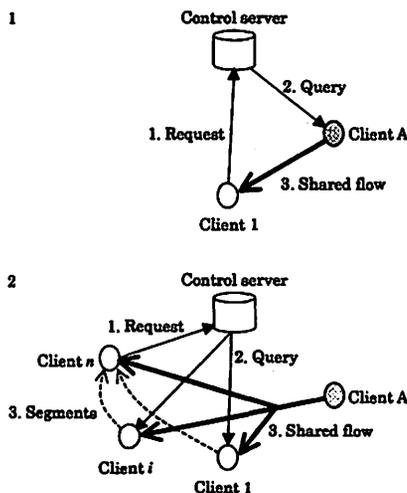


Figure 2 P2MVID Service Control.

制御サーバはコンテンツの保持と配信はしない。基本的には、クライアントからのコンテンツ配信要求を受け、コンテンツを保持

するクライアントに対して配信を促す。まず、最初のコンテンツ視聴要求をクライアント 1 が制御サーバに送信したとする(図 2 の上段)。制御サーバは要求されたコンテンツを提供可能なクライアントの候補を記憶していて、それらの候補のいくつかを選択して直ちに共有フローを配信可能か否かを問合せる。ここでクライアント A が共有フローを配信することを承諾したとする。制御サーバは共有フロー配信開始の時刻  $T_1$  を記録する。そして、クライアント 1 に共有フローの配信時刻を通知する。制御サーバはコンテンツに含まれる各セグメントに対して、クライアント 1 がどの時点で他のクライアントに提供可能かも記録する。

図 2 の下段は、 $n$  番目のクライアント  $n$  が時刻  $T_n$  に要求を制御サーバに発している。要求を受信した制御サーバは共有フローの配信開始時刻  $T_1$  からの経過時間  $(T_n - T_1)$  を求める。そしてクライアント  $n$  が必要なセグメント(すなわちコンテンツの先頭から  $T_n - T_1$  時間分のセグメント)の集合  $\alpha$  を求める。制御サーバは自身が管理しているスケジュール表を参照し、既に先行クライアント  $1, \dots, n-2$  によって配信されることが決定しているセグメントの中から時刻  $T_n$  以降に配信されるセグメント(すなわちクライアント  $n$  が受信可能なセグメント)を集合  $\alpha$  から差し引き、クライアント  $n$  に新たに配信しなければならないセグメントの集合  $\beta$  を得る。そして、集合  $\beta$  内の各セグメント配信する時刻を決定する。ここで集合  $\beta$  内の各セグメントを提供可能なクライアントをクライアント  $1, \dots, n-1$  の中から選出する。図 2 の下段に示されるようにクライアント 1 とクライアント  $i$  が選出されたとする。制御サーバはクライアント 1 とクライアント  $i$  に決定した配信時刻にセグメント配信可能か問合せる。クライアント 1 とクライアント  $i$  が承諾したとすると、制御サーバはスケジュール表に集合  $\beta$  内の各セグメントの配信時刻を新たに追加更新するとともに、クライアント  $n$  がどの時点で各セグメントを他のクライアントに提供可能になるかも記録する。そして、制御サーバは集合  $\alpha$  内のセグメントが配信されるスケジュールをクライアント  $n$  に通知する。クライアント  $n$  はブロードキャストされている共有フローを受信するとともに、通知されたスケジュールに従って同様にブロードキャストされるパッチフローセグメントを複数のクライアントから受信する。クライアント  $n$  は受信するセグメントがどのクライアントから配信されているのかを知る必要はなく、ネットワークにおいては、それらを配信するための経路制御は要求されない。

なお、セグメント集約化手法による配信トラフィック低減効果を最大に得るためにはセグメントサイズを  $1/\lambda$  (要求生起率は  $\lambda$ ) とする必要がある。クライアントからのコンテンツ視聴要求は全て制御サーバを介して処理される。制御サーバでは、要求の生起間隔を常に記録し、平均の要求生起率を算出し、新しい共有フローの配信時にセグメントのサイズを決定する。なお、文献 12) では、配信トラフィックを最小化する共有フローの配信周期は  $1/h$  となることを明らかにしている。それまでの Patching とは異なり、ある共有フローを配信している期間に同一コンテンツの共有フローを平行して配信することはない。これはある時刻に共有フローを提供するクライアントは唯一であることを意味し、制御サーバにおける配信制御を単純にする。共有フローの配信は一貫して同一クライアントである必要はなく、制御サーバによる指示により適宜他の配信可能なクライアントに交代することもできる。

