

選択確率を考慮した選択型コンテンツの 放送型配信における待ち時間短縮手法

後藤 佑介^{†1} 義久 智樹^{†2}
金澤 正憲^{†3} 高橋 豊^{†1}

近年のデジタル放送の普及にともない、ユーザがコンテンツを選択して視聴する、選択型コンテンツに対する注目が高まっている。たとえば、2 択クイズ番組で、ユーザが回答を選択し、その回答に対する映像を視聴するといった選択型コンテンツが考えられる。サーバは、ユーザの嗜好に応じた番組を提供できるが、クライアントは、選択したコンテンツが再生されるまで待つ必要がある。筆者らは、これまで、使用できる帯域幅を考慮した待ち時間短縮手法を提案してきたが、選択確率に偏りがある場合、最後までコンテンツを視聴する確率を考慮することで、待ち時間を効率良く短縮できる。本論文では、選択型コンテンツの放送型配信において、選択確率を考慮したうえで待ち時間を短縮する手法を提案し、評価を行い、その有効性を示す。

A Method to Reduce Waiting Time for Selective Contents Broadcast Considering Selection Probability

YUSUKE GOTOH,^{†1} TOMOKI YOSHIHISA,^{†2}
MASANORI KANAZAWA^{†3} and YUTAKA TAKAHASHI^{†1}

Due to the recent popularization of digital broadcasting systems, selective contents, content-aware broadcasting depending on viewers' preference, have attracted attention. For example, in a quiz program, a user selects his answer and watches the video content for the answer. Although the server can deliver programs reflecting users' preferences, clients have to wait until their selected contents start playing. Therefore, we have proposed a method to reduce the waiting time considering available bandwidth. However, in case that selection probabilities are heterogeneous, the waiting time can be reduced effectively by considering probabilities that users play the content to the end. In this paper, we propose a method to reduce the waiting time for selective contents broadcast considering selection probabilities. Experimental results demonstrate the effectiveness of our method.

1. はじめに

1 セグメント放送や地上波デジタルテレビ放送といった近年の放送・通信融合環境の普及にともない、ユーザがコンテンツを選択して視聴する選択型コンテンツ配信に対する注目が高まっている¹⁾。たとえば、2 択のクイズ番組で、選択肢を提示した後、ユーザは回答を選択する。ユーザの回答が正解であれば正解の映像を表示し、不正解であれば不正解の映像を表示する。また、ニュース番組で、いくつかのニュースの概要を述べた後、ユーザが詳しく見たいニュースを選択して視聴するといった選択型コンテンツがあげられる。サーバは、選択型コンテンツを提供することで視聴者の嗜好に応じたコンテンツを提供できるが、選択肢となるいくつかのコンテンツを配信する必要がある。放送型配信の帯域幅には上限があり、コンテンツの数が多くなると、クライアントは選択したコンテンツが再生されるまで待つ必要がある。ここでコンテンツとは、2 択クイズ番組の選択肢の映像や、回答に対する映像といった、各場面の映像を示す。

放送型配信において、クライアントがデータの受信を要求してから再生を開始するまでに要する待ち時間の短縮問題は重要な研究テーマであり、これまでいくつかの手法が提案されている。しかし、選択型コンテンツの放送型配信において、選択確率に偏りがある場合、各コンテンツの選択確率を考慮することで、待ち時間を効率良く短縮できる。たとえば、以下の状況があげられる。

- 経済ニュースとスポーツニュースを選択できるニュース番組で、海外で活躍する日本人スポーツ選手が話題になっている場合、経済ニュースよりスポーツニュースを選択する確率が高くなる。
- 2 択のクイズ番組で、回答 A より回答 B の方がもっともらしい回答の場合、回答 B を選択する確率が高くなる。

そこで、本論文では、以上のような選択確率に偏りがある状況における待ち時間短縮手法を提案する。選択確率の取得方法については、5.2 節で説明する。提案手法では、選択確率

^{†1} 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

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

^{†3} 京都大学学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

を考慮したうえで、コンテンツの放送スケジュールを作成する。選択型コンテンツにおけるすべての視聴順序について、最後までコンテンツを再生する確率を考慮しており、単純に選択確率が高いコンテンツを早く放送するだけではない。

本論文は、以下のように構成される。2章では関連研究について説明し、3章では提案手法を説明する。4章では評価を行い、5章では考察を行う。最後に6章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

2.1 選択型コンテンツ

選択型コンテンツの配信方法として、放送型とオンデマンド型の2種類があげられる。放送型配信では、サーバは、各クライアントから発生する受信要求を処理する必要がないためサーバの負担を軽減できるが、クライアントは、必要なデータが放送されるまで待つ必要がある。一方、オンデマンド型では、クライアントの受信要求に応じて帯域を割り当てる。サーバが配信に必要な帯域を確保できる場合、クライアントは待つことなくコンテンツを視聴できるが、帯域を確保できない場合、クライアントは、視聴するコンテンツを選択してから再生が開始されるまで待つ必要がある。このため、クライアントの数が多い場合には、オンデマンド型よりも放送型が適しているといえる。本論文では、オンデマンド型より放送型が適している場合を想定し、放送型配信で選択型コンテンツを配信する場合を対象とする。

これまで、選択型コンテンツの視聴順序を表記するために、視聴順序グラフと呼ぶ状態遷移グラフが用いられてきた²⁾。視聴順序グラフでは、各ノードは各コンテンツを再生している状態を示し、コンテンツの再生が終了すると、次の状態に遷移する。たとえば、3択クイズ番組の視聴順序グラフは図1-Aで表現される。図1のクイズ番組では、1問目が正解の場合のみ、2問目を回答できる。 S_1 は、出題の映像を再生している状態であり、再生時間が1分のコンテンツである。1分後、 S_1 の再生が終了すると、 S_2 に遷移する。 S_2 は、選択肢となる回答X, Y, Zの内容を表示している状態であり、再生時間が1分のコンテンツである。この間に、ユーザは回答を選択する。 S_2 の再生終了後、回答Xを選択すると S_3 、回答Yを選択すると S_4 、回答Zを選択すると S_5 といったように、選択されたコンテンツに応じた状態に遷移する。ユーザがコンテンツを選択しなかった場合には、再び S_2 に戻る。これらの選択確率は、矢印付近に記述されており、回答Xを選択する確率は0.35、回答Yを選択する確率は0.3、回答Zを選択する確率は0.25、コンテンツを選択せずに再び S_2 に戻る確率は0.1である。 S_3, S_4, S_5 の再生時間は3分である。 S_3 は、回答Xを選択した場合の状態であり、正解の映像を再生する。 S_4, S_5 は、それぞれ回答Y, Zを選択した場合

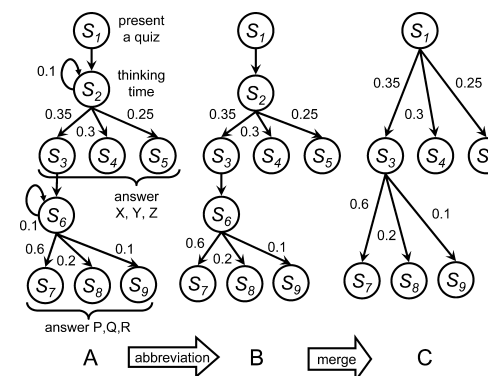


図1 3択クイズ番組の視聴順序グラフの簡単化

Fig. 1 A simplification of a play-sequence graph for a quiz program.

