

目次

第 1 章	序論	2
1.1	研究の背景	2
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	映像配信方式	4
2.1	はじめに	4
2.2	サイマルキャスト方式	4
2.3	スケーラブル方式	5
2.4	空間・時間・SNR スケーラビリティ	7
2.5	おわりに	9
第 3 章	コンテンツ配信システムモデル	10
3.1	はじめに	10
3.2	コンテンツ配信で利用される画像解像度	10
3.3	コンテンツ配信システムモデル	10
3.4	コンテンツキャッシュ方法	11
3.5	おわりに	11
第 4 章	サイマルキャスト方式と SNR スケーラブル方式のキャッシング効果の検討	13
4.1	はじめに	13
4.2	従来モデルの目的	13
4.3	従来モデルの検討	13
4.4	おわりに	16
第 5 章	サイマルキャスト方式と空間的スケーラブル方式のキャッシング効果の検討	17
5.1	はじめに	17
5.2	提案モデルの目的	17
5.3	検討	17
5.4	おわりに	19
第 6 章	結論	20
6.1	総括	20
6.2	今後の課題	21

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末の進化と、YouTube を代表とする動画配信アプリケーションやオンラインゲームといった様々なコンテンツ配信が高まり、トラフィックの爆発的な増加が深刻な問題となっている。急速なブロードバンド化が進み、光ファイバ (FFTH) による 100Mbps の有線通信や、LTE (Long Term Evolution) による 100Mbps の無線通信などを利用した、高速かつ大容量の通信が可能となっているが、まだまだそのバランスは取れていないのが現状である。

この解決策の一つとして、Information Centric Network (ICN) によるコンテンツ配信におけるキャッシュ効果が注目されている。特に、ネットワーク帯域幅を多く占有する映像コンテンツの分野では、エッジサーバでのビデオコンテンツのキャッシングが、伝送データ量の減少に有効な手段として検討されており、ICN 環境での MPEG-AVC, SVC を使用した多くの研究が報告されている [1]-[3]。

しかし、これらの研究の大半は、解像度のみに着目する空間的スケーラブル方式ではなく、画質の差分データを利用する SNR スケーラブル方式を採用している。多くの商用映像配信アプリケーションでは、画像解像度のみ異なるビデオコンテンツを使用しており、この事実から鑑みると、空間的スケーラブル方式とサイマルキャスト方式のどちらが、よりキャッシュシステムに適しているかを明らかにすることが必要であると考えられる。そこで、本論文では、サイマルキャスト方式と、空間的スケーラブル方式の、映像配信におけるコンテンツキャッシュの有効性について検討する。

1.2 研究の目的

本論文では、映像配信におけるコンテンツ取得の高速化及びコスト低減を目指し、サイマルキャスト方式と空間的スケーラブル方式の、映像配信におけるコンテンツキャッシングの有効性を検討する。

インターネットでのビデオ配信を想定したとき、ネットワークの伝送レートに応じて適応的にビットレートを割り当てる機能や、画質をコントロールできるスケーラブル機能など、映像コンテンツの分野ではさまざまな手段が検討されている [9]。その一つとして、ICN によるコンテンツ配信におけるキャッシュ効果が、伝送データ量の削減手段として検討されている。近年、ネットワーク帯域幅の大部分は、ビデオストリーミングアプリケーションにより占有されているが、その大半のアプリケーションで、いくつかのビデオ品質を提供している。例えば、YouTube のような商業的アプリケーションでは、品質を 5 種類以上用意するなど、一つのコンテンツに対してクライアントに提供する数が多く、それら全てが異なるサイズのコンテンツを持っている。つまり、異なる空間解像度が利用されている。しかし、その一方で、動画コンテンツ配信の研究分野では、SNR スケーラブル方式と呼ばれる、画質のスケール変化を扱う方式を採用した研究が大半である。

従って、本論文では、空間的スケーラブル方式を採用した場合のコンテンツキャッシュの有効性を数学的に分析し、これをサイマルキャスト方式を利用した場合の有効性と比較する。キャッシングについては、あるキャッシュコンテンツに対するヒット確率と共に、いくつかの前提に基づいて要求される伝送データ量に着目して検討する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は本章であり、本論文の背景、目的について述べた。

第2章では、本論文で扱う映像配信方式である、サイマルキャスト方式、SNR スケーラブル方式、空間的スケーラブル方式について、それぞれの特徴や本論文で採用する経緯を説明する。

第3章では、本論文で扱うコンテンツ配信システムモデルについて、利用する画像解像度や、キャッシュでのコンテンツ蓄積方法、キャッシュを利用する場合・しない場合のコンテンツ配信方法なども含め、説明する。

第4章では、サイマルキャスト方式と SNR スケーラブル方式のキャッシュ効果とその優位性について、関連研究 [4] に沿って、理論的に検討する。

第5章は、本論文で新たに条件設定したモデルに対して、サイマルキャスト方式と空間的スケーラブル方式のキャッシュ効果とその優位性について、理論的に検討する。

第6章は結論であり、本論文の総括を述べる。

第2章 映像配信方式

2.1 はじめに

本章では、まず、本論文で扱う映像配信方式である、サイマルキャスト方式、スケーラブル方式について、コンテンツ配信の流れを含めて説明する。次に、スケーラブル方式を差分対象に合わせて細分化し、SHVC (Scalable High-efficiency Video Coding) を例に、スケーラビリティの実現方法を述べる。

2.2 サイマルキャスト方式

サイマルキャスト方式における各品質情報に対する利用方法を、図 2.1 に示す。ただし、本論文では簡易化のため、品質は高・低 2 品質とする。

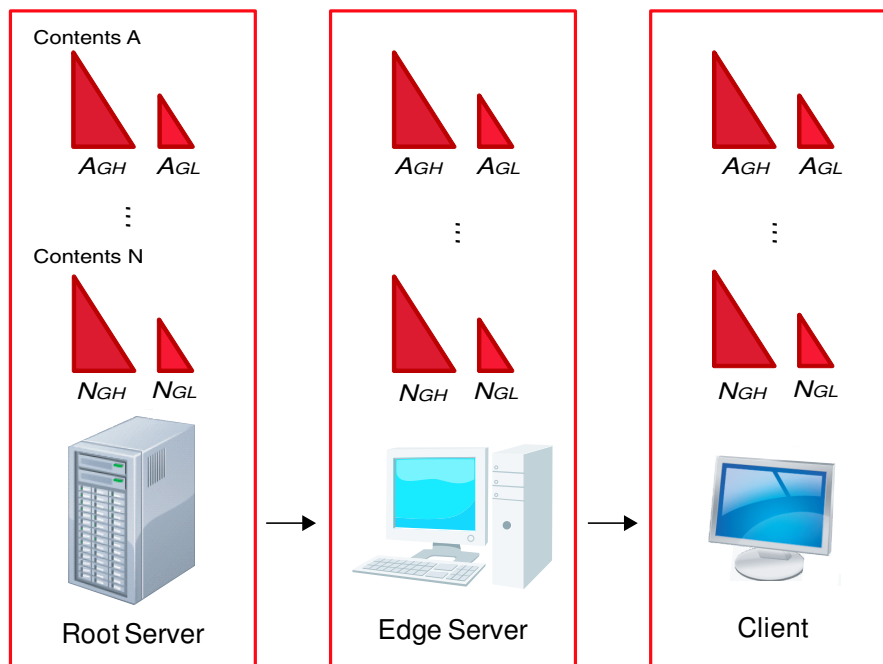


図 2.1: サイマルキャスト方式

図 2.1 に示すように、サイマルキャスト方式では、ルートサーバが各コンテンツごと高・低の 2 品質のデータを独立した情報として管理する。例えば、コンテンツ A に対しては、低品質データ: A_{GL} , 高品質データ A_{GH} , ..., コンテンツ N に対しては、低品質データ: N_{GL} , 高品質データ N_{GH} というように、独立したデータを持つ。ルートサーバは、このようにして管理するコンテンツを、クライアントの求める品質に応じ、エッジサーバを経由して伝送する。クライアントは、受け取ったコンテンツを汎用復号器にて再生する。従って、サイマルキャスト方式の特徴として、同じコンテンツ

