

修士論文 2010年度 (平成22年度)

自律分散型 Transmission Gateway を用いた
高安定 Multicast の実現

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
峯木 厳

自律分散型 Transmission Gateway を用いた 高安定 Multicast の実現

インターネットを用いた一对多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信を実現する場合、送信者の計算機資源やネットワーク資源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。しかし多数の受信者に対して同報配信する IP マルチキャストでは、データ送信者が各受信者におけるコンテンツ受信品質を保証することは困難であり、安定性を高めるための IP マルチキャスト通信技術が求められている。

本研究では、自律分散型ゲートウェイ (Transmission Gateway (TG)) を用いた高安定なマルチキャスト通信を実現するシステムを構築した。TG は送受信者間ネットワーク上に複数設置され、受信者と同じマルチキャストコンテンツを受信しておく。TG は各受信者における受信品質状態を監視しておき、受信者のパケット損失を検知した場合は、自ら受信しているパケットをユニキャストでその受信者に転送してデータ補完する。

TG は損失パケットの補完以外に、マルチキャスト→ユニキャストトランスレータの機能も持つ。つまり、受信者が受け取るマルチキャストパケットの損失率が高く、TG が受信しているマルチキャストパケットの損失率が低い場合は、受信者はマルチキャスト受信を中断し、TG からユニキャストで受信を行う。また、自立分散型 TG が連携を行うことで、受信効率の高い TG が、損失パケットの転送、および、ユニキャスト転送を行う機能も持つ。

本研究では、これらの機能を持つ TG を実装し、提案システムの有効性を様々なテストケースを用いて検証し、評価を行った。本提案システムの実現により、受信データの欠損を軽減した高安定マルチキャスト配信が可能となった。

キーワード

1. ストリーミングアプリケーション, 2. IP マルチキャスト, 3. トランスレータ,
4. インターネット

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

峯木 巖

Realization of High-Stability Multicast Using an Autonomous, Distributed Transmission Gateway

To realize one-to-many broadcast style real-time streaming over the Internet, IP multicast is the effective architecture, as it can reduce computing resources at the data sender and network resources. However, because only one copy of each data packet is sent to an unlimited number of multicast receivers, it is difficult to guarantee the data reception quality for each receiver, and hence stable IP multicast communication architecture is desired.

In this study, we establish the high-stability multicast using an autonomous, distributed Transmission Gateway (TG). Multiple TGs are installed at multicast networks. Some of the responsible TGs join and receive appropriate multicast streams receives join, and these TGs monitor the reception quality for each receiver and transmit missing packets to complement packets lost by the receiver.

The TG also has the function to translate multicast streams to unicast streams. Therefore, the TG could forward the translated unicast streams to receivers if the multicast reception quality for the receivers is worse than the one for the TG. Since the multiple TGs can negotiate the multicast reception qualities among the TGs, the most effective TG can complement lost packets or transmit unicast streams in stead of multicast streams.

We implemented the actual TG and evaluate the effectiveness of our proposed system. According to the result, we provide the high-stability multicast communication system that reduces the possibility of packet loss.

Keywords :

1. Streaming, 2. IP Multicast, 3. Translator,4. Internet

Keio University Graduate School of Media and Governance

Gen Mineki

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 本研究の目的	1
1.3 本論文の構成	2
第2章 要素技術	3
2.1 IP ネットワークにおけるストリーミング区分	3
2.2 通信技術	3
2.2.1 ユニキャストとIP マルチキャスト	4
2.2.2 CDN	6
2.3 再生品質向上手法	7
2.3.1 パケットの欠損を回避するためのデータ転送制御手法	7
2.3.2 欠損パケットを事後補完するデータ再送信手法	7
2.4 まとめ	8
第3章 関連研究と問題点	9
3.1 アプリケーションレイヤーマルチキャスト	9
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	10
3.3 階層化マルチキャスト	10
3.4 IP マルチキャストとユニキャストの併用技術	12
3.4.1 RAMS	12
3.4.2 ERAMS	15
3.4.3 PRAMS	16
3.5 まとめ	18
第4章 アプローチ	19
4.1 本研究の要求事項	19
4.2 システム概要	20
4.2.1 基礎概要	20
4.2.2 IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信の併用	21
4.2.3 コンテンツ状態の監視と対処	22
4.3 まとめ	23

第5章 設計	24
5.1 設計要件	24
5.1.1 全体構成	24
5.2 動作概要	25
5.2.1 Transmission Gateway 受信者間の動作概要	25
5.2.2 Transmission Gateway 同士の動作概要	26
5.3 モジュール構成	27
5.3.1 情報管理モジュール	28
5.3.2 実行制御モジュール	28
5.3.3 配信手法変換モジュール	28
5.3.4 リンク情報モジュール	30
5.3.5 受信評価モジュール	31
5.3.6 映像受信モジュール	31
5.3.7 Join/Leave 管理モジュール	31
5.3.8 映像転送モジュール	31
5.4 まとめ	31
第6章 実装	33
6.1 実装環境	33
6.2 実装概要	33
6.2.1 受信者用 proxy と TG の初期設定	33
6.2.2 情報管理モジュール	33
6.2.3 実行制御モジュール	34
6.2.4 配信手法変換モジュール	35
6.2.5 リンク情報モジュール	36
6.2.6 受信評価モジュール	39
6.2.7 Join/Leave 管理モジュール	40
6.2.8 映像受信モジュールと映像転送モジュール	41
6.3 まとめ	41
第7章 評価	42
7.1 評価概要	42
7.2 評価環境	42
7.2.1 評価用ネットワーク	42
7.2.2 評価用機器	42
7.3 評価	43
7.3.1 評価1	44
7.3.2 評価2	46
7.4 評価のまとめと考察	49

