

放送通信融合環境における再生中断時間短縮のためのストリーミング配信手法

義久 智樹^{†1} 原 隆浩^{†2} 西尾 章治郎^{†2}

近年の放送通信融合環境への関心の高まりにともない、放送と通信を用いたストリーミング配信が注目されている。放送通信融合環境におけるストリーミング配信では、音楽や映像といったストリーミングデータを放送から受信すると同時に他の再生端末からも受信する。放送と通信の短所を互いに補えるが、効率的にデータを配信しなければ再生の中断時間が長くなる。そこで提案手法では、通信の帯域幅を考慮したうえでストリーミングデータの放送スケジュールを作成する。本研究では、単に通信帯域分だけ放送帯域が増加したと見なしてスケジューリングするだけでは再生中断時間を効率的に短縮できず、実際の通信帯域と再生中断時間を効率的に短縮する追加帯域が異なっていることを確認した。この追加帯域を求め、データを放送することで再生中断時間を短縮する。

A Method for Streaming Delivery to Reduce Interruption Time on Broadcast and Communications Integration Environments

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

Due to the recent popularization of broadcast and communication integration environments, streaming delivery using broadcast and communication attracts much attention. In the streaming delivery, clients receive streaming data such as music or movie from broadcasting systems and communication systems concurrently. Although these systems compensate their demerits for each other, the interruption time is lengthened if the system does not deliver the data efficiently. In our proposed method, the system produces a broadcast schedule of streaming data considering the communication bandwidth. In this research, we confirmed that the additional bandwidth that gives shorter interruption time differs from the communication bandwidth. By finding the additional bandwidth, our proposed method reduces the interruption time.

1. ま え が き

放送通信技術の発達にともない、音楽データや映像データを受信しながら再生するストリーミング配信に対する注目が高まっている。ストリーミング配信では、一般に、データはいくつかの部分に分割される。データを再生する再生端末は、分割されたデータを保存し、順番に再生開始時刻になってから再生する。再生端末が分割されたデータを再生開始時刻までに受信完了していない場合、再生が中断されるため、この再生が中断されている時間（以降、再生中断時間）を短縮する様々な手法が提案されている。再生中断時間には、視聴要求を出してから最初の部分の再生を開始するまでの待ち時間も含まれる。これらの手法は、放送を用いる手法と通信を用いる手法に分けられる。それぞれ以下のような特徴と問題点がある。

- 放送を用いる手法
分割されたデータの再生終了と同時に次の分割されたデータを受信完了できる放送スケジュールを作成して、再生開始までの待ち時間を短縮している¹⁾⁻³⁾。放送を用いることで、複数の再生端末にまとめてデータを配信でき配信サーバの負荷を軽減できるが、再生端末は必要なデータが放送されるまで待つ必要があり、視聴要求と同時に再生を開始できない。たとえば単純な手法では、10分間隔で放送されている番組の場合、平均5分待たなければ始まりから再生を開始できない。
- 通信を用いる手法
データの配信サーバや他の再生端末が持つデータを受信することで、データを早く受信して再生中断時間を短縮している⁴⁾⁻⁶⁾。再生端末の視聴要求に応じて必要なデータを配信できるが、人気のある番組に視聴要求が集中すると、通信速度が遅くなる。たとえば、インターネット放送で人気のある番組を視聴しようとしても、視聴開始まで時間がかかる。

これらの問題点は相補的な関係にあり、初めの方のデータを通信で受信しながら再生し、初めの方のデータを再生している間に残りのデータを放送から受信するといったように、放

^{†1} 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

^{†2} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

送と通信両方からデータを受信することで改善できる。

近年、放送通信融合環境への関心が高まっており、融合することで放送と通信両方の短所を互いに補える。電波放送やインターネットマルチキャストといった放送と、通信両方からデータを受信して再生中断時間を短縮する研究がいくつか行われているが、通信からのデータ受信を考慮して放送スケジュールを作成する手法はなかった^{7),8)}。これは、複数の放送チャンネルを用いて各チャンネルで同じセグメントを繰り返し放送するニアビデオオンデマンドを応用していなかったためと考えられる。

そこで本研究では、放送通信融合環境における再生中断時間短縮のためのストリーミング配信手法を提案する。具体的な想定サービスは4.1節で説明している。提案手法では、通信からのデータ受信による帯域幅の増加を考慮して放送スケジュールを作成する。単に通信帯域分だけ放送帯域が増加したと見なすだけでは再生中断時間を効率的に短縮できず、実際の通信帯域と再生中断時間を効率的に短縮する追加帯域が異なっていることを明らかにした。この追加帯域を求めて放送スケジュールを作成し、データを放送する。このため、提案手法は放送が通信と融合したことによる通信分の帯域の増加により再生中断時間を短縮しているだけではない。再生端末は、放送スケジュールに従って配信されるデータを放送から受信すると同時に他の再生端末からもデータを受信することで再生中断時間を既存手法より短縮できる点に有効性がある。

以下、2章で関連研究を紹介し、3章で対象とする放送通信融合環境を説明する。4章で提案手法を説明し、5章で評価を行い、6章で考察する。最後に7章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

放送通信融合環境において再生中断時間を短縮するいくつかの手法が提案されている。

UVoD⁹⁾では、いくつかの放送チャンネルを用いて、同じデータを繰り返し放送する。各チャンネルでデータの初めが放送される時刻をずらすことで、再生端末がデータを初めから再生できる機会が増え、再生開始までの待ち時間を短縮できる。さらに再生開始までの待ち時間を短縮するため、ある再生端末が受信要求を出した際、次にデータの初めが放送されるまでの時間が長い場合には、通信を用い、ユニキャストでその再生端末に必要なデータを配信する。

Super-Scaler VoD¹⁰⁾では、UVoDと同じく、データの初めが放送される時刻をずらしていくつかのチャンネルで同じデータを繰り返し放送する。データの初めの部分が放送されるまでの待ち時間が長い場合には、一定時間待ち、その間に同じデータに対して受信要求を出

したいいくつかの再生端末にマルチキャストでデータを配信している。複数の再生端末にまとめてデータを配信できるため、受信要求が多いデータに対してUVoDより配信効率が向上する。