のデータであっても、品質が異なる場合、独立した情報として管理し、伝送することが挙げられる。つまり、エッジサーバでキャッシュしている品質（例：高品質データ）と、クライアントの要求する品質が異なる（例：低品質データ）場合、ルートサーバまでデータを取りに行かねばならないというデメリットがある。逆に、キャッシュしている品質が、クライアントの要求する品質と同じ（例：高品質）であれば、ルートサーバとエッジサーバ間でのコンテンツのやり取りがない分、キャッシュ効果を得ることができる。

次に、配信時のデータの流れを整理する。最初に、キャッシュされていないコンテンツの配信の流れを考える。まず、クライアントがエッジサーバに対して、コンテンツと品質を指定して配信を要求する。エッジサーバはこれを受け、ルートサーバから、指定されたコンテンツのすべての品質データを取り出し、エッジサーバ内のキャッシュメモリに送信する。キャッシュメモリは、このうち、クライアントから指定された品質のデータのみをクライアントに送信する。エッジサーバは、各コンテンツの累積利用回数とキャッシュメモリの蓄積状態を管理しているため、ここで、キャッシュメモリの蓄積装置に累積利用回数が多いものを蓄積するよう指示する。以上を、図 2.2 に示す。

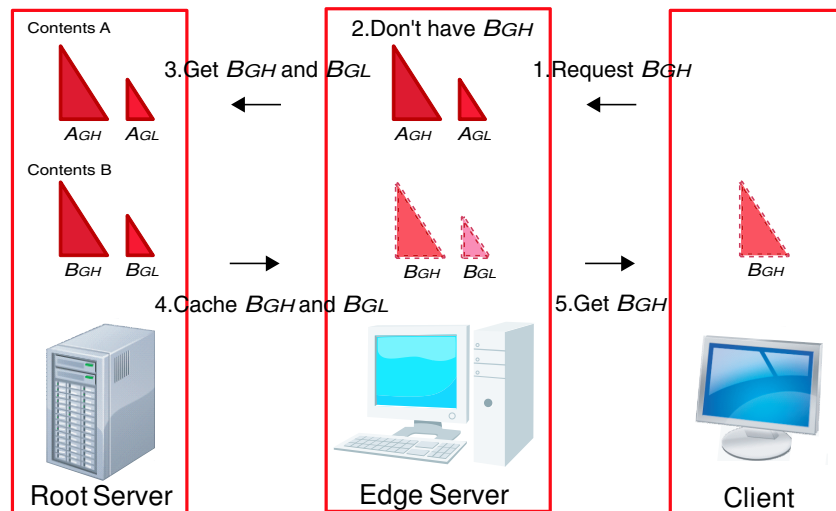


図 2.2: キャッシュされていないコンテンツの配信の流れ（サイマルキャスト方式）

次に、キャッシュされているコンテンツの配信の流れを考える。まず、クライアントがエッジサーバに対してコンテンツと品質を指定して配信を要求する。エッジサーバ内のキャッシュメモリには、要求されたコンテンツが既にキャッシュされているため、エッジサーバはキャッシュメモリに、クライアントから指定された品質データを配信するよう制御情報を送り、クライアントにデータが送信される。このため、ルートサーバとエッジサーバ間での伝送データ量が削減される。クライアントへのデータ送信後、エッジサーバはコンテンツの累積利用回数を更新し、これに合わせ累積利用回数が多いものをキャッシュメモリに蓄積するよう指示する。以上を、図 2.3 に示す。

2.3 スケーラブル方式

一般的なスケーラブル方式における各品質情報に対する利用方法を、図 2.4 に示す。ただし、こちらも、サイマルキャスト方式同様、高・低 2 品質の場合で説明する。

図 2.4 に示すように、スケーラブル方式では、各コンテンツごと低・差分の 2 データを蓄積・管理している。例えば、コンテンツ A に対しては、低階層データ： A_L 、差分データ A_H 、 \dots 、コンテンツ N に対しては、低階層データ： N_L 、差分データ N_H というようなデータを持つ。このとき、低階層

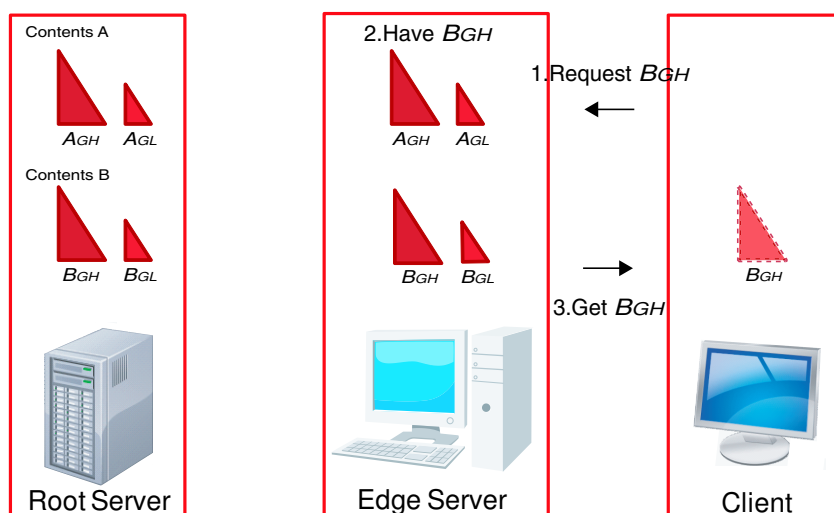


図 2.3: キャッシュされているコンテンツの配信の流れ (サイマルキャスト方式)

データは、サイマルキャスト方式と同様に蓄積・管理し、差分データは、低階層データと共に高品質再生を実現するためのサブセットとして、ルートサーバに格納しておく。クライアントでは、低階層データと差分データ、或いは差分データのみを復号することで、高品質データ A_{SS}, \dots, N_{SS} を生成し再生する。そのため、低階層データをエッジサーバにキャッシュしておけば、クライアントからの要求が低品質再生、高品質再生どちらの場合でも利用できるため、全体的なコンテンツヒット確率はサイマルキャスト方式より向上し、かつ全体的な伝送データ量もサイマルキャスト方式より削減できるというメリットがある。しかし、スケーラブル方式で必要とするデータ量は、サイマルキャスト方式に比べ大きい（例：2層空間的スケーラビリティの必要データ量—サイマルキャスト方式の10-20%増）というデメリットもある [10]。ただし、本論文では、クライアントの要求は高品質再生のみとし、キャッシュは低階層データのみ行うものとする。

次に、配信時のデータの流れを整理する。最初に、キャッシュされていないコンテンツの配信の流れを考える。まず、クライアントがエッジサーバに対して、コンテンツと品質を指定して配信を要求する。エッジサーバはこれを受け、ルートサーバから、指定されたコンテンツのすべての品質データを取り出し、エッジサーバ内のキャッシュメモリに送信する。キャッシュメモリは、このうち、クライアントから指定された品質のデータのみをクライアントに送信する。エッジサーバは、各コンテンツの累積利用回数とキャッシュメモリの蓄積状態を管理しており、ここで、キャッシュメモリの蓄積装置に累積利用回数が多いものを蓄積するよう指示する。以上を、図 2.5 に示す。