このように、制御サーバにおいて、各セグメントに対する提供可能なクライアントの管理と各セグメントの配信スケジュールの制御を一元的に行うことで、ランダムに生起する視聴要求に対してクライアント間のセグメント配信を円滑に実施することができる。

### ネットワークモデル

図 3 は P2MVID を実現するネットワークをモデル化している。ネットワーク制御プレーン、サービス制御プレーン、データ配信プレーンで構成される。

ネットワーク制御プレーンでは、各ネットワークノードがループを含まないようにブロードキャストツリーを物理的もしくは論理的に構築する。次世代移動通信網においては、高度かつ効率的な移動性をサポートするための、位置管理、ページング、コンテンツトランスファー、ダイバシティハンドオーバ、プロビジョニングを容易に実現するために集中制御モデルとツリートポロジを構成するかもしれない。この場合、予めブロードキャストツリーが物理的に構築されていることになるだろう<sup>20-22)</sup>。

サービス制御プレーンでは、サーバ・クライアント型の通信形態であり、サーバがクライアントへコンテンツ情報の提供と検索、参加クライアントに対するAAA(認証・認可・課金)制御を行う。前章で説明した制御サーバによる共有フローとパッチフロー提供クライアントの管理とスケジューリング機能も当該プレーンに実装される。

データ配信プレーンでは、P2Pによるクライアント同士の通信形態である。クライアントは、共有フローやパッチフローを複数クライアントから受信し、また共有フローやパッチフローは全てのクライアントが提供する。

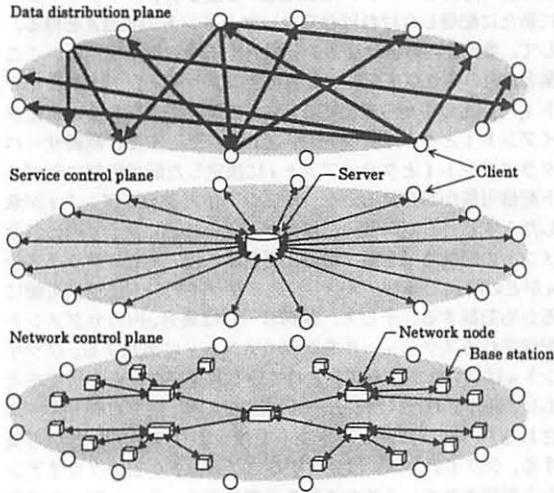


Figure 3 Network model.

### ブロードキャストによる要求帯域の解析

P2MVIDでは、移動クライアントに対する経路制御オーバーヘッドとP2Pモデルによる脆弱性を克服するためにブロードキャストによる配信手段を選んだ。ブロードキャストはトラフィックの上昇が必至であるが、セグメント化の集約配信による削減が期待できる。ここでは、上記ネットワークモデルに基づき、P2MVIDがネットワークに要求する帯域を算出する。同時に、Patching手法とFragmented Patching手法のそれと比較することにより提案手法のトラフィックの特性を考察する。

文献12)では、Patching手法とFragmented Patching手法において図4で定義されるネットワーク上の要求帯域をトラフィック量(Erlang)を用いて比較している。トラフィック量は要求の平均生起率と平均配信時間との積であり、これに配信帯域を乗ずると平均使用帯域と同等となる(同文献のAppendix Aを参照)。Patching手法の場合、図4のトランクリンクとブランチリンク上で要求される帯域 $\rho_{p,t}$ 、 $\rho_{p,b}$ はそれぞれ、

$$\rho_{p,t} = th + \frac{\lambda - \tau}{2\tau} \quad (1)$$

$$\rho_{p,b} = \left(1 - \left(\frac{m-1}{m}\right)^{\frac{\lambda}{\tau}}\right) \times \tau \times \left(h + \frac{m\tau}{\lambda^2} - \frac{m}{\lambda}\right) + \frac{\lambda - \tau}{2m\tau} \quad (2)$$

