

卒業論文 2008年度 (平成20年度)

通信品質適応型
IP マルチキャスト DV リレーの設計と実装

慶應義塾大学 環境情報学部

氏名：峯木 巖

指導教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井 純

徳田 英幸

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

重近 範行

Rodney D. Van Meter III

植原 啓介

三次 仁

中澤 仁

平成21年2月10日

通信品質適応型 IP マルチキャスト DV リレーの設計と実装

本研究では、通信品質適応型 IP マルチキャスト DV リレーの設計を行い、リアルタイムストリーミングコンテンツ配信において、多様な環境にいる受信者への配信の効率化の実現するシステムを構築した。

インターネット上においてリアルタイムなコンテンツ配信を多数の受信者に対して実現する場合、送信サーバやネットワークの負荷を軽減するために IP マルチキャストを利用することが効果的である。しかし IP マルチキャストでは、それぞれの受信者に応じてデータ品質制御を行うこと、すなわち各受信者におけるストリーム通信状況を把握し、その通信状況に応じてデータ転送レートなどを制御して最適な通信品質を維持することは困難であり、これを克服するシステムが必要である。

本研究では、IP マルチキャストにより配信されるリアルタイム DV ストリームを経路上にあるサーバがユニキャストに変換し、ストリーミングコンテンツ受信者状況に応じて通信サーバや品質を変化させる DV データ転送システムを提案し実現する。これにより、IP マルチキャスト通信の各受信者に対し、配信データ品質の劣化が少ない高品質・大容量な配信を行うことを可能とする。これら一連の作業は受信者による特別な操作なく行われるため、多数の受信者に対し配信データ品質の劣化が少ない効率的な配信を行うことが可能となり、インターネット上におけるより活発な情報配信・取得という活動を行うことが可能となる。

キーワード

1. ストリーミング, 2. 適応通信, 3. マルチキャスト

慶應義塾大学 環境情報学部

峯木 巖

<p>Designing and Implementation of IP Multicast Dvrelay to Adapt the communications quality</p>

In the research, IP multicast DV relay to adapt communication quality was designed, and the system that achieved the efficiency improvement of the delivery to the receiver designed. A system that achieved existed in various environments in the realtime streaming contents delivery was also constructed.

It is effective to use IP multicast to reduce the load of the streaming server and the network when the realtime streaming contents delivery is achieved for many receivers on the Internet. However, IP multicast is not capable for controlling the quality of the contents according to various receiver's environment. A system that will overcome these issue are required.

In this research, adaptive streaming regarding reciever feedback and server load is proposed and realized. The intermediate server in the network path translates realtime IP multicast DV stream into an unicast stream. By using this system, large scale and variable quality video streaming with low loss can be realized. This system does not require difficult configuration at the reciever application. Therefore, high quality data with low loss can be distributed to many recievers, and will enhance active information propagation/retrieve.

Keywords :

1. STREAMING, 2. adaptive communication, 3. IP Multicast

Keio University, Faculty of Environmental Information

Gen Mineki

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	要素技術	4
2.1	IP ネットワークにおける映像・音声配信技術	4
2.1.1	ストリーミング	4
2.2	通信技術	4
2.2.1	IP マルチキャスト	4
2.2.2	CDN	7
第3章	関連研究と問題点	8
3.1	アプリケーションレイヤーマルチキャスト	8
3.2	アプリケーション層での QoS マルチキャストプロトコル	8
3.3	CoopNet	8
3.4	Dvrelay	9
3.5	階層化マルチキャスト	9
3.6	アプリケーションレイヤーマルチキャスト上での階層符号化	10
第4章	アプローチ	13
4.1	本研究の要求事項	13
4.2	システム概要	13
4.2.1	基礎概要	13
4.2.2	コンテンツ品質状態の監視と対処	14
4.2.3	IP マルチキャスト配信のユニキャスト配信への変換	16
4.2.4	DVTS(Digital Video Transport System)	17
4.2.5	DV フォーマット	18
第5章	設計	19
5.1	設計要件	19
5.1.1	全体構成	19
5.2	動作概要	21
5.2.1	管理サーバ	21

5.2.2	中継サーバ	22
5.2.3	受信者	23
5.3	配信制御機構の機能	24
5.3.1	情報取得モジュール	24
5.3.2	情報協議モジュール	24
5.3.3	情報管理モジュール	25
5.3.4	リンク情報モジュール	26
5.3.5	映像配信制御モジュール	26
5.4	映像配信機構の機能	27
5.4.1	IP マルチキャスト - ユニキャスト変換	27
5.4.2	配信データの複製	27
5.4.3	配信データの品質制御	27
5.5	本章のまとめ	28
第 6 章	実装	29
6.1	実装環境	29
6.2	実装概要	29
6.2.1	情報取得	29
6.2.2	情報協議	31
6.2.3	リンク情報	31
6.2.4	情報管理	32
6.2.5	DVTS 制御	35
第 7 章	評価	38
7.1	評価概要	38
7.2	本システムの実現した機能	38
7.3	テスト環境	39
7.4	実験	40
7.4.1	実験 1: 狭帯域にいる受信者への配信	40
7.4.2	実験 2: トラフィックが競合している受信者への配信	41
7.4.3	実験 3: 配信能力が低下した中継サーバからの配信	42
7.4.4	実験 4: 負荷が高い中継サーバからの配信	44
7.5	実験のまとめと考察	47
第 8 章	結論	48
8.1	まとめ	48
8.2	今後の課題	48

目次

2.1	ストリーミング概要	5
2.2	ユニキャスト概要	5
2.3	マルチキャスト概要	6
3.1	デジタルコンテンツの階層符号化概要図	10
3.2	マルチキャスト概要図	11
3.3	階層化マルチキャスト概要図	12
4.1	配信モデル	14
4.2	DVTS 概要	17
4.3	DV フォーマット	18
5.1	全体モジュール概要	20
5.2	管理サーバモジュール概要	21
5.3	中継サーバモジュール概要	22
5.4	受信者モジュール概要	23
5.5	送信者 1 台：受信者 1 台のストリームの複製	28
5.6	送信者 1 台：受信者 n 台のストリームの複製	28
5.7	品質制御無し	28
5.8	品質制御有り	28
6.1	Load Average の取得	30
6.2	パケットロスの取得	31
6.3	node_info 構造体	33
6.4	管理サーバ側生存確認	34
6.5	中継サーバ・受信者側生存確認	35
6.6	dest_list_obj 構造体	36
6.7	フレームレートコントロール	37
7.1	テスト用ネットワークの概要	39
7.2	実験 1 のネットワーク概要	40
7.3	受信者 1 のパケットロス率と中継サーバの配信 fps 数の変化	41
7.4	実験 2 のネットワーク概要	42
7.5	各受信者のパケットロス率と配信総 fps 数の変化	42

7.6	レポート1回で対応した場合の各受信者のパケットロス率と配信総 fps 数の変化	43
7.7	実験3のネットワーク概要	44
7.8	受信者のパケットロス率と中継サーバの配信 fps 数の変化	44
7.9	実験4のネットワーク概要	45
7.10	各受信者のパケットロス率と各中継サーバの配信 fps 数の変化	46
7.11	各受信者のパケットロス率と中継サーバの Load Average の変化	46

表 目 次

4.1	品質制御比較	16
5.1	構成モジュール	20
6.1	ソフトウェア環境	29
7.1	ハードウェア環境	39

第1章 序論

本章では、本論文の背景、目的を明らかにする。また、本論文の構成を示す。

1.1 背景

インターネットは広域通信基盤として飛躍的な進化を遂げてきた。昨今では、そのバックボーンの高速度のみならず、ラストワンマイルと呼ばれるユーザー収容回線のブロードバンド化も進み、広帯域を要するデジタルコンテンツの配信や流通が新しいインターネットサービスとして普及している。

今後、現在の主流である YouTube[1] やニコニコ動画 [2] などの低帯域な蓄積型動画の視聴のみならず、データ送信から受信、そして再生までの時間的制約が厳格な「リアルタイム性」の高い映像・音声・動画配信の需要が高まっていくと考えられる。身近な例として、企業が開催するセミナーなどイベントの生中継、スポーツやエンターテイメントなどのライブ中継、個人が行うストリーミングサービスなどが想定される。実際、近年流行している Twitter[3] を見てもリアルタイムアプリケーションがキーワードとして注目されていることは明確であり、IPTV[4] に代表される一対多通信形態の放送型コンテンツ配信はインターネットの代表的なアプリケーションとしてこれから急速に普及していくと思われる。また、ブロードバンド化によるコンテンツ品質への要求も高くなっており、高品質・大容量なストリーミング配信への期待は更に高まっていくと考えられる。

しかし、インターネットが広帯域化された現在においても、リアルタイム性の高い映像・音声などのデジタルコンテンツを多数の受信者に向けてストリーミング配信することには様々な課題がある。最も代表的な問題は、通信品質を維持するための帯域確保と、それに寄与する通信の効率化に関する問題である。通常のユニキャストを用いて送信者が多数の受信者に高品質なストリーミング配信を行う場合、送信者は一つのストリームが必要とする帯域を受信者数倍、データ送出しなければならず、これにより、計算機資源的にも、ネットワーク資源的にも高品質通信を維持するには限界があるという点である。

この問題を解決するために最適な技術として IP マルチキャスト技術が存在する。IP マルチキャストでは、送受信者が「マルチキャストアドレス」という特別なアドレスを指定して通信を行う。データ送信者はあるマルチキャストアドレスを宛先アドレスとして指定し、全ての受信者はそのマルチキャストアドレスを送信者アドレスとして指定して「参加要求」を行う。この状態で、送信者がデータを一度送信すると、各受信者までの通信経路上にあるルータが受信者へ向けて自動的にデータを複製して送信するため、全ての受信者に対して同じデータを効率的にネットワーク帯域資源を使用し、配信することが可能とな

る技術である。IP マルチキャストの具体的な説明は第 2 章で行う。結果として、送信者側の計算機資源やネットワーク帯域資源の利用を効果的に抑えることが出来る。

しかし、IP マルチキャスト通信を実現するためには、送受信者のみならず経路の上の全ルータがマルチキャストに対応している必要がある。また、ユニキャストアドレスとは完全に異なるマルチキャストアドレスを管理しなければならない点、マルチキャスト経路制御プロトコル、特にドメイン間経路制御は複雑であり、オペレーションやトラブルシューティングも困難であるという問題もある。更に、アプリケーション利用者として最も重要な課題は、ストリーミングアプリケーションの品質制御が行えないことである。つまり、IP マルチキャストでは送信者が全ての受信者を「グループメンバー」として管理するため、個々の受信者の受信状況を把握することが困難であり、状況に応じて個々の受信者レベルでの配信データの品質管理を行うことが出来ないという問題である。

最近では、IP マルチキャスト代替技術として、アプリケーションレベルで実現するマルチキャスト、すなわち、アプリケーションレイヤマルチキャスト (ALM) という技術が出現している。これは IP マルチキャストのようにマルチキャストアドレスを利用してデータをルーティングするのではなく、データを受信者や他のホスト同士で転送し、最終的に全受信者にデータが行き届くようにするユニキャストベースの通信技術である。アプリケーションレイヤマルチキャストの説明は第 3 章で行う。しかし、この技術にも様々な課題が残されており、更なる研究成果が求められる。

以上のことから、将来へ向けた多様化・大容量化リアルタイムデジタルコンテンツ配信の普及、更には IPTV の展開によるユーザー数の増大を考慮した場合、リアルタイムストリーミング配信において IP マルチキャスト技術を用いることは不可欠と言える。しかし、IP マルチキャストにはその技術利用における障害も存在し、特に各受信者の受信品質を把握し、品質制御する仕組みを実現することが必須である。このため、IP マルチキャストとユニキャスト双方の技術を利用することで、それぞれ利点を生かす融合技術を実現することが重要である。

1.2 本研究の目的

インターネット上においてリアルタイムストリーミングコンテンツ配信を多数の受信者に対して実現する場合、送信サーバやネットワークの負荷を軽減するために IP マルチキャストを利用することが効果的である。しかし IP マルチキャストでは、それぞれの受信者に応じてデータ品質制御を行うこと、すなわち各受信者におけるストリーム通信状況を把握し、その通信状況に応じてデータ転送レートなどを制御して最適な通信品質を維持することは困難であり、これを克服するシステムが必要である。

本研究では、IP マルチキャストにより配信されるリアルタイム DV ストリームを経路上にあるサーバがユニキャストに変換し、ストリーミングコンテンツ受信者状況に応じて通信サーバや配信コンテンツの品質を変化させる DV データ転送システムを提案し、実現する。これにより、各受信者に対し配信データ品質の劣化が少ない高品質・大容量な配信を行うことが可能となる。この時、音声・映像配信を行うに当たり、連続的な配信データ

の欠損が音声・映像配信に与える影響が大きいと考え、パケットロスによる配信データ品質の劣化を対象とする。

提案システムは、複数の「中継サーバ」と「管理サーバ」から構成される。手法として、中継サーバは IP マルチキャストで配信されるリアルタイム DV ストリーミングコンテンツを受信し、それをユニキャストに変換し、コンテンツ受信者に転送する。管理サーバは各受信者の配信データ品質、具体的にはデータの欠損率の監視を行い、配信データ品質の劣化を防止するためにその受信品質状況を中継サーバに通知する。この時、必要に応じて負荷の低い中継サーバに転送を依頼する。また、全ての中継サーバが高負荷であったり、中継サーバと受信者間のネットワークが高負荷であるなどの理由によりデータ欠損率が悪い場合は、DV 転送レートを調整する。

これら一連の作業は受信者にとって特別な操作をすることなく行われる。これにより、不特定多数の受信者に対し配信データ品質の劣化が少ない効率的な配信を行うことが可能となり、より活発な情報配信・取得という活動を行うことが可能となる。

1.3 本論文の構成

本論文は全 8 章から構成される。

第 2 章では本研究における要素技術について述べる。

第 3 章では本研究の関連研究として既存の配信手法について言及し、これらの問題点を明らかにする。

第 4 章では本研究の提案する映像・音声配信手法について述べる。

第 5 章では 4 章で提案した映像・音声配信手法の設計を行う。

第 6 章では 5 章に基づいた実装について述べる。

第 7 章では本システムの実装に対しての評価を行う。

第 8 章では本システムのまとめと応用の可能性及び今後の課題について述べる。

第2章 要素技術

本章では、本機構を構築するために必要である IP ネットワークを用いた映像・音声転送技術、及びそれらが不特定多数の受信者に対し、送信者のネットワーク帯域資源、計算機資源を枯渇することなく、効率的に用いる技術に関して述べる。

2.1 IP ネットワークにおける映像・音声配信技術

本節では IP ネットワーク上における映像・音声配信に用いられる、ストリーミング技術に関して述べる。

2.1.1 ストリーミング

映像・音声データ全体を受信してからローカルで再生する方式が図 2.1 の左側のダウンロード型再生方式である。これに対し、データの受信と再生を平行して行う方式が図 2.1 右側のストリーミング型再生方式である。ストリーミング型再生方式は youtube などに代表されるオンデマンド型映像・音声配信だけでなく、リアルタイム性の高い映像・音声配信にも用いられる。

2.2 通信技術

本節ではストリーミングを行う上で必要不可欠といえる通信技術に関して述べる。

2.2.1 IP マルチキャスト

単一の送信者が複数の受信者に対し、同一の内容の packets を一斉に配信する場合に用いられるのが IP マルチキャスト技術である。送信者から同一の内容の packets を複数の受信者に配信するには、ユニキャストを用いる手法とマルチキャストを用いる手法とがある。

複数のユニキャスト (1 対 1) 通信を用いた場合、送信元の者が配信するデータサイズは図 2.2 のように受信者数に比例する。このためデータの配信処理を行うための送信者の計算機資源の消費量が増加する。また、送信者が必要とするネットワーク帯域も同様に増加する。