次に、キャッシュされているコンテンツの配信の流れを考える。まず、クライアントがエッジサーバに対してコンテンツと品質を指定して配信を要求する。エッジサーバ内のキャッシュメモリには、要求されたコンテンツの一部（低階層データ）がキャッシュされているため、キャッシュされていないデータ（差分データ）をルートサーバから取り出し、これとキャッシュ済みのデータ（低階層データ）をクライアントに送信するよう制御情報が送られることとなる。従って、ルートサーバとエッジサーバ間の伝送データ量が、キャッシュしていた低階層データ削減される。クライアントへのデータ送信後、エッジサーバはコンテンツの累積利用回数を更新し、これに合わせ累積利用回数が多いものをキャッシュメモリに蓄積するよう指示する。以上を、図 2.6 に示す。

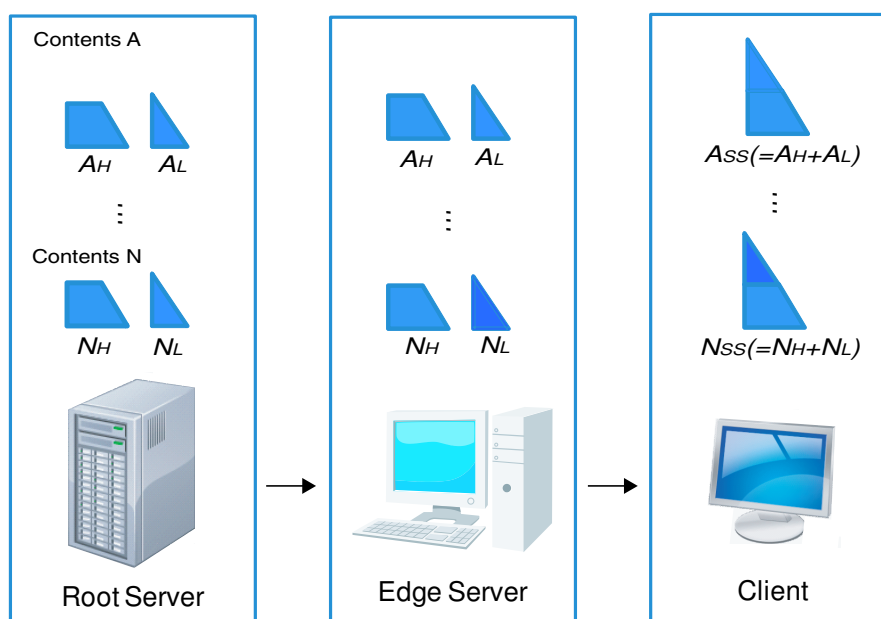


図 2.4: スケーラブル方式

2.4 空間・時間・SNR スケーラビリティ

そもそもスケーラビリティとは、解像度、画質、フレームレートなどを動的に変更できる機能である。スケーラブル符号化を用いてエンコードされたビットストリームの一部を切り出すと、フレームレートやビットレート、解像度などが異なるコンテンツを作成することができ、伝送レートが動的に変動するネットワーク配信でメリットがある。つまり、通常の圧縮方法では、伝送レート不足により画像のコマ落ちや破綻が生じるところを、スケーラブル符号化では、伝送レートに応じ最適な画質のビットストリームを切り出して伝送することができる。従って、大きな画質劣化を回避し、快適に視聴することができる。

このスケーラブル方式は、差分対象により更に細かく分けることができ、ビデオコーデックのスケーラビリティには、次の3種類がある。

- SNR スケーラビリティ：画質（SNR）の階層化
- 時間スケーラビリティ：フレームレートの階層化
- 空間的スケーラビリティ：解像度の階層化

SNR スケーラビリティは、研究分野で最も広く使われている方式である。時間スケーラビリティは、H.265/HEVC のバージョン1で既に対応している。また、空間的スケーラビリティは、本論文でターゲットとする方式である。

ここで、近年標準化が進められている SHVC (Scalable High-efficiency Video Coding) を例に、スケーラビリティの実現方法を説明する。SHVC では、スケーラビリティを実現するために、階層符号化と呼ばれる符号化方式が採用されている。階層符号化は、「ベースレイヤ」と呼ばれる基本部分と、解像度、フレームレート、画質を改善するための「エンハンスメントレイヤ」と呼ばれる付加情報から構成される。ベースレイヤは、H.265/HEVC バージョン1と互換のある部分で、この部分だけを切り出すと、HEVC バージョン1のデコーダで復元することが可能である。また、このベースレイヤに加え、解像度や、画質を改善するための差分信号をエンハンスメントレイヤとして符号化

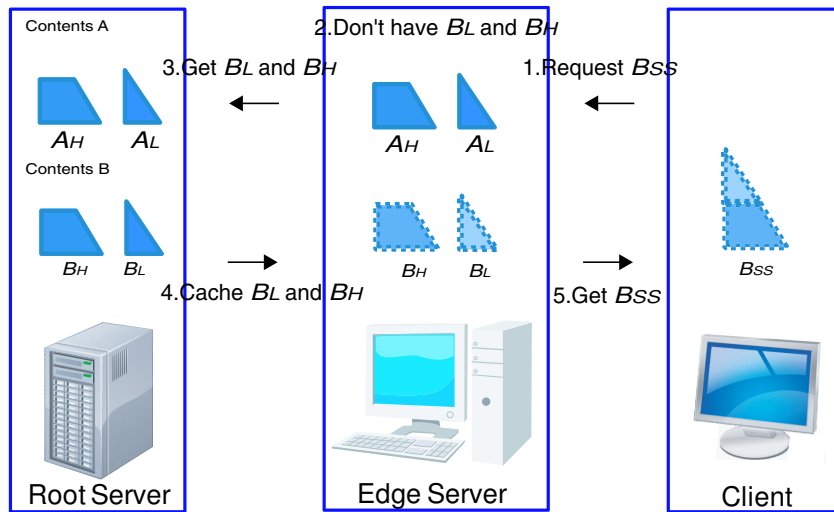


図 2.5: キャッシュされていないコンテンツの配信の流れ (スケーラブル方式)

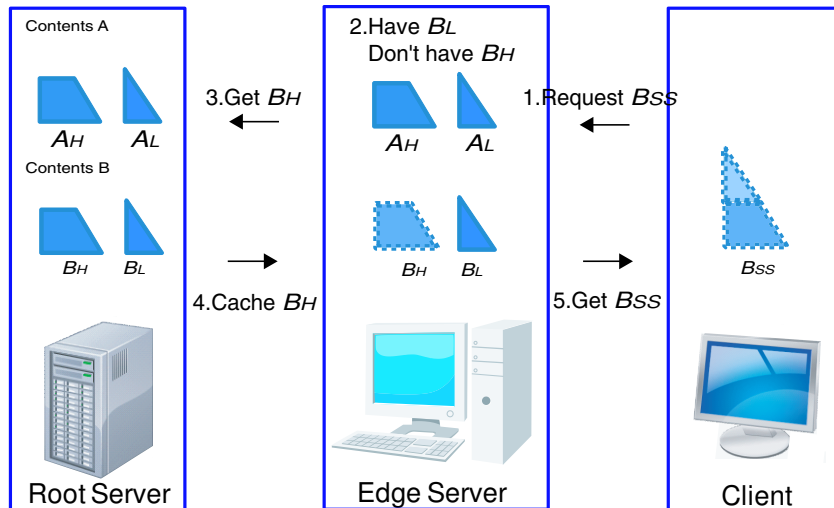


図 2.6: キャッシュされているコンテンツの配信の流れ (スケーラブル方式)