第 8 章	結論	50
8.1	まとめ	50
8.2	今後の課題と展望	51
謝辞		53

目 次

2.1	ストリーミング概要	3
2.2	ユニキャスト概要	4
2.3	マルチキャスト概要	5
2.4	CDN 概要	6
3.1	IP マルチキャスト配信の概要図	9
3.2	アプリケーションレイヤーマルチキャスト配信の概要図	9
3.3	デジタルコンテンツの階層符号化概要図	11
3.4	マルチキャスト概要図	12
3.5	階層化マルチキャスト概要図	12
3.6	RAMS 概要図	13
3.7	RAMS のデザイン	13
3.8	RAMS 動作概要	14
3.9	ERAMS 概要図	15
3.10	ERAMS 動作概要	16
3.11	PRAMS 概要図	17
3.12	PRAMS 動作概要	17
4.1	提案システムの概要	20
5.1	設計概略図	25
5.2	TG 受信者間の動作概要	26
5.3	TG 同士間の動作概要	27
5.4	送信者 1 台：受信者 1 台のストリームの複製	29
5.5	送信者 1 台：受信者 n 台のストリームの複製	29
5.6	欠損したパケットの補完	30
5.7	受信者のコンテンツへの参加と離脱のイメージ	32
6.1	コンテンツリスト構造体	36
6.2	受信者リスト構造体	36
6.3	欠損したパケットの補完手法	37
6.4	リンク情報モジュール	38
6.5	パケットロスの算出法	40
7.1	評価用ネットワーク仮想トポロジ図	43

7.2	欠損パケットの補完	44
7.3	評価 1: TG の変更における評価トポロジ	45
7.4	TG の変更	45
7.5	パケットロの競合が発生した場合	46
7.6	パケットロの競合が発生した場合	47
7.7	変更に必要な検知回数が 1 回の場合	48
7.8	変更に必要な検知回数が 5 回連続の場合	48

表 目 次

6.1	ソフトウェア環境	33
7.1	評価用 VM ホスト, 仮想ホスト・ルータ, Dummynet の仕様	43

第1章 序論

1.1 背景

現在、インターネットの高速化に伴い、インターネットサービスの形態として、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る。例えば、IPTV [3] や企業説明会などのイベントの生中継や、スポーツやエンターテインメントなどのライブ中継、一般のインターネットユーザによる情報発信といった不特定多数の受信者へのストリーミングサービスが存在する。代表的な事例として、Ustream [4] にて配信されたアメリカのバラク・オバマ大統領就任演説 [5]、宇多田ヒカルの活動休止ライブ [6] などが挙げられる。また、Ustream だけに限らず、リアルタイム動画配信サイトのニコニコ生放送 [7] などを見ても、リアルタイム性のあるストリーミングアプリケーションが注目されていることは明確であり、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。

しかし、ネットワーク帯域資源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である。ベストエフォート型のインターネットにおいて、配信経路の状態が動的に変動することから、受信者までの到達性は安定しない。このことから、送受信者間の配信データ到達の安定性は各受信者で異なっており、配信データが欠損した場合は個別に対処する必要がある。このとき、送信者が各受信者の欠損データへの対処を個別に行うには、送信者の計算機資源、ネットワーク資源への負荷が増加し、配信システム自体がダウンしてしまう可能性がある。

以上のことから、将来へ向けた高品質・大容量化するリアルタイムコンテンツ配信の普及によるユーザ数の増大を考慮した場合、多様な受信者の環境へ適応し、配信データの欠損を抑えた配信の高安定化及び、コンテンツの高品質化を両立する配信手法が必須である。

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管理を行うこと、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欠損パケットの再送信を行うことが困難である。本研究では、これを克服するシステムを構築することで、パケットロスが少ない安定したリアルタイムストリーミングコンテンツ配信を行うことを目的とする。これら一連の作業を送信者、受信者、通信経路上のルータに特別な操作をすることなく行うことで、不特定多数の受信者に対しコンテンツ品質の劣化が少ない安定した配信を行う。本研究の実現により、IP マルチキャスト配信の通信品質を向上することで、各受信者にパケットロスを抑えた安定した一対多の配信環境を実現した。

このとき、本システムでは DVD のフォーマットである MPEG2-TS と同品質のビットレートのリアルタイムストリーミングを対象とする。また、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ことから、配信データ受信から再生までの時間に到達しないパケットをパケットロスとし、パケットロスによる音声・映像のノイズをコンテンツ品質の劣化と定義する。

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・音声転送技術に関して述べる．また，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，計算機資源を有効利用し，配信データの欠損の少ない安定した配信を行う技術に関して述べる．

2.1 IP ネットワークにおけるストリーミング区分

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．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 左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 右のストリーミング型再生方式である．オンデマンド型音声・映像配信だけでなく，ニコニコ生放送や Ustream などリアルタイム型音声・映像配信にも用いられる．