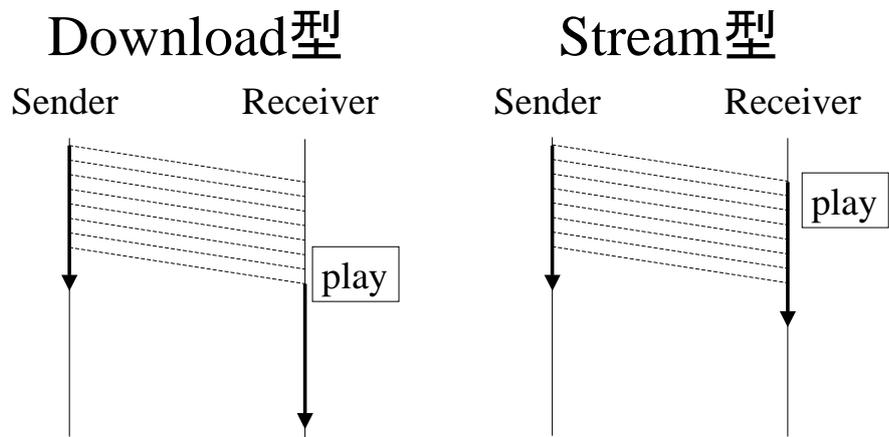


図 2.1: ストリーミング概要

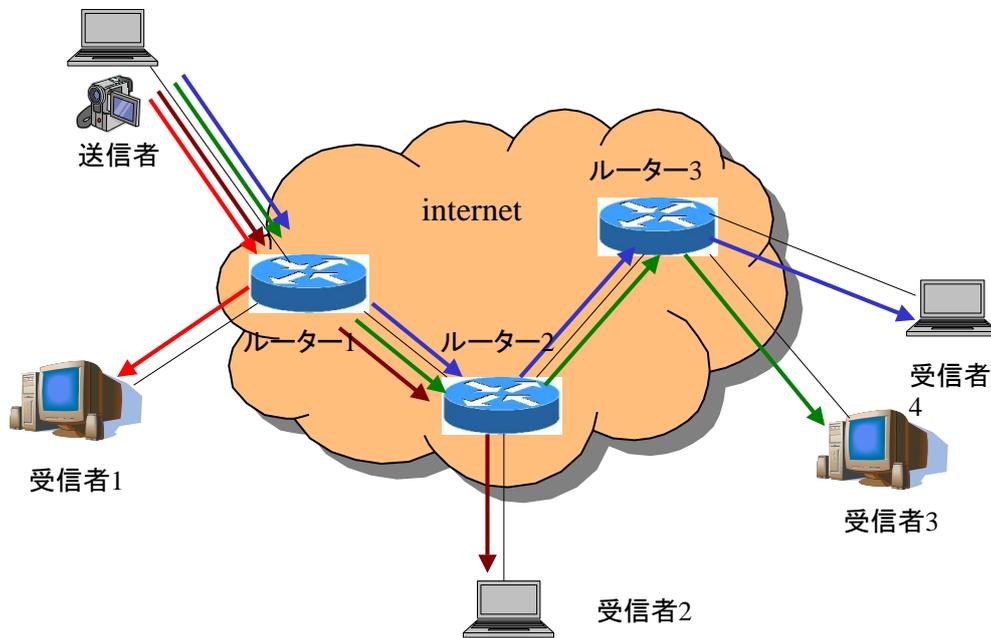


図 2.2: ユニキャスト概要

IP マルチキャストの概要を図 2.3 に示す。マルチキャスト通信を用いた場合、送信者には単一のパケットのみが配信される。パケットは、通信経路上のルータがあて先に応じて複製し、受信者に対して配信される。経路上のルータは、マルチキャスト受信者が異なるインターフェースに存在している場合のみ、パケットの複製を行う。

IP ネットワークにおいて 1 対多通信を実現する IP マルチキャストは、送信者で受信者数のパケットを複製せずに、分散しているルータを用いてパケットの複製を行うため負荷が分散される。しかし、IP マルチキャストを行うにはマルチキャスト経路制御とサポートする者やスイッチ・ルータなどのネットワーク環境が必要である。

マルチキャストパケットの配送は、マルチキャストアドレスに基づいたグループに参加している全ての受信者に配送される。このため、IP マルチキャストの経路制御は複数のホストを対象として行わなくてはならないため非常に複雑となる。また、送信者が直接受信者に配信を行っていないので、受信者の状態を把握するのが困難である。さらに、現状ではコンテンツやネットワークの管理を考慮したアプリケーションがないため、同一 ISP 内のような一部の限定されたネットワークを除いては IP マルチキャストの普及は困難である。

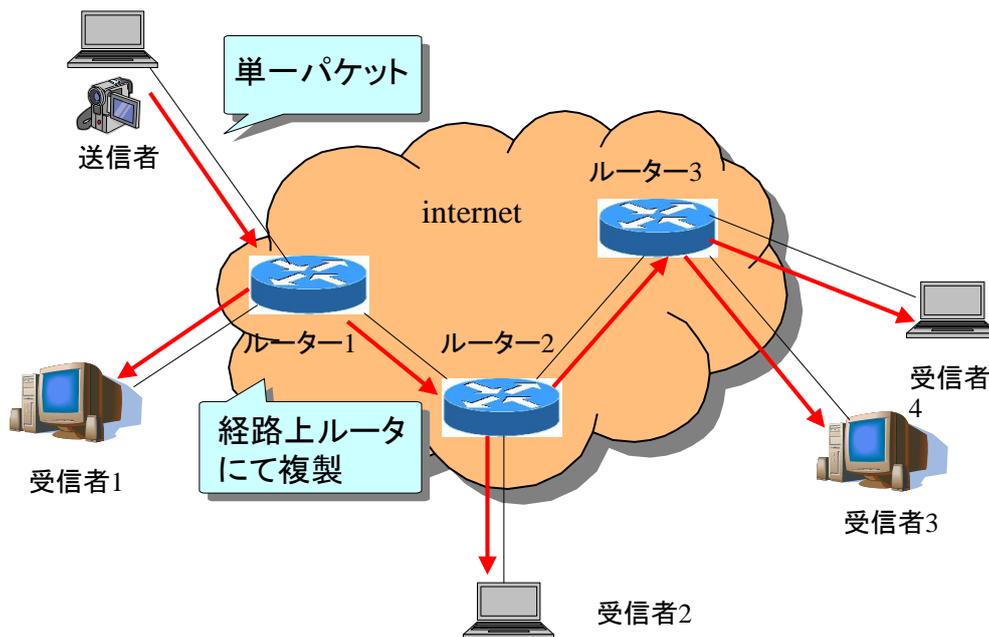


図 2.3: マルチキャスト概要

2.2.2 CDN

Contents Distribution Network(CDN)[5][6] は一対多モデルの配信元を複数箇所に分散させることにより配信元の負荷を軽減させ、受信者に安定した映像を提供するための技術である。具体的には、配信元に存在するコンテンツを各 ISP に分散させたサーバに対してキャッシュし、受信者に最適なサーバを伝達することによって配信の効率化を行なう。しかし、一般の配信者は、システムを構築するコストの問題から CDN を気軽に映像配信に利用することができない。また、各 ISP が CDN 網に参加していることを前提としており、受信者に対して映像配信を行なうことは困難である。

第3章 関連研究と問題点

本章では既存のアプリケーションや過去に提案された枠組みから本研究に関連の深いものについて述べ、現在のライブストリーミング配信機構における問題点を明らかにする。

3.1 アプリケーションレイヤーマルチキャスト

アプリケーションレイヤーマルチキャスト (ALM) とは IP マルチキャストの代替手法である。IP マルチキャストではマルチキャスト通信をネットワークレイヤで行うが、ALM はこの機能をアプリケーションレイヤなどの上位レイヤで実現する。具体的には、ルータで行っていたパケットの複製処理をエンドノードで行う。ALM では、マルチキャストグループに属するエンドノード同士で論理的なリンクを構成し、それぞれのノードがユニキャスト通信を行う。また ALM では、マルチキャストグループに参加しているノードをコントロール・トポロジとデータ・トポロジに二分し体系化している。コントロール・トポロジは各ノードが相互に生存確認を行い、トポロジの構成を維持する。データ・トポロジは実データの流れを規定する。

しかし、IP マルチキャストと比較するとネットワーク帯域資源の非効率性、遅延の増加、プロトコル実装の複雑さ、不安定なノードの存在といった課題が存在するため、更なる研究成果が求められる。

3.2 アプリケーション層での QoS マルチキャストプロトコル

複数の映像ストリーム配信に対する QoS 制御機能を提供する ALM プロトコル Emma/QoS が提案されている [7]。また、この研究ではビデオ会議を想定して行っている。

この手法では、P2P 上の各エンドホストが映像を他のエンドホストへマルチキャスト転送する際に、その転送レートを調整する機能を持つと仮定する。この時、既存の映像ストリームの転送レートをエンドホスト間で協調して調整することで新たな映像ストリームの受信要求を受け入れ、配信を行う。この研究では、低品質ストリームにサービスを限定してしまっている。そのため、高品質・大容量のストリームには不向きである。

3.3 CoopNet

ALM においてノードはシャットダウン、クラッシュ、優先される別のタスクによる中断などが生じ、ノードが途絶することがある。そのため、単一の配送木を作る ALM では、

ツリーが再構成されるまで配信が途絶するため、このような障害に弱い。CoopNet [8] ではそのような弱点を Multiple Description Coding(MDC) によって解決した。

MDC は元のデータストリームを複数に符号化し、配信を行う。受信者は複数の符号化された中の任意のデータストリームを最低 1 本受信すれば映像を複合化することが可能となる。このとき、データストリームの本数が多いほど、欠落の少ない映像を受信することが可能となる。

しかし、CoopNet では複数のツリーの管理を行う必要があるため、ツリーの管理が複雑になるという問題がある。

3.4 Dvrelay

既存のコンテンツ配送路に中間ノードを追加することで、各受信者に適応したストリーミングを実現する機構として Dvrelay[9] がある。

送信者とクライアントとの間に DV データの転送を行う Dvrelay を設置し、下流のクライアントの使用可能なネットワーク帯域に応じてフレームレートの変更を行う。しかし、この手法では複数のクライアントへの配信を行うことを想定していないため、レートを変更するクライアントの数だけ Dvrelay を使用する必要がある。そのため、複数クライアントへの配信を目的としている本研究には不向きである。また、Dvrelay ではフレームレートの変更を手動で行うため、品質制御を行うことは困難である。

3.5 階層化マルチキャスト

階層符号化は、解像度等を変化させた画像を階層的に複数用意し、画像の階層数に応じて品質を選択できる符号化方式である。図 3.1 に、デジタル映像情報の階層符号化を示す。階層符号化では、各階層ごとに符号化を行ない、下位レイヤーを補完する形で上位レイヤーが存在する。画像は最低限の品質を提供する基本レイヤーと、それに追加することでより空間的解像度や時間的解像度の高い高品質な画像を提供する拡張レイヤーに分類される。拡張レイヤー 数が Low から High に増加するに従って、映像品質が徐々に向上する。階層符号化方式を用いることで、単一データから視聴者の環境に応じた品質の調整が可能となる。

階層符号化のアルゴリズムは解像度だけでなく、フレームレートや色階調など、他の画像品質をメトリックとすることで実現可能となる。しかし、再生品質を維持するために均一性を考慮する必要がある。例えばフレームレートでは、再生品質維持のためフレーム間隔を均一にする必要がある。

通常マルチキャスト配信を図 3.2、階層化マルチキャスト [10] を図 3.3 に示す。通常マルチキャストでは、ストリーミングのビットレート制御が出来ないため、途中経路でデータ損失が発生した場合、下位ノードにおけるデータ受信にも影響が発生する。階層化マルチキャストは IP マルチキャストにおける送信者によるストリーミングの送信ビットレート制御ができない問題に対し、受信者によるビットレート制御を可能にするための技

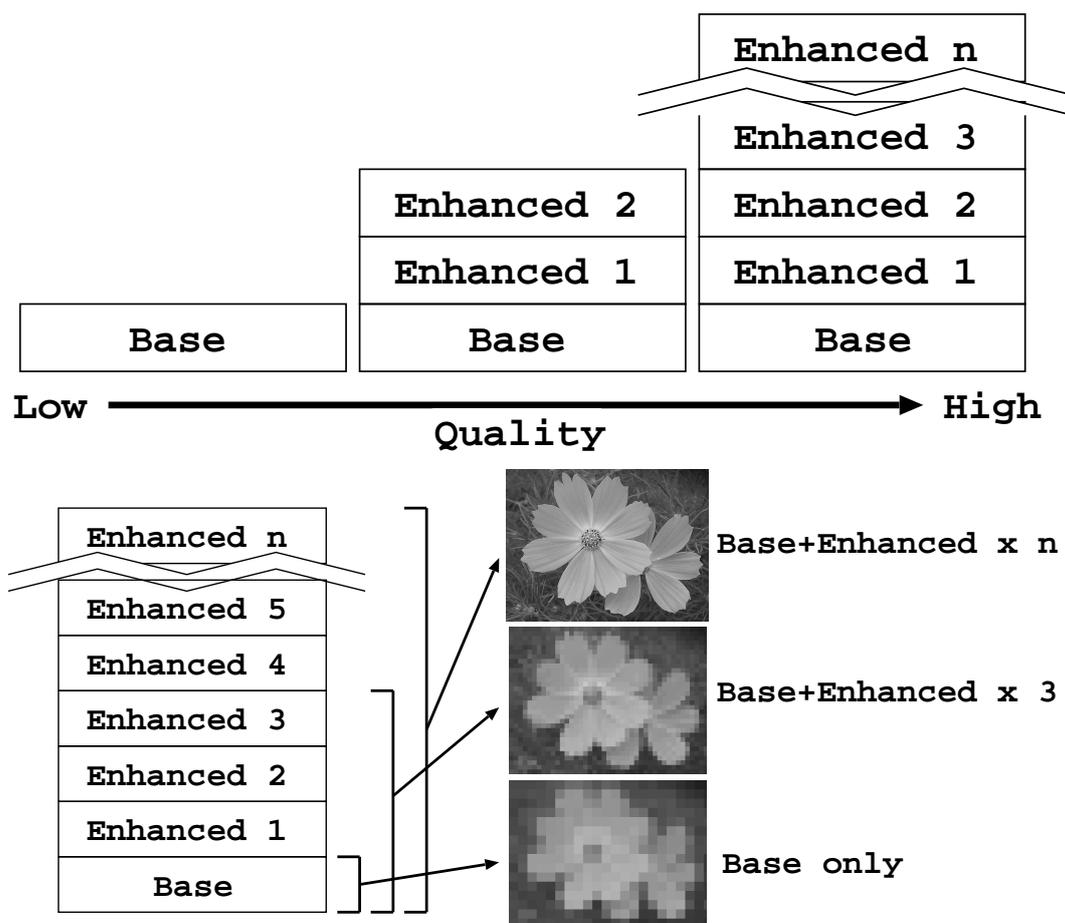


図 3.1: デジタルコンテンツの階層符号化概要図

術である。送信者は階層における最大品質でコンテンツを送信する。送信の際、レイヤー毎にマルチキャストチャンネルを割り当て、マルチキャスト送信を行う。受信者は基本レイヤーを配信するチャンネルに参加し、計算機・ネットワーク環境に応じて拡張レイヤーを配信するチャンネルに参加し、受信を行う。これにより受信者の通信品質に適応したストリーミング配信環境が構築される。

レイヤードエンコーディングでは、受信者環境に合わせた柔軟なサービス展開ができる一方で、オリジナルコンテンツをレイヤードエンコードしなければならないという問題がある。そのためコンテンツ送信者の負荷が大きい。

3.6 アプリケーションレイヤーマルチキャスト上での階層符号化

ALM 上での階層符号化を行う手法が開発・研究されている。[11] この手法では、それぞれのレイヤー毎に配信ツリーを構築する。また、分散環境を想定しているため、全体情