する。ベースレイヤとエンハンスメントレイヤの双方をデコードすると、高画質な画像を再生できる。この場合、エンハンスメントレイヤの画像は、ベースレイヤより高解像度（例えば、画枠が倍）の画像を用い、ベースレイヤのエンコード、デコード方法は、バージョン1と同様である。エンハンスメントレイヤは、時間方向の動き予測に追加して、同じ時刻のベースレイヤの複合画像を予測参照画像に使用でき、低解像度ではあるものの、同時刻の画像を予測参照画像に使用できるため、符号化効率を改善することができる。本論文でターゲットとなる空間的スケーラビリティでは、ベースレイヤの複合画像をアップサンプルして予測に用いる。一方、SNR スケーラビリティでは、ベースレイヤの複合画像をそのまま解像度変換せずに予測参照画像に用いる [9]。ただし、本論文では、このベースレイヤを低階層データ、エンハンスメントレイヤを差分データとして表記する。

以上のようなスケーラブル方式による伝送データ量削減効果が、どのように伝送効率に影響するかを、サイマルキャスト方式と比較しながら考察する。

2.5 おわりに

本章では、まず、サイマルキャスト方式及びスケーラブル方式について、それぞれの利点と欠点を、コンテンツ配信の流れに沿って示した。次に、スケーラビリティの実現方法と、SNR スケーラビリティ及び空間的スケーラビリティの違いを示した。

第3章 コンテンツ配信システムモデル

3.1 はじめに

本章では、まず一般的にコンテンツ配信で利用される画像解像度について説明し、それを踏まえ決定した、本論文で利用する画像解像度を示す。次に、本論文で利用するコンテンツ配信モデルについて説明し、このモデルにおけるコンテンツキャッシュ方法を示す。

3.2 コンテンツ配信で利用される画像解像度

近年のネットワーク帯域幅の大部分は、ビデオストリーミングアプリケーションにより占有されており、その大半はいくつかのビデオ品質を提供していて、それらすべてが異なるサイズの動画となっている。ユーザは、システムにより与えられているデフォルトサイズの中からいずれかを選択できるが、現在では MPEG-DASH のようにリアルタイムでの動的な自動選択に移行されている [5][6]。典型的な画像解像度を表 3.1 にまとめる。この表から、本研究では表 3.2 に示すような、2:1 の空間的スケーラブルシステムモデルに変換して利用することにする。

表 3.1: 画像の種類と解像度

種類	解像度	ビットレート
1080p	1920×1080	8Mbps
720p	1280×720	5Mbps
480p	854×480	2.5Mbps
360p	640×360	1Mbps
240p	426×240	指定なし

表 3.2: 可能なスケーラブルシステム

種類	解像度	ビットレート
720p - 360p	1280×720 - 640×360	5Mbps, 1Mbps
480p - 240p	854×480 - 426×240	2.5Mbps, 0.5Mbps

3.3 コンテンツ配信システムモデル

次に、本論文で使用するコンテンツ配信システムモデルを、図 3.1 に示す。

図中のルートサーバは、サイマルキャスト方式の場合、低及び高品質データを持つ。一方、スケーラブル方式では、低階層及び差分データを持つ [4]。これを、エッジサーバは、サイマルキャスト方式の場合高品質データを、スケーラブル方式の場合低階層データを、エッジサーバ内のキャッシュ内

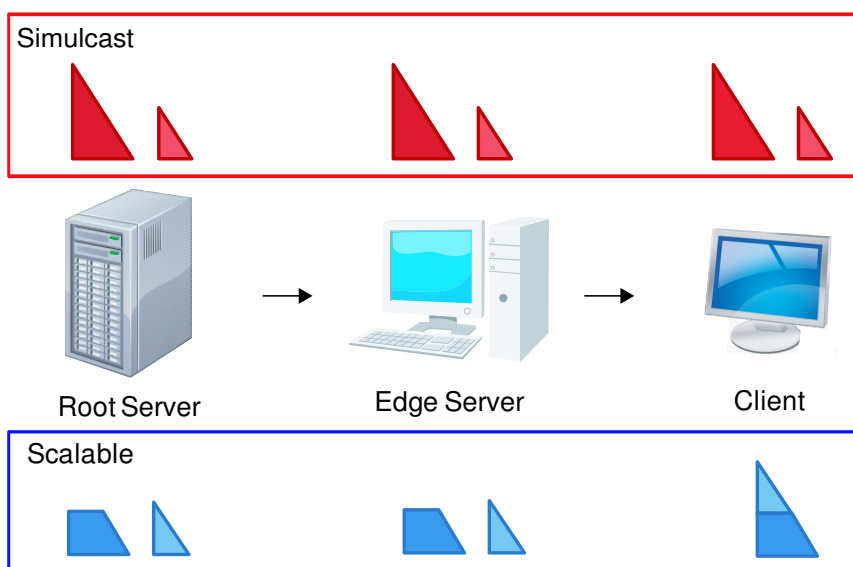


図 3.1: コンテンツキャッシュ及び配信システムモデル

に格納することができる。そして、エッジサーバを通してクライアントにコンテンツを配布する。ただし、本論文では、クライアントの要求が高品質再生であるものとする。

3.4 コンテンツキャッシュ方法

この節では、一般的なコンテンツキャッシュにおけるコンテンツの一時保管の処理手順について説明する。

まず、エッジサーバは、クライアントからコンテンツ及び品質要求を受けると、キャッシュ内に、そのコンテンツデータがあるか否かを確認する。データが存在する場合はキャッシュから、存在しない場合はルートサーバからエッジサーバを経由して、クライアントにコンテンツデータを送る。この時、エッジサーバは、各コンテンツに対し、クライアントのコンテンツ利用回数を記憶する。利用回数が多い順に、キャッシュ内のコンテンツの蓄積優先度を更新し、キャッシュ容量を閾値として、実際に蓄積するコンテンツの更新処理を行う。この更新処理は、クライアントへの伝送終了後に行うものとして考える。品質情報については、本論文では、ルートサーバからエッジサーバへの伝送ではすべての品質情報を、エッジサーバからクライアントへの伝送では必要なコンテンツのみ伝送するものとして考える。また、本論文では、スケーラブル構成を利用することの意義を示すので、使用経過時間やデータ量などを考慮した、他のコンテンツキャッシュ方式については扱わない。以上の手順を、図 3.2 に示す。

3.5 おわりに

本章では、まず一般的にコンテンツ配信で利用される画像解像度について説明し、それを踏まえ本論文で利用する画像解像度を決定した。次に、本論文で利用するコンテンツ配信モデルにおけるコンテンツキャッシュ方法を示した。