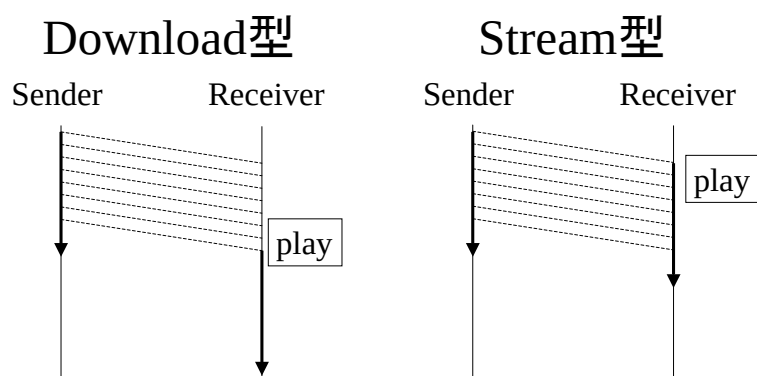


図 2.1: ストリーミング概要

2.2 通信技術

本節ではストリーミングを行う上で用いられる通信技術に関して述べる．

2.2.1 ユニキャストとIP マルチキャスト

現在、ストリーミング配信技術として一般的に用いられる配信手法がユニキャスト (1 対 1) 通信である。通常のユニキャストを用いて送信者が受信者 n 人に通信を行う場合、図 2.2 のように送信者は必要とするネットワーク帯域資源を一对一通信時の n 倍のデータ送出を行う必要があり、計算機資源的にも、ネットワーク資源的にも送信者にかかる負荷は増加する。

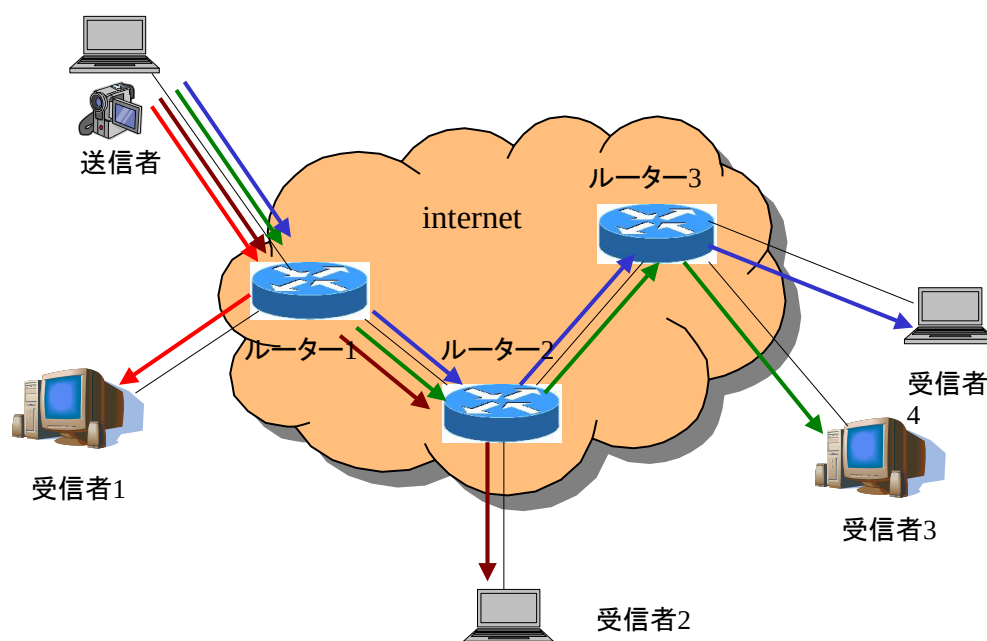


図 2.2: ユニキャスト概要

IP マルチキャストの概要を図 2.3 に示す。

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送信者の計算機資源、ネットワーク資源に対する負荷を軽減し、配信することが可能となる技術である。これにより、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。