一方、Fragmented Patchingにおけるトランクリンクとブランチリンク上で要求される帯域 $\rho_{m,t}$ 、 $\rho_{m,b}$ はそれぞれ、

$$\rho_{m,t} = th + \frac{\lambda - \tau}{\lambda(\lambda/\tau - 1)} \sum_{k=1}^{\lambda/\tau-2} \left\lfloor \frac{\lambda/\tau - 1}{k} \right\rfloor \quad (3)$$

$$\rho_{m,b} = \left(1 - \left(\frac{m-1}{m}\right)^{\frac{\lambda}{\tau}}\right) \times \tau \times \left(h + \frac{m\tau}{\lambda^2} - \frac{m}{\lambda}\right) + \frac{\lambda - \tau}{m\lambda(\lambda/\tau - 1)} \sum_{k=1}^{\lambda/\tau-2} \left\lfloor \frac{\lambda/\tau - 1}{k} \right\rfloor \quad (4)$$

と文献12)では導いた( $h$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$ ,  $m$ はそれぞれコンテンツサイズ(配信時間)、要求生成率、共有フローの発生率、ブランチリンクの分枝数であり、コンテンツは固定ビットレートのストリーミング配信(帯域=1)すると仮定。要求の生起はランダムであり各要求は互いに独立して生起し相関性はないと前提)。上式3、4は、共有フローとパッチフローの各セグメントをマルチキャスト配信した場合を表している。本論文ではP2MVIDとして共有フローとパッチフローをブロードキャストする場合を新たに考慮する。両フローをブロードキャストした場合、ネットワーク上の全リンクに生じるトラフィックは一律であり、トランク、ブランチリンク上の要求帯域 $\rho_{m,t}$ と $\rho_{m,b}$ は式3と同等であり、

$$\rho_{m,t} = th + \frac{\lambda - \tau}{\lambda(\lambda/\tau - 1)} \sum_{k=1}^{\lambda/\tau-2} \left\lfloor \frac{\lambda/\tau - 1}{k} \right\rfloor \quad (5)$$

$$\rho_{m,b} = th + \frac{\lambda - \tau}{\lambda(\lambda/\tau - 1)} \sum_{k=1}^{\lambda/\tau-2} \left\lfloor \frac{\lambda/\tau - 1}{k} \right\rfloor \quad (6)$$

となる。尚、いかなるマルチキャストVOD手法を使わずユニキャストだけでコンテンツ配信した場合も示しておく。トランク、ブランチリンク上の要求帯域 $\rho_{u,t}$ と $\rho_{u,b}$ は、次の通りである。

$$\rho_{u,t} = \lambda h \quad (7)$$

$$\rho_{u,b} = \lambda h / m \quad (8)$$

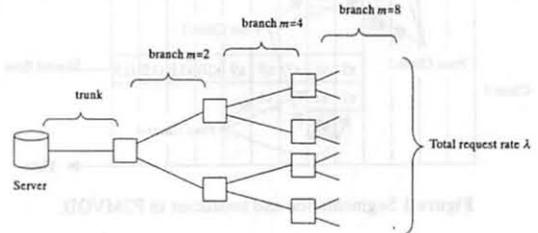


Figure 4 Network topology (symmetric tree).

さて、各手法において、図3で示したネットワークの各リンク上の要求帯域を算出する。図3のネットワーク制御プレーンは改めて図5のように各リンクとネットワークノードをそれぞれN0~N4、a~tと定義する(無線基地局BSとクライアント間の無線リンクは共有媒体型LANであると仮定し、それぞれe~tと同等であることを留意せよ)。上式を導出した図4のネットワークポロジは対称ツリーとなっているが、非対称ツリーに変形して要求帯域を求めることも可能である。その場合、 $m$ はそのリンクより下流で生起する要求の生起率とネットワーク全体の要求生起率の比率に基づいて決定すればよい。図6は図5を変形し送信クライアントを根にした非対称ツリーを示している。送信クライアントが接続するBSとノードN1間のリンクfがトランクリンクになっており、その他はブランチリンクとなっている。リンクf以外のBSが直接接続されるリンクe、g~tにおける要求生起率と全体の要求生起率との比率は1/16であるから $m$ の値は16である。ノードN0とN2、N3、N4の間のリンクb、c、dの同比率は4/16であるから $m$ の値は4である。ノードN0とN1の間のリンクaの同比率は12/16であるから $m$ の値は4/3である。