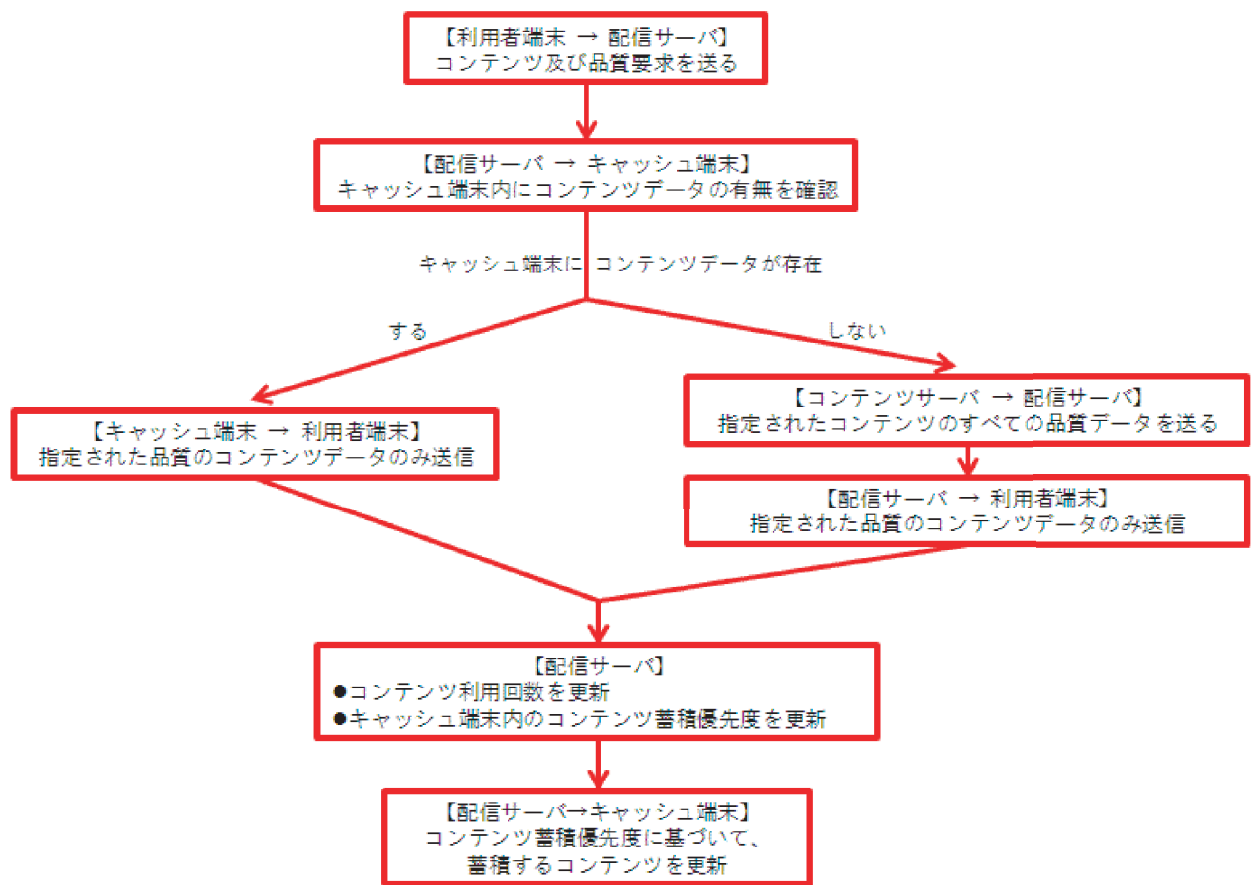


図 3.2: コンテンツキャッシュにおけるコンテンツの一時保管手順

第4章 サイマルキャスト方式とSNRスケール方式のキャッシング効果の検討

4.1 はじめに

本章では、サイマルキャスト方式とスケール方式のキャッシングにおける優位性に関する研究 [4] に基づき、まず従来モデルの目的を述べ、次に従来モデルにおける AVC 及び SVC 環境でのキャッシング効果を比較・検討する。

4.2 従来モデルの目的

従来モデルにおいて、もしクライアントの要求に対し、エッジサーバまたはクライアントのキャッシュメモリに一時保管されたコンテンツを利用できれば、エッジサーバの負荷を軽減できると共に、エッジサーバとキャッシュメモリ間の伝送回数を削減することができる。すなわち、従来モデルにより、ネットワーク上を流れるコンテンツ伝送データ量、伝送待ち時間などを削減できる。そのため、本章では映像配信におけるコンテンツ取得の高速化及びコスト低減を目指し、サイマルキャスト方式と SNR スケール方式の、映像配信におけるコンテンツキャッシングの有効性を検討する。

4.3 従来モデルの検討

まず、二層モデルのサイマルキャスト方式とスケール方式のキャッシング効果を比較するにあたり、いくつかの定義をする。

サイマルキャスト方式における低品質及び高品質データ量をそれぞれ、 D_{GL}, D_{GH} とする。空間的スケール方式または SNR スケールシステムにおける低階層及び差分データ量をそれぞれ、 D_L, D_H とし、総データ量を $D_{SS} = D_L + D_H$ とする。簡単に考えるため、本章では $D_{SS} = D_{GH}$ として、検討を進める。

ここで、コンテンツの一部をエッジサーバのキャッシュメモリに配置することを考える。これにより、クライアントへの伝送データ量は、キャッシュコンテンツに対するヒット確率に応じて単調減少する。非階層データ及び階層データ利用時の伝送データ量は、あるキャッシュコンテンツに対するヒット確率 p を使って、それぞれ $g(p), h(p)$ と表せられる。総数 N 個のコンテンツに対する伝送データ量を $D_{Tra}(z, N)$ と定義し、 $z = 0$ のときは低品質、 $z = 1$ のときは高品質をそれぞれ表すものとする、コンテンツヒット確率と伝送データ量の関係は図 4.1 のようになる。

この図では、 $p = 0$ でコンテンツを全くキャッシュしていない状態を示しており、高品質レイヤのみアクセスがある場合には、 $A[\text{bit}] (A = D_{Tra}(1, N))$ のデータ伝送が必要となる。逆に、 $p = 1$ なら全てのデータがエッジサーバのキャッシュメモリ内に存在するため、データを送信する必要はない。これを、直線 $g(p)$ で示す。また、スケール方式により、低階層データのみがキャッシュされる場合、その遷移を直線 $h(p)$ で示す。この場合、たとえば $B[\text{bit}] (B = D_{Tra}(0, N))$ の低階層データが全て

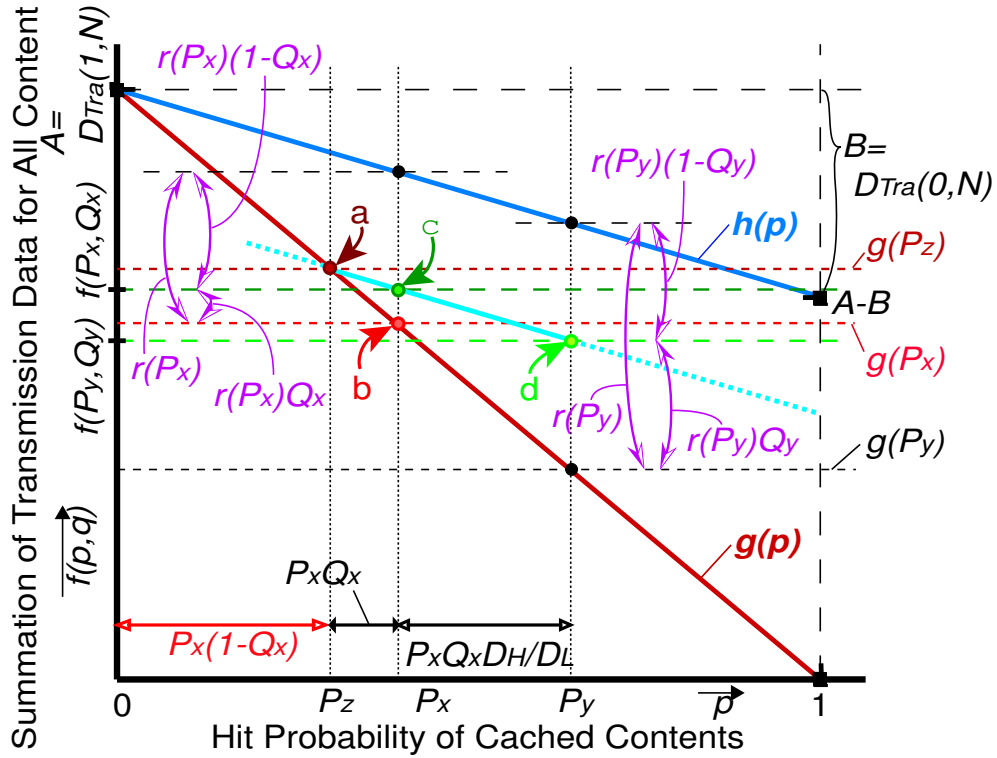


図 4.1: 伝統モデルにおけるコンテンツヒット確率と伝送データ量の関係

キャッシュされていたとしても、高品質再生のためには、差分データ分の $A - B[\text{bit}]$ クライアントに送信する必要がある。 $g(p)$ 及び $h(p)$ は、次のように定義される。

$$\begin{aligned} g(p) &= -Ap + A, & A &= D_{Tra}(1, N) = ND_{GH} \\ h(p) &= -Bp + A, & B &= D_{Tra}(0, N) = ND_L \end{aligned} \quad (4.1)$$