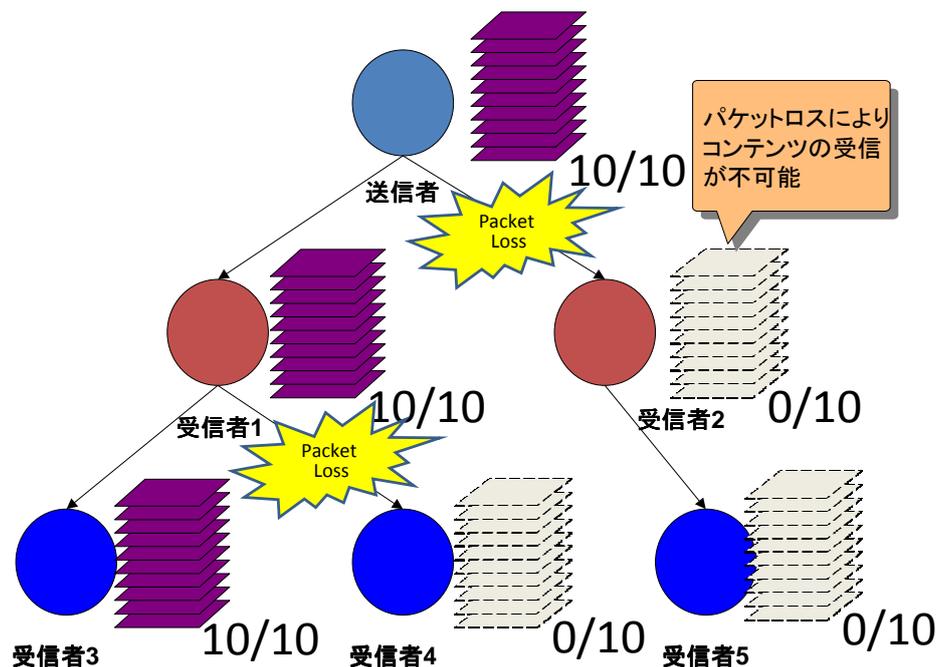


図 3.2: マルチキャスト概要図

報を把握することが難しく、上流ノード、下流ノードとの通信(メッセージング)を基本としてツリー構築を行う。メッセージングでは、上流ノードからのメッセージの受信を確認後、受信時点での各ノード自身の状況に応じた判断を行い、下流、または参加希望ノードへとメッセージを送信する。さらに、参加するための接続箇所探索の情報交換、参加のための参加情報交換、離脱時のノード情報交換など、全ての処理においてメッセージングを利用する。この手法では、接続するレイヤーごとに配信ツリーの構築するため、受信者の優先度を設定する必要がなく、自由な配信ツリーを構築することが可能となる。しかし、複数のツリーを管理する必要があり、管理が複雑になるという問題や分散ストリームの結合という問題が生じる。そのため、実用に耐えうる配信ツリー数を4,5本としている。

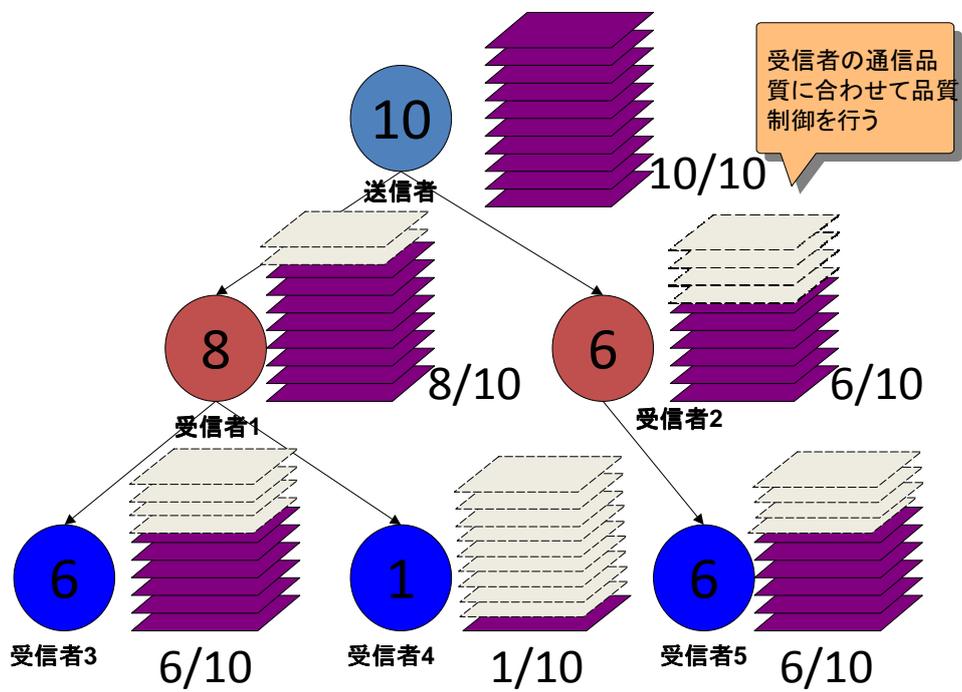


図 3.3: 階層化マルチキャスト概要図

第4章 アプローチ

本章では、目的とするコンテンツ配信モデルに対する要求事項を述べ、次に要求事項に基づいてコンテンツ配信モデルの提案を行う。

4.1 本研究の要求事項

本研究は各受信者に対し配信データ品質の劣化が少ない高品質・大容量の配信を行うことで、インターネット上における活発な情報配信・取得という活動の活発化の実現を目的とする。本研究の目的を達成するために以下の項目が必要となる。

- コンテンツ品質状態の監視と対処

本研究の提案するコンテンツ配信システムは、配信データ品質の劣化が発生した際に検知し、速やかに対処して受信者に提供しなくてはならない。このため、各受信者の受信しているコンテンツ品質の状態を適切に把握する必要がある。本システムでは配信データ品質の劣化を検知するために、受信者のコンテンツ品質を統一的に監視する機能が必要である。

- IP マルチキャスト配信からユニキャスト配信への変換

IP マルチキャストのようなネットワーク層における配信の効率化技術は、現状のIP ネットワークではインターネットサービスプロバイダ (ISP) などのサービスや運用ポリシーに依存する。このため、広域への配信を行う際にはユーザの利用している接続サービスを考慮しなくてはならない。この依存問題を解決するためには、送信者から受信者への中継地点にて接続サービスや運用ポリシーに依存しないユニキャスト配信へ変換する機能が必要である。

4.2 システム概要

本節では前節で述べた要求事項に基づいて管理サーバ・中継サーバを用いたコンテンツ配信システムモデルを提案する。

4.2.1 基礎概要

本研究の目的を満たすために、本システムでは各受信者の受信しているコンテンツ品質の監視を行う。本システムの概要を図 4.1 で示す。本システムでは、送受信者間に中継

サーバを設置し、送信者から IP マルチキャストで配信される映像・音声コンテンツをユニキャストで再配信を行う。また、コンテンツ品質の監視を行う管理サーバを設置する。管理サーバは中継サーバ・受信者と TCP による双方向通信を行うことで、受信者の受信しているコンテンツ品質の監視を行う。また、コンテンツ品質の劣化が発生した場合、必要に応じて中継サーバの変更及び品質制御を行う。本システムでは、送信者と中継サーバ間は安定してマルチキャストストリーミングが出来ていることを前提としており、この間での品質制御は行わない。

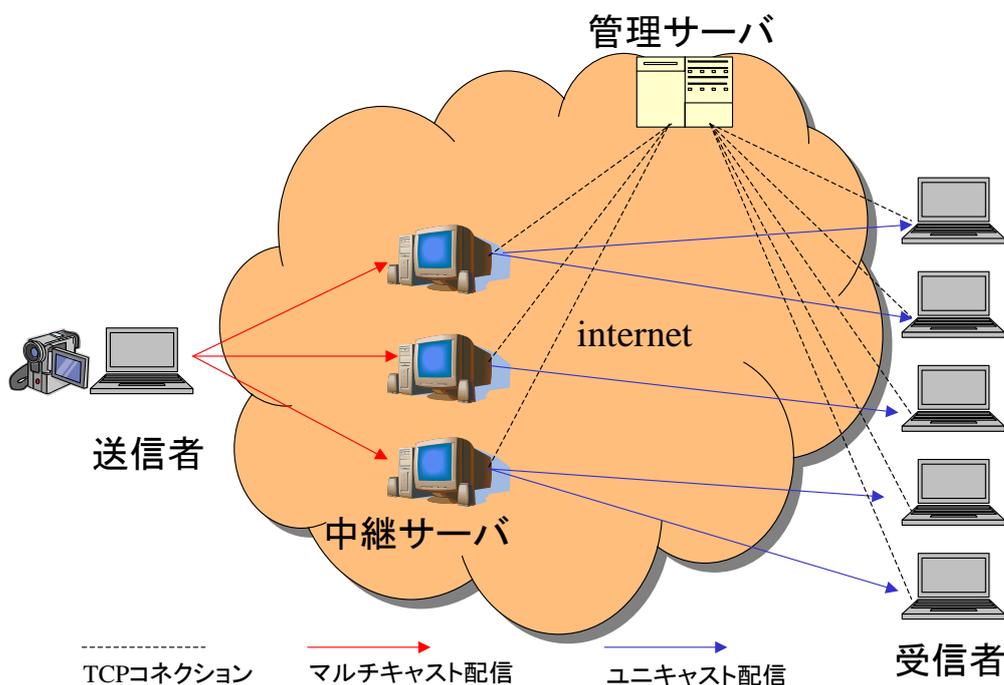


図 4.1: 配信モデル

4.2.2 コンテンツ品質状態の監視と対処

本研究ではコンテンツ品質状態の監視と対処を行うに当たり、中継サーバ・受信者を監視する必要がある。各処理に必要な項目を以下に述べる。

受信者の受信しているコンテンツ品質の状態

本システムでは、各受信者のコンテンツ状態の監視を管理サーバが行う。管理サーバは各受信者と定期的に行われる品質状態の報告を受信し、受信者が受信しているコンテンツ

品質の状態を取得する。コンテンツ品質が劣化した場合必要に応じて中継サーバの変更を行う。しかし、全ての中継サーバで切り替えを行うことが不可能であった場合、や中継サーバを変更後もコンテンツ品質の状態に変化がない場合、配信コンテンツの品質制御を行う必要がある。

受信者の参加と離脱

本システムでは、各受信者のコンテンツにおける品質状態を監視を行うため、個々の受信者を把握、管理する必要がある。管理サーバはノード情報の追加・削除を行う。この際、管理サーバがネットワークから Network Interface Card(NIC) を通して受信したデータは、管理サーバがメモリもしくは HDD に作成したデータベースに格納させる。管理サーバはデータベースに従い、受信者に対しコンテンツの配信開始・停止命令を中継サーバへ行う。中継サーバは受信した配信開始・停止命令に従い、受信者にコンテンツ配信を行う。

受信者の検索と更新

参加受信者の管理を行うノードは、ノード情報を格納したデータベースを参照し、必要なデータを検索・更新する必要がある。管理サーバは参加受信者の品質状態の定期報告に従い、データベースの更新を行う。また、必要に応じて検索したデータを基に配信元中継サーバの変更を行う。

中継サーバの計算機資源の状態

受信者のコンテンツ品質の状態には受信者に対し配信を行う中継サーバに対する負荷と関係があると考えられる。そのため、管理サーバは複数存在する中継サーバより、定期的に中継サーバの負荷情報を取得し、相対的に負荷の少ない中継サーバから新規参加受信者へ配信を行う。また、中継サーバの限界値の確認及び計算機資源にもネットワーク帯域資源にも余裕のある中継サーバに受信者への配信元中継サーバを切り替える機能が必要がある。

中継サーバの変更

中継サーバ・受信者の状況によっては中継サーバの変更が必要となる。その場合、必要になるデータは中継サーバの負荷と受信者のコンテンツ品質の状態である。しかし、他中継サーバと比較して負荷が相対的に軽い中継サーバへ切り替えるだけでは、中継サーバの変更が頻繁に発生し、逆にコンテンツ品質の劣化へとつながる可能性がある。中継サーバを切り替えるにあたり、相対的な比較だけでなく、絶対的な数値比較が必要である。以上のことから、相対的に負荷が軽い中継サーバが他に存在する場合でも中継サーバの変更を行わない機能を考える必要がある。

また、中継サーバが予期せぬ停止をした場合、停止した中継サーバから配信を受けていた受信者への配信を速やかに他中継ノードに切り替える機能が必要である。

コンテンツ品質の制御

中継サーバの変更が不可能である場合や中継サーバの変更を行ってもコンテンツ品質の劣化が変化しない、もしくは増加する場合、コンテンツの品質制御を行う必要がある。このとき、リアルタイム映像・音声配信において、伝送遅延時間が一定であると仮定すると、ある時間軸を基準とした場合、送信側から創出された単位時間当たりのデータ量は、受信側の単位時間当たりの消費量と一致する。フレーム間圧縮方式とフレーム内圧縮方式の特徴を表 4.1 に示す。

	フレーム内圧縮	フレーム間圧縮
代表例	DV	MPEG2[12]
使用帯域	30Mbps	4-15Mbps
圧縮率	-	
フレーム内一部データ欠損の影響	前後に影響を与えない	前後に影響を与える
品質制御による要求資源		

表 4.1: 品質制御比較

フレーム間圧縮方式の映像データを用いた場合、動きの多いシーンではデータ量が多くなってしまふ。その際、受信者側の再生状況に合わせた時間粒度の細かいフロー制御を行う必要があるため、処理が複雑になる。また、フレームデータが他のフレームデータに影響を与えるため、パケットロスによるコンテンツ品質の劣化が発生した際に与える悪影響が大きい。

フレーム内圧縮の場合、固定ビットレートのため、フロー制御が用意に行うことが可能である。また一部のデータ欠損が複数フレームに渡って連続的に影響を与えることはない。フレームレートコントロールを行った場合、要求される計算機資源は少ない。そのため、以上のことから本システムではフレーム内圧縮方式を対象にする。

4.2.3 IP マルチキャスト配信のユニキャスト配信への変換

本研究では IP マルチキャストをユニキャストに変換して再配信を行う。各処理に必要な項目を以下に述べる。

IP マルチキャストのユニキャストへの変換

本システムでは各受信者のコンテンツ品質の劣化を検知するだけでなく、それに対する対処を行う。IP マルチキャスト配信では各受信者のコンテンツ品質の劣化を検知することは可能だが、受信者単位での対処を行うことは不可能である。そのため、送受信者間でマルチキャスト配信をユニキャスト配信に変換する必要がある。中継サーバは送信者から IP マルチキャストでコンテンツを受信し、下流にいる受信者にユニキャストで配信を行う機能が必要である。

配信コンテンツデータの複製

本システムでは IP マルチキャスト配信をユニキャスト配信に変更するため、中継サーバの下流にいる複数の受信者に対しユニキャスト配信を行うには受信者の数だけ配信本数を増やす必要がある。そのため、中継サーバは配信されたコンテンツを複製する機能が必要である。

4.2.4 DVTS(Digital Video Transport System)

Digital Video Transport System(DVTS)[13] は市販の DV カメラから IEEE1394 インタフェースを用いて DV フォーマットのデータを読みだし、そのデータに対し IP パケット化を行い、リアルタイム伝送を行うことを目的としたシステムである。DVTS は DV フォーマットを用いることで NTSC 映像方式の場合で片方向約 30Mbps の帯域を利用して 720 × 480 の解像度と 29.97fps のフレームレートの映像の送受信が可能である。通信方式としては UDP[14] を用いる。DV フォーマットはフレーム内圧縮方式であり一部のデータ欠損が複数フレームに渡って連続的に影響をあたえることはないのに対して、輻輳制御による実効帯域幅の変動は連続的な映像の乱れになるため UDP が使用される。パケット到達順序を保証しない UDP でパケット到達順序を把握する方法として RTP/RTCP[15] を用いる