ここで、同ネットワークにおいて、各BSには異なる映像コンテンツの送信クライアントが1個づつ存在し、それぞれのコンテ

リンクの受信クライアントは全 BS に存在するものと仮定する。リンク  $e \sim t$  はそれぞれ、1 個のコンテンツ配信に対するトランクリンクとして使用され、15 個のコンテンツ配信に対するブランチリンク ( $m = 16$ ) として使用される。リンク  $a \sim d$  はそれぞれ、4 個のコンテンツ配信に対するブランチリンク ( $m = 4/3$ ) として使用され、12 個のコンテンツ配信に対するブランチリンク ( $m = 4$ ) として使用される。さて、各式 1~8 に対し、 $m = 16$ 、 $4/3$ 、 $4$  をそれぞれ代入し、コンテンツサイズ  $h$  を 2 として、各要求生起率  $\lambda$  に対してトラフィックを最小化する共有フロー発生率  $\tau$  を計算して最小要求帯域を求める。Patching 手法におけるトランクリンクおよびブランチリンク ( $m = 16$ 、 $4/3$ 、 $4$ ) 上の最小要求帯域を  $\rho'_{p,t}$ 、 $\rho'_{p,b(m=16)}$ 、 $\rho'_{p,b(m=4)}$ 、 $\rho'_{p,b(m=4/3)}$  とし、Fragmented Patching における同リンクの最小要求帯域を  $\rho'_{f,t}$ 、 $\rho'_{f,b(m=16)}$ 、 $\rho'_{f,b(m=4)}$ 、 $\rho'_{f,b(m=4/3)}$  とし、最後に P2MVOD における同リンクの最小要求帯域を  $\rho'_{m,t}$ 、 $\rho'_{m,b(m=16)}$ 、 $\rho'_{m,b(m=4)}$ 、 $\rho'_{m,b(m=4/3)}$  とすると、リンク  $e \sim t$  の要求帯域はそれぞれの手法、及びユニキャスト配信において

$$\rho_{\text{patching}}(e) = 1\rho'_{p,t} + 15\rho'_{p,b(m=16)} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{fragmented}}(e) = 1\rho'_{f,t} + 15\rho'_{f,b(m=16)} \quad (10)$$

$$\rho_{\text{P2MVOD}}(e) = 1\rho'_{m,t} + 15\rho'_{m,b(m=16)} \quad (11)$$

$$\rho_{\text{unicast}}(e) = 1\rho_{u,t} + 15\rho_{u,b(m=16)} \quad (12)$$

となる。一方、リンク  $a \sim d$  の要求帯域はそれぞれの手法、及びユニキャスト配信において

$$\rho_{\text{patching}}(a) = 4\rho'_{p,b(m=4/3)} + 12\rho'_{p,b(m=4)} \quad (13)$$

$$\rho_{\text{fragmented}}(a) = 4\rho'_{f,b(m=4/3)} + 12\rho'_{f,b(m=4)} \quad (14)$$

$$\rho_{\text{P2MVOD}}(a) = 4\rho'_{m,b(m=4/3)} + 12\rho'_{m,b(m=4)} \quad (15)$$

$$\rho_{\text{unicast}}(a) = 4\rho_{u,b(m=4/3)} + 15\rho_{u,b(m=4)} \quad (16)$$

図 7 と 8 は、各手法におけるリンク  $e \sim t$  と  $a \sim d$  それぞれの最小の要求帯域を示している。各図の曲線は、各要求生起率  $\lambda$  に対して最小化されたトラフィックをプロットしたものであり、 $\rho_{\text{patching}}(e) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{fragmented}}(e) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{P2MVOD}}(e) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{unicast}}(e) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{patching}}(a) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{fragmented}}(a) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{P2MVOD}}(a) = f(\lambda)$ 、 $\rho_{\text{unicast}}(a) = f(\lambda)$  を表している。