従って、次のように書き換えられる。

$$A = \frac{D_{GH}}{D_L} B \quad (4.2)$$

ここで、 q を低品質レイヤ、 $(1 - q)$ を高品質レイヤのキャッシュデータ保有割合として、それぞれ定義する。ヒット確率 p のとき、低品質保有率 q における伝送データ量を $f(p, q)[\text{bit}]$ とすると、以下のようになる。

$$f(p, q) = (1 - q)g(p) + qh(p) \quad (4.3)$$

$h(p)$ と $g(p)$ の間の差分関数 $r(p)$ は、次式のように与えられる。

$$r(p) = h(p) - g(p) = -Bp + A - (-Ap + A) = (A - B)p \quad (4.4)$$

ここで、ヒット確率 P_z が、高品質レイヤのみのキャッシュに対するヒット確率であると仮定すると、 P_z に対する伝送データ量 $f(P_z, 0) = q(P_z)$ は、図中の点 a に示す位置となる。この点 a を起点に、ヒット確率を P_x まで増加させ、このとき新たにヒットしたコンテンツが全て高品質レイヤの場合、 P_x の伝送データ量は $f(P_x, 0) = g(P_x)$ となり、これを点 b に示す。一方、新たにヒットしたコンテンツが全て低品質レイヤの場合、 P_x の伝送データ量は $f(P_x, Q_x)$ となり、これを点 c に示す。

す。このとき、新たなヒットがすべて、比 Q_x で表される低品質レイヤになって以降の確率 P_x は、 $P_x = P_z + P_x Q_x$ で表せる。

いま、キャッシュするコンテンツが、高品質レイヤのみであった点 a と、そこから低品質レイヤのみのキャッシュに変更された後の点 d とのキャッシュ効果を比較する。図中の点 d が、 P_x と傾き $\frac{D_H}{D_L}$ から推定される確率 P_y を持つと仮定すると、以下のように定義できる。

$$\begin{aligned} P_y &= P_x + \left(\frac{D_H}{D_L}\right) P_x Q_x \\ &= P_z + P_x Q_x + \left(\frac{D_H}{D_L}\right) P_x Q_x \\ &= \frac{(D_H + D_L) P_x Q_x + D_L P_z}{D_L} \\ &= \frac{(D_H + D_L) P_x Q_x - D_H P_z}{D_L} \quad (\text{ただし、} P_z = P_x (1 - Q_x) \text{ からとする}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

キャッシュヒット率 P_x, P_y と、低品質レイヤの比率 Q_x, Q_y は、次のような関係を持つ。

$$\begin{aligned} r(P_x) (1 - Q_x) &= r(P_y) (1 - Q_y) \\ P_x (1 - Q_x) &= P_y (1 - Q_y) \end{aligned} \quad (4.6)$$

以上より、次の式が得られる。

$$\begin{aligned} P_x &= \left(\frac{1 - Q_y}{1 - Q_x}\right) P_y & P_y &= \left(\frac{1 - Q_x}{1 - Q_y}\right) P_x \\ Q_x &= \left\{ \frac{1 - (1 - Q_y)}{P_x} \right\} P_y & Q_y &= \left\{ \frac{1 - (1 - Q_x)}{P_y} \right\} P_x \end{aligned} \quad (4.7)$$

また、 P_x, P_y におけるキャッシュデータ比及びキャッシュヒット率は、2つのスケーラブルレイヤのデータ量に比例する。

$$P_y Q_y : P_x Q_x = (D_L + D_H) : D_L \quad (4.8)$$

従って、次のようになる。

$$P_y = \frac{P_x Q_x (D_L + D_H)}{Q_y D_L} \quad (4.9)$$

式 (7), (9) から、次の式が得られる。

$$Q_y = \frac{Q_x (D_L + D_H)}{D_L + Q_x D_H} \quad (4.10)$$

ここで、点 b と比較したとき、点 d で必要な伝送データ量をみてみると、

$$\begin{aligned} g(P_x) - f(P_y, Q_y) &= -AP_x + A - \{(1 - Q_y) g(P_y) + Q_y h(P_y)\} \\ &= -AP_x + A - \{(1 - Q_y) (-AP_y + A) + Q_y (-BP_y + A)\} \\ &= A(P_y - P_x) + (B - A) P_y Q_y \\ &= A \left\{ \frac{P_x Q_x (D_L + D_H)}{Q_y D_L - P_x} \right\} + (B - A) \left\{ \frac{P_x Q_x (D_L + D_H)}{Q_y D_L} \right\} Q_y \\ &= \frac{P_x Q_x}{D_L} \{B(D_L + D_H) - AD_L\} \end{aligned} \quad (4.11)$$

もし、

$$B(D_L + D_H) - AD_L \geq 0 \quad (4.12)$$

なら、スケーラブルなキャッシュは、以下のとき有効であると言える。

$$D_{SS} = D_L + D_H \geq D_{GH} \quad (4.13)$$

この結果は、参考文献 [4] の結果と矛盾する。しかし、本論文では $D_{SS} = D_{GH}$ という仮定から始めているので、式 (5.13) がイコールの場合のみ正しいと言える。したがって、これはスケーラブル方式が、全くキャッシュ効果を向上させられていないことを意味しており、また参考文献 [4] と同じ結論であることを意味している。この結果は、図 2 の点 b 及び点 d で必要な伝送データ量が同量であることから確認できる。

4.4 おわりに

本章では、サイマルキャスト方式と SNR スケーラブル方式のキャッシングにおける優位性に関する研究 [4] で提案されているモデルに基づき、AVC と SVC 環境でのキャッシング効果を比較した。 $D_{SS} = D_{GH}$ という仮定から始めていたため、式 (4.13) がイコールの場合のみ正しいと言え、参考文献 [4] 同様、SNR スケーラブル方式がキャッシュ効果を向上させられないことを確認した。

第5章 サイマルキャスト方式と空間的スケーラブル方式のキャッシング効果の検討

5.1 はじめに

本章では、SNR スケーラブル方式を利用した前章から、空間的スケーラブル方式に変更し、提案モデルでのキャッシングにおける優位性を、サイマルキャスト方式と比較して検討する。まず提案モデルの目的を述べ、次に提案モデルにおけるサイマルキャスト方式及び空間的スケーラブル方式でのキャッシング効果を比較・検討する。

5.2 提案モデルの目的

本章では、実際の映像配信で、いくつかの異なる画像解像度を使用している事実から鑑み、前章で提示した SNR スケーラブル方式を利用した従来モデルから、空間的スケーラブル方式を利用した本提案モデルへ変更する。これにより、より実際に近いモデルでの評価を行うため、従来モデルより現状のサービスに合致した評価を得ることができる。従って、本章では映像配信におけるコンテンツ取得の高速化及びコスト低減を目指し、サイマルキャスト方式と空間的スケーラブル方式の、映像配信におけるコンテンツキャッシングの有効性を検討する。