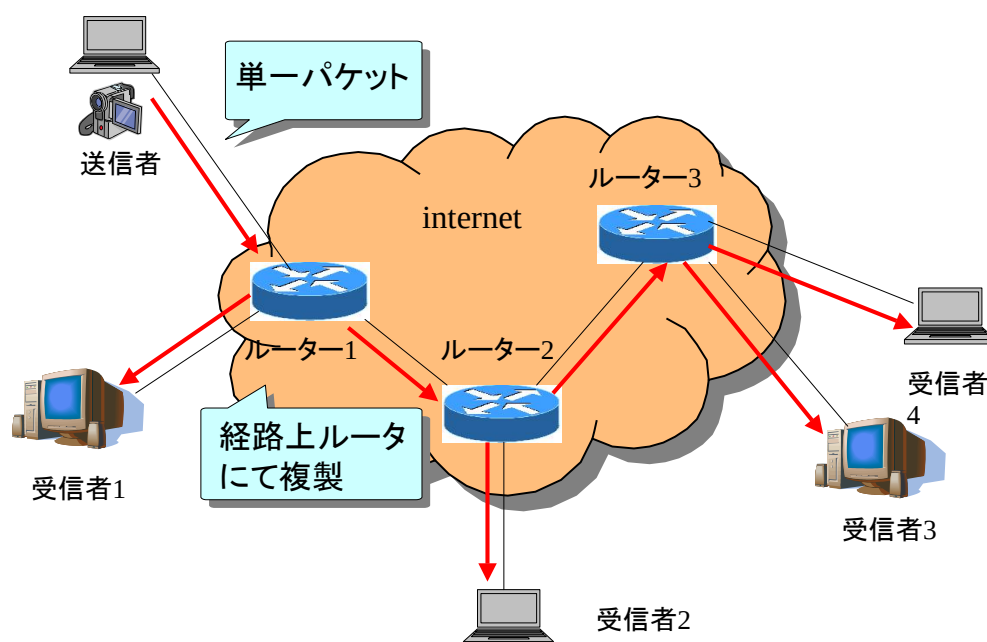


図 2.3: マルチキャスト概要

IP マルチキャスト配信では、マルチキャストデータの通信品質把握および制御ができないという問題がある。通常のユニキャストにおける通信品質把握では、送信者が受信者からのフィードバック情報を受け取ることで、個々の通信品質を把握し、それに応じた制御を行うことが可能である。しかし、IP マルチキャストを用いた通信では、送信者は受信者 IP アドレスや受信者数、配信 tree の構造を把握せずにデータを送受信することができる。しかし、IP マルチキャストではトランスポートプロトコルに UDP [8] を用いるのが一般的であり、送信者は自分が送信したデータが全てのグループメンバに到達したか否かを確認することができない。そして、送信者は全ての受信者がどのような品質でデータを受信しているのか、また、データ送信帯域はどれくらいに制御すべきであったのかを判断することは不可能である。例えば、パケット欠損や通信障害を発見し、欠損パケットの再送信を行うことができる。同様の技術を用いて、IP マルチキャストにおいても各受信者に対して個別に通信品質を把握し、欠損パケットの再送信を行う手法は存在する [9]。しかし、これは小規模ネットワークでの利用や比較的受信者数の少ないアプリケーションを想定しており、多数の受信者が存在する広域インターネット環境ではフィードバック情報が頻繁に送信され、ネットワーク負荷を急激に増大するという問題がある。

2.2.2 CDN

大容量のデータを高速に転送するための技術として、Contents Distribution Network(CDN)[10][11]が存在する。CDN とはインターネット網内に構築されるコンテンツ配信用ネットワークのことを指す。CDN では、オリジナルコンテンツサーバと以前に配信したデータをキャッシュとして保持するキャッシュサーバ、需要の高い情報を予めキャッシュするリバース・キャッシュサーバの 3 種類の配信サーバを用いる。CDN の概要を図 2.4 に示す。

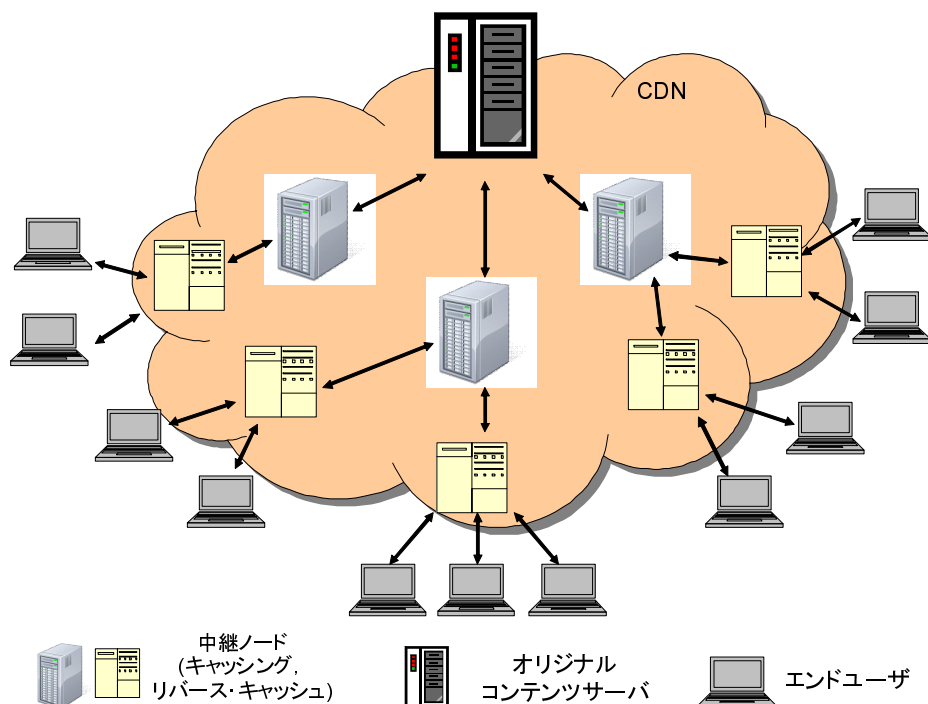


図 2.4: CDN 概要

CDN では、データを配信するためのキャッシュサーバ、リバース・キャッシュサーバを 1 つのサイトに集中配備するのではなく、インターネット上に分散して設置する。このとき、配置には通常の DNS システムを用いた手法だけでなく、Anycast 技術を用いて導入されることもある。これにより、データの要求が行われたネットワークに、物理的・ネットワーク的に近い配信サーバを選び、そこからデータを転送する手法を用いている。しかし、バラク・オバマ大統領就任演説や宇多田ヒカルのライブ中継に代表されるように、瞬間的に大規模なアクセスが集中した場合、負荷を分散できず、システム全体がダウンしてしまうという問題がある。また、CDN が対象とするのは、送信者は国や企業などの組織であり、一般のユーザが送信者となり CDN などの大規模なサービスを利用することは運用のコスト的に難しく、個人での大規模配信に CDN を利用することは困難である。