の状態であり、どちらも不正解の映像を再生する。回答Xを選択した場合のみ、 S_3 の再生終了後に S_6 に遷移する。 S_6 の再生時間は1分である。 S_6 では、回答P, Q, Rのいずれかの映像を選択でき、回答Pを選択すると S_7 、回答Qを選択すると S_8 、回答Rを選択すると S_9 に遷移する。ユーザがコンテンツを選択しなかった場合には、再び S_6 に戻る。回答Pを選択する確率は0.6、回答Qを選択する確率は0.2、回答Rを選択する確率は0.1、コンテンツを選択せずに再び S_6 に戻る確率は0.1である。 S_7, S_8, S_9 の再生時間は3分である。

視聴順序グラフに対して、状態遷移の省略 (Abbreviation)、状態の結合 (Merge)、状態の分割 (Split) の3種の操作を行うことで、視聴順序グラフを簡単な形状に変形でき、放送スケジュールの作成が容易になる。選択確率を考慮しない場合の視聴順序グラフの変形については、文献3)に詳述されている。これらの操作に加えて選択確率を考慮すると、図1-Aの視聴順序グラフは、図1-Cに表現される。図1-Cにおける選択確率をすべて足すと0.9となり、1にならないが、コンテンツを選択せずに再び S_2 や S_6 に戻る確率(0.1)が、状態の結合により省略されたためである。以上の操作を行うことで、3択クイズ番組の例は、図1のように簡単化できる。

2.2 既存研究

放送型配信において、待ち時間を短縮するためのスケジューリング手法は、いくつか提案されている⁴⁾⁻⁸⁾。これらの手法では、データをデータサイズの等しいいくつかの部分に分割

し、帯域幅が等しいいくつかのチャンネルを用いて、分割したデータを各チャンネルで繰り返して放送している。クライアントは、初めのデータを受信できる機会が増え、待ち時間を短縮できる。データサイズの等しいいくつかの部分に分割して放送する手法として、パケットロスを考慮した手法や、単一のチャンネルで放送する手法など、さまざまな手法が提案されている。

Optimized Periodic Broadcast (OPB) 法^{9),10)}では、ユーザがコンテンツを再生している間に、次に再生するコンテンツを予測して受信することで、再生開始までの待ち時間を短縮している。Pyramid Broadcasting 法¹¹⁾、Asynchronous Harmonic Broadcasting (AHB) 法¹²⁾では、データサイズが異なるいくつかの部分に分割してスケジューリングすることで、待ち時間を短縮している。しかし、これらの手法では選択型コンテンツを対象としておらず、選択型コンテンツの視聴順序を考慮した放送スケジュールを作成できない。

筆者らは、これまで選択型コンテンツの放送型配信において、待ち時間を短縮する手法をいくつか提案してきた^{2),13)}。Contents Cumulated Broadcasting Considering Bandwidth (CCB-CB) 法³⁾では、選択型コンテンツの放送型配信において、再生レートと等しい帯域幅のチャンネルをできるだけ確保し、待ち時間を短縮している。根から順に、各深さで状態数が一番小さいコンテンツを視聴順序として選択した場合に、待ち時間なく再生できることを考慮し、視聴順序上のコンテンツを優先的に放送する。Dense Cumulated Broadcasting (DCB) 法¹⁴⁾では、選択型コンテンツの再生時間が異なる場合のスケジューリング手法を提案している。各コンテンツの再生時間を考慮したうえで、データを分割し、分割したデータをスケジューリングすることで、待ち時間を効率的に短縮している。しかし、これらの手法では選択確率を考慮しておらず、深さ優先的に放送スケジュールを作成するため、選択確率にばらつきがある場合、単純手法よりも待ち時間が長くなる。

2.3 待ち時間が発生する仕組み

文献 2), 3) とよく似た説明ではあるが、読者の理解を深めるため、選択確率に偏りがある場合の例を用いて、待ち時間が発生する仕組みについて説明する。ここで待ち時間とは、ユーザが番組の受信要求を出してから最初の部分が再生されるまでの時間と、視聴するコンテンツを選択してから再生が開始されるまでの選択後の時間を指す。

単純なスケジューリング手法(単純手法)では、サーバはいくつかの放送チャンネルを用いて、各コンテンツをユーザの再生開始時刻と同時に放送する。各深さのコンテンツを放送する時間帯において、サーバが放送に用いるチャンネルの数は、選択型コンテンツの各深さにおける選択肢の数と等しい。たとえば、図 1-C で表される視聴順序グラフを、7.5 Mbps の

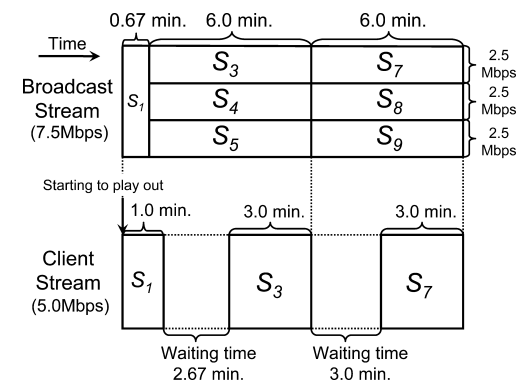


図 2 単純手法の放送スケジュールの例

Fig. 2 An example of broadcast schedules under the simple method.