NBB VoD¹¹⁾でも、他の手法と同じく、データの初めが放送される時刻をずらしていくつかのチャンネルで同じデータを繰り返し放送する。データの初めの部分が放送されるまでの待ち時間が長い場合に、必要なデータを他の再生端末がすでに受信していれば、その再生端末からデータを受信する。必要なデータを持つ再生端末が他にない場合には、ユニキャストで必要なデータを配信する。

以上のようにいくつかの手法が提案されているが、通信からのデータ受信を考慮して放送スケジュールを作成する手法はなかった。提案手法は、放送通信融合環境における放送システム側の配信手法において、データを分割し、分割されたデータの放送スケジュールに従ってデータを配信する点に新規性がある。

3. 放送通信融合環境

本章では、対象とする放送通信融合環境を説明する。

3.1 システム構成

図1にイメージ図を示す。放送通信融合環境におけるストリーミング配信では、再生端末は放送システムと通信システム両方からデータを受信する。

放送システムでは、様々なストリーミング配信が考えられるが、本研究では、再生中断時間を短縮できるニアオンデマンド型のストリーミング配信を想定する。ニアオンデマンド型では、データをいくつかの部分に分割し、複数の放送チャンネルを用いて配信する。分割さ

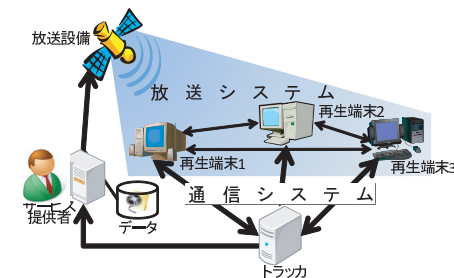


図1 放送通信融合環境

Fig. 1 A broadcast and communication integration environment.

れたデータをセグメントと呼び、各チャンネルで同じセグメントを繰り返し放送することで、再生端末がセグメントを受信できる機会が増えて再生中断時間を短縮できる。電波放送や帯域保証されたインターネットマルチキャストといった放送を想定している。

通信システムにおけるストリーミング配信も、様々な手法が考えられるが、本研究では、P2P ストリーミングやグリッドキャストと呼ばれるインターネットでの端末伝送型のストリーミング配信を想定する^{12),13)}。端末伝送型では、ストリーミングデータをいくつかのピースに分割して配信する。ピースはデータ送受信の単位であり、再生端末はピースごとにデータを再生できる。先ほどのセグメントには複数のピースが含まれることになる。トラックと呼ばれる端末がすべての再生端末の接続状況を把握しており、新たに接続する再生端末はトラックに問い合わせることで他の再生端末の IP アドレスを取得できる。配信サーバからだけでなく再生端末間でもピースを送受信することで、配信サーバにかかる負荷を軽減できる。このため、端末伝送型は配信サーバからのみ直接データを受信するクライアントサーバ型と比べて再生中断時間を短縮できる。配信サーバの性能が非常に良い場合には配信サーバにかかる負荷は問題にはならないが、性能の良い配信サーバを設置するにはサーバ側のコストがかかる。端末伝送型ではユーザ側の再生端末を用いるため設置コストを抑えられる。通信時に要求したピースが存在しない場合には、放送されるまで待つことになる。

3.2 本環境の妥当性

図1において、サービス提供者は映像や音声等のコンテンツのデータを所有しており、放送設備とトラックを管理している。現状の地上波デジタル放送局のほとんどは情報公開のためにインターネットを使っており、トラックをインターネット上で公開することが可能である。各再生端末は再生終了後、自身の再生中断時間と、自身と他の再生端末との間の通信帯域をトラックに送信する。サービス提供者は、トラックに送信された各再生端末の再生中断時間や通信帯域を平均することで、平均再生中断時間と平均通信帯域を取得できる。このようなシステム構成では、サービス提供者がトラックを経由して平均再生中断時間や平均通信帯域といった視聴者の状況を把握でき、管理している放送設備を用いて放送スケジュールを調整できる。このため、視聴者の状況に応じて放送システムのスケジュールを調整することについて妥当といえる。サービス提供中に新たな放送スケジュールでサービスを再開することも可能だが、放送スケジュールを変更することで各セグメントに含まれるピースが変わるため、放送スケジュール変更時に再生していた再生端末の再生中断時間が非常に長くなる可能性がある。このため、深夜等サービス終了後に変更して次のサービスから新しい放送スケジュールを使用することを考えている。

構成する主なシステムやネットワークについて、放送に地上波デジタル放送、通信にインターネット、再生端末としてインターネットにつながる地デジチューナが考えられる。本研究では通信帯域に応じて放送スケジュールリングを行っており、2章で紹介しているように放送通信融合環境に関する研究が世界中でさかんに行われている。システム構成的にはすでにインターネットにつながる地デジチューナが普及しており、このようなシステムは現実的で、通信帯域に応じて放送スケジュールリングを行う状況は存在する。手法的にはまだ研究段階だが、上述のようにさかんに研究されており、再生中断時間を短縮する提案手法は有用である。さらに、近年ワンセグローカル放送と呼ばれる、半径数メートルの範囲でのストリーミング配信も行われている。この場合、想定環境を構成する主なシステムとして、放送にワンセグローカル放送、通信にインターネット、再生端末としてインターネットにつながるワンセグプレーヤを用いることで想定環境と同じ環境を構築できる。これもすでに普及しており現実的な構成で提案手法は有用といえる。

想定している放送通信融合環境では、放送スケジュールによって再生中断時間が変化する。視聴者にとって再生中断時間は短いほど望ましくサービス品質が向上する。このため、視聴者の状況に応じて放送システムのスケジュールを調整できる状況では、サービス品質を向上させるためにサービス提供者が再生中断時間が短くなるように放送側のスケジュールを変更することが妥当である。

4. 提案手法

放送通信融合環境における再生中断時間短縮のためのストリーミング配信手法 BCD (Broadcast and Communication based Delivery) 法を提案する。