2.3 再生品質向上手法

ストリーミングの再生品質を向上する品質制御技術として、パケットの欠損を予め回避する転送制御手法と欠損したパケットを事後補完する再送信手法が存在する。

2.3.1 パケットの欠損を回避するためのデータ転送制御手法

パケットの欠損を回避するための制御手法として、転送レート制御が挙げられる。これはストリーミングの通信状況やネットワーク状態を検知/監視し、プロアクティブに適切な転送レートを予測し、次のデータ転送に対する転送レートを変更し、パケットの欠損を回避するための制御技術である。代表的な例として、TCP Friendly Rate Control (TFRC) [12, 13] や Dynamic FEC [14] などがある。これらは通信状態やネットワークの混雑度に応じて動的に転送レートを変化させて欠損パケット量を軽減させる技術である。既に標準化技術として広く普及している [15] が、アルゴリズムの精度がストリーミングプロトコルの精度に直結されるため、特に複雑系ネットワークや多様な受信環境が混在するマルチキャスト通信などでは、プロトコルそのものが複雑になってしまうケースがある。また、欠損パケットを完全に排除することを目的とした手法でないため、信頼性を求めるアプリケーションには、第 2.3.2 節で述べるデータ再送信手法や TCP 通信などと連携させる必要もある。

2.3.2 欠損パケットを事後補完するデータ再送信手法

IP マルチキャストなどの信頼性が低い UDP 通信で転送されたデータが欠損した場合、適切な量の欠損パケットをユニキャストで再送することで信頼性を向上する技術である。これはリアクティブに、つまりパケットロスという事象に対して事後に行われる動作である。利点としては、前述の転送レート制御のような「予測アルゴリズム」などを考慮しないため、プロトコルの複雑性を回避できる。ただし、パケット欠損をトリガとする後追いの手法であるため、パケットロスが起きたタイミングで計算機資源やネットワーク資源を集中的に使用し、結果として更なるパケットロスなどを誘発してしまい、パケットロスの収束に時間を要するといった欠点を有する。また、再送を行う欠損パケットに関しては、アプリケーションの種類や特性に応じて再送量などが異なることも注意する必要がある。つまり、時間軸と補完率の関係により、完全性に対する曖昧度を含むことを許容する。例えば、リアルタイムストリーミングのようなアプリケーションでは、再生バッファが空になると欠損したパケットの再送は行わずに次のフレーム再生に移行することが望ましい。これは再生の時間軸をデータ転送者や他の再生者と合わせ、リアルタイム性を維持するためである。また、逆に、IP マルチキャストを用いたグループメンバーへのファイル転送などのアプリケーションでは、パケット欠損を排除することが他の受信者との時間軸を合わせることでより重要であるため、補完率を 100% にし、完全性を求めることになる。

2.4 まとめ

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，計算機資が枯渇することなく，配信データの欠損の少ない安定した配信を行う技術に関して述べた．次章では，本章で述べた通信技術を用いた関連研究とその問題点について述べる．

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) [16] とは IP マルチキャストの代替手法として利用される通信である。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ーで行うが、ALM はこの機能をアプリケーションレイヤーで実現する。具体的には、IP マルチキャストでは、図 3.1 のようにルータで行っていたパケットの複製処理を図 3.2 のように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。

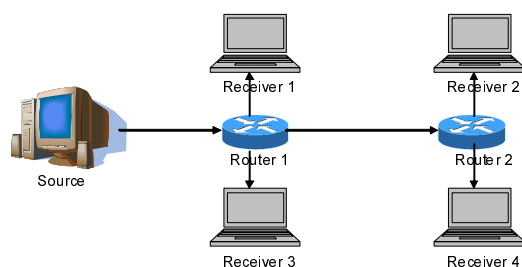


図 3.1: IP マルチキャスト配信の概要図

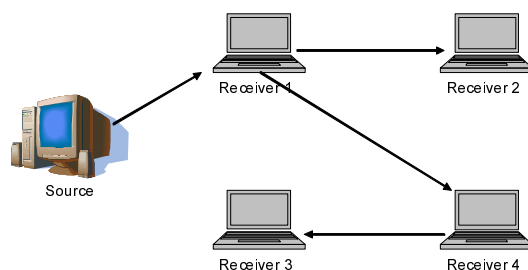


図 3.2: アプリケーションレイヤーマルチキャスト配信の概要図

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を配信することに用いる。

しかし、ALM ではノードをリレーすることによって配信を行うことから、各ノードの受信している環境が異なるため、配信経路によってはネットワーク帯域資源の低いインフラや計算機資源の低い機器の参加により遅延が増加する可能性がある。また、配信経路上のノードは常に安定してネットワークに存在しているとは限らない。そのため、上流のノードが離脱した際、配信網を再構築する必要が生じ、配信網自体が不安定になるといった課題が存在する。