5.3 検討

ほとんどの場合、空間的スケーラブル方式は2層構造の場合に限定される。拡大画像のサイズは、水平及び垂直方向に2.0倍までと制限されおり、これはスケーラブルビデオ符号化規格のプロファイルに記載されている。

2層空間的スケーラビリティのデータ量は、サイマルキャスト方式より10-20%多くのデータを必要とすることが知られている [7][8]。そのため、この節では、第4章で示したモデルから、 $D_{SS} = \alpha D_{GH}$ ($\alpha \geq 1.0$, *ex.* 1.1 – 1.2) とする図 5.1 に変更し、その他の条件は前節で述べたものと同様にして、キャッシングの影響を検討する。以下に、図 5.1 を示す。

図より、 $g(p)$ 、 $h(p)$ は次のように定義される。

$$\begin{aligned} g(p) &= -Ap + A, & A &= D_{Tra}(1, N) = ND_{GH} \\ h(p) &= -Bp + \alpha A, & B &= D_{Tra}(0, N) = ND_L \end{aligned} \quad (5.1)$$

$h(p) - g(p)$ 間の差の関数 $r(p)$ は、次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} r(p) &= h(p) - g(p) = -Bp + \alpha A - (-Ap + A) \\ &= (A - B)p + (\alpha - 1)A \end{aligned} \quad (5.2)$$

式 (4.5)-式 (4.10) と同様の議論が成り立ち、式 (5.11) についてはパラメータ α が現れる。

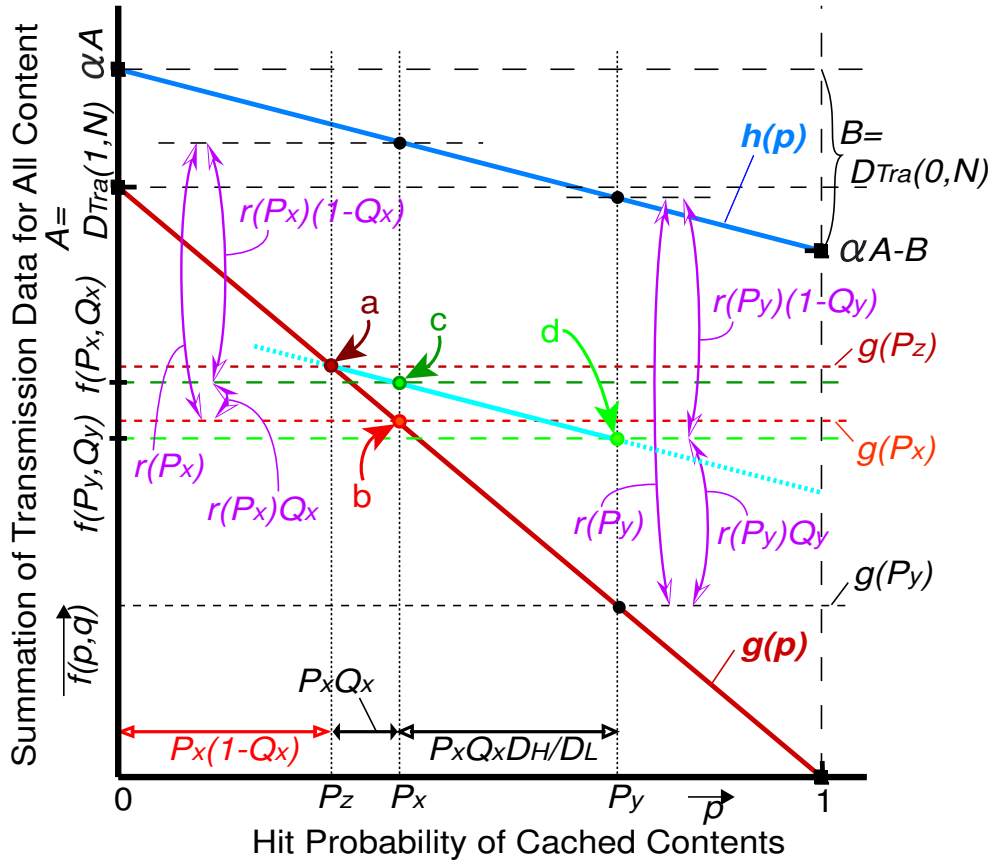


図 5.1: 提案モデルにおけるコンテンツヒット確率と伝送データ量の関係

$$\begin{aligned}
 g(P_x) - f(P_y, Q_y) &= -AP_x + A - \{(1 - Q_y)g(P_y) + Q_y h(P_y)\} \\
 &= -AP_x + A - \{(1 - Q_y)(-AP_y + A) + Q_y(-BP_y + \alpha A)\} \\
 &= A(P_y - P_x) + (B - A)P_y Q_y + (1 - \alpha)AQ_y \\
 &= \frac{P_x Q_x}{D_L} \{B(D_L + D_H) - AD_L\} - (\alpha - 1)AQ_y \\
 &= \frac{P_x Q_x}{D_L} \left\{ B(D_L + D_H) - AD_L - (\alpha - 1) \frac{AQ_y D_L}{P_x Q_x} \right\} \\
 &= \frac{P_x Q_x}{D_L} \left[B(D_L + D_H) - AD_L \left\{ 1 + (\alpha - 1) \frac{Q_y}{P_x Q_x} \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

ここで、式(5.1)を代入し、 $D_{SS} = \alpha D_{GH}$ の関係を使用する。

$$\begin{aligned}
 g(P_x) - f(P_y, Q_y) &= \frac{P_x Q_x}{D_L} \left[ND_L D_{SS} - ND_{GH} D_L \left\{ 1 + (\alpha - 1) \frac{Q_y}{P_x Q_x} \right\} \right] \\
 &= P_x Q_x ND_{GH} \left[\alpha - \left\{ 1 + (\alpha - 1) \frac{Q_y}{P_x Q_x} \right\} \right] \\
 &= P_x Q_x ND_{GH} (\alpha - 1) \left(1 - \frac{Q_y}{P_x Q_x} \right) \leq 0
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

従って、右辺は常に0またはそれ以下になる。結果として、空間的スケラブル方式は、エッジサーバまたはクライアントのキャッシュメモリに、低レイヤデータのみ記憶されている場合、サイマルキャスト方式より効果的なキャッシュを提供しないことが判明した。

5.4 おわりに

本章では、現状のサービスに適した空間的スケーラブル方式と、サイマルキャスト方式のキャッシングにおける優位性を比較・検討した。 $D_{SS} = \alpha D_{GH}$ という仮定から始めていたため、式(5.4)が0またはそれ以下となり、前章同様、空間的スケーラブル方式がキャッシュ効果を向上させられないことが確認できた。

第6章 結論

6.1 総括

第1章では、本研究の背景と目的、及び本論文の構成について述べた。

近年、急速なブロードバンド化が進み、光ファイバや、LTE といった高速かつ大容量の通信が可能となっているものの、モバイル端末の進化や、動画配信アプリケーションなど様々なコンテンツ配信によるトラフィックの爆発的な増加により、まだまだそのバランスは取れていないのが現状である。解決策として、ICN によるコンテンツ配信におけるキャッシュ効果が注目されており、特に映像コンテンツの分野では、エッジサーバでのビデオコンテンツのキャッシングが、伝送データ量の減少に有効な手段として検討され、多くの研究が報告されている。しかし、研究の大半では、SNR スケーラブル方式が採用されており、これは多くの商用映像配信アプリケーションで画像解像度のみ異なるビデオコンテンツが利用されている現状に適していない。そこで、サイマルキャスト方式と、空間的スケラブル方式の、映像配信におけるコンテンツキャッシュの有効性について検討することの必要性を述べた。