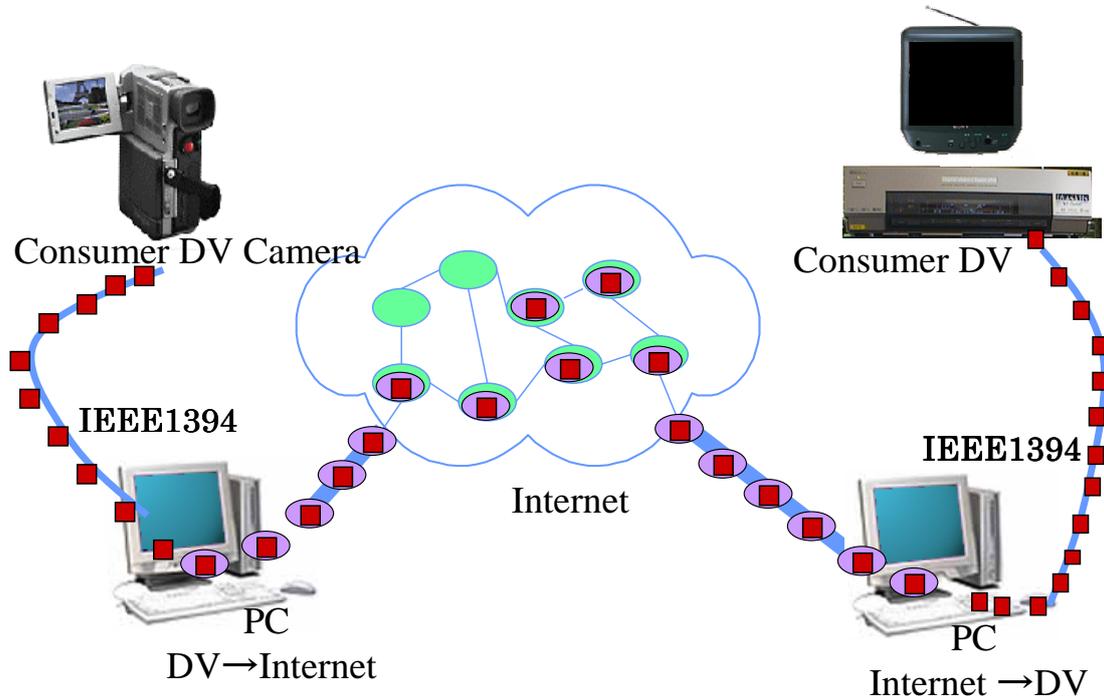


図 4.2: DVTS 概要

4.2.5 DV フォーマット

DV フォーマット [16][17] はフレーム内圧縮方式であり、一部のデータの欠損が複数フレームにわたって連続的に影響を与えることはない。そのため、映像フレームを間引くことで消費大域の調整をリアルタイムで行うことが可能である。

DV フォーマットのデータ構造を図 4.3 に示す。

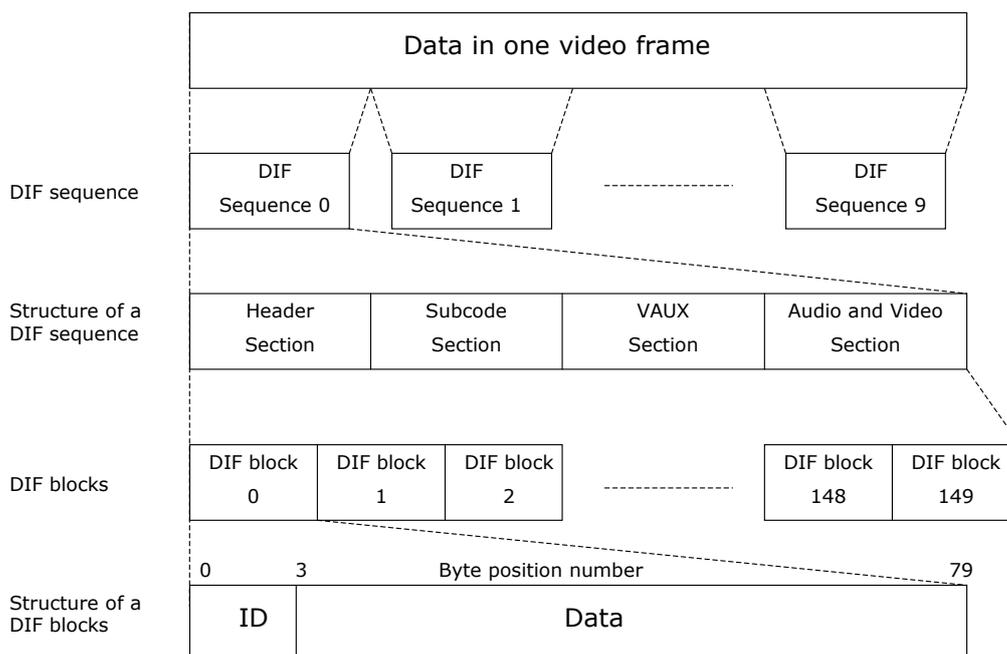


図 4.3: DV フォーマット

DV データは 10 個の DIF シーケンスから成る。DIF シーケンス内には”Header”、”Subcode”、”VAUX”、”Audio and Video”の 4 種のセクションが存在する。これらのデータは 80byte ごとに DIF ブロックの形に区切られ IEEE1394 インターフェース上に転送される。また、DV フォーマットは、フレーム単位で抽象化されたフォーマットなので、全てのデータ (映像、音声、システムデータ) はフレーム単位で扱われる。

第5章 設計

本章では、本研究で提案する機構の設計について述べる。本機構の動作をモジュールごとにまとめ、説明する。

5.1 設計要件

本機構の必要機能は以下の通りである。

- 中継サーバ・受信者の状況把握
- 中継サーバの変更
- 品質制御
- IP マルチキャスト配信からユニキャスト配信への変換

5.1.1 全体構成

本機構の全体概要を図 5.1 に示す。本機構を構成するモジュールは、以下の通りである。本機構ではノードの情報、中継サーバの情報を管理するサーバに応じて構成するモジュールが表 5.1.1 のように変化する。また、本機構は配信機構と配信制御機構によって構成されている。

- 情報の取得
 - ノードの受信している音声・映像品質
 - 中継サーバに対する負荷の数値化
- 情報協議
 - パケットロス発生による中継サーバの変更
 - 定期報告のタイミング調整
- ノード情報の管理
 - ノードの参加，削除，更新，参照
 - 他中継サーバとの負荷状態の参照・比較

- リンク情報
取得情報の送受信，受信者の生存確認
- 映像配信機構制御
映像配信の開始・停止，宛先，配信品質の指定

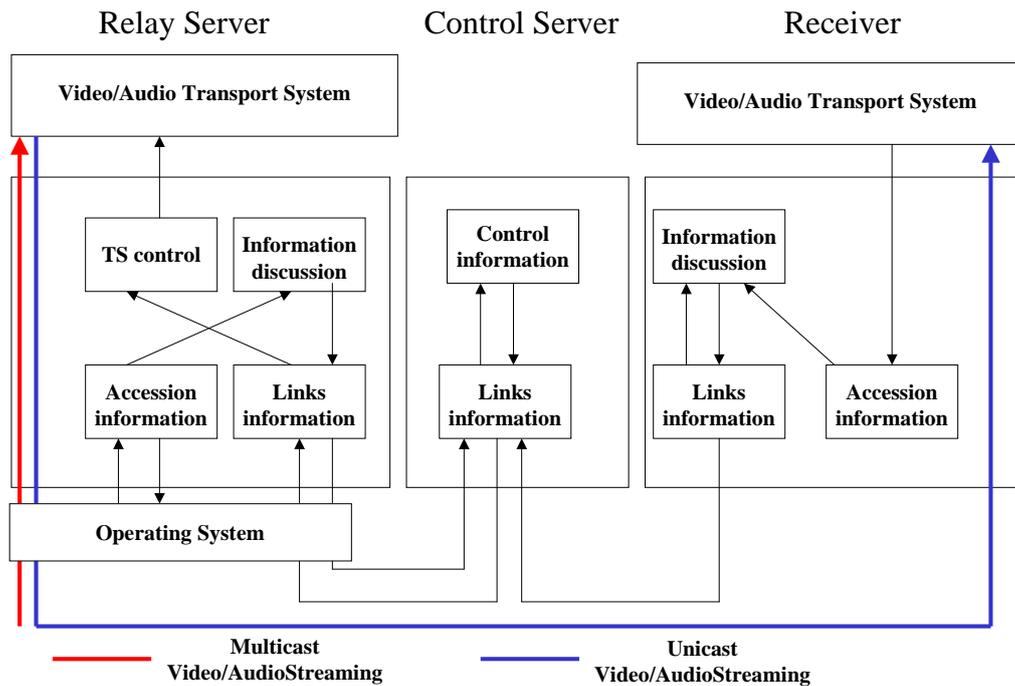


図 5.1: 全体モジュール概要

	送信者	管理サーバ	中継サーバ	受信者
情報取得モジュール	-	-		
情報協議モジュール	-	-		
情報管理モジュール	-		-	-
リンク情報モジュール	-			
映像配信制御モジュール	-	-		-
映像配信機構		-		

表 5.1: 構成モジュール

5.2 動作概要

本節では本システムの動作概要を管理サーバ，中継サーバ，受信者に分けて示す。

5.2.1 管理サーバ

本機構の管理サーバの各モジュールの関係及び，動作概要を図 5.2 に示す。

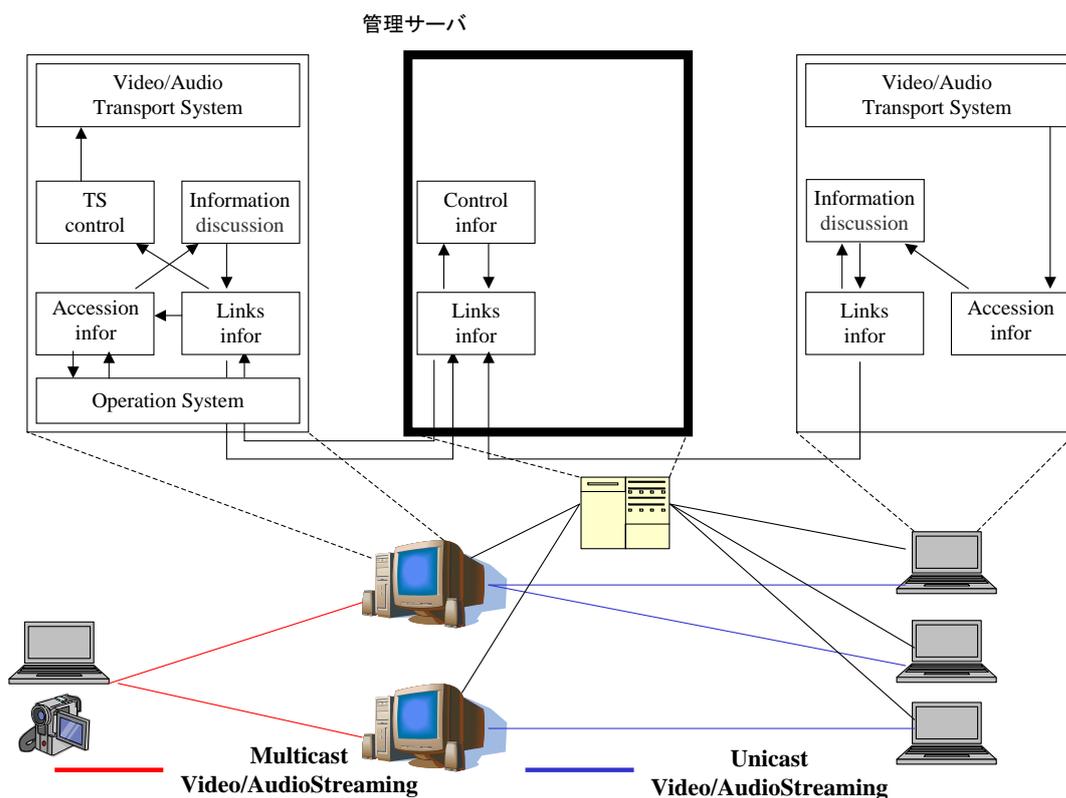


図 5.2: 管理サーバモジュール概要

1. 情報管理モジュールへ中継サーバから登録要求
2. 情報管理モジュールへ受信者から接続要求
3. 情報管理モジュールによる中継サーバの決定
4. 中継サーバへ接続要求受信者への配信開始命令
5. 情報取得モジュールよりリンク情報モジュールを経て中継サーバ・受信者情報取得
6. 変更要求を確認した場合は情報管理モジュールにて協議

7. 変更要求が認められた場合は元の中継サーバには配信停止，他の中継サーバに配信命令メッセージの作成
8. 変更要求が認められなかった場合，中継サーバに対し品質制御命令メッセージの作成
9. 対象の中継サーバへ配信停止・配信命令・品質制御命令メッセージの送信

5.2.2 中継サーバ

本機構の中継サーバの各モジュールの関係及び，動作概要を図 5.3 に示す。

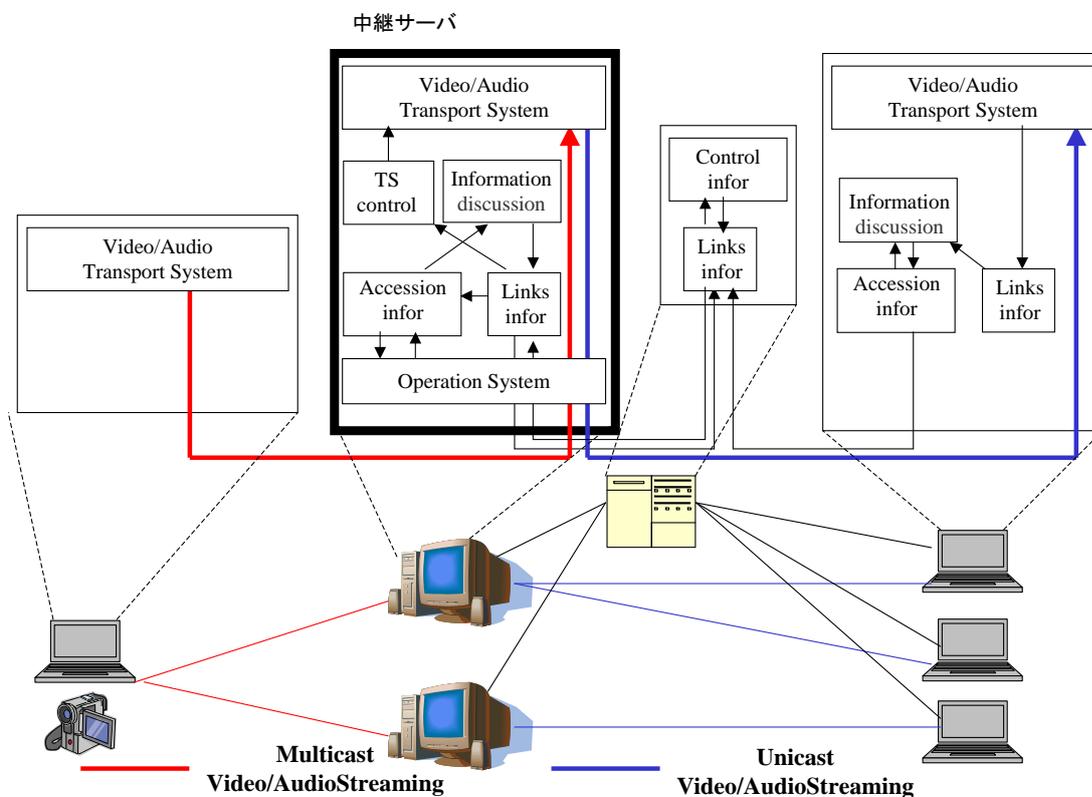


図 5.3: 中継サーバモジュール概要

1. 管理サーバの情報管理モジュールへの中継サーバ情報の追加
2. 送信者からストリーミングをマルチキャストで受信
3. 管理サーバによる配信を行う中継サーバの決定
4. 管理サーバによる配信品質の決定
5. 管理サーバより配信命令の受信・受信者へユニキャストで配信

6. 情報取得モジュールより OS からの情報を取得
7. 情報協議モジュールにて必要に応じて配信先の変更要求メッセージの作成
8. 管理サーバへ取得情報・変更要求メッセージの送信