共有フローとパッチフローをマルチキャストする Fragmented Patching が著しくトラフィックを低下させることがわかる。しかしながら、文献 12) でも示されているように、Fragmented Patching は要求生起率の上昇に伴い、マルチキャストにおける接木頻度が爆発的に増加してしまう。ブロードキャスト配信する P2MVOD は要求の生起率が低いとき、Patching、Fragmented Patching と比較すると要求帯域は大きい。しかしながら、要求の生起率が高くなるに従い要求帯域は Patching より下回っていくことが分かる。Fragmented Patching をベースとしている P2MVOD では、共有フローの配信頻度が Fragmented Patching と同様に極めて低く抑制される(ほぼ  $1/h$ )。これは、要求の生起率に伴うトラフィックの増加分に共有フローのトラフィックが含まれないために、トラフィックの増加率(傾き)が Patching と比べて小さいのである。ブロードキャストを用いる P2MVOD はブランチリンクの数に依らずにトラフィックは一定となるが、マルチキャストを用いる Patching、Fragmented Patching はブランチリンクの数が増えるに従ってトラフィックを削減することができる。このことからブランチリンクの数に対して要求の生起率が高い環境、換言すれば、ネットワークの規模に対してクライアントの数が多い(すなわち密度が高い)環境では、従来の Patching と遜色がないトラフィック削減効果を得られるということである。本質的には、クライアント密度の高い環境ではブロードキャストに対してマルチキャストの効果は得られないということと等しい。このように、P2MVOD は、ユニキャストとマルチキャストを用いる Patching、Fragmented Patching で問題となるクライアント移動性と P2P の脆弱性を解決しつつも、とりわけクライアント密度が高い環境では十分なトラフィック削減効果を得ることができるということが明らかになった。

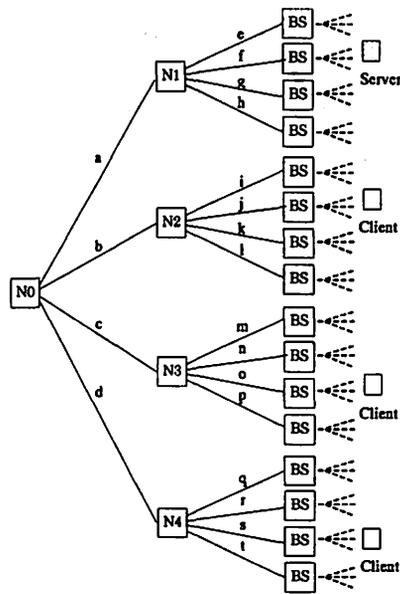


Figure 5 Network topology.

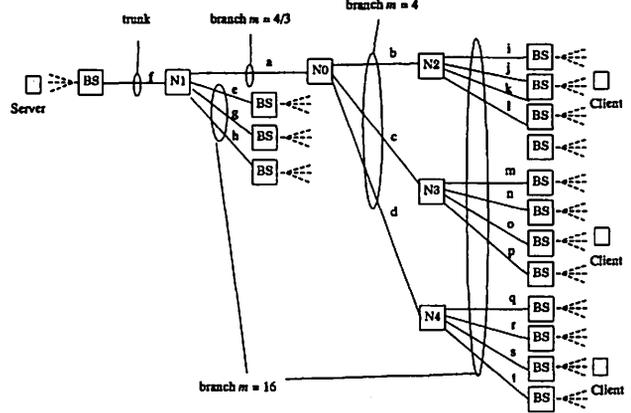


Figure 6 Transformed topology.

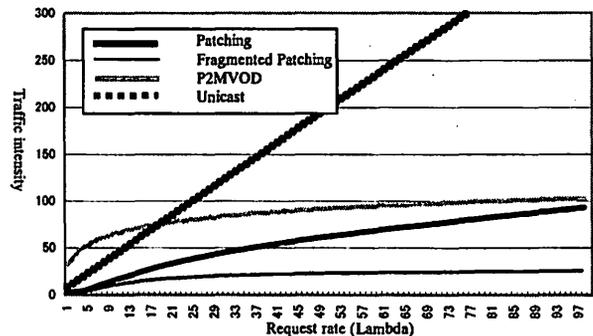


Figure 7 Comparison of minimized traffic (links  $e \sim t$ ).