4.1 想定環境

本研究では以下の環境を想定する。3章で説明した用語を用いている。

- 放送システムはニアオンデマンド型である。
- 通信システムは端末伝送型ストリーミング配信を行う。
- 再生端末は放送システムと通信システムからデータを受信できる。
- 再生端末は再生するストリーミングデータのすべてのピースを保存できる。
- 再生端末はストリーミングデータを最初から最後まで早送りや巻き戻しをせずに再生する。
- 再生端末はピースを受信完了と同時に再生できる。
- 再生端末は再生を終了するとネットワークから切断する。

たとえば、放送システムに地上波デジタル放送、通信システムにインターネットを用い、インターネットにつながる地デジチューナを再生端末として映像を視聴することが考えられる。後に 5.4 節の評価で通信帯域の揺れを考慮しているように、帯域が必ずしも保証されている必要はなく、通信システムにインターネットを用いることは妥当である。地上波デジタル放送は複数のチャンネルを用いたニアビデオオンデマンドが可能であり、インターネットでは、すでに端末伝送型ストリーミング配信が行われており現実的である。

次節から通信システムの配信方法と放送システムの配信方法を順番に説明する。

4.2 通信システムの配信方法

ピースを放送から受信しても再生開始時刻に間に合うにもかかわらず通信から受信すると、通信帯域を無駄に消費することになるため、BCD 法では、放送では間に合わないピースのみ通信からの受信を試みる。このピースを他の再生端末が持っていない場合や、受信/再生を行っている端末がない場合には放送を待つことになり、自分が次に必要とするピースを他の再生端末がつかねに持っているという前提があるわけではない。BCD 法では、CoolStreaming⁴⁾と同様に 1 対 1 の通信を行い、最も早く受信完了できる再生端末から前の方のピースを受信する。受信する再生端末とピースを決定するアルゴリズムを図 2 に示す。以下に説明する。

ピースを受信しようとしている再生端末を Reacher と呼ぶ。まず 2 行目で、すべての再生端末から、ある再生端末 (TmpPlayer) をピースの受信先として考える。Reacher はトラッカに問い合わせることですべての TmpPlayer を把握できる。4 行目で、Reacher は自分が持っておらず TmpPlayer が持つ最初のピース (TmpPiece) を探す。これは、TmpPlayer が持つピースのリストを要求して取得することで可能である。TmpPiece は、単に TmpPlayer が持っている最初番号のピースではない。6 行目で、Reacher が持っておらず TmpPlayer が持っているピースがない場合には、次の TmpPlayer を受信先として考える。TmpPiece がある場合には 9 行目で、そのピースを TmpPlayer から受信する場合に必要な時間 (ComDownloadTime) を計算する。これは、ピースのリストの取得時に計測した通信帯域から計算できる。ピースリストの送信時に送信時刻も付加して送信する。たとえば、ピースリストの送信時刻を t_s 、データサイズを a_p 、送信時刻情報のデータサイズを a_t とすると、ピースリストを受信した時刻が t_r であれば、 $(a_p + a_t)/(t_r - t_s)$ で求められる。計測のための時刻同期は、時刻サーバと同期させることで可能と考える。時刻同期していない場合には、ピースリストを要求してから受信するまでの往復の時間をもとに通信帯域を計測できる。また 11 行目で、放送から受信する場合に必要な時間 (BroDownloadTime) を計算する。これは、放送スケジュール内で TmpPiece が次に放送される時刻と現在時刻の

When a player finishes receiving a piece:

```

input: Time          output: TargetPlayer, TargetPiece
1:  DownloadTime=∞; //DownloadTime を非常に大きな値に初期化
2:  //すべての再生端末について
3:  for TmpPlayer ∈ players do
4:    //自分が持っておらず TmpPlayer が持つ最初のピースを探す
5:    TmpPiece=FindPiece(TmpPlayer);
6:    if TmpPiece is nothing then//TmpPiece がなければ
7:      next TmpPlayer
8:    end if
9:    //TmpPlayer から TmpPiece を受信するのにかかる時間を計算
10:   ComDownloadTime=CalculateComDownloadTime(Time, TmpPlayer, TmpPiece);
11:   //TmpPiece を放送から受信する場合にかかる時間を計算
12:   BroDownloadTime=CalculateBroDownloadTime(Time, TmpPiece);
13:   //TmpPiece の再生開始時刻を計算
14:   PlayStartTime=CalculatePlayStartTime(Time, TmpPiece);
15:   if PlayStartTime < BroDownloadTime and//放送では間に合わない
16:     ComDownloadTime < BroDownloadTime and//放送より通信の方が早い
17:     ComDownloadTime < DownloadTime then//この再生端末がほかより早い
18:     DownloadTime = ComComDownloadTime;
19:     TargetPlayer = TmpPlayer;
20:     TargetPiece = TmpPiecxer;
21:   end if
22: end for

```

図 2 BCD 法の通信システムのアルゴリズム

Fig. 2 The algorithm for communication systems under the BCD method.

差をとることで計算できる。さらに 13 行目で、TmpPiece の再生開始時刻を計算する。これは、Reacher が現在再生中のピースから TmpPiece を再生開始するまでの時間を計算して求められる。以上の値を用い、14 行目以降、放送では再生開始まで間に合わず、放送より通信で受信の方が早く受信でき、TmpPiece を TmpPlayer から受信するのが一番早くピースを受信できる場合に、その TmpPlayer をピースの受信先とし、TmpPiece の受信を開始する。