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 プロトコルとして、ビデオ会議を想定した Emma/QoS が提案されている [17]。

この手法では、P2P 上の各受信者が映像を他の受信者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受信者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、ビットレートを 256kbps と低品質なサービスに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 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ストリーミング品質を受信者が選択できる符号化方式である。図 3.3 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。

通常のマルチキャスト配信を図 3.4、階層化マルチキャスト [18] を図 3.5 に示す。通常の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

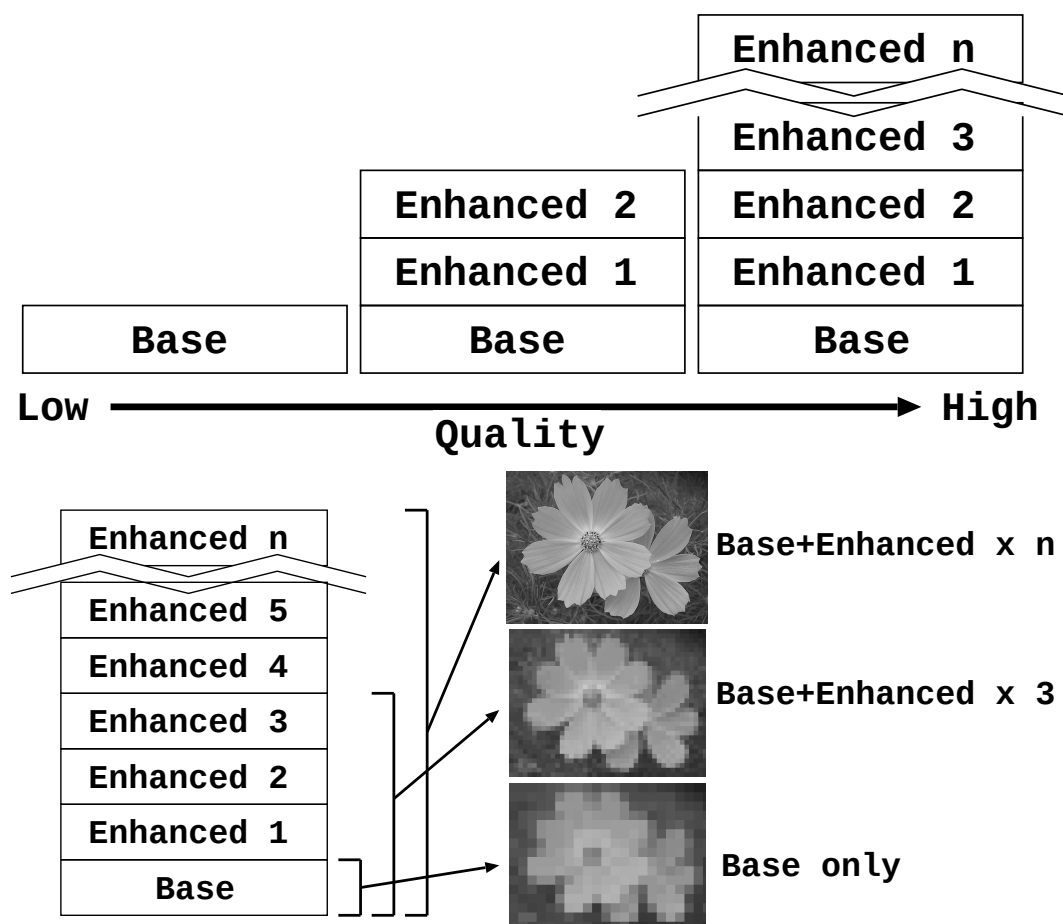


図 3.3: デジタルコンテンツの階層符号化概要図

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、IP マルチキャストで配信を行う場合は、受信者のネットワーク環境の状態に応じて、頻繁にマルチキャストセッションへの Join/Leave を繰り返す可能性がある。そのため、配信を行うマルチキャスト網の再構築が頻繁に発生し、配信を行う際に発生する遅延時間が増加する問題が生じる。また、少ないグループ数で幅広い帯域をサポートできるように、各グループの転送レートを指数関数的に増加するように配慮されている。この結果、上位のグループへの参加により転送レートが急増してしまうため、TCP との親和性が低いといった問題がある。