帯域幅を用いて、単純手法でスケジューリングした場合の放送スケジュールを図 2 に示す。コンテンツの再生レートは、MPEG2 で一般的な 5.0 Mbps とした¹⁵⁾。S1 の再生時間は 1 分、S3, S4, S5, S7, S8, S9 の再生時間は 3 分とする。

“Broadcast Stream” は、サーバが放送するデータを示し、“Client Stream” は、ユーザが再生するデータを示す。サーバは、初めに 7.5 Mbps の帯域幅を用いて S1 を放送する。再生レートが 5.0 Mbps で再生時間が 1 分のコンテンツを 7.5 Mbps で放送するため、放送には 0.67 分かかる。S1 の放送終了後、S3, S4, S5 は同じ時刻に再生が開始されるため、サーバは S3, S4, S5 を同時に放送する。各コンテンツの放送には、 $7.5/3 = 2.5$ Mbps の帯域幅を用いる。S3, S4, S5 の再生時間は 3 分なので、放送には $3 \times 5.0/2.5 = 6$ 分かかる。一方、ユーザは、S1 の受信開始と同時に再生を開始し、1 分後に再生を終了する。しかし、S1 の再生終了と同時に S3, S4, または S5 の再生を開始すると、コンテンツのデータの受信が S3, S4, または S5 の再生開始に間に合わず、再生中に途切れが発生する。途切れなく再生するためには、コンテンツの受信完了と同時に再生が終了するように、 $0.67 + 6.0 - (1.0 + 3.0) = 2.67$ 分待ってから再生を開始する必要がある。このようにして、待ち時間は発生する。S3, S4, または S5 の再生開始から 3 分後に、再生を終了する。このとき、S3, S4, S5 のどれかを選択した場合の待ち時間は、いずれも 2.67 分となる。選択確率を考慮して平均すると、 $2.67 \times (0.35 + 0.3 + 0.25) = 2.40$ 分の待ち時間となる。

同様に、S7 の再生終了と同時に S7, S8, または S9 の再生を開始すると、コンテ

コンテンツのデータの受信完了が S_7, S_8, S_9 の再生開始に間に合わず、再生中に途切れが発生する。途切れなく再生するためには、コンテンツの受信完了と同時に再生が終了するように、 $6 - 3 = 3$ 分待ってから再生を開始する必要がある。このとき、 S_7, S_8 または S_9 を選択した場合の待ち時間は、いずれも 3 分となる。選択確率を考慮して平均すると、 $(2.67 + 3) \times 0.35 \times (0.6 + 0.2 + 0.1) + 2.67 \times (0.3 + 0.25) \doteq 3.25$ 分の待ち時間となる。

待ち時間の合計は、コンテンツの数が増えるほど増加するため、ユーザが番組を最後まで視聴するまでに発生する待ち時間の合計は、短い方が望ましい。また、図 1-A で表される視聴順序グラフを用いて放送スケジュールを作成する場合、10%のユーザは S_2 の映像を繰り返し見ることになり、その間に放送されたデータを受信することで待ち時間は短縮される。本論文では、コンテンツの再生レートと等しい帯域幅の放送チャンネルを多く確保し、クライアントが最後まで再生する確率が高い視聴順序の順にスケジューリングを行うことで、選択確率を考慮しない既存手法に比べて待ち時間を短縮する。

3. 提案手法

選択型コンテンツの放送型配信において、選択確率を考慮したスケジューリング手法「Extended Cumulated Broadcasting (ECB) 法」を提案する。ECB 法では、2.1 節で説明した視聴順序グラフを用いて放送スケジュールを作成し、コンテンツの受信開始から再生開始までの待ち時間を短縮する。文献 3) との違いは、視聴順序グラフの選択確率を考慮してスケジューリングを行う点である。

3.1 想定環境

スケジューリング手法を提案するにあたって、想定する環境を箇条書きで示す。

- 放送される番組は、選択型コンテンツである。
- サーバは、選択型コンテンツの選択確率を見積もっている。
- サーバは、複数のチャンネルから同時にデータを放送できる。
- クライアントは、複数のチャンネルから同時にデータを受信できる。
- クライアントは、コンテンツの再生を開始すると、最後まで途切れずに再生する。
- クライアントは、コンテンツの蓄積に十分な容量のバッファを持つ。
- クライアントは、番組の放送が始まってから、その番組のコンテンツを受信する。

3.2 待ち時間短縮問題のモデル化

本節では、選択型コンテンツの放送型配信における待ち時間短縮問題について、問題の性質が理解できるように、以下のように式を導出する。コンテンツの数を N 、 $t_{bf}(i)$

($i = 1, \dots, N$) を S_i の放送終了時刻、 $t_{pf}(i)$ を S_i の再生終了時刻 (ループがある場合は、最も早い再生終了時刻) とすると、 i 番目のコンテンツを再生するまでの待ち時間 w_i は、 $w_i = \max(0, t_{pf}(i) - t_{bf}(i))$ になる。視聴順序の数を m 、視聴順序 R_j ($j = 1, \dots, m$) に含まれるコンテンツの番号のリストを X_j とする。 P_i をコンテンツ S_i の選択確率とすると、視聴順序 R_j の待ち時間は、 $\sum_{k \in X_j} (P_k \times w_k)$ となり、すべての視聴順序の平均待ち時間は、 $[\sum_{j=1}^m \{\sum_{k \in X_j} (P_k \times w_k)\}] / m$ で与えられる。本論文の目的は、平均待ち時間を短くすることであり、この値を小さくすることである。制約条件は、各チャンネルの帯域幅の合計が使用する帯域幅より小さくなることである。各コンテンツの放送に用いる帯域幅を b_j で表し、チャンネルの数を M 、全帯域幅を B とすると、この制約は、 $b_1 + \dots + b_M \leq B$ と表せる。まとめると、以下ようになる。

[待ち時間短縮問題のモデル化]

$$\text{目的関数: } \underset{\text{minimize}}{\left[\sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{k \in X_j} (P_k \times w_k) \right\} \right] / m}$$

$$\text{制約条件: } b_1 + \dots + b_M \leq B$$

視聴順序グラフにおける同じ深さのコンテンツの選択確率が等しい場合、 P_i ($i = 1, \dots, N$) の値は従来手法 CCB-CB 法と同じになり、平均待ち時間も CCB-CB 法と同じになる。また、視聴順序グラフにおけるすべてのコンテンツの選択確率が等しい場合、提案手法の平均待ち時間は、単純手法と同じになる。しかし、一般的に、視聴者の選択には偏りが発生するため、各コンテンツの選択確率は異なる。