4.3 放送システムの配信方法

放送通信融合環境では、通信からもピースを受信するため、通信帯域を考慮して放送スケジュールを作成することで効率的に再生中断時間を短縮できる。そこで BCD 法では、実際の放送帯域に通信帯域を擬似的に追加して放送スケジュールを作成する。追加する放送帯域を追加放送帯域と呼ぶ。放送スケジュール作成のアイデア自体は HD¹⁾ 法に発想を得ているが、追加放送帯域を導入している点が異なる。BCD 法では、データをいくつかのセグメ

```

input:  $p_s, a_p, r, b_i, N$       output:  $a_i$ 
1:  Sum_p=0;
2:   $a_1=0$ ;
3:  while Sum_p <  $p_s$  do//合計再生時間が再生時間を越えるまで
4:     $a_1 += a_p$ ; //  $S_1$  のデータサイズ
5:     $p_1 = a_1/r$ ; //  $S_1$  の再生時間
6:     $d_1 = a_1/b_1$ ; //  $S_1$  の放送時間
7:    Sum_p =  $p_1$ ; //合計再生時間を  $S_1$  の再生時間とする
8:    //Tmp_d2 を計算
9:    if  $b_1 < r$  then
10:   Tmp_d2 =  $d_1 + a_p/r$ ;
11:   else
12:   Tmp_d2 =  $p_1 + a_p/b_1$ ;
13:   end if
14:    $e_2 = \min(b_a \times \text{Tmp\_d}_2/r, p_s - \text{Sum\_p})$ ;
15:    $d_2 = \text{Tmp\_d}_2 + e_2$ ; //  $S_2$  の放送時間
16:   for i=2 to N do
17:      $a_i = d_i \times b_i$ ; //  $S_i$  のデータサイズ
18:      $p_i = a_i/r$ ; //  $S_i$  の再生時間
19:     Sum_p +=  $p_i$ ; //合計再生時間に  $S_i$  の再生時間を加える
20:      $e_{i+1} = \min(b_a \times p_i/r, p_s - \text{Sum\_p})$ ;
21:      $d_{i+1} = d_i + p_i + e_{i+1}$ ;
22:   end for
23: end while
    
```

図3 BCD法の放送システムのアルゴリズム

Fig. 3 The algorithm for broadcast systems under BCD method.

ントに分割して各放送チャネルで繰り返し放送する．放送スケジュールの作成アルゴリズムを図3に示す．以下に説明する．

追加放送帯域を b_a , ストリーミングデータの再生時間を p_s , 再生レートを r , ピースのデータサイズを a_p とする．追加放送帯域の決め方については後に 4.4 節で詳述する．

使用できる N 個のチャンネルの帯域幅を b_i ($i = 1, \dots, N$) とし, チャンネル i で繰り返し放送するセグメントを S_i , そのデータサイズを a_i , 放送にかかる時間を d_i とする．7 行目までは, a_1 が Sum_p と等しくなるまで計算を繰り返すための処理であり, 8 行目から説明する．まず 9~13 行目で S_1 の再生終了までの最短時間である Tmp_d_2 を計算する． a_2 は図4に示す場合分けがあるため, 後の for ループに入れず別に計算する． $b_1 < r$ の場合, S_1 の再生終了までの最短時間は S_1 に含まれる最後のピースの受信完了と同時に最後のピースを再生開始する場合であり, 最後のピースの受信完了にかかる時間 d_1 と最後のピースの再生時間 a_p/r の和になる． S_1 の再生終了までに通信から b_a の帯域幅を用いてデータを受信す

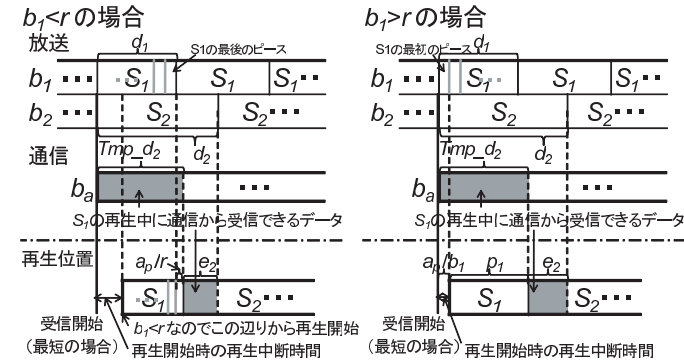


図4 BCD法における a_2 の求め方

Fig. 4 a_2 determination under the BCD method.

ると考えるため, この間に通信から受信したデータの再生時間は $e_2 = \min(b_a \times \text{Tmp_d}_2/r, p_s - \text{Sum_p})$ になる (14 行目). e_2 は最大でも $p_s - \text{Sum_p}$ になるため, これらの小さい方の値をとっている．ただし, $p_s - \text{Sum_p} < b_a \times \text{Tmp_d}_2/r$ になるのは b_a が非常に大きい場合であり, 後の評価ではこのような状況は発生していない． S_2 の再生開始まで $d_2 = \text{Tmp_d}_2 + e_2$ の時間をかけられるため (15 行目), 17 行目で, S_2 のデータサイズ $a_2 = d_2 \times b_2$ となる． $b_1 > r$ の場合, S_1 の再生終了までの最短時間は S_1 に含まれる最初のピースの受信完了と同時に再生開始する場合であり, 最初のピースの受信完了にかかる時間 a_p/b_1 と S_1 の再生時間 p_1 の和になる． a_2 は先ほどと同様に求められる．次に 16 行目からの for ループに関して, a_{i+1} ($i = 2, \dots, N$) について, S_i の再生時間 p_i は 18 行目で a_i/r と求められ, この間に通信から b_a の帯域幅を用いてデータを受信することになる．通信から受信したデータの再生時間は $e_{i+1} = \min(b_a \times p_i/r, p_s - \text{Sum_p})$ となり (20 行目), S_{i+1} の再生開始まで $d_{i+1} = d_i + p_i + e_{i+1}$ かけられることになる (21 行目). これより次のループの 17 行目で, $a_{i+1} = d_{i+1} \times b_{i+1}$ と与えられる．以上の操作を繰り返し, 再生時間の合計 (Sum_p) がデータの再生時間と等しくなるように a_1 を調整することで, データを分割するデータサイズ a_1, \dots, a_N が求まる．

4.4 追加放送帯域の決め方

BCD 法では, スケジューリングのパラメータとして追加放送帯域 b_a がある．追加放送帯域の値によって再生中断時間が変化するため, 再生中断時間を最短にできるように追加放送帯域を与える必要がある．