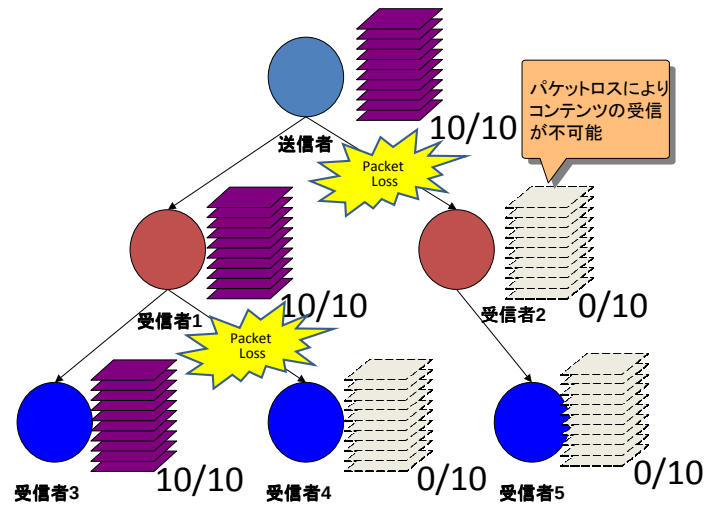


図 3.4: マルチキャスト概要図

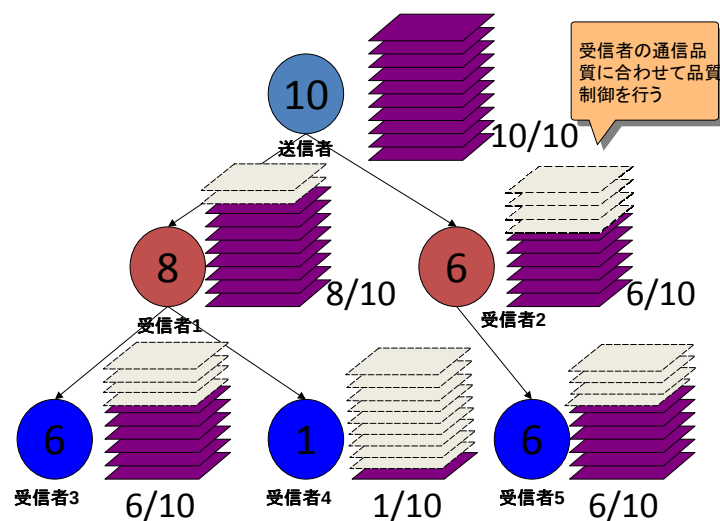


図 3.5: 階層化マルチキャスト概要図

3.4 IP マルチキャストとユニキャストの併用技術

3.4.1 RAMS

IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信を併用した音声・映像配信技術として、Unicast-Based Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions (RAMS) [19] が IETF にて提唱されている。RAMS は IPTV を対象としている。RAMS の概要を図 3.6, 3.7 に示す。

RAMS では、送受信者間に Retransmission Server (RS) を設置する。RS には受信者と

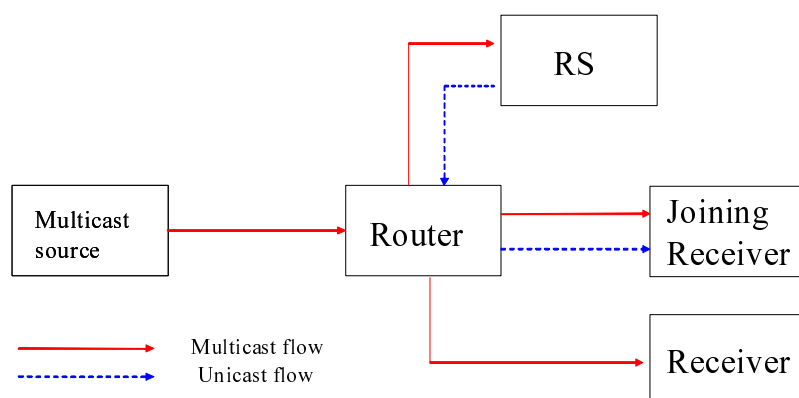


図 3.6: RAMS 概要図

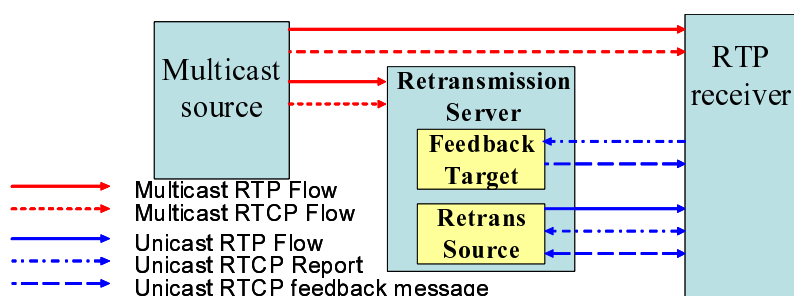


図 3.7: RAMS のデザイン

メッセージ通信を行う Feedback Target(FT) とユニキャスト配信を行う Burst and Retrans Source(BRS) の二つの機能が存在する。FT では、受信者からのコンテンツ配信要求やユニキャスト配信を受信するためのポート番号、ユニキャストコンテンツを受信して計測した使用可能ネットワーク帯域といった情報を通知する RAMS-Request (RAMS-R) や RAMS-R に対する返事である RAMS-Information (RAMS-I) の送受信を行う。BRS では、受信している IP マルチキャストコンテンツをユニキャストに変換し、受信者がマルチキャストセッションに参加してから実際にデータを受信するまでの待ち時間を軽減するための事前配信とマルチキャストコンテンツの配信データ欠損による品質劣化が発生した際の再送信に関する通信を行う。

次に RAMS の動作概要を図 3.8 に示す。

1. 受信者は RS に対し、コンテンツ配信要求やポート番号を通知する RAMS-R を送信
2. RAMS-R を受信した RS は自身の join しているコンテンツから該当するコンテンツを検索
 - (a) 該当コンテンツが見つかった場合、RAMS-I を Accept Responses として受信者へ送信