3.3 スケジューリング手順

放送に使用する番組を構成する選択型コンテンツのデータサイズの合計を D 、再生レートを r 、全状態数を N とする。状態 S_i ($i = 1, \dots, N$) で再生するコンテンツのデータサイズを D_i とし、コンテンツ S_i の選択確率を P_i で表す。視聴順序グラフでユーザが視聴できる順序の数を m とし、視聴順序を R_j ($j = 1, \dots, m$) とする。使用できる帯域幅を B とし、サーバは $M = \lceil B/r \rceil$ 個のチャンネル C_k ($k = 1, \dots, M$) を使用する。また、チャンネル C_k の帯域幅を B_k で表し、 $B_1 = B_2 = \dots = B_{M-1} = r$ 、 $B_M = B - r(M-1)$ とする。チャンネル C_k で最後にスケジューリングされたコンテンツの放送終了時刻を F_k とし、初めは $F_k = 0$ とする。番組の放送終了時刻を F で表し、 $F = D/B$ とする。スケジューリングされるコンテンツの順番を格納するリストを L とする。

以上のような初期値設定のもと、ECB法では、次の手順でスケジューリングを行う。

- (1) 視聴順序 R_j ($j = 1, \dots, m$) について、選択確率が高い視聴順序を構成するコンテンツの状態番号を、根から順番に L に挿入する。該当する状態番号がすでに L に挿入されている場合は、挿入しない。
- (2) L の先頭の状態番号 l を取得し、あるチャンネル C_k で S_l を放送した場合にクライアントが再生を開始できる時刻 $F_k + D_l(\frac{1}{B_k} - \frac{1}{r})$ を最小にする k を求める。再生を開始できる時刻を最小にするチャンネルが複数存在する場合、 k の値が一番小さいチャンネルを選択する。
- (3) C_k に S_l をスケジューリングする。
- (4) $F_k = F_k + D_l/B_k$ となる。
- (5) $F_k > F$ となる場合、 S_l が F までに放送終了できるように、帯域幅を調整する。
- (6) L が空になるまで手順 (2) に戻る。

3.4 導入例

図3の視聴順序グラフを使用して、導入例を説明する。図3の視聴順序グラフは3択クイズ番組であり、1問目が正解の場合のみ2問目を回答できる。理解しやすい例として、7.5 Mbpsの帯域幅を用いて、提案手法でスケジューリングする場合を考える。 S_1 は選択肢を提示しているコンテンツであり、再生時間は1分である。 S_2, \dots, S_7 は回答に対する映像であり、再生時間が3分のコンテンツである。選択確率は、図中に示している。コンテンツの再生レートを5.0 Mbpsとすると、番組の放送終了時刻は、 $F = (1 + 3 \times 6) \times 5.0 / 7.5 = 12.7$

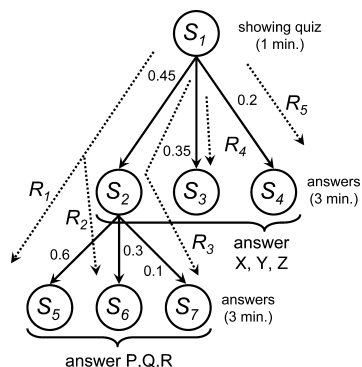


図3 クイズ番組の視聴順序グラフ

Fig. 3 A play-sequence graph for a quiz program.

分となる。また、 $M = \lceil 7.5/5.0 \rceil = 2$ 個のチャンネル C_1, C_2 を用いることになり、 C_1 の帯域幅は 5.0 Mbps、 C_2 の帯域幅は 2.5 Mbps となる。

まず、手順 (1) で、選択確率が高い視聴順序を構成するコンテンツの状態番号を、根から順番にリスト L に並べる。たとえば、図3の場合、視聴順序は R_1, \dots, R_5 の5通りある。このとき、各視聴順序の選択確率は、 $R_1 = 0.45 \times 0.6 = 0.27$, $R_2 = 0.45 \times 0.3 = 0.135$, $R_3 = 0.45 \times 0.1 = 0.045$, $R_4 = 0.35$, $R_5 = 0.2$ となる。提案手法では、視聴順序の選択確率が高いコンテンツの順番にスケジューリングされるため、 R_4, R_1, R_5, R_2, R_3 の順となり、リスト L に並べられる順番は、 $S_1, S_3, S_2, S_5, S_4, S_6, S_7$ の順になる。視聴順序の選択確率が高い順番にスケジューリングしており、単に選択確率が高いコンテンツを順番にスケジューリングしているわけではない。手順 (2) で、 S_1 をスケジューリングすることになり、 $F_1 = F_2 = F_3 = 0$ であるため、 $k = 1$ となる。手順 (3) で、 S_1 を C_1 にスケジューリングし、手順 (4) で、 $F_1 = 1$ となる。手順 (5) では、 $F_1 < F$ であるため何も行われず、手順 (6) で再び手順 (2) に戻る。手順 (2) で、 S_3 をスケジューリングする場合、クライアントが再生を開始できる時刻 $F_k + D_l(\frac{1}{B_k} - \frac{1}{r})$ の値は、 $k = 1$ のとき 4、 $k = 2$ のとき 6 となるため、再生開始時刻を最小にする k は 1 となり、 C_1 にスケジューリングされる。次に、 S_2 をスケジューリングする場合、 $k = 2$ となり、 C_2 にスケジューリングされる。 S_5 の場合、 $k = 1$ となり、 C_1 にスケジューリングされる。同様に、 S_4, S_6, S_7 がスケジューリングされる。最終的な放送スケジュールを図4に示す。

S_1 の受信を開始すると、ユーザは即座に S_1 の再生を開始する。 S_1 の再生終了後、ユーザは、次に視聴するコンテンツを選択して視聴する。このときユーザは、途切れずに再生できるようにまで待つから次のコンテンツの再生を開始するため、各コンテンツの再生中に途切れることなく、視聴するコンテンツが切り替わる時点で待ち時間は発生する。

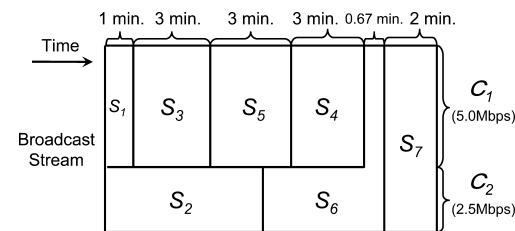


図4 ECB法の放送スケジュールの例

Fig. 4 An example of broadcast schedule under the ECB method.