BCD 法において、ある放送通信融合環境で再生中断時間を最短にする追加放送帯域を最適追加放送帯域と呼ぶ。後に 5.2 節で詳細を述べるが、単に平均通信帯域を追加放送帯域として設定しても効率的に再生中断時間を短縮できず、実際の通信帯域と最適追加放送帯域は異なっている。最適追加放送帯域は、再生端末の視聴要求の到着間隔や、平均通信帯域、再生レート、再生時間といった複数の要因で決まる。一概に解析できず、方程式で求めることは非常に困難である。後に 5.2 節の評価で示すが、追加放送帯域と平均再生中断時間のグラフは下に凸になっており、追加放送帯域を変えながら最小地点を求めることで最適追加放送帯域を発見できる。そこで提案手法では、いくつかの追加放送帯域における再生中断時間をコンピュータシミュレーションにより総当たりで求めて最適追加放送帯域を発見する。サービス提供者が想定する再生端末に応じて通信帯域におよその目途をつけ、この値から始めて最終的には平均再生中断時間が最短になるように設定する。具体的には、地デジチューナの場合、有線 LAN や無線 LAN でインターネットにつながっており、主観的ではあるが、その通信帯域は 1 Mbps 程度であり、1 Mbps から始めることが考えられる。また、ワンセグプレーヤの場合、屋外での利用になるため PHS や 3G サービスでインターネットにつながっており 300 Kbps 程度であり、300 Kbps から始めることが考えられる。一般的に、再生端末を想定するとおよその目途をつけられると思われるが、まったく知識のない場合には、0 bps から始めることが考えられる。

5 章に示すシミュレーション結果では、本論文のシミュレーション環境における最適追加放送帯域を求め、その環境における有効性を示している。筆者らが作成した最適追加放送帯域を発見するコンピュータシミュレーションは、CPU : Dual Xeon 2 GHz、メモリ 4 G バイトの計算機環境で実行したところ 6 時間程度で終了した。平均通信帯域が変化すると最適追加放送帯域も変わるが、評価で示しているように、必ずしも追加放送帯域が最適追加放送帯域でなくても平均再生中断時間を短縮できる。シミュレーションには、再生端末の視聴要求の平均到着間隔や、平均通信帯域、再生レート、再生時間といった複数のパラメータが必要になる。再生レート、再生時間は正確な値が分かるが、平均到着間隔や平均通信帯域は正確な値が分からず、実際の値とは異なる。このため、シミュレーションで求めた値を追加放送帯域として設定しても実際には最適追加放送帯域ではなくて再生中断時間があまりにも長くなる可能性がある。このような場合には、トラックが把握している平均到着間隔と平均通信帯域を用いてシミュレーションをなおし、最適追加放送帯域を求め直す。

たとえば、再生端末としてインターネットにつながる地デジチューナを用いる場合、1 度もサービスを開始していなければ、まずは平均到着間隔は 1 分、通信はインターネットを

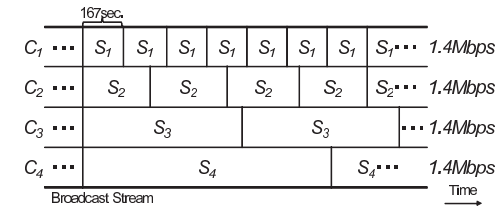


図 5 放送スケジュールの例

Fig. 5 An example of a broadcast schedule composed by the BCD method.

使うと考えて平均通信帯域を 1 Mbps としてシミュレーションし、最適追加放送帯域を求める。早朝、求めた最適追加放送帯域でサービスを開始する。サービス提供中、トラックが平均到着間隔や平均通信帯域、平均待ち時間を把握する。深夜等サービス終了後やサービス提供中、平均待ち時間がシミュレーションで求めた最短値と比べてあまりにも長い、たとえばシミュレーションで求めた最短値より 1 分以上長い場合には、トラックが把握している最新の平均到着間隔と平均通信帯域を用いてシミュレーションをやり直し、最適追加放送帯域を求め直す。次のサービス開始時に、求め直した最適追加放送帯域を用いてサービスを開始する。上記の例で取り上げた 1 分や 1 Mbps という値は初めはサービス提供者の主観によるものでよく、1 度でもサービスを提供するとトラックから把握できる。コンテンツに対する人気が高くなったり低くなったりすると平均待ち時間が大きく変わり、最適追加放送帯域を求め直す必要がある。

シミュレーションのパラメータが実際の値に近ければ、シミュレーションで求めた最適追加放送帯域と実際の最適追加放送帯域が近くなり、再生中断時間を効率的に削減できるため、時間がかかっても求める価値がある。

4.5 具体例

次章の評価環境下で、平均通信帯域が 1 Mbps の場合、最適追加放送帯域は 1.5 Mbps になる。この場合の BCD 法の放送スケジュールを図 5 に示す。具体的なピース番号や放送周期は表 1 に示す。時刻 0 に放送が開始され、最初の視聴要求は再生端末 A から時刻 0 秒に出される。次に時刻 29.4 秒に再生端末 B が視聴要求を出す。この例では評価で行ったコンピュータシミュレーションの結果を用いている。通信からデータを受信する例を示すため、再生端末 B に注目する。B は、データの再生を開始するため最初のピース 1 の受信を試みる。放送でピース 1 が配信されるまで待つ場合、チャンネル 1 の次の周期の初めてピース 1 が放送されるまで待つ必要があり、139 秒待つことになる。一方、A は時刻 0 に放送さ

表 1 放送スケジュールの例の値

Table 1 Values of the example broadcast schedule.

チャンネル	開始ピース	終了ピース	放送周期
1	1	235	167 秒
2	236	647	293 秒
3	648	1,565	654 秒
4	1,566	3,600	1,449 秒

れるピース 1 を持っているため、B は A からピース 1 を受信できる。これらの再生端末間の帯域幅は 295 Kbps であり、ピース 1 の受信に 3.39 秒かかる。放送から受信するより通信から受信する方が早くピース 1 を受信できるため、B は A から通信でピース 1 を受信する。この時点で再生中断時間は 3.39 秒になる。ピース 1 の受信中に、チャンネル 1 で放送されるピース 43 から 46、チャンネル 2 で放送されるピース 278 から 281、チャンネル 3 で放送されるピース 690 から 693、チャンネル 4 で放送されるピース 1,608 から 1,611 を受信する。ピース 1 を受信完了すると、次に受信していない初めのピースであるピース 2 を通信から受信することを考える。ピース 2 も A から通信で受信する方が早いので、A から受信する。