5.2.3 受信者

本機構の受信者の各モジュールの関係及び、動作概要を図 5.4 に示す。

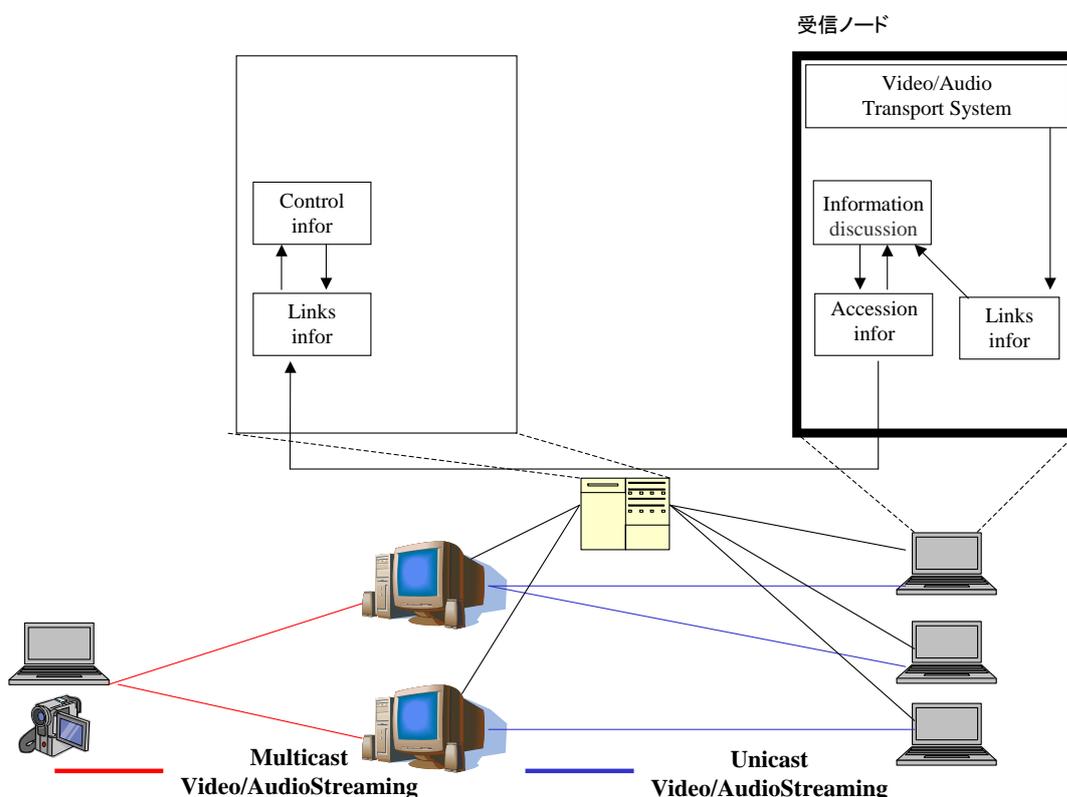


図 5.4: 受信者モジュール概要

1. 管理サーバの情報管理モジュールへの受信者情報の追加
2. 中継サーバよりコンテンツの受信
3. 受信中のコンテンツの品質状況を確認
4. 情報協議モジュールにて必要に応じて配信元の変更要求メッセージの作成
5. 管理サーバへ取得情報・変更要求メッセージの送信

5.3 配信制御機構の機能

配信制御機構では中継サーバの計算機資源に対する負荷の数値化，中継サーバの配信情報の管理，受信者情報の管理，音声・映像の品質情報の監視，中継サーバ・受信者間リンクの保持，映像配信機構の制御を行う。

5.3.1 情報取得モジュール

情報取得モジュールでは，配信網に参加する中継サーバでは自身の計算機資源に対する負荷を取得し，受信者では現在受信しているコンテンツの映像の品質情報を取得する。取得した情報はリンクモジュールを経て，管理サーバの情報管理モジュールへと送信される。情報取得モジュールの機能を以下に述べる。

中継サーバの負荷測定

中継サーバが受信者に映像・音声配信を行うにあたり，中継サーバの計算機資源に対する負荷が増大し，受信者への映像・音声配信に影響がでると考えられる。そのため，配信する中継サーバにかかる負荷数を OS の提供する値に基づいて測定を行う。

中継サーバの使用ネットワーク帯域の測定

中継サーバ一台あたりの配信可能な受信者の台数には限界がある。配信先受信者数が増加に比例し，中継サーバの使用ネットワーク帯域幅は増加する。この時，中継サーバの使用ネットワーク帯域幅は，中継サーバの配信している配信総 fps 数に比例する。そのため，配信総 fps 数より，ネットワーク使用帯域が計測が可能である。中継サーバの配信総 fps 数をアプリケーションの提供する値から測定し，使用ネットワーク帯域幅を計測する。

受信者のコンテンツ品質の状態測定

映像・音声配信を行うにあたり，受信者の受信している映像・音声の状態を理解しておく必要がある。そのため，受信者側で映像・音声の品質の状態をアプリケーションの提供する値から取得する。

5.3.2 情報協議モジュール

情報協議モジュールでは，情報取得モジュールによって取得されたデータが許容量を超えていた場合，中継サーバであれば配信先受信者の，受信者であれば配信元の中継サーバの変更・停止の要求をメッセージを作成する。作成した要求メッセージはリンク情報モジュールを経て管理サーバの情報管理モジュールへと送信される。情報協議モジュールの機能を以下に述べる。

変更要求メッセージ

中継サーバ・受信者のそれぞれで状況によってはパケットロスの少ない品質状態のより良い映像・音声配信を受信者が受信できる可能性がある。しかし、変更要求を行う側の中継サーバ・受信者は他の中継サーバ・受信者の状態を確認する手法がないため、管理サーバの情報管理モジュールにて要求の是非を問う必要がある。そのため、変更要求が認められない場合は情報管理モジュールにて要求を破棄する。

5.3.3 情報管理モジュール

情報管理モジュールでは、情報取得モジュールより送られてきた中継サーバ及び受信者情報の管理を行う。情報管理モジュールは管理サーバにおいて使用される。また、受信者の生存確認が不可能になった受信者のデータの削除、ノード情報の更新、中継サーバの配信先の変更、配信の停止、配信の開始、中継サーバが予期せぬ停止をした際の他の中継サーバへ受信者の割り振りを行う。情報管理モジュールの機能を以下に述べる。

受信者の追加・削除・更新

リンク情報モジュールを経由して配信に参加する受信者の情報を取得し、データをモジュール内のデータベースに追加後、リンク情報モジュールを経由し、中継サーバからの配信を開始させる。また、受信者の生存が確認不可能になった受信者のデータを削除、中継サーバからの配信を停止させる。ノード情報が変更された受信者のデータの変更を行う。

中継サーバの選択 (中継サーバ側)

映像・音声配信を行うにあたり、状況がリアルタイムで変化する中継サーバの負荷データを情報取得モジュールからリンク情報モジュールを経由し、取得・管理を行う。情報管理モジュールは受信者情報の参照を行い、中継サーバの現在配信台数及び中継サーバの計算機資源に対する負荷状況を比較する。比較した情報を元に受信者に配信を行う中継サーバを決定、リンク情報モジュールを経て中継サーバに命令する。

中継サーバの選択 (受信者側)

映像・音声配信を受信するにあたり、受信者の受けている映像・音声が通信路や中継サーバの性能によってはパケットロスによる品質の劣化が起こる可能性がある。そのため、受信側で発生しているパケットロスを情報取得モジュールからリンク情報モジュールを経由し、取得・管理を行う。情報管理モジュールは取得した情報と中継サーバの情報を参照、比較を行う。比較した情報を元に必要に応じて配信を行う中継サーバの変更を決定。リンク情報モジュールを経て中継サーバに命令する。

品質制御

中継サーバを変更するにあたり、全ての中継サーバが高負荷であったり、中継サーバと受信者間のネットワークが高負荷であるなどの理由によりデータ欠損率が悪い場合は、品質レートを調整する。

5.3.4 リンク情報モジュール

リンク情報モジュールでは、情報取得モジュールを用いて測定された中継サーバ・受信者の情報を管理サーバの情報管理モジュールへ送信する。また、中継サーバ、受信者の生存確認を行う。さらに、情報管理モジュールが送信した映像配信機構の制御命令を中継サーバの映像配信機構モジュールに伝達する。リンク情報モジュールの機能を以下に述べる。

中継サーバ・受信者情報の送受信

中継サーバ・受信者情報の送受信は全て通信を行うそれぞれのリンク情報モジュールを経由して行われる。情報取得モジュールが提供するデータを管理サーバの情報管理モジュールに送信する。

中継サーバ・受信者の生存確認

配信に参加している中継サーバ・受信者は TCP によるコネクションを管理サーバ間と張っておくことで生存確認を行う。コネクションが切れた時点で生存確認不能と判断し、受信者の場合は配信停止命令を中継サーバに送信する。中継サーバの場合は情報管理モジュール内のデータベース参照後、生存確認不可能になった中継サーバより配信を受けていた受信者は、生存確認がされている他の中継サーバから配信を開始させる。

制御命令の伝達

管理サーバの情報管理モジュールが送信した映像配信機構の制御命令を映像配信制御モジュールに伝達する。

5.3.5 映像配信制御モジュール

映像配信制御モジュールでは、情報管理モジュールが送信してきた制御命令をリンク情報モジュールを経由して受信する。受信した制御命令に従い映像配信機構の制御を行う。本モジュールが制御を行う。映像配信制御モジュールの機能を以下に述べる。

映像配信機構の制御

管理サーバの情報管理モジュールが送信した制御命令を、リンク情報モジュールを経由して受信する。これに基づいて外部の映像配信機構に対して送受信などの制御を行う。こ

れは映像配信制御機構・映像配信機構双方が処理可能である汎用的なデータ形式で制御データの伝達を行う。

5.4 映像配信機構の機能

本研究の対象とする配信形態は、IP マルチキャスト配信では対応が困難である環境において、即時性を要求される単一のコンテンツを到達させる形である。本機構における映像配信機構には以下の要求事項がある。

- IP マルチキャスト配信をユニキャストに変更して再配信
- 配信データの複製による再配信
- 配信データの品質制御

5.4.1 IP マルチキャスト - ユニキャスト変換

本機構では送信者から中継サーバまでの映像・音声配信はIP マルチキャストを用い、中継サーバから受信者への配信はユニキャストを用いて行う。このため、中継サーバではIP マルチキャストで受信した配信データを Unicast に変換し、再配信を行う。IP マルチキャストを受信するために中継サーバは予めグループに join しておき、送信者からデータが配信されてくるのを待つ。送信者から配信を受信した後、管理サーバの情報管理モジュールからの配信命令に従い、配信先の受信者に映像・音声配信を行う。

5.4.2 配信データの複製

本機構では中継サーバから受信者への映像・音声配信は Unicast を用いて行う。このため、中継サーバでは配信データの複製をおこない、再配信を行う。再配信を行う際、中継サーバは図 5.5 のように最低 1 本の複製したストリームを出力する。また、受信者が複数存在する場合は図 5.6 のように多数のストリームを出力することで、受信者に映像・音声配信を行う。

5.4.3 配信データの品質制御

本機構では必要に応じて配信データの品質制御を行う。図 5.7 は品質制御を行わない配信、図 5.8 は品質を 1/2 に落とした場合である。

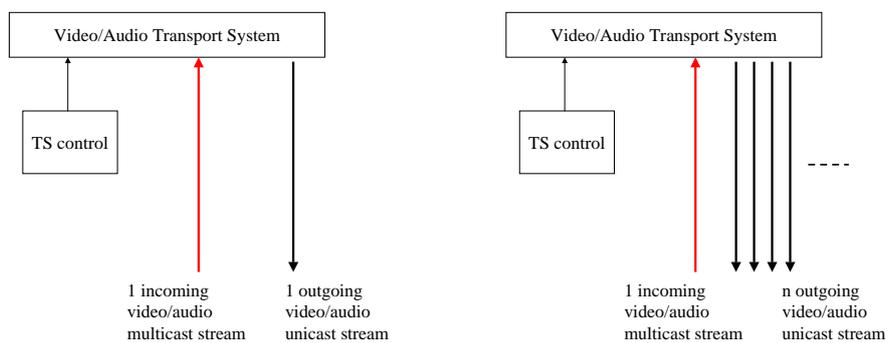


図 5.5: 送信者 1 台 : 受信者 1 台の
ストリームの複製

図 5.6: 送信者 1 台 : 受信者 n 台の
ストリームの複製

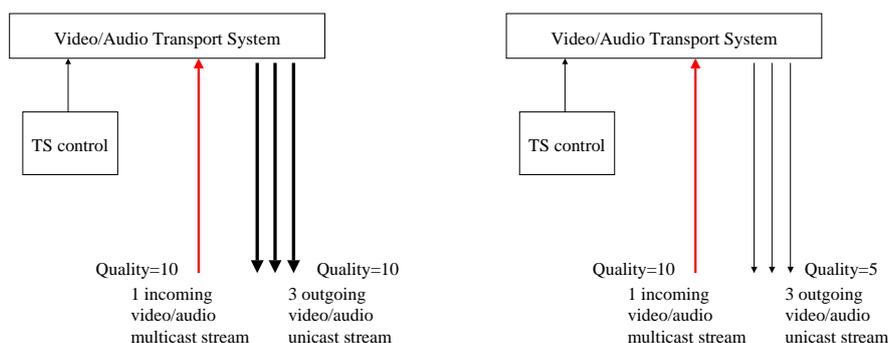


図 5.7: 品質制御無し

図 5.8: 品質制御有り

5.5 本章のまとめ

本章では 4 章で述べた提案に基づき，インターネット上における通信品質に適応する音声・映像配信を行うシステムの設計について述べた。

次章では本章で述べた設計に基づき実装を行う。

第6章 実装

本章では、5章で述べた設計をもとに、配信制御機構の実装について述べる。なお、本機構の映像配信機構としてインターネット上でDVデータの送受信を行うDVTSを対象に設計を行い、その設計に従い、実装を行った。

6.1 実装環境

本機構の実装を行ったソフトウェア環境は表 6.1 の通りである。

OS	Debian Linux 2.6.18
プログラム言語	C 言語
コンパイラ	gcc-4.1.2
ライブラリ	libc-2.3.6

表 6.1: ソフトウェア環境

6.2 実装概要

本機構では映像配信機構としてインターネット上でDVデータの送受信を行うDVTSを用いる。本機構の映像配信機構はDVTSを拡張する形で実装を行う。

6.2.1 情報取得

中継サーバ・受信者の情報として中継サーバでは自身にかかる負荷値として Load Average, fps の取得を行い、受信者では受信の際発生しているパケットロス値の取得を行う。本実装では OS として Linux を用いているため、Load Average の情報は proc file system, パケットロスの情報は DVTS から提供されている。本実装では、これらの値の取得関数化した。

Load Average の取得

Load Average の値として Linux Kernel が用いる proc file system を利用する。Load Average の値は /proc/loadavg ファイルから取得が可能であるため、図 6.1 の avg 関数を作成し、格納する。

```
char avg[30];
FILE *fp;

    (abbreviation)

memset(avg, 0, sizeof(avg));
memset(buf, 0, sizeof(buf));
if((fp = fopen("/proc/loadavg", "r")) == NULL){
    printf("file open error\n");
    return(-1);
}
while(fgets(avg, 30, fp) != NULL){
    printf("load_average: %s\n", avg);
}
```

図 6.1: Load Average の取得

配信総 fps 数の取得

中継サーバの配信 fps は中継サーバの使用ネットワーク帯域資源に比例している。そのため、配信中の総 fps から中継サーバのネットワーク帯域資源に対する負荷状況を把握することが可能である。fps の取得方法としては、DVTS のフルレートでの fps は約 30fps である。そのため、受信者数を 30 倍した値と frame_drop とのそれぞれの商の合計から求める。

パケットロス値の取得

パケットロスの値として DVTS の既存の関数 (pkt_loss) を用いる。具体的な方法としては図 6.2 のように受信したデータの rtp ヘッダ値を前後で比較し、パケットロスが発生しているかを確認する。取得した pkt_loss の値を dvrecv_param 構造体内の pkt_loss_sum 関数に格納する。pkt_loss_sum の値は後に情報協議モジュール内で使用する。

```
dvrecv_param->pkt_loss += rtphdr->seq - rtp_seq_prev - 1;
dvrecv_param->pkt_loss_sum += rtphdr->seq - rtp_seq_prev - 1;

(abbreviation)

if(rtphdr->seq - rtp_seq_prev - 1 != 0){
    printf("pkt_loss : %d\n", rtphdr->seq - rtp_seq_prev - 1);
}

(abbreviation)

rtp_seq_prev = rtphdr->seq;
```

図 6.2: パケットロスの取得

6.2.2 情報協議

情報取得モジュールより取得された中継サーバ・受信者の情報はそれぞれで設定された条件に応じて配信先・配信元の変更要求を管理サーバに対して行う。

中継サーバ側の変更要求

中継サーバの変更要求の条件は、中継サーバが配信を行う総受信者数と取得した Load Average と配信総 fps 数に閾値を設けることで条件検索を行う。条件を満たしている場合、リンク情報モジュールを経て、管理サーバへと変更要求メッセージを送信する。この時、本システムは 100BASE-TX の NIC を対象としたため、配信総 fps 数の閾値を 100 とする。