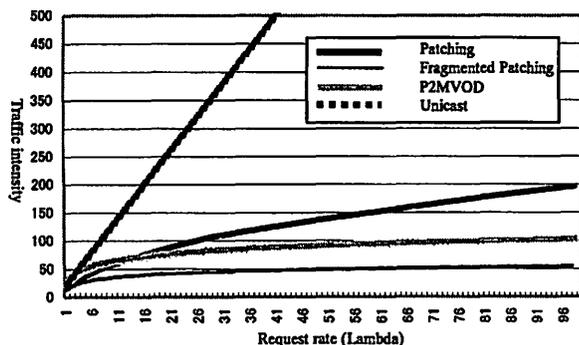


Figure 8 Comparison of minimized traffic (links a - d).

## まとめ

モバイルユーザ同士の P2P によるオンデマンド映像ストリーム配信を提案した。高効率とされる従来のマルチキャスト VOD 技術ではコンテンツ提供側および受信側の移動を許容するためのネットワーク上のモバイル経路制御オーバーヘッドと、P2P における継続的なコンテンツ配信の脆弱性といった問題があった。提案する P2MVID では、コンテンツをセグメント化することにより、クライアントが複数クライアントからコンテンツを享受できるようにし、かつコンテンツの提供側の配信責任を分担した。また、ブロードキャスト配信することにより移動中の送信受信に際して要求されるいかなる経路制御の必要性を排除した。本方式は、コンテンツをブロードキャストすることによりトラフィックの上昇を招いてしまうが、分割されたセグメントをクライアント間でできるだけ共有受信させることでトラフィックの増加を相殺する。本論文では、トラフィック量(Erlang)を用いる理論解析によってブロードキャスト配信されるトラフィックの特性を示し、とりわけクライアント密度が高い環境では従来のマルチキャスト VOD 技術と遜色のないトラフィック削減効果を得ることが可能であることを明らかにした。

近年の撮像機の小形化やメモリの大容量化、無線アクセスの広帯域化は、エンドシステムとなるユーザ装置へのマルチメディアデータの分散保持を可能にし、これにより移動するユーザからの無限に多様な情報の発信と享受を実現させる。とはいえ、無線媒体によって構築されるモバイルネットワークインフラは、映像といった高品位でかつ多様なコンテンツを流通させるための、十分な配送資源を備えているとは言い難い。本論文ではマルチキャスト VOD 技術からのアプローチによって、新しい分散マルチメディア情報流通の 1 つの形態を提示し、ネットワーク経路制御と配信トラフィックの面で極めて効果的な方法を示したと言えよう。近年は、P2P 配送モデルにおいてエンドシステムであるピア自身がコンテンツ配信のための論理的ツリー経路を構築するといったオーバーレイネットワークの研究が盛んである<sup>23-25)</sup>。ピアだけによる配送ツリーの構築は、各ピアにモビリティを許容した場合、配送ツリーの再構築や、実ネットワーク上でのトラフィック最適化等の多くの課題がある。しかしながら、インフラ側の実装機能に依存せずに実現可能であるという点で大いに注目すべきである。今後は、オーバーレイを前提とした P2MVID の方法論に焦点を当てて研究を進める。

## 参考文献

- 1) Viswanathan, S. and Imielinski, T.: Metropolitan area video-on-demand service using pyramid broadcasting, *IEEE Multimedia System* Vol. 4 (1996).
- 2) Paris, J. -F., Cater, S.W. and Long, D.E.: A low bandwidth broadcasting protocol for video on demand, *Proc. Int'l Conf. Computer Communication and Network*, Lafayette, IN (Oct. 1998).
- 3) Paris, J. -F., Cater, S.W. and Long, D.E.: Efficient broadcasting protocol for video on demand, *Proc. Int'l Symposium Modeling, Analysis and*