4. 評価

4.1 比較対象

提案手法と既存手法を比較するにあたって、各手法について簡単に説明する。単純手法では、視聴順序グラフの各深さで同時刻に放送するコンテンツの数だけチャンネルを作成し、各チャンネルの帯域幅に同じ倍率をかけ、すべてのチャンネルの帯域幅の合計を使用する帯域幅と等しくする。CCB-CB法³⁾では、サーバは再生レートと等しい帯域幅のチャンネルをできるだけ多く準備することで、待ち時間を効率的に短縮できる。たとえば、CCB-CB法で図3の選択型コンテンツを配信する場合の放送スケジュールを図5に示す。使用できる帯域幅が7.5Mbpsのとき、 C_1 の帯域幅は5.0Mbps、 C_2 の帯域幅は2.5Mbpsとなる。クライアントが S_1, S_2, S_7 の順番に再生する場合、 S_1, S_2 は同じ時間帯に受信したデータをそのまま放送するため、待ち時間は発生しない。 S_7 は、 S_1 の再生開始640秒後から、帯域幅が7.5Mbpsのチャンネルで120秒間受信することになる。 S_7 の再生開始時刻は最短で S_1 の再生開始から640秒後になるため、再生時に $640 - 60 \times (1 + 3) = 400$ 秒の受信待ち時間が発生する。選択確率を考慮して平均すると、 $(0.45 \times 0.6 \times 0 + 0.45 \times 0.3 \times 280 + 0.45 \times 0.1 \times 400 + 0.35 \times 120 + 0.2 \times 330) / 5 = 32.8$ 秒の待ち時間となる。

単純手法、CCB-CB法、提案手法であるECB法を用いた場合の平均待ち時間を表1に示す。左端が状態の遷移を示す。たとえば、“ $S_1 \rightarrow S_4$ ”は、 S_1, S_4 の順番に再生するとき S_1 と S_4 の間で発生する待ち時間を示す。ECB法の平均待ち時間は、単純手法に比べて45.6%、CCB-CB法に比べて20.1%減少していることが分かる。

4.2 評価に用いる視聴順序グラフ

本節では、提案手法ECB法の性能評価を行う。視聴順序グラフは、選択型コンテンツの種類に応じてさまざまな形状が考えられ、これらすべての視聴順序グラフに関して評価を行うことは不可能である。そこで、本論文では、クイズ番組とドラマにおける選択肢の数や深さをパラメータとして与え、できる限り多くの形状の視聴順序グラフに対して評価を行う。

クイズ番組の視聴順序グラフを図6に示す。各問題には e 個の選択肢があり、1つは正解のコンテンツ、残りは不正解のコンテンツで構成されている。正解のコンテンツを選択した場合は、続けて次の問題を視聴する。一方、不正解のコンテンツを選択した場合は、視聴を終了する。正解を選び続けた場合、最大 n 問出題される。最初の出題映像(S_1)は、再生時間が1分の映像であり、他の映像は、再生時間が3分の映像である。状態の数は、図6の場合、 $ne + 1$ 個になる。

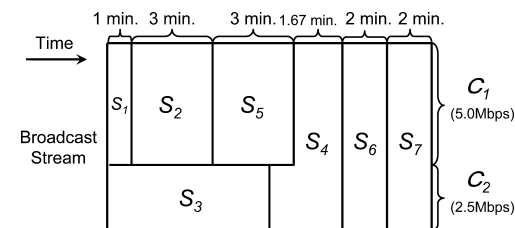


図5 CCB-CB法の放送スケジュール例

Fig. 5 An example of broadcast schedule under the CCB-CB method.

表1 各手法における平均待ち時間の比較

Table 1 Comparison of the average waiting time under each method.

視聴順序 (選択確率)	待ち時間 (sec.)		
	単純手法	CCB-CB	ECB
$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5$ (0.27)	91.8	0	32.4
$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_6$ (0.135)	45.9	37.8	32.4
$S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_7$ (0.045)	15.3	18.0	18.0
$S_1 \rightarrow S_3$ (0.35)	56.0	42.0	0
$S_1 \rightarrow S_4$ (0.2)	32.0	66.0	48.0
平均待ち時間	48.2	32.8	26.2

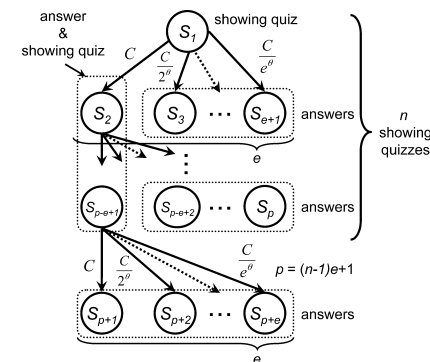


図6 クイズ番組の視聴順序グラフ

Fig. 6 A play-sequence graph for a quiz program.

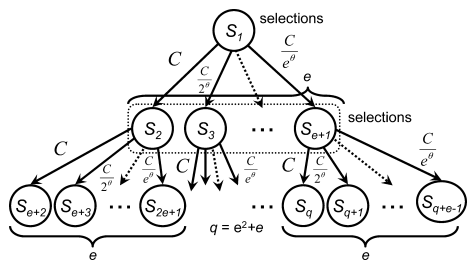


図 7 ドラマの視聴順序グラフ ($n = 2$)
Fig. 7 A play-sequence graph for a drama program.

次に、ドラマの視聴順序グラフを図 7 に示す。各選択部分には e 個の選択肢があり、 n 力所の選択場面がある。映像は、すべて再生時間が 10 分である。状態の数は、図 7 の場合、 $e^2 + 2e - 1$ 個になる。

同階層にあるコンテンツの選択確率は、人気を表す確率分布としてよく用いられる $\theta = 0.271$ の Zipf 分布で与えた¹⁶⁾。Zipf 分布における n 番目のコンテンツの選択確率は、 C/n^θ で与えられる。 C は、正規化のための定数である。

4.3 平均待ち時間

4.3.1 帯域幅

帯域幅を変化させた場合の平均待ち時間の評価を行った。結果を図 8、図 9 に示す。図 8 は、クイズ番組の場合の平均待ち時間である。図 9 は、ドラマの場合の平均待ち時間である。横軸は、使用する帯域幅をコンテンツの再生レートで除した値である。縦軸は、平均待ち時間をコンテンツの再生時間で除した値である。“Simple ($e = i$)” は、2.3 節で説明した単純手法の場合の平均待ち時間であり、 i は選択型コンテンツの選択肢の数を示す。“CCBCB ($e = i$)” は、既存手法 CCB-CB 法の場合、“ECB ($e = i$)” は、提案手法 ECB 法の場合である。 $n = 3$ とした。

このグラフより、クイズ番組とドラマそれぞれについて、ECB 法の平均待ち時間は既存手法よりも短いことが分かる。これは、ECB 法では、多分木の視聴順序グラフの選択確率と視聴順序を考慮して、クライアントが選択する確率が高い視聴順序のコンテンツを優先してスケジューリングするためである。また、クイズ番組では、単純手法よりも CCB-CB 法の平均待ち時間が長くなる。CCB-CB 法では、根から順番に各深さで状態数が一番小さいコンテンツを先に放送するため、選択確率が高いコンテンツは、選択確率が低いコンテンツ

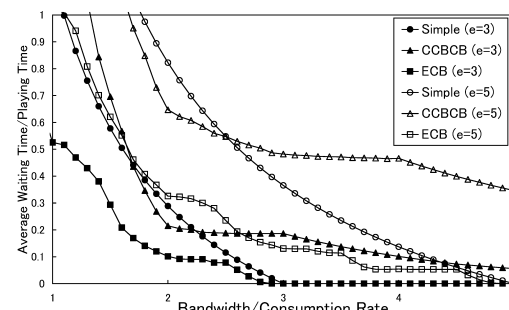


図 8 クイズ番組の帯域幅と平均待ち時間
Fig. 8 The average waiting time and the bandwidth under a quiz program.