受信者側の変更要求

受信者の変更要求の条件は、DVTS より取得したパケットロス数に閾値を設けることで条件検索を行う。この時、パケットロスの発生が一時的である場合と継続的である場合が考えられる。そのため、10%のパケットロスが5回以上発生した場合、管理サーバへと変更要求メッセージを送信する。

6.2.3 リンク情報

リンク情報モジュールは中継サーバ・受信者の情報取得モジュールで取得してきた情報データが送受信され、管理サーバの情報管理モジュールへと送信される。情報データは

データベースに格納され、情報管理モジュールで使用される。また、リンク情報モジュールは中継サーバ・受信者の生存確認に使用される。

情報の送受信

中継サーバ・受信者の情報管理には図 6.3 の `node_info` 構造体を利用する。各中継サーバ・受信者の区別は構造体内のソケットのファイル・ディスクリプターを格納する `soc` 関数によって識別を行い、`sockaddr_in` 構造体にそれぞれの IP アドレスを格納する。受信者のパケットロス値、パケット総数は `pkt_loss`、`pkt_sum` に格納され、中継サーバの配信台数、総 `fps` 数を `num`、`fps_sum` に格納する。また、中継サーバの Load Average を `avg_1m`、`avg_5m`、`avg_10m`、`run_pro` に格納し、中継サーバの配信先 IP アドレスを `cli_addr` 構造体に格納する。

生存確認

中継サーバ・受信者のリンクを保持するために、管理サーバ・中継サーバ間、管理サーバ・受信者間で図 6.4、6.5 の TCP Socket を作成し、`accept()` と `connect()` を利用した生存確認を行う。

6.2.4 情報管理

本機構の配信に参加、もしくは参加要求を行っている受信者の情報は、管理サーバの `node_info` 構造体内で管理を行う。管理サーバは全ての中継サーバ・受信者から `node_info` 構造体内のそれぞれに合う項目のデータを受信する。

配信先の追加

管理サーバは配信に対して新規に接続要求が受信者からあった場合、データベースである `node_info` 構造体を参照し、検索条件に応じて配信元となる中継サーバを決定する。

中継サーバの選択

中継サーバの変更要求を受けた際、中継サーバの選択を行うにあたり、中継サーバ側の比較、受信者側の比較、双方での比較の 3 種類の比較を行う。

- 中継サーバ側での比較
中継サーバの配信先の総パケットロス数、配信 `fps` 数、LoadAverage の 3 種類の比較を行い、最も余裕のある中継サーバを選択する。
- 受信者側の比較
変更先の中継サーバから過去に配信を受けていた場合、配信を受けていた時のパケットロスを記憶しておく。そして、記憶した過去のパケットロスと現状のパケットロ

```
struct cli_addr{
    int soc;
    struct sockaddr_in claddr;
    int f_rate;
    int sl_num;
    int cnt;
    int s_loss[FD_SETSIZE];
};

struct node_info{
    int soc;
    struct sockaddr_in addr;
    int pkt_loss;
    int pkt_sum;
    int fps_sum;
    int sl_num;
    int f_rate;
    char load_avg[30];
    double avg_1m, avg_5m, avg_15m;
    int run_pro;
    struct cli_addr cl_ipaddr[10];
    int cnt;
    int pkt_flag[10];
    int pkt_flag_sum;
    u_long report_cnt;
};
```

図 6.3: node_info 構造体

スと比較し、現状のパケットロスが過去のパケットロスよりも 10%以上大きい場合は中継サーバの変更を行う。

- 双方の比較
受信者の記憶した過去のパケットロス値と変更先のパケットロス値の受信者単位の平均値の比較を行い、過去のパケットロス値が変更先のパケットロス値の平均値よりも小さい場合は中継サーバの変更を行う。

以上の項目が 1 つでも満たされなかった場合、品質制御によって対応を行う。

```
{
int sock1, sock2, new_sock;
int i;

(abbreviation)

if(listen(sock1, SOMAXCONN) < 0){/*NCAg*/
    perror("listen");
    return(-1);
}
if(listen(sock2, SOMAXCONN) < 0){/*pT[o*/
    perror("listen2");
    return(-1);
}
for(i = 0; i < FD_SETSIZE; i++){
    if(FD_ISSET(i, &fds)){
        if(i==sock1){

(abbreviation)

            if((new_sock = accept(sock1,(struct sockaddr *)&cl_addr,&len))<0){
                perror("accept");
                return -1;
            }

(abbreviation)
}
```

図 6.4: 管理サーバ側生存確認

品質制御

中継サーバの変更条件を満たせず、受信者で頻りにパケットロスが発生している場合、情報管理モジュールはDV 転送レートを調整し、パケットロスの発生を抑える。また、一定回数以上のレポートでパケットロスが閾値未満で合った場合、配信レートを上げ、パケットロスの変化を監視する。パケットロスが再び閾値以上発生する場合、配信レートを戻す。この時、配信レートを上げるレポート回数の初期値を5とし、以降は2の冪数倍していく。本機構では、品質制御手法としてフレームレートコントロールを用いる。具体的な手法は第 6.2.5 節で説明する。

```
{
    int sock;

    (abbreviation)

    if((connect(sock, (struct sockaddr_in *)&addr, sizeof(addr))) < 0){
        perror("accept");
        return (-1);
    }

    (abbreviation)
}
```

図 6.5: 中継サーバ・受信者側生存確認

エラー処理

中継サーバが異常停止した場合、リンク情報より中継サーバの生存確認が不可能になる。その場合は、`node_info` 構造体内に格納されている停止した中継サーバの配信していた受信者の IP アドレスを格納した `cli_addr` 構造体を参照する。この時、映像・音声配信の途切れを最小限にすることが重要である。そのため、周囲の中継サーバの状態を問わず他の中継サーバに配信を行わせる。その後、中継サーバの負荷が均一になるよう `node_info` 構造体を参照し配信先の変更を行う。

6.2.5 DVTS 制御

参加受信者の接続要求に応じて中継サーバの映像配信機構である DVTS に対し、配信開始・停止及び DV データの送信先の指定を管理サーバからの配信命令に従い、配信制御モジュールで行う必要がある。本実装では、配信先として管理サーバから指定された接続ノードのデータを元に配信制御モジュールを DVTS 内に実装することで、直接 DVTS の配信先データを格納している `dest_list_obj` 構造体を編集する。`dest_list_obj` 構造体を図 6.6 に示す。

配信先の追加と削除

配信先の追加と削除を行うには、配信先情報を格納している `dest_list_obj` 構造体を編集する必要がある。配信先を追加する場合は新たに送信先ソケットを作成し、構造体に格納する。配信先を削除する場合は、構造体内部の該当部分を削除し、前後の配信先のポインタの変更を行う。

```
struct dest_list_obj {
    /* socket fd must be here, since setsockopt is needed */
    /* for setting multicast TTL and other things. */
    int soc;
    char dest_str[256];
    int port;
    struct sockaddr_storage s_addr;
    /* FOR MULTICAST */
    int multi_ttl;
    char *multi_ifname;
    char *multi_ifname6;
    u_int32_t pkt_count;
    int frame_drop;
    struct dest_list_obj *prev;
    struct dest_list_obj *next;
};
```

図 6.6: dest_list_obj 構造体

品質制御

本システムでは、第 6.2.4 節で述べた通り、品質制御手法としてフレームレートコントロールを用いる。具体的には配信に使用する dest_list_obj 構造体の中にある frame_drop の値を変更する。frame_drop の値は DV データ転送時に用いる。図 6.7 のように配信レートを $1/\text{frame_drop}$ とし、frame 数が frame_drop の値で割り切れる場合のみ中継を行う。

```
if ((n = recvfrom(dvrecv_param->soc,
                 (char *)&recvbuf, sizeof(recvbuf),
                 0,
                 (struct sockaddr *)&from, &length)) < 0) {
    if(errno==EHOSTUNREACH || errno==ENETUNREACH){
        continue;
    }
    perror("recvfrom");
    return;
}
```

(abbreviation)

```
if (dest_list_obj->frame_drop > 1 &&
    (frame % dest_list_obj->frame_drop) != 0) {

}else {
    if((m = sendto(dest_list_obj->soc,
                  (char *)&recvbuf, n,
                  0,
                  (struct sockaddr *)&dest_list_obj->s_addr,
                  sizeof(dest_list_obj->s_addr))) < 0){
        perror("sendto");
        return;
    }
}
```

図 6.7: フレームレートコントロール

第7章 評価

本章では,6章において実装された本機構に対する評価について述べる.

7.1 評価概要

本システムでは,各受信者・中継サーバの状態を管理サーバに通知することより監視し,それぞれの通信品質に応じて対処する.本実験は,本システムで実現した機能の有用性を検証する.

7.2 本システムの実現した機能

本機構は,管理サーバ,中継サーバを用いて通信品質に適応した映像配信機構を実現した.本機構が実現した機能は以下の5項目である.

- コンテンツ品質状態の管理
- 中継サーバの余剰計算機資源に応じた切り替え
- マルチキャスト配信のユニキャストへの変換
- リアルタイム配信に対応する品質制御可能な映像配信機構
- 映像配信機構の外部からの制御

本機構のシステムモデルでは,一台の送信者が複数の受信者に配信を行うにあたり,管理サーバと中継サーバを用いる.受信者は管理サーバへと接続要求を行い,接続要求を受けた管理サーバの通知に基づき中継サーバは配信を開始する.配信開始後,管理サーバは受信者の受信しているコンテンツ品質データのパケットロスの監視を行う.この時,必要に応じて中継サーバの計算機資源・ネットワーク帯域資源の余剰資源がより多い中継サーバへと配信元の変更を行う.また,受信者の利用可能資源が少ない場合や全ての中継サーバに余剰資源が少ない場合,中継サーバが配信データの品質制御を行う.

このシステムモデルが実現されたかを実機を用いて数パターンの実験を行うことで動作を検証する.

7.3 テスト環境

評価は，図 7.1 に示す環境を用いて行う．本評価環境は，1 台の送信者と，7 台の受信者，1 台の管理サーバ，3 台の中継サーバ，dummynet [18] によって構成されている．本研究の有効性を確かめるため，図 7.2，7.4，7.7，7.9 の 4 パターンのトポロジを構築して実機での動作の検証を行った．

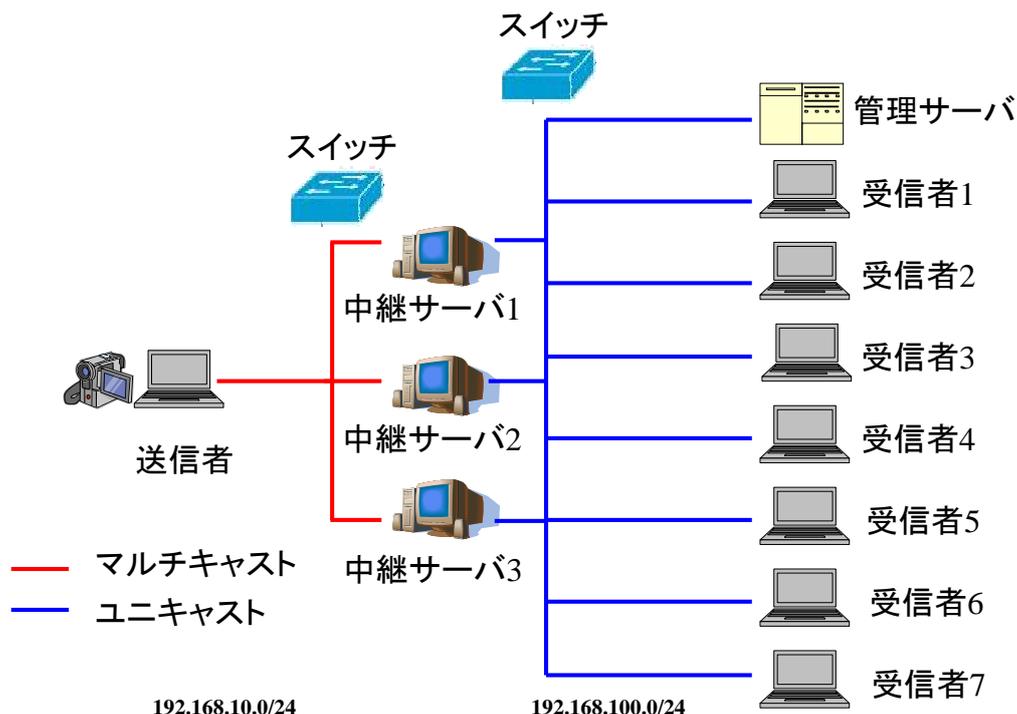


図 7.1: テスト用ネットワークの概要

次に実装を行ったハードウェア環境を表 7.1 に示す．

	管理サーバ	中継サーバ 1	中継サーバ 2	中継サーバ 3
CPU	Intel Core Duo 1.66GHz	AMD Athlon(tm) XP 2200+ 1.80GHz	Intel Pentium4 3.00GHz	Intel Pentium4 2.80GHz
メモリ	1024KB	256KB	512KB	512KB
HDD	100GB	189.92GB	114.50GB	189.92GB
NIC	100BASE-TX	100BASE-TX	100BASE-TX	100BASE-TX
OS	Debian Linux 2.6.18	Debian Linux 2.6.18	Debian Linux 2.6.18	Debian Linux 2.6.18

表 7.1: ハードウェア環境

7.4 実験

7.4.1 実験 1: 狭帯域にいる受信者への配信

実験目的

- ・ パケットロスが 10%以上で中継サーバが切り替わることの確認
- ・ 切り替え後、パケットロス率の変化を見て品質制御を行うことの確認

図 7.2 のように 1 台の受信者と中継サーバの間に dummynet を設置し、パケット量を制限することで擬似的に狭帯域にいる受信者の状態を再現する。この時、dummynet のパケット制限値を 20Mbit/s にし、受信者 1 側で発生するパケットロス率と配信レートの計測し、評価を行う。計測の結果を図 7.3 に示す。

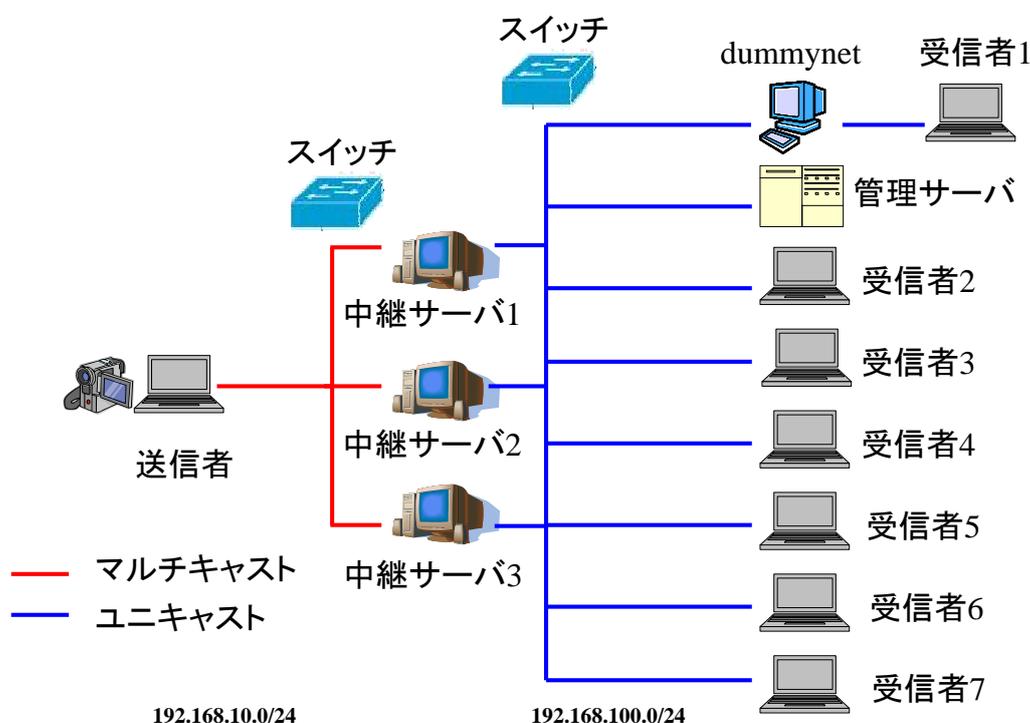


図 7.2: 実験 1 のネットワーク概要

dummynet により受信者 1 では 30%強のパケットロスが発生している。5 回のレポートの後中継サーバを変更するが、パケットロスに変化がない。そのため、他の中継サーバに切り替えることをせず、品質制御を行い、パケットロスを抑えることが出来た。これにより、本実験の目的を満たしたことを示した。