- 4) Hua, K.A. and Sheu, S.: Skyscraper broadcasting: A new broadcasting scheme for metropolitan video-on-demand systems, *Proc. ACM SIGCOMM '97*, pp.89-99 (1997).
- 5) Woo, H. and Kim, C.K.: Multicast scheduling for VOD services, *Multimedia Tools and Applications* 2(2) pp.157-171 (Mar.1996).
- 6) Kalva, H. and Fuhr, B.: Techniques for improving the capacity of video-on-demand systems, *Proc. 29th Annual Hawaii Int'l. Conf. on System Sciences*, pp308-315, Wailea, HI, USA, IEEE Computer Society Press (Jan. 1996).
- 7) Uno, S., Tode, H., and Murakami, K.: Simple and Efficient Video-on-Demand Scheme with Segment Transmission over High Speed Network, *IEICE Trans. Communications*, Vol. E84-B, No.1 (Jan. 2001).
- 8) Cater, S.W. and Long, D.E.: Improving Video-on-demand Server Efficiency Through Streaming Tapping, *Proc. Int'l. Conf. on Computer Communication and Networks*, pp200-207, Las Vegas (Sep.1997).
- 9) Hua, K.A., Cai, Y., and Sheu, S.: Patching: A Multicast Technique for True Video-On-Demand Services, *Proc. ACM Multimedia '98*, Bristol, U.K. (Sept. 1998).
- 10) Gao, L. and Towsley, D.: Supplying Instantaneous Video-on-Demand Services Using Controlled Multicast, *Proc. IEEE Int'l. Conf. on Multimedia Computing and Systems '99*, Florence, Italy (Jun. 1999).
- 11) Guo, Y., Shu, K., Kurose, J. and Towsley, D.: P2Cast: Peer-to-Peer Patching Scheme for VoD Service, *Proc. Int'l World Wide Web Conf.*, pp. 301-309, Budapest, Hungary (2003).
- 12) Sato, K., Katsumoto, M., Terada, M. and Miki, T.: Fragmented Patching Technique: Super Optimal Asynchronous Multicasting for On-demand Video Distribution, *IPSI Journal* Vol.45 No.10, pp.2297-2313 (Oct. 2004).
- 13) Sato, K., Katsumoto, M. and Miki, T.: An Optimal Network Scheme for On-demand Video Distribution with Asynchronous Multicasting, *IPSI Journal* Vol.44 No.12, pp.3161-3173 (Dec. 2003).
- 14) Sato, K. and Katsumoto, M.: Multicast Techniques for Personalized Media Stream Delivery, *IPSI Journal* Vol.44 No.2, pp.374-385 (Feb. 2003).
- 15) Mysore, J. and Bharghavan, V.: A New Multicasting-based Architecture for Internet Host Mobility, *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '97*, Budapest, Hungary (Sep. 1997).
- 16) Helmy, A.: A Multicast-based Protocol for IP Mobility Support, *ACM SIGCOMM 2nd Int'l Workshop on Networked Group Communication*, Palo Alto, CA (Nov. 2000).
- 17) Helmy, A. and Jaseemuddin, M.: Efficient Micro-Mobility using Intra-domain Multicast-based Mechanisms (M&M), *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Oct. 2002).
- 18) Sato, K., Katsumoto, M. and Miki, T.: Video Distribution Network between Preceding and Succeeding Vehicles on the Same Route, *IPSI Journal* Vol.46 No.2 (Feb. 2005).
- 19) Sato, K., Katsumoto, M. and Miki, T.: Source Mobility support Multicast (SMM), *IPSI Journal* Vol.45 No.2, pp.412-425 (Feb. 2004).
- 20) Valko, A.G.: Cellular IP - A New Approach to Internet Host Mobility, *ACM Computer Communication Review* (Jan. 1999).
- 21) Soliman, H., Catelluccia, C., et al.: Hierarchical Mobile IPv6 mobility management (HMIPv6), IETF Internet Draft (Oct. 2004).
- 22) Jang, H., Jee, J., et al.: Mobile IPv6 Fast Handovers over IEEE 802.16e Networks, IETF Internet Draft (Jul. 2005).
- 23) Do, T.T., Hua, K.A. and Tantaoui, M.A.: P2VoD: Providing Fault Tolerant Video-on-Demand Streaming in Peer-to-Peer Environment, *Proc. IEEE Int'l Conf. on Communication* (Jun. 2004).
- 24) Xu, D., Hefeeda, M., Hambrusch, S. and Bhargava, B.: On Peer-to-Peer Media Streaming, *Proc. IEEE ICDCS* (Jul. 2002).
- 25) Tran, D.A., Hua, K.A. and Do, T.T.: A Peer-to-Peer Architecture for Media Streaming, *IEEE Journal of Selected Areas in Communication*, Vol. 22 (Jan. 2004).