5. 評価

BCD 法の有効性を確かめるため、コンピュータシミュレーションによる評価を行った。様々な評価パラメータが考えられるが、本研究では紙面の都合上、表 2 に示す値を用いた。以下に妥当性を説明する。MPEG2 の Low プロファイルで符号化された 30 分の映像データを想定し、GOP (Group Of Pictures) と呼ばれる再生の単位をピースと考え、GOP の標準サイズである 0.5 秒分をピースのデータサイズとした。地上波デジタル放送を想定し、1.4 Mbps の 4 個の放送チャンネルを用いるとした。また、視聴者がストリーミングデータの視聴要求を出す間隔である視聴要求の到着間隔は、一般的な到着であるポアソン過程に従うものとし、到着間隔をポアソン分布で与えた。

端末伝送型のストリーミング配信では、これまでの研究から、各通信によるボトルネックリンク帯域の奪い合いといったネットワークレベルでの相互作用は影響せず、端末間の可用帯域のみ影響を及ぼすことが知られている⁶⁾。本研究では、これらの研究と同様に各端末間の帯域のみ考慮する。再生端末間の通信帯域は正規分布で与え、平均通信帯域を 512 Kbps 以下になる確率が 1% になるように分散を与えた。これは、あまりにも通信帯域が小さい場合には再生中断時間が非常に長くなり、ストリーミング配信を利用しないと考えられるため

表 2 評価に用いた値

Table 2 Parameter configuration.

再生レート	2 Mbps
再生時間	30 分
ピースサイズ	125 K バイト
シミュレーション時間	3 時間
放送チャンネル数	4 個
チャンネルの帯域幅	1.4 Mbps

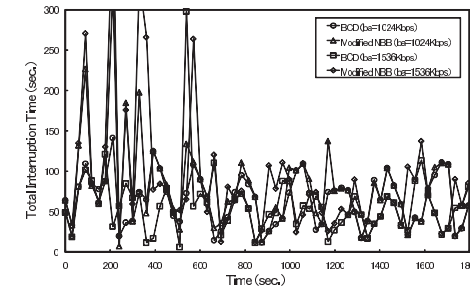


図 6 再生端末の視聴要求時刻と再生中断時間

Fig. 6 The time for requesting playing the data and the interruption time.

である。

5.1 再生中断時間

各手法における各再生端末の再生中断時間を図 6 に示す。横軸は再生端末が視聴要求を出した時刻であり、縦軸は各再生端末の再生中断時間合計である。図を見やすくするためシミュレーションの初めの 30 分を示している。視聴要求の平均到着間隔は 30 秒とし、平均通信帯域は 1,024 Kbps、通信帯域の揺れは 5% とした。通信帯域の揺れとはピースを受信する再生端末を決定する際に用いる再生端末間で算出した帯域幅と、実際の帯域幅の誤差である。平均到着間隔と通信帯域の揺れは特に明記しない限り以降の評価でも同じである。

凡例中の BCD ($ba=i$ Kbps) ($i = 1,024, 1,536$) は提案手法 BCD 法で、追加放送帯域 b_a を i Kbps に設定した場合である。

Modified NBB VoD は、既存手法 NBB VoD¹¹⁾ を改良した手法であり、これをもって既存手法との比較を示す。オリジナルの NBB VoD 法では導入されていないが、データを分割して放送することでさらに再生開始間までの待ち時間を短縮できる。このため、Modified NBB VoD では、放送システムの配信方法は BCD と同じで、通信システムの配信方法に

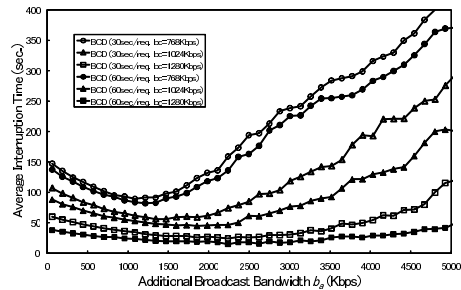


図 7 追加放送帯域と平均再生中断時間

Fig. 7 The extra broadcast bandwidth and the average interruption time.

NBB VoD のアルゴリズムを利用している．すなわち，通信帯域が大きい再生端末間からピースを受信する．NBB VoD ではユニキャストが可能だが，本論文の想定環境では通信の配信サーバはないため，その部分は省略した．グラフの縮尺が大きくなって視認性が低くなるため結果には載せていないが，たとえば平均通信帯域が 1,024 Kbps の場合，オリジナルの NBB VoD 法の平均再生中断時間は 363 秒，Modified NBB VoD では 67 秒になる．

図 6 から，多くの場合 BCD ($ba=1,536$ Kbps) が他の追加放送帯域よりも再生中断時間が短くなっていることが分かる．これは，1,536 Kbps を追加放送帯域として設定する方が最適追加放送帯域に近づき，再生中断時間をさらに短縮できているためである．

また，各再生端末の帯域幅が異なっているため再生端末ごとに再生中断時間が変化している．ただし，追加放送帯域ごとに傾向があり，平均で見ると追加放送帯域を 1,536 Kbps とした場合が他に比べて短縮されている．そこで以降，シミュレーション期間中で再生を終了したすべての再生端末の再生中断時間の平均値を評価値として用いる．

5.2 追加放送帯域

追加放送帯域を決定するため，再生中断時間の平均値と追加放送帯域の関係を調べた．結果を図 7 に示す．横軸は追加放送帯域，縦軸は平均再生中断時間合計である．BCD (j sec/req. $bc=k$ Kbps) ($j = 30, 60$, $k = 768, 1,024, 1,256$) は，平均到着間隔が j ，平均通信帯域が k Kbps の場合の平均再生中断時間である．

このグラフより，いずれの場合も平均再生中断時間を最短にする追加放送帯域があることが分かる．4.4 節で説明したが，この最適追加放送帯域はコンピュータシミュレーションで求められる．たとえば，平均到着間隔が 30 秒で平均通信帯域が 768 Kbps の場合，最適追加放送帯域は 1,152 Kbps になり，1,024 Kbps の場合，1,472 Kbps，1,280 Kbps の場合，

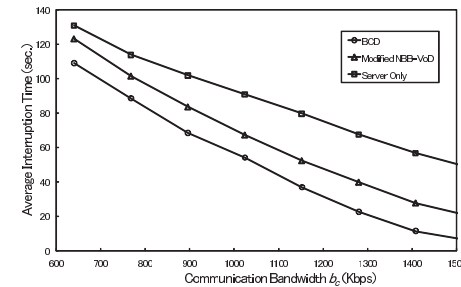


図 8 平均通信帯域と再生中断時間

Fig. 8 The average communication bandwidth and the average interruption time.