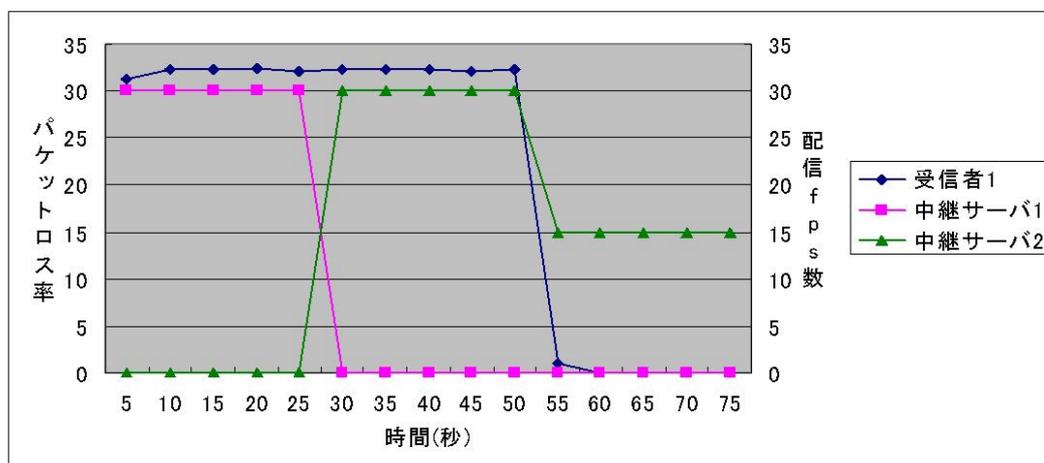


図 7.3: 受信者 1 のパケットロス率と中継サーバの配信 fps 数の変化

7.4.2 実験 2: トラヒックが競合している受信者への配信

実験目的

受信者の配信品質が他の受信者に影響を与える状態での品質制御の確認

ユニキャスト配信の場合、マルチキャスト配信と違い使用ネットワーク帯域資源は配信数に比例する。そのため、配信先の受信者が通信経路を共有している場合、トラヒックが競合し、パケットロスが発生する可能性がある。本実験では、受信者全てが途中経路を共有することでトラヒックの競合を発生させ、その状況での動作を確認する。この時、各受信者のパケットロス率と配信総 fps 数を計測し、評価を行う。結果を図 7.5 に示す。

配信開始後、5 回のレポートの後に中継サーバを変更して配信を行っているが、配信総 fps 数が変化していないため、パケットロス率に一時的な変化が生じるが、ほぼ一定である。この時、パケットロス率の変化はレポートの到達順序が遅い順に一時的に低下している。これは、レポートの遅い受信者が早い受信者の中継サーバの変更の際に生じたネットワーク帯域資源を使用するため、一時的にパケットロス率が下がるものと考えられる。

その後、配信レートが下がる受信者ともう一度中継サーバの変更を行う受信者とは別れるが、品質制御を行う受信者が存在するため配信総 fps 数が減少し、全体のパケットロス率が下がる。これにより、パケットロスにより途切れていた受信者 4 からのレポートが再開している。その後、再び品質制御を行うことで通信経路のネットワーク資源帯域の許容量までパケット数を減少させることができ、トラヒックの競合を抑えることを確認できた。これにより、本実験の目的を満たしたことを示した。

また、本実験ではパケットロスを 5 回連続で検知した場合を前提としているが、パケットロスを 1 回検知した状態で中継サーバの変更、もしくは品質制御を行った場合の結果を図 7.6 に示す。

5 回連続の検知で対応した場合は 80 秒でパケットロスが収縮したのに対して、1 回の検知で対応した場合はパケットロス率が 10% 未満に収縮するのに 535 秒の時間を必要とし

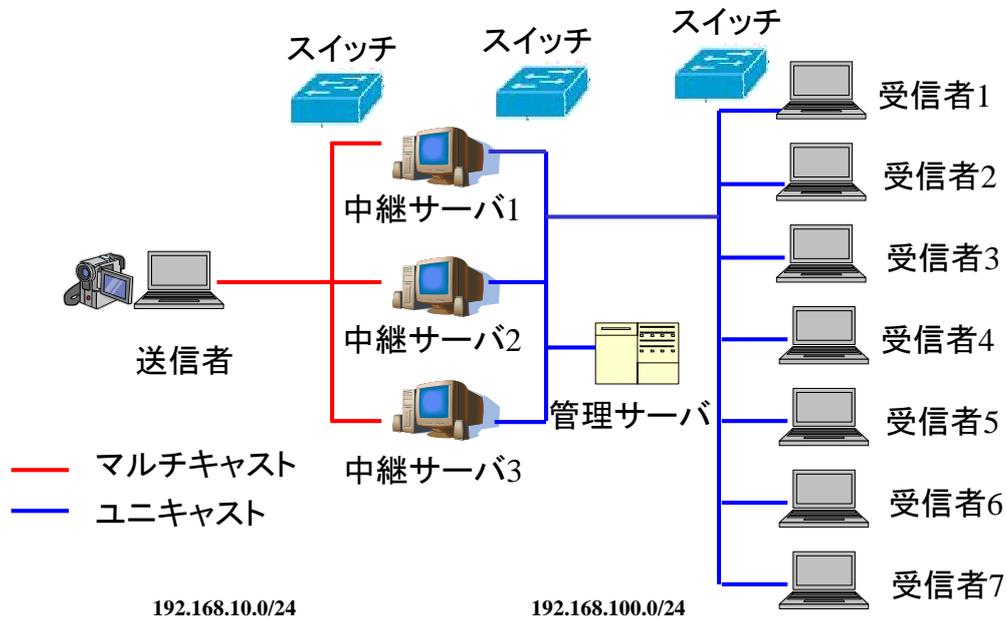


図 7.4: 実験 2 のネットワーク概要

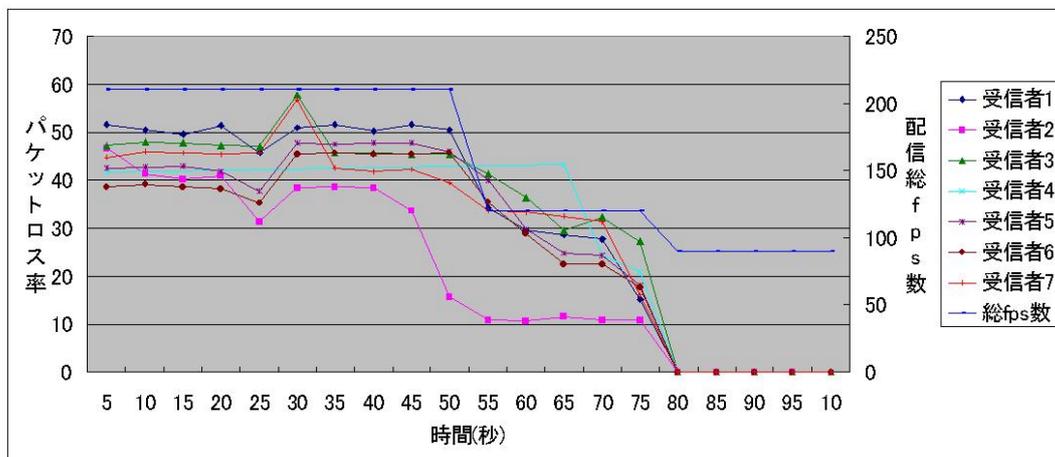


図 7.5: 各受信者のパケットロス率と配信総 fps 数の変化

た．これによりある程度様子を見て対応を行う必要があることを示した．

7.4.3 実験 3: 配信能力が低下した中継サーバからの配信

実験目的

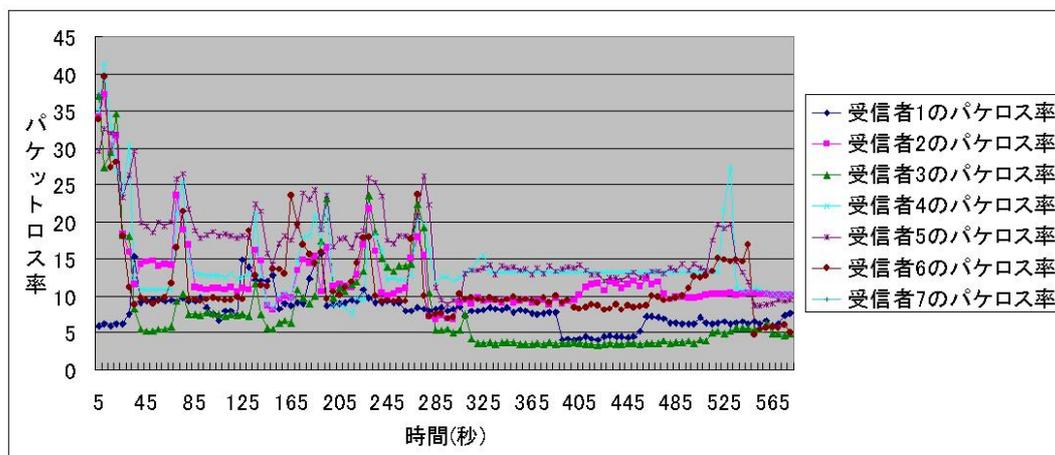


図 7.6: レポート 1 回で対応した場合の各受信者のパケットロス率と配信総 fps 数の変化

- ・ 中継サーバに問題があった場合の中継サーバの切り替えの確認
- ・ 配信能力が低下している中継サーバへ新たに配信を受ける受信者が発生しないことの確認

本システムは配信を行うに当たり、中継サーバの配信能力に依存する。そのため、何らかの原因で中継サーバの配信能力が低下した場合、配信を行う中継サーバを他の中継サーバへ変更する必要がある。本実験では、左側の `dummynet1` のパケットロスレートを 20% に設定し、配信能力が低下した中継サーバを擬似的に再現する。その後、`dummynet2` にてパケットの制限を行った場合の動作を確認する。この時、各受信者のパケットロス率と受信者 1, 2, 3 に配信を行っている中継サーバ 1 と受信者 4, 5, 7 に配信を行っている中継サーバ 2 のそれぞれの配信 fps 数を計測し、評価を行う。結果を図 7.8 に示す。

配信開始 20 秒後に `dummynet1` を起動させ、20% のパケットロスが発生させる。この時、受信者 2, 3 は発生したパケットロスを検知し、中継サーバを変更する。しかし、受信者 1 は他の中継サーバの余剰資源が不足しているため、中継サーバを変更することが不可能となり、品質制御を行うことで対応を行うがパケットロス率が減ることはない。

次に `dummynet2` を作動させ、帯域を制限させる。これにより受信者 4, 5 はパケットロスが発生する。管理サーバは他の中継サーバに受信者 4, 5 を受け入れる余剰資源がないのを確認し、中継サーバの変更をせず、受信者 4, 5 の配信レートを $1/2$ に変更する。これにより受信者 4, 5 のパケットロスは解消され、受信者 1 を受け入れる余剰資源が発生する。その後、中継サーバの変更を行い、受信者 1 のパケットロスも解消される。これにより、本実験の目的を満たしたことを示した。

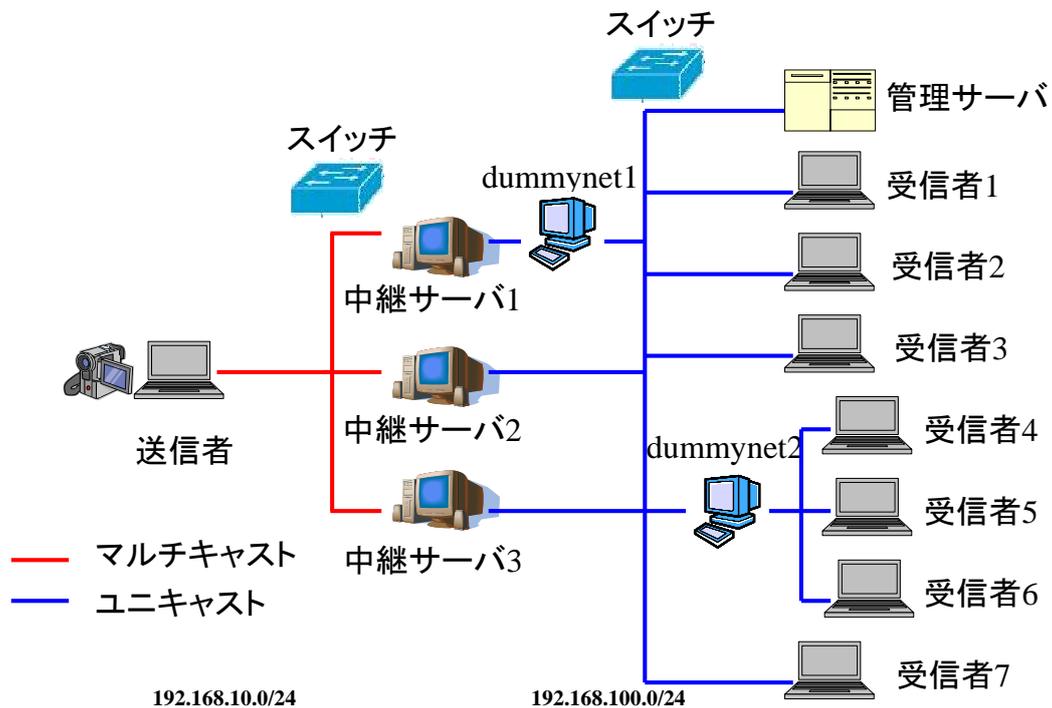


図 7.7: 実験 3 のネットワーク概要

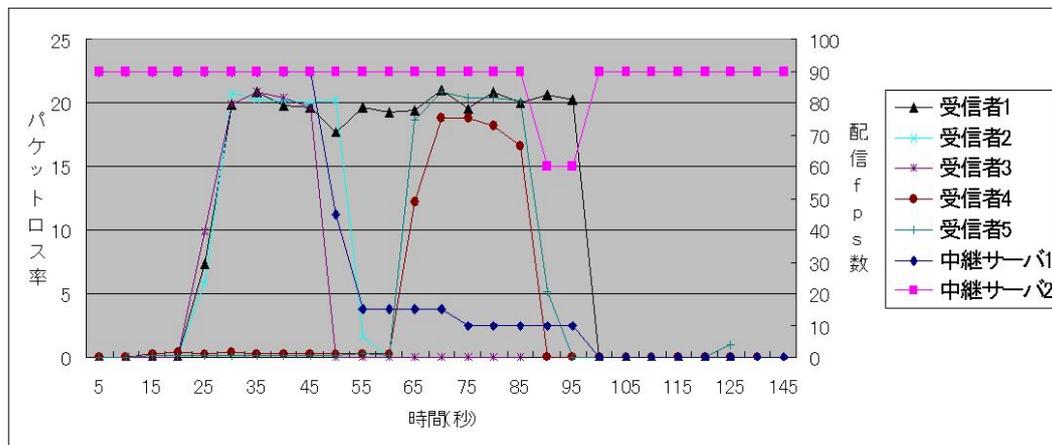


図 7.8: 受信者のパケットロス率と中継サーバの配信 fps 数の変化

7.4.4 実験 4: 負荷が高い中継サーバからの配信

本実験では、図 7.9 のトポロジを用いて実験を行う。本実験では、ネットワーク帯域資源的負荷と計算機資源的負荷の 2 種類の負荷をかけて動作の検証を行う。この時、ネットワーク帯域資源的負荷では受信者 7 台全てを中継サーバ 1 に接続する。計算機資源的負荷では本システムとは別にプログラムを起動し、計算機資源に対し負荷をかけ、その動作を