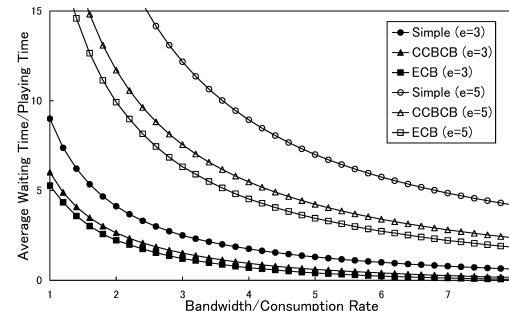


図 9 ドラマの帯域幅と平均待ち時間
Fig. 9 The average waiting time and the bandwidth under a drama program.

より後の時刻にスケジューリングされる可能性がある。一方、単純手法では、同階層にあるコンテンツを同時に放送しているため、選択確率が変化しても平均待ち時間は変わらない。たとえば、5 個の選択肢から選択する場面が 3 力所ある、視聴時間が最大 $1 + 3 \times 3 = 10$ 分のクイズ番組の場合、再生レートが 5.0 Mbps で、23 Mbps の帯域幅を用いて放送すると、平均待ち時間は、単純手法では 2.86 秒、CCB-CB 法で 23.3 秒、ECB 法で 1.93 秒となり、単純手法に比べて 25.5%、CCB-CB 法に比べて 87.7%短縮される。

ドラマの場合、CCB-CB 法は、単純手法に比べて平均待ち時間が短くなる。ドラマでは、選択肢の数と分岐数の増加にとともに、同階層にあるコンテンツの数が大幅に増加する。単純手法でドラマを放送する場合、1 つのコンテンツを放送するために使用できる帯域幅が

減少し、受信時間が増加するため、平均待ち時間が増加する。たとえば、5 個の選択肢から選択する場面が 3 カ所ある $10 \times 3 = 30$ 分のドラマの場合、再生レートが 5.0Mbps で、23 Mbps の帯域幅を用いて放送すると、平均待ち時間は、単純手法では 46.0 秒、CCB-CB 法で 32.6 秒、ECB 法で 23.0 秒となり、単純手法に比べて 50.0%、CCB-CB 法に比べて 29.4%短縮される。

4.3.2 分岐の数

分岐の数が、平均待ち時間にどの程度の影響を与えるかについて調べた。結果を図 10、図 11 に示す。図 10 は、クイズ番組の場合の平均待ち時間、図 11 は、ドラマの場合の平均待ち時間である。横軸は分岐の数 n 、縦軸は平均待ち時間をコンテンツの再生時間で除し

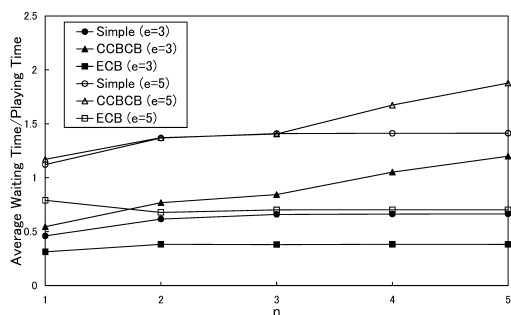


図 10 クイズ番組の分岐の数と平均待ち時間

Fig. 10 The average waiting time and the number of branches under a quiz program.

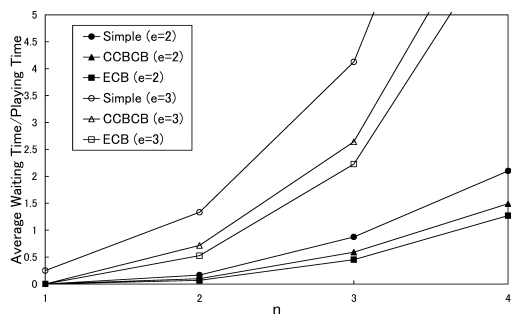


図 11 ドラマの分岐の数と平均待ち時間

Fig. 11 The average waiting time and the number of branches under a drama program.

た値である。このグラフより、ECB 法の平均待ち時間は、既存手法よりも短縮されていることが分かる。また、ECB 法において、クイズ番組では、 n が大きいほど平均待ち時間は一定値に近づいているが、ドラマでは、平均待ち時間は増加していることが分かる。クイズ番組では、 n が大きくなって同階層に含まれるコンテンツの数は増加しないが、ドラマでは、 n が大きくなるほど同階層に含まれるコンテンツの数が増加するため、平均待ち時間は増加する。たとえば、3 個の選択肢から選択する場面が 3 カ所ある $10 \times 3 = 30$ 分のドラマの場合、再生レートが 5.0Mbps で、10 Mbps の帯域幅を用いて放送すると、平均待ち時間は、単純手法では 24.8 秒、CCB-CB 法で 17.6 秒、ECB 法で 13.4 秒となり、単純手法に比べて 46.0%、CCB-CB 法に比べて 23.9%短縮される。

4.4 最大待ち時間

提案手法では、選択確率を考慮したうえで平均待ち時間を短縮することを目的としているが、選択型コンテンツの放送型配信では、最大待ち時間も評価の指標になりうると考えられる。そこで、最大待ち時間に関する評価を行った。結果を図 12 に示す。横軸は、使用する帯域幅をコンテンツの再生レートで除した値である。縦軸は、最大待ち時間を出題映像のコンテンツの再生時間で除した値である。ECB 法では、使用する帯域幅が増加すると、最大待ち時間は段階的に変化する。これは、使用する帯域幅が変化してもコンテンツの放送スケジュールが変化しない場合、最大待ち時間は変化しないためである。

このグラフより、ECB 法の最大待ち時間は、単純手法よりも長くなる事が分かる。ECB 法では、多分木の視聴順序グラフの選択確率と選択順序を考慮して、クライアントが選択する確率が高い視聴順序のコンテンツを優先してスケジューリングするため、各視聴順序で発

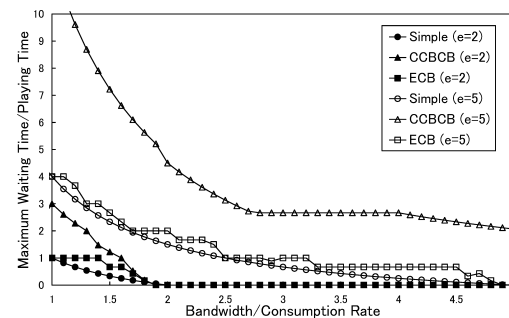


図 12 クイズ番組の帯域幅と最大待ち時間

Fig. 12 The maximum waiting time and the bandwidth under a quiz program.