2,240 Kbps になる．単純に通信帯域だけ放送帯域が増加したと見なすだけでは再生中断時間を効率的に短縮できず，実際の通信帯域と再生中断時間を効率的に短縮する追加帯域が異なっている．

また，平均到着間隔が 60 秒の平均再生中断時間が，30 秒の場合より短くなっている．これは，平均到着間隔が長くなると，データを要求する端末の数が単位時間あたりで見ても減少するため，ネットワーク内で送受信されるデータが減り，データを早く送受信できるようになるためである．

5.3 平均通信帯域

通信帯域を考慮し，現実的な平均再生中断時間になるようにシステムを設計することが考えられる．そこで，平均通信帯域と平均再生中断時間の関係を調べた．結果を図 8 に示す．横軸は平均通信帯域，縦軸は平均再生中断時間合計である．BCD は提案手法 BCD 法で，Modified NBB VoD は 5.1 節で説明した比較手法である．グラフの視認性を高めるためこれまで示していなかったが，Server Only は，トラックがキャッシュサーバとして初期バッファをユニキャスト転送する方法であり，すなわち，すべてのピースを所持しているサーバからのみピースを受信する従来の手法である．追加放送帯域はすべて最適追加放送帯域としている．

このグラフより，Server Only に比べて端末伝送を行う他 2 手法の再生中断時間が短いことが分かる．これは，30 秒あたり 1 視聴者しか発生しないとしても，端末伝送を行うことでパイプライン的にデータを転送でき，再生中断時間を短縮できるためである．

平均通信帯域が 1,024 Kbps の場合，Modified NBB VoD では平均再生中断時間は 67.2 秒，BCD では 54.1 秒になっており，提案手法では 19%短縮できている．

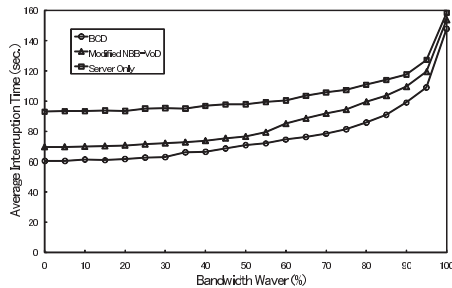


図 9 通信帯域の揺れと再生中断時間

Fig. 9 The bandwidth waver and the average interruption time.

5.4 通信帯域の揺れ

ネットワークが不安定な場合、通信帯域の揺れが大きくなり、平均再生中断時間に影響を及ぼす。そこで、通信帯域の揺れと平均再生中断時間の関係を調べた。結果を図 9 に示す。横軸は通信帯域の揺れ、縦軸は平均再生中断時間合計である。平均通信帯域は 1,024 Kbps とした。通信帯域の揺れが大きくなるほど平均再生中断時間が長くなっていることが分かる。これは、再生端末間の帯域幅を計測した時点と実際の通信時の帯域幅が異なり、ピースの送受信にかかる時間が長くなる場合があるためである。

5.5 ピースリストの受信完了にかかる時間

評価では、図 2 のアルゴリズムに従い、各再生端末はピースの受信を開始するときにトラックから各再生端末のピースリストを取得し、各再生端末はピースを受信完了するたびにピースリストをトラックに送信する。ピースリストは、受信しているピース番目のビットを 1 にしたデータであり、ピースと比べて非常に小さいデータになり、再生中断時間に大きな影響を与えない。たとえば、評価に用いたピースサイズは 125 K バイトであり、2 Mbps の 30 分のデータでのピースの数は、3,600 ビットを記述できるデータは $3,600/8 = 450$ バイトであり、ピースリストは 450 バイトのデータになる。評価と同じ平均通信帯域が 1,024 Kbps の場合、1 つのピースリストを受信するのに平均 3.125 ミリ秒がかかることになる。再生時間が 30 分で平均到着間隔が 30 秒であり、再生中断時間を無視すると平均参加端末数は $30 \times 60/30 = 60$ 台になり、60 台のピースリストの受信には平均 0.1875 秒になる。平均到着間隔が短くなり、参加再生端末数が増えるとピースリストの受信完了にかかる時間は長くなるが、それよりもピースの受信にかかる時間の方が非常に長く、再生中断時間はピースの受信にかかる時間の方に大きく影響される。

再生端末数が増加するほど、すなわち平均到着間隔が短くなるほど再生中断時間が長くなることは図 7 より明らかだが、適用することは可能であり再生端末数の適用範囲に制限はない。また、Modified NBB VoD 法でも提案手法と同じくピースリストを取得しているため、再生端末数に関わりなく比較手法である Modified NBB VoD 法より再生中断時間を短縮できる。さらに、仮に 1 分までの再生中断時間を現実的とする、評価環境では図 7 に示しているように、60 台程度までが適用範囲といえる。

6. 考 察

6.1 最適追加放送帯域と平均通信帯域が異なる理由

図 7 より最適追加放送帯域と平均通信帯域が異なることが分かる。これは、通信帯域に分散があるためである。BCD 法では、再生端末間の通信帯域が平均通信帯域と等しいと見なし、再生端末が S_i ($i = 1, \dots, N-1$) に含まれる最後のピースの再生終了と同時に S_{i+1} を受信完了できるようにスケジューリングしている。しかし、通信帯域には分散があり、必ずしもこのとおり受信できず再生に中断が発生する。再生が中断している間再生端末は通信からピースを受信できるが、この通信からの受信分を考慮してスケジューリングしていないため、最適追加放送帯域が平均通信帯域と等しくならない。通信帯域の分散によって再生中断が長くなることを防ぐために、BCD 法では、追加放送帯域を設け、通信帯域の分散に応じて適切な追加放送帯域を設定するように対策している。