確認する．結果を図 7.10，7.11 に示す．

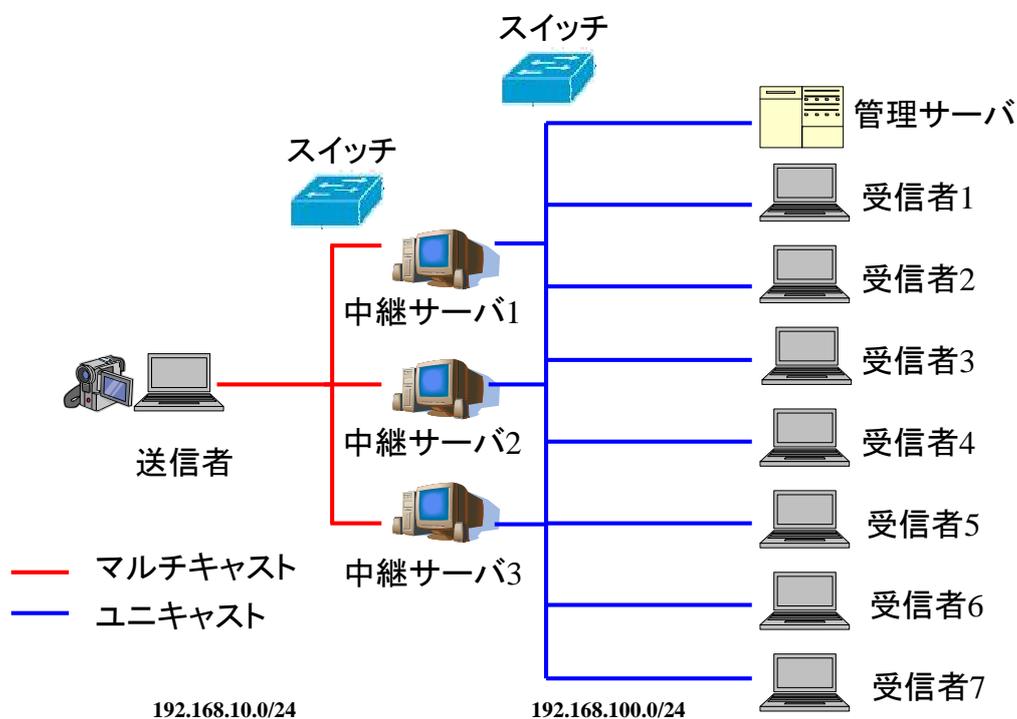


図 7.9: 実験 4 のネットワーク概要

ネットワーク帯域資源的負荷

実験目的

配信 fps 数が 100 以上で中継サーバが切り替わるのを確認

本実験では，受信者 7 台全てを中継サーバ 1 に接続し，パケットロス率と各中継サーバの配信 fps 数を計測し，評価を行う．計測の結果を図 7.10 に示す．

受信者 7 台への配信は中継サーバ 1 台ではネットワーク帯域資源が枯渇し，パケットロス率が高くなる．中継サーバの変更要求を受け，管理サーバは受信者に配信を行う中継サーバの変更を開始する．これにより，中継サーバ 1 台にかかる負荷を他の中継サーバに分散することで，パケットロスを抑えた安定した配信を行うことが示した．

また，中継サーバの変更が行われた受信者のパケットロス率が一度高くなる傾向が見られる．これは，パケットロス率が高い状態で変更を行ったことからパケットロスの計測に用いる rtp ヘッダのシーケンス番号が中継サーバの変更前後で差異があるためだと考えられる

計算機資源的負荷

実験目的

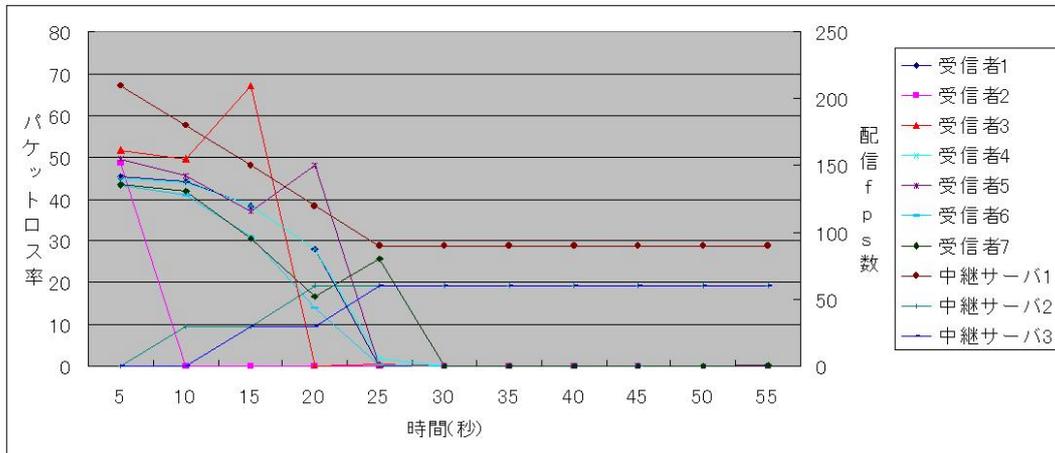


図 7.10: 各受信者のパケットロス率と各中継サーバの配信 fps 数の変化

LoadAverage が 6 以上で中継サーバが切り替わるのを確認

本実験では、受信者 3 台に配信を行っている状態である中継サーバ 1 の CPU に対し負荷をかけ、Load Average の値を変化させる。この時の配信を受けている 3 台の受信者のパケットロス率を計測し、評価を行う。計測の結果を図 7.11 に示す。

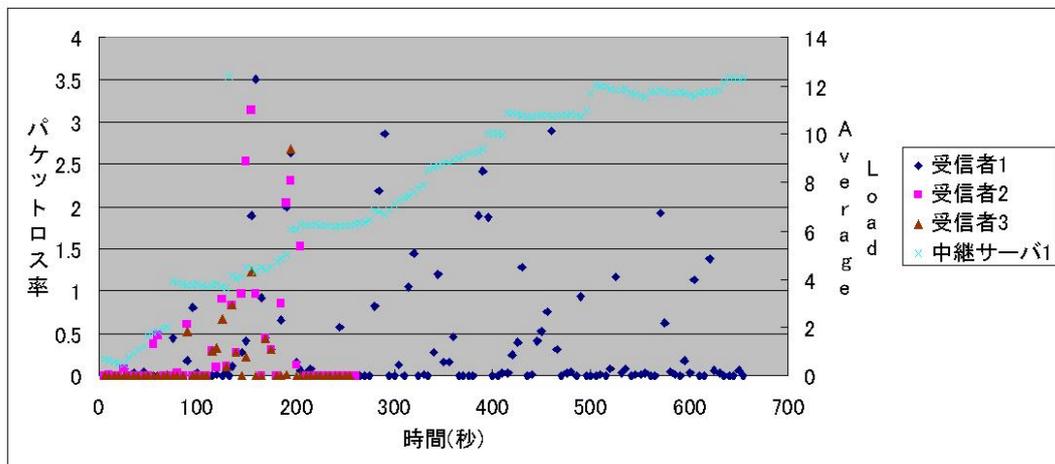


図 7.11: 各受信者のパケットロス率と中継サーバの Load Average の変化

Load Average の値が低いときは安定した配信を行っているが、Load Average の値が上昇するにつれて、不規則的なパケットロスの発生が多くなる。Load Average が 6 を超えた時点で管理サーバは受信者を他の中継サーバへと変更を行う。これにより受信者 2、3 のパケットロスは抑えることが出来た。しかし、受信者 1 は他の中継サーバが受信者 1 を受け入れるだけのネットワーク帯域資源的な余剰資源がないため、中継を続行する。その後、不規則的なパケットロスは発生するが、Load Average の値が 12 を超えてもパケッ

トロス率は 3%未満である．これにより，配信を行う中継サーバの計算機資源に対して高い負荷がかかった場合でも，受信者が 1 台の時，パケットロスの少ない安定した配信を行うことが可能であることが示した．

以上の結果から本実験の目的を満たすことを示した．

7.5 実験のまとめと考察

本章では，本システムで実現した機能について，その有用性を様々な状況を想定し，実ネットワークを使用した実験を行い評価を行った．本実験では，4 種類の実験を行った．実験 1・2 では，中継サーバを変更後もパケットロス率が減少しなかった場合はコンテンツの品質制御を行い，パケットロスの少ない配信を行うことが可能であることが確認できた．また，実験 3・4 では，他の中継サーバに配信可能な余剰資源がある場合，速やかに中継サーバの変更を行いパケットロス率の低いコンテンツ配信が可能であることが確認できた．他の中継サーバに配信可能な余剰資源がない場合は品質制御で対応し，配信可能な余剰資源を確認出来次第中継サーバの変更を行うことが確認できた．従って，本論文の目的であるパケットロスによるコンテンツ品質の劣化の少ない大容量・高品質なコンテンツ配信を行うことが可能であることを示せた．

第8章 結論

本章では，本研究の成果をまとめ，今後の展望を述べる．

8.1 まとめ

本研究では通信品質適応型 DV リレーの設計と実装を行った．本機構を用いることにより，コンテンツ配信において受信者に特別な操作を行わせることなく不特定多数の受信者に対し配信データ品質の劣化の少ない効率的な配信が可能となった．

通常のユニキャスト通信を用いた従来のコンテンツ配信モデルは，受信者の個々の通信インフラへの対応が可能であるが，インターネット上に存在する不特定多数の受信者に対し，即時性の高い高品質・大容量のコンテンツを配信することは一定のネットワーク帯域資源の確保や複数受信者への配信の効率という問題から行うことができない．それらの問題を解決する技術として IP マルチキャスト技術が存在する．しかし，IP マルチキャストにはルータの対応問題，マルチキャストアドレスの管理，経路制御の複雑性といった問題に加え，受信者の個々の通信インフラへの対応が困難である．そのため，IP マルチキャストとユニキャスト双方の技術を利用することで，それぞれ利点を生かす融合技術を実現することが重要である．

本研究では，管理サーバ，中継サーバを用い，IP マルチキャストにより配信されるリアルタイム DV ストリームを経路上にある中継サーバがユニキャストに変換し，ストリーミングコンテンツ受信者状況に応じて通信サーバや配信コンテンツの品質を変化させる DV データ転送システムを提案し，実現した．

本機構では映像配信機構として DVTS(Digital Video Transport System) を拡張し，ネットワークから DV データを受信し再送信する機能と，再送信時に品質制御を行う機能を追加した実装を用いた．

本研究により，パケットロスを抑えた安定した配信が可能となった．また，IP マルチキャストでは困難な受信者の環境に合わせた配信が可能であることを示した．本システムにより，IP マルチキャストとユニキャストの融合を行うことで IP マルチキャストが届かないネットワークに存在する受信者に対してもコンテンツの配信が可能となった．これにより，多様な環境にいる受信者へのコンテンツ配信の効率化を実現した．

8.2 今後の課題

本研究における今後の展望として以下の事項が挙げられる．

- レポートタイミングの調整

本機構ではノード管理に関する処理を管理サーバのみが行っている。そのため、多数の受信者から一斉にパケットロス通知のレポートが送信された場合、管理サーバに自身の処理能力を超える負荷を与える可能性がある。本機構の実装では個々のタイミングを調整し、管理サーバにかかる負荷を均一に調整することは行っていない。そのため、受信者の状況に合わせた動的にレポートタイミングを調整し、管理サーバに対する負荷を均一にする機構が必要となる。

- 品質制御

本機構の実装では品質制御を行う際の手法がフルレートの下はハーフレートとなっている。そのため、品質制御を行う際のパケット量が雑把なものとなる。この場合、ハーフレートの状態ではパケットロス値が0だったとしてもフルレートでの配信を行うことが可能である保障はない。そのため、通信品質に適応した通信を行うにはより細かい品質制御アルゴリズムを考える必要がある。また、FECなどのパケットロスが発生した際の品質維持についても考える必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導を頂きました、慶應義塾大学常任理事村井純博士、同大学徳田英幸博士、中村修博士、楠本博之博士に深く感謝致します。

また、絶えず御指導と御助言を頂きました慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科准教授朝枝仁博士、慶應義塾大学SFC研究所上席所員小川晃通博士に感謝致します。

そして本研究を進めていく上で、様々な励ましと助言、お手伝いをいただきました、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程久松剛氏、松園和久氏、三島和宏氏、Achmad Basuki氏、岡田耕司、堀場勝広氏、工藤紀篤氏、水谷正慶氏、松谷健史氏、修士課程遠峰隆史氏、金井瑛氏、空閑洋平氏、奥村祐介氏、六田佳祐氏、同大学SFC研究所上席所員中村友一氏に感謝いたします。同大学総合政策学部上原雄貴氏、永山翔太氏、井上大地氏、同大学環境情報学部波多野敏明氏、三部剛義氏、徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤合同研究プロジェクトの皆様感謝致します。

共に卒論を執筆した、慶應義塾大学総合政策学部中里恵氏、同大学環境情報学部黒宮佑介氏、立石幹人氏に感謝します。

最後に、今まであらゆる面で多大な助力を頂き、いつも私を支え励ましてくれた家族と友人に心から深謝と敬愛を表し、謝辞と致します。

以上を持って、謝辞といたします。

参考文献

- [1] YouTube, LLC. YouTube WWW page. URL: <http://www.youtube.com>, Dec 2008.
- [2] niwango, inc. ニコニコ動画 WWW page. URL: <http://www.nicovideo.jp/>, Dec 2008.
- [3] Obvious. twitter WWW page. URL: <http://twitter.com/>, Dec 2008.
- [4] IPTV FORUM JAPAN. IPTV FORUM JAPAN WWW page. Dec 2008.
- [5] A. Vakali, and G. Pallis. Content Delivery Networks: Status and Trends. *IEEE Internet Computing, IEEE Computer Society*, pages 68–74, Nov 2003.
- [6] G. Pallis, and A. Vakali. Insight and Perspectives for Content Delivery Networks. *Communications of the ACM, Vol. 49, No. 1*, 49(1):101–106, Jan 2006.
- [7] 中村 嘉隆, 山口 弘純, 廣森 聡仁, 安本 慶一, 東野 輝夫, 谷口 健一. エンドホストの動画像フィルタリングによるアプリケーション層での QoS マルチキャストプロトコルの提案. *情報処理学会論文誌, Vol.45, No. 2*, 45(2):438–448, 2004.
- [8] Padmanabhan, V.N. Wang, H.J. Chou, P.A. Resil-ient peer-to-peer streaming. *Proceedings. 11th IEEE International Conferen-ce*, pages 16–27, 2003.
- [9] Yasuo Tsuchimoto, Mohammad Abdul Awal, Poompat Saengudomlert, Teerapat Sanguank-otchakorn, and Kanchana Kanchanasut. Band-width Adjustable DVTS on the Heterogeneous Internet Environments for Distance Learning. *2007 International Symposium on Applications and the Internet Workshops*, 2007.
- [10] S.McCanne, V.Jacobson and M.Vetterli. Receiver-driven Layered Multicast. *ACM SIGCOMM*, Aug 1996.
- [11] 小口敦司, 池上大介, 中里秀則, 富永英義. 独立複数ツリー型分散 ALM ストリーミングシステムの手案. *電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, no.492, NS2006-157*, 106(492):35–40, Jan 2007.
- [12] MPEG-2 Generic coding of moving pictures and associated audio information. <http://mpeg.telecomitalia.com/standards/mpeg-2/mpeg-2.htm>, Oct 2000.
- [13] A.Ogawa. *DVTS (Digital Video Transport System) WWW page*, November 2001. <http://www.sfc.wide.ad.jp/DVTS/>.

- [14] J. Postel. *User Datagram Protocol*, August 1980. RFC 768.
- [15] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson. *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*, July 2003. RFC 3550.
- [16] *Specifications of Consumer-Use Digital VCRs using 6.3mm magnetic tape*, 1994. HD Digital VCR Conference.
- [17] HD DIGITAL VCR CONFERENCE. Specifications of Consumer-Use Digital VCRs PART1 General Specifications of Consumer-Use Digital VCRs. *Specifications of Consumer-Use Digital VCRs using 6.3mm magnetic tape*, pages 1–61, Dec 1994.
- [18] L. Rizzo. dummynet WWW page. URL: <http://info.iet.unipi.it/?luigi/ipdummynet/>, Dec 2008.