生ずる待ち時間は選択確率に応じて変化する。このため、選択確率が低い選択順序の待ち時間は長くなり、単純手法よりも最大待ち時間が長くなる。たとえば、5個の選択肢から選択する場面が3カ所ある、視聴時間が最大 $1 + 3 \times 3 = 10$ 分のクイズ番組の場合、再生レートが 5.0 Mbps で、10 Mbps の帯域幅を用いて放送すると、最大待ち時間は、単純手法では 90 秒、CCB-CB、ECB 法で 210 秒となり、単純手法に比べて最大待ち時間が約 2.3 倍長くなっている。しかし、ECB 法では、最大待ち時間を与える選択確率は低いため、平均としては待ち時間を短縮できている。ドラマでも同様の傾向があることを確認している。

5. 考 察

5.1 提案手法の有効性

提案手法 ECB 法では、視聴順序グラフにおけるすべての視聴順序の選択確率をもとに、再生レートの帯域幅を持つチャンネルをできるだけ確保してスケジューリングを行う。既存手法 CCB-CB 法では、視聴順序の選択確率を考慮せず、各深さごとにコンテンツの順番を決定していた。しかし、選択肢の数が増加すると、選択確率が低いコンテンツを放送するために次の深さのコンテンツの放送が遅れ、他の視聴順序の待ち時間が増加するという問題点があった。たとえば、クイズ番組の場合、視聴順序グラフの深さが増加するとコンテンツが増加し、次の選択肢のコンテンツの放送開始時刻が遅れるため、選択確率が高い回答を選択したクライアントの待ち時間が増加する。提案手法では、すべての視聴順序について、根から葉までの選択確率の積をもとに、スケジューリングする順番を決定する。このため、選択肢の数が増加しても、コンテンツを効率的にスケジューリングすることで待ち時間を短縮できる。

5.2 選択確率の取得方法

選択確率の取得方法は、分布で与える方法、実際に取得する方法、両者を組み合わせる方法がある。分布で与える方法は、あらかじめ放送開始前に確率分布関数を用いて選択確率を与える方法である。さまざまな確率分布が考えられるが、本論文の評価では、人気を表す確率分布としてよく用いられる $\theta = 0.271$ の Zipf 分布を用いている。クライアントが複数の選択肢の中から見たい映像を選択する確率は、コンテンツの人気度の算出において、Zipf の法則が適用できると考えられる。

実際に取得する方法は、想定する視聴順序グラフに従って、実際に番組を作成してユーザに視聴してもらい、得られたデータをもとに選択確率を算出する方法である。ユーザの視聴数をもとにした各コンテンツの選択確率は、取得した次の放送から反映されるため、コンテ

ンツの人気度の反映は遅くなり、選択確率が高いコンテンツの視聴で発生する待ち時間は大きくなる。

両者を組み合わせる方法は、初めに分布で与えて、実際にデータを取得しながら段階的に分布を修正していく方法である。これは、たとえばクライアントが選択したコンテンツをインターネット経由でサーバに送信し、サーバが選択確率を計算して放送スケジュールに反映させることで可能になる。選択確率を初めに分布で与えることで、予想される人気度をもとにした放送スケジュールを作成でき、サービス開始時点の平均待ち時間をある程度短縮できる。

スケジューリングのフィードバックは、クライアントが選択したコンテンツの情報をサーバに送信することで実現可能である。視聴者が選択したコンテンツを集計するサーバは、情報ネットワークにつながっており、放送スケジュールを作成し、放送システムを用いてデータを放送する。これは、サーバを放送システム管理用計算機とすることで可能である。サーバの負荷が大きい場合は、他の計算機を用意することで解決できる。このとき、フィードバックの手順は以下ようになる。

- (1) クライアント（再生端末）は、放送されているデータの中から視聴者が選んだコンテンツを選択して再生し、情報ネットワークに接続する。
- (2) クライアントは、視聴者がコンテンツを選択すると、視聴者が選択したコンテンツがどれであるかといった情報を集計サーバに送信する。
- (3) 集計サーバは、クライアントからの情報が届くたびに、選択確率を計算する。
- (4) 集計サーバは、次の放送からは、この時点の選択確率を用いて放送スケジュールを作成する。

5.3 サーバの負荷

制御にかかるサーバの負荷は、データの放送にかかる負荷と放送スケジュールの作成にかかる負荷に分けられる。データの放送にかかる負荷は、提案手法で作成された放送スケジュールを読み込み、放送スケジュールに従って放送する際に発生する負荷である。この負荷は、提案手法を用いない場合でも発生する負荷であり、単純な他の手法で作成された放送スケジュールに従って放送する場合にも発生する。このため、この負荷による従来手法との待ち時間への影響の差異はないと考えられる。

放送スケジュールの作成にかかる負荷に関して、放送開始前に静的に放送スケジュールを決定して放送する場合には、この負荷は待ち時間に影響を及ぼさない。しかし、放送しながら選択確率を取得して放送スケジュールを動的に作成する場合には、サーバの負荷が待ち

時間に影響を及ぼす。サーバの計算能力が低くてこの影響が非常に大きい場合には、選択確率の取得にかかる時間と放送スケジュールを作成する時間による待ち時間の増加が、選択確率を考慮することによる待ち時間短縮よりも大きくなり、結果的に待ち時間が増加することが考えられる。提案手法では、選択確率を考慮することで待ち時間を既存手法より短縮しているため、選択確率に偏りがあるほど既存手法より待ち時間を短縮できる。このため、選択確率を考慮することによる負荷が大きい場合、提案手法の効果が現れる選択確率の差(偏り)が存在する。この効果が現れる差は、サーバの負荷によって変わるため、定量的に示すことはできないが、実際にサービスする場合、サービスに使うサーバを含めた放送システムを用いて、放送開始前に実験することで求められる。