6.2 再生開始待ち時間

本研究では、再生端末が初めのピースの受信完了と同時に視聴開始する場合の平均再生中断時間を評価し、提案手法の有効性を確認した。再生端末が視聴要求を出してから再生を開始するまでの待ち時間は、最初のピースの受信を完了するまでの待ち時間 W_S に等しくなる。しかし、最初のピースを受信完了してから、視聴開始するまでさらに時間 W_E だけ待つことで、再生中に発生する中断時間 W_M を短くできる。再生中断時間と呼んでいるものは $W_S + W_E + W_M$ で表される。この方法で短縮できる再生中断時間は、図 8 から算出できる。たとえば、平均通信帯域が 1 Mbps の場合、平均再生中断時間は 54.1 秒になるが、再生開始をさらに 30 秒遅らせると再生中に発生する中断時間は 24.1 秒になる。これは、提案手法では再生端末は最も早く受信完了できるピースを通信から受信しているためである。なかには通常より接続時間が延びる端末もあるが、短くなる端末もあり、平均すると一概に 30 秒減ることになる。中断なく再生するためには、再生端末は最初のピースを受信完了してから 54.1 秒以上待たせよう。再生端末は、この中断なく再生するための待ち時間

を，データの受信要求時にトラックから取得できる．

30分の2Mbpsの映像データを途切れなく視聴するために54.1秒待つことが長いと感じるかどうかは主観的なものである．そこで客観的に他の手法と比較して，提案手法では，単純に通信帯域を追加帯域として追加した場合や既存手法を放送通信融合環境に摘要した場合に比べて，途切れのない再生に必要な待ち時間を短縮できる．この待ち時間が長い場合には，映像データの再生時間を短くすることや再生レートを落として配信することが考えられる．

7. ま と め

本論文では，放送通信融合環境におけるストリーミング配信の再生中断時間を短縮するBCD法を提案した．BCD法では，追加放送帯域を放送帯域に追加して放送スケジュールを作成する．単純に実際の通信帯域を追加放送帯域として追加しただけでは再生中断時間を効率的に短縮できないことが分かったため，最適な追加放送帯域を求めたうえで配信を行う．評価を行い，再生中断時間を短縮できることを確認した．今後，放送通信融合環境において早送り，巻き戻しを行う場合や，サービス提供中に放送スケジュールを変更する動的スケジュールリング手法，選択型コンテンツ³⁾を配信する場合の再生中断時間短縮手法を考えている．

謝辞 本研究の一部は，総務省委託研究「ユビキタス・プラットフォーム技術の研究開発」による成果である．また一部は，文部科学省科学研究費補助金（若手（B））「端末伝送型インターネット放送におけるコンテンツ配送方式」（課題番号：21700108）による成果である．ここに記して謝意を表す．

参 考 文 献

- 1) 義久智樹，塚本昌彦，西尾章治郎：分割放送方式におけるチャンネルの帯域幅を考慮した連続メディアデータの分割手法，電子情報通信学会和文論文誌B，Vol.J91-B，No.3，pp.300–308（2008）．
- 2) Kulkarni, S., Paris, J.-F. and Shah, P.: A Stream Tapping Protocol Involving Clients in the Distribution of Videos on Demand, *Springer Advances in Multimedia, Special Issue on Collaboration and Optimization for Multimedia Communications*, Vol.2008（2008）．
- 3) 義久智樹，金澤正憲：選択型コンテンツの放送型配信におけるスケジュールリング手法，情報処理学会論文誌，Vol.47，No.12，pp.3296–3307（2006）．
- 4) Zhang, X., Liu, J. and Li, B.: DONet/CoolStreaming: A Data-driven Overlay Network for Live Media Streaming, *Proc. IEEE INFOCOM2005*, Vol.3, pp.2102–2111

（2005）．

- 5) Magharei, N. and Rejaie, R.: PRIME: Peer-to-Peer Receiver-driven Mesh-based Streaming, *Proc. IEEE INFOCOM2007*（2007）．
- 6) Shah, P. and Paris, J.-F.: Peer-to-Peer Multimedia Streaming Using BitTorrent, *Proc. IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conference (IPCCC 2007)*, pp.340–347（2007）．
- 7) Asorey-Cacheda, R., Courville, N., Gonzalez-Castano, F.J. and Bischl, H.: A Survey and Perspective on NVoD Systems for Satellite Networks, *Proc. IEEE Int'l Work. Satellite and Space Communications (IWSCC 2007)*, pp.230–233（2007）．
- 8) Hefeeda, M.M., Bhargava, B.K. and Yau, D.K.Y.: A Hybrid Architecture for Cost-effective On-demand Media Streaming, *ACM Computer Networks*, Vol.44, Issue 3, pp.353–382（2004）．
- 9) Lee, J.Y.B.: UVoD: An Unified Architecture for Video-on-Demand Services, *IEEE Communication Letters*, Vol.3, No.9, pp.277–279（1999）．
- 10) Lee, J.Y.B. and Lee, C.H.: Design, Performance Analysis, and Implementation of a Super-Scalar Video-on-Demand System, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.12, Issue 11, pp.983–997（2002）．
- 11) Taleb, T., Kato, N. and Nemoto, Y.: Neighbors-Buffering-Based Video-on-Demand Architecture, *Signal Processing: Image Communication*, Vol.18, Issue 7, pp.515–526（2003）．
- 12) Jiang, X., Dong, Y., Xu, D. and Bhargava, B.: GnuStream: A P2P Media Streaming System Prototype, *Proc. IEEE Int'l Conf. on Multimedia and Expo (ICME 2003)*, pp.325–328（2003）．
- 13) BitTorrent. <http://www.bittorrent.com/>

（平成21年9月18日受付）

（平成22年5月6日採録）



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。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。データベースシステム、分散処理に興味を持つ。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情報システム工学専攻教授を経て、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、その後2007年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ピクトリア大学客員。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。本会理事を歴任。本会論文賞を受賞。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。