第2章では、本論文で扱う映像配信方式である、サイマルキャスト方式、スケラブル方式について述べた。

サイマルキャスト方式では、同じコンテンツのデータであっても、品質が異なる場合独立した情報として管理し、伝送する。これにより、キャッシュしている品質がクライアントの要求と異なる場合、ルートサーバまでデータを取りに行かねばならないという欠点がある分、要求と同じであればルートサーバ及びエッジサーバ間のやり取りを行わなくて済むという利点があることを示した。一方、スケラビリティ方式の場合、クライアントの要求が低品質・高品質再生どちらの場合でもキャッシュ効果があり、また低階層データのみキャッシュする分、1コンテンツあたりのキャッシュメモリ使用量を削減できるため、全体的なコンテンツヒット確率が向上するという利点があることを示し、また、スケラブル方式で必要とするデータ量が、サイマルキャスト方式に比べ大きいというデメリットも示した。スケラブル方式については、さらに細分化し、画質の差分を作る SNR スケラビリティ、フレームレートを階層化する時間スケラビリティ、解像度のみ差分を作る空間的スケラビリティについて紹介し、実際の映像配信では画像サイズのみ異なる現状から、SNR スケラビリティより空間的スケラビリティの方が適していることを示した。

第3章では、コンテンツ配信で利用される一般的な画像解像度の説明及び本論文で利用する解像度の説明と、本論文で使うコンテンツ配信システムモデル及びそのキャッシング方法を示した。

現在、ビデオ品質は MPEG-DASH のようにリアルタイムでの動的な自動選択型に移行されているが、本研究では 2:1 の空間的スケラブルシステムモデルを採用した。このシステムモデルにおいて、サイマルキャスト方式とのキャッシュ品質の違いなどを説明し、キャッシュ方法の処理手順を示した。

第4章では、サイマルキャスト方式と SNR スケラブル方式のキャッシングにおける優位性に関する研究 [4] に基づき、従来モデルの目的及びキャッシング効果の検討を行った。

研究 [4] に基づき、 $D_{SS} = D_{GH}$ という仮定から始め、サイマルキャスト方式と SNR スケラブル方式のキャッシング効果を比較した。コンテンツの一部をエッジサーバのキャッシュメモリに配置

することを考えたとき、最終式 (4.13) がイコールの場合のみ正しいと言え、参考文献 [4] 同様、SNR スケーラブル方式がキャッシュ効果を向上させられないことを明らかにした。

第5章では、前章で採用した SNR スケーラブル方式から、現状のサービスに適した空間的スケラブル方式に変更し、提案モデルで、サイマルキャスト方式とのキャッシングの優位性を比較した。

空間的スケラブル方式は2層構造の場合に限定される。拡大画像のサイズは、水平及び垂直方向に2.0倍までと制限されており、これはスケラブルビデオ符号化規格のプロファイルに記載されている。

2層空間的スケラビリティのデータ量は、ほとんどの場合サイマルキャスト方式より10-20%多くのデータを必要とするため、第4章で示したモデルから、 $D_{SS} = \alpha D_{GH}$ ($\alpha \geq 1.0$, ex. 1.1 – 1.2) という仮定から始め、サイマルキャスト方式と空間スケラブル方式のキャッシング効果を比較した。最終式 (5.4) が0またはそれ以下となり、前章同様、低レイヤのデータのみがエッジサーバまたはクライアントのキャッシュメモリに記憶されている場合、空間的スケラブル方式がサイマルキャスト方式より効果的なキャッシュを提供できないことを明らかにした。

第6章は本章であり、本論文の総括及び今後の課題について述べる。

6.2 今後の課題

今後検討すべき課題を以下に示す。

本論文では、ICN 環境でのコンテンツ配信における、サイマルキャスト方式及びスケラブル方式を利用したキャッシング効果について検討した。しかし、現在のビデオストリーミングアプリケーションでは、MPEG-DASH や CCN といった様々な環境が考えられる。よって、それぞれの環境での、サイマルキャスト方式とスケラブル方式を利用したキャッシングの有効性、及び解像度の差分のみを利用する空間スケラビリティにおけるキャッシングの有効性について検討する余地がある。また、本論文では、理論的に証明しただけであり、実験による裏付けを行っていない。よって、本論文での検討及び前述の今後の課題について、実験による裏付け及び実証が、今後の課題である。

謝辞

これらの結果につながる研究は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 及び欧州委員会第7次研究枠組み計画 (FP7) が、Contract No.167 のもとに行っている取り組みから研究費支援を受けています。

本研究の機会及び素晴らしい環境を与えてくださり、貴重な時間を割いて研究の方向性をご指導いただきました渡辺裕教授、ならびに中里秀則教授に、心より感謝致します。また、本研究を進める上で重要参考資料を提供してくださいました児玉明教授に、深く御礼申し上げます。

貴重なご意見、様々なご提案をいただきました AVS ゼミの皆様にも、心より御礼申し上げます。

最後に、私をここまで育ててくださった家族に、心から感謝致します。

参考文献

- [1] Christopher Muller, Daniele Renzi, Stefan Lederer, Stafano Battista, and Christian Timmerer: “Using Video Coding for Dynamic Adaptive Streaming over HTTP in Mobile Environments,” 20th EUSIPCO 2012, pp. 2208-2212, Aug. 2012
- [2] Hari Kalva, Velibor Adzic, and Borko Furht: “Comparing MPEG AVC and SVC for Adaptive HTTP Streaming,” IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.158-159, Jan. 2012.
- [3] Christian Sieber, Tobias Hossheld, Thomas Zinner, Phuoc Tran-Gia, and Christian Timmerer: “Implementation and User-centric Comparison of a Novel Adaptation Logic for DASH with SVC,” IFIIP/IEEE IM2013 Workshop, 1st International Workshop on Quality of Experience Centric Management (QCMAN), pp.1318-1323, May 2013
- [4] 児玉明: “キャッシュ型コンテンツ配信における階層データによる映像品質管理方法に関する一考察,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.42, No.1, pp.5-14, January 2013
- [5] Google You Tube help page: “Advanced encoding settings,” <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=en#1722171>
- [6] Google You Tube help page: “Live encoder settings, bitrates and resolutions,” <https://support.google.com/youtube/answer/2853702?hl=en#2853702>
- [7] Heiko Schwarz, Detlev Marpe and Thomas Wiegand: “Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard,” IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 17, No. 9, pp.1103-1120 September 2007
- [8] C. Andrew Segall and Gary J. Sullivan: “Spatial Scalability within the H.264/AVC Scalable Video Coding Extension,” IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 17, No. 9, pp.1121-1135 September 2007
- [9] 大久保榮: “H.265/HEVC 教科書,” 株式会社インプレスジャパン, pp.1-319, October 2013
- [10] Michael Zink: “SCALABLE VIDEO ON DEMAND,” WILEY, pp.1-231, August 2005

目次

2.1	サイマルキャスト方式	4
2.2	キャッシュされていないコンテンツの配信の流れ（サイマルキャスト方式）	5
2.3	キャッシュされているコンテンツの配信の流れ（サイマルキャスト方式）	6
2.4	スケーラブル方式	7
2.5	キャッシュされていないコンテンツの配信の流れ（スケーラブル方式）	8
2.6	キャッシュされているコンテンツの配信の流れ（スケーラブル方式）	8
3.1	コンテンツキャッシュ及び配信システムモデル	11
3.2	コンテンツキャッシュにおけるコンテンツの一時保管手順	12
4.1	伝統モデルにおけるコンテンツヒット確率と伝送データ量の関係	14
5.1	提案モデルにおけるコンテンツヒット確率と伝送データ量の関係	18

表目次

3.1 画像の種類と解像度	10
3.2 可能なスケーラブルシステム	10