5.4 想定する視聴順序グラフ

視聴順序グラフには、放送する番組に応じてさまざまな形状があり、問題を間違えた場合に次の問題に移る問題形式も存在する。すべての視聴順序グラフについて評価することは不可能なため、クイズ番組とドラマの2つの視聴順序グラフを提示し、評価を行った。

グラフに「輪」がある場合、「状態の分割」を行い、視聴経路を分割してスケジューリングするが、該当するコンテンツは、全視聴経路の中で一番早い再生開始時刻に合わせて1回だけスケジューリングするため、送信する総データ量は増加しない。クライアントは、受信したコンテンツをバッファに蓄積しておくことで、後で任意の時間に再生することができる。この場合、コンテンツがバッファに蓄積されている限り、時間軸をさかのぼる状態遷移はつねに可能であるため、「状態の省略」により、輪を省略できる。

6. おわりに

本論文では、ユーザがコンテンツを選択して視聴する選択型コンテンツの放送型配信において、選択確率に偏りがある状況での待ち時間短縮手法を提案した。提案するECB法では、選択型コンテンツのすべての視聴順序において、最後までコンテンツを再生する確率を考慮したうえで、コンテンツの放送スケジュールを作成する。評価の結果、既存手法に比べて平均待ち時間を短縮できることを確認した。

今後の予定として、使用できるチャンネルの数を考慮したスケジューリング手法や、連続して複数の番組を放送する場合のスケジューリング手法が考えられる。

謝辞 本研究の一部は、平成20年度総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」、ならびに文部科学省グローバルCOEプログラム「知識循環社会のための情報学教育研究拠点」の研究助成による成果である。また一部は、文部科学省科学研

究費補助金(若手研究(B))「選択型コンテンツの放送型配信に関する研究」(課題番号:18700085)および文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A))「ユビキタス環境のための全体プログラミング方式」(課題番号:20240007)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 総務省: 情報通信白書平成20年版(2008). <http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h20/pdf/index.html>
- 2) 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リング手法, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.3296-3307 (2006).
- 3) Gotoh, Y., Yoshihisa, T. and Kanazawa, M.: A scheduling method considering available bandwidth in selective contents broadcasting, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007)*, pp.2597-2602 (2007).
- 4) Gotoh, Y., Yoshihisa, T. and Kanazawa, M.: d-cast: A division based broadcasting system for IP networks, *Proc. IEEE/ICACT 2007*, pp.1902-1907 (2007).
- 5) 後藤佑介, 義久智樹, 金澤正憲: 異種クライアント環境における連続メディアデータ放送のための待ち時間短縮手法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J91-D, No.3, pp.667-676 (2008).
- 6) Paris, J.-F.: A Simple Low-Bandwidth Broadcasting and receiving scheme for popular video service, *Proc. Int. Conf. on Computer Communications and Networks (IC3N '99)*, pp.118-123 (1999).
- 7) Paris, J.-F., Long, D.D.E. and Mantey, P.E.: Zero-delay broadcasting protocols for video-on-demand, *Proc. ACM Int. Multimedia Conf. (Multimedia '99)*, pp.189-197 (1999).
- 8) Janakiraman, R. and Waldvogel, M.: Fuzzycast: Efficient Video-on-Demand over Multicast, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.920-929 (2002).
- 9) Mahanti, A., Eager, D., Vernon, M. and Stukel, D.: Scalable on-demand media streaming with packet loss recovery, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.11, Issue 2, pp.195-209 (2003).
- 10) Zhao, Y., Eager, D.L. and Vernon, M.K.: Scalable On-Demand Streaming of Non-linear Media, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.15, Issue 5, pp.1149-1162 (2007).
- 11) Viswanathan, S. and Imilelinski, T.: Pyramid broadcasting for video on demand service, *Proc. SPIE Multimedia Computing and Networking Conf. (MMCN '95)*, pp.66-77 (1995).
- 12) Yoshihisa, T., Tsukamoto, M. and Nishio, S.: A scheduling scheme for continuous media data broadcasting with a single channel, *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol.52, pp.1-10 (2006).

- 13) 後藤佑介, 義久智樹, 金澤正憲: 選択型コンテンツのオンデマンド配信における待ち時間短縮のためのスケジューリング手法, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.2, pp.716-726 (2008).
- 14) Gotoh, Y., Yoshihisa, T. and Kanazawa, M.: A Scheduling Method Considering Playing Time in Selective Contents Broadcasting, *Proc. 4th Int. WorkShop on QoS in Multiservice IP Networks (QoS-IP2008)*, pp.191-196 (2008).
- 15) 藤原 洋: 最新 MPEG 教科書, マルチメディア通信研究会, アスキー出版局, 東京 (1997).
- 16) Dan, A. and Sitaram, D.: Buffer Management Policy for an On-Demand Video Server, IBM Research Report RC 19347 (1994).

(平成 20 年 4 月 30 日受付)

(平成 20 年 11 月 5 日採録)



後藤 佑介 (学生会員)

2005 年岡山大学工学部情報工学科卒業。2007 年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程修了。現在, 同大学院博士課程在学中。放送コンピューティングに興味を持つ。IEEE 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修了。2005 年同専攻博士後期課程修了後, 京都大学学術情報メディアセンター助教を経て, 2008 年大阪大学サイバーメディアセンター講師, 現在に至る。博士 (情報科学)。地上波デジタル放送に興味を持つ。電子情報通信学会, IEEE 各

会員。



金澤 正憲 (正会員)

1971 年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。1972 年同大学大型計算機センター助手, 助教授を経て, 1995 年同教授。現在, 京都大学学術情報メディアセンター教授。工学博士。スーパーコンピューティング, 性能評価, グリッドコンピューティングに興味を持つ。ACM, 電子情報通信学会, 日本応用数理学会各会員。



高橋 豊 (正会員)

1980 年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士課程単位取得退学。同年同大学工学部数理工学教室助手。1983 年 4 月より 1 年間, フランス INRIA (国立情報制御研究所) 客員教授。1989 年同助教授。1996 年奈良先端大情報科学研究科教授。1999 年より京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻教授。工学博士。待ち行列理論・トラヒック理論, 情報システム・情報ネットワーク等のモデル化と性能評価に関する研究に従事。2001 年 IFIP (International Federation for Information Processing) Silver Core 受賞, Telecommunication Systems 等の Associate Editor。IFIP WG6.3 Former Cochairman。Elected Full Member of IFIP WG6.3 and WG7.3。日本オペレーションズ・リサーチ学会, 応用数理学会, システム制御情報学会各会員。