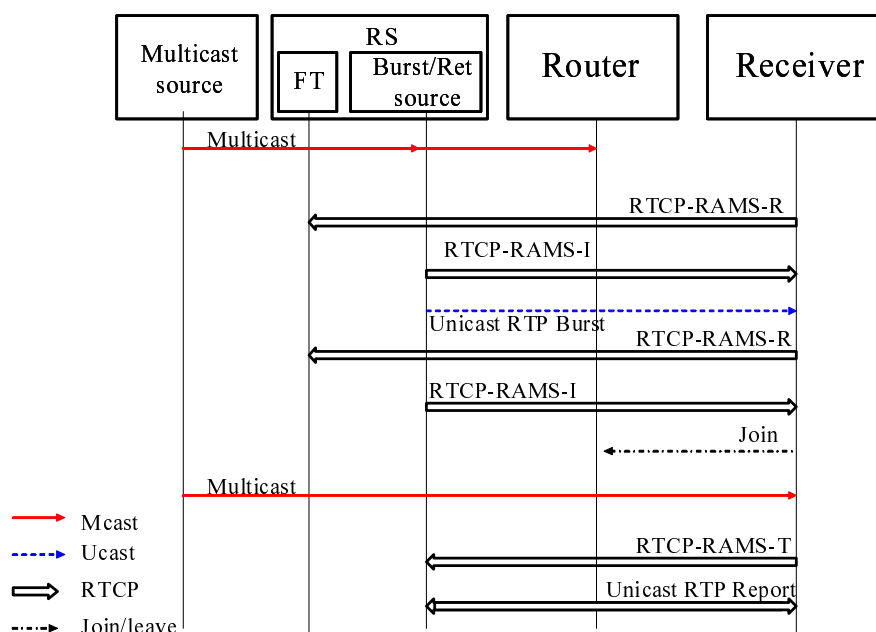


図 3.8: RAMS 動作概要

- (b) 該当コンテンツが見つからなかった場合, RAMS-I を Reject Responses として受信者へ送信
- RS は受信している IP マルチキャストコンテンツをユニキャストに変換し, 受信者へ配信
 - ユニキャスト配信を行う際に以下の情報を Reference Information として同時に配信
 - Conditional Access System(CAS) のキー
 - MPEG の I フレーム など
 - 受信者はユニキャストを受信後, マルチキャストセッションに IGMP [20] もしくは MLD [21] により参加
 - 受信者は IP マルチキャストを受信した後, ユニキャスト配信の停止要求として RAMS-Termination(RAMS-T) を RS に送信
 - 以後は IP マルチキャストのみを受信
 - コンテンツにてパケットロスが発生した場合は RS が所持しているキャッシュから欠損したパケットを再送信することで欠損パケットを補完

このとき, RAMS では単一の RS によって構成されるシステムであるため, RS にアクセスが集中した場合や RS に対して再送要求が頻繁に発生する場合, RS へかかる負荷が

増大し、システム全体が停止する可能性がある。また、送信者 RS 間、RS 受信者間にボトルネックリンクが存在する場合は、欠損パケットを補完することが不可能であるという問題が存在する。

RAMS の派生技術として、現在 Extended Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions (ERAMS) [22] と Proxy Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions (PRAMS) [23] が存在する。

3.4.2 ERAMS

一対多の大規模な IP マルチキャスト配信において、不特定多数の受信者が一斉にマルチキャストセッションに参加・離脱を行う場合がある。しかし、RAMS ではユニキャストによる配信を行うため、アクセスが集中すると、RS の処理能力を上回り、サービスを続行することが不可能となる可能性が存在する。そのため、ERAMS では IP マルチキャストによる配信を主とし、RS にかかる負荷を軽減することで、この問題を解消する。ERAMS の概要を図 3.9、3.10 に示す。

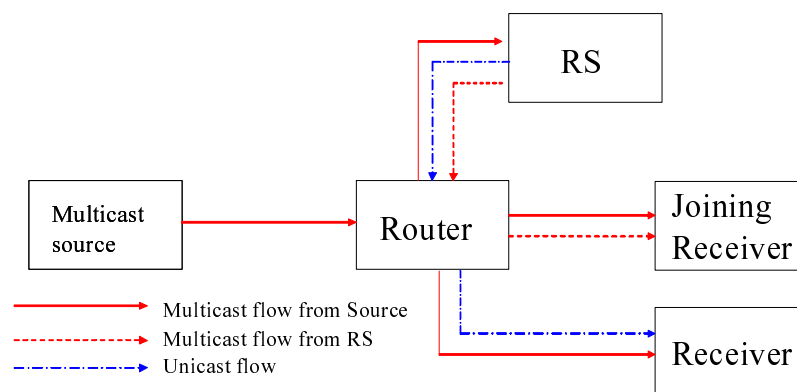


図 3.9: ERAMS 概要図

ERAMS では、RAMS ではユニキャストによる事前配信していたコンテンツを IP マルチキャスト配信で行う。

1. 受信者はマルチキャストアドレス A のコンテンツ配信要求を行う RAMS-R を RS に送信
2. RAMS-R を受信した RS は事前配信を行うマルチキャストアドレス X を RAMS-I にて送信
3. 受信者は RAMS-I に従いマルチキャストアドレス X に Join し、コンテンツを受信
4. その後、マルチキャストキャストアドレス A に Join し、マルチキャストアドレス X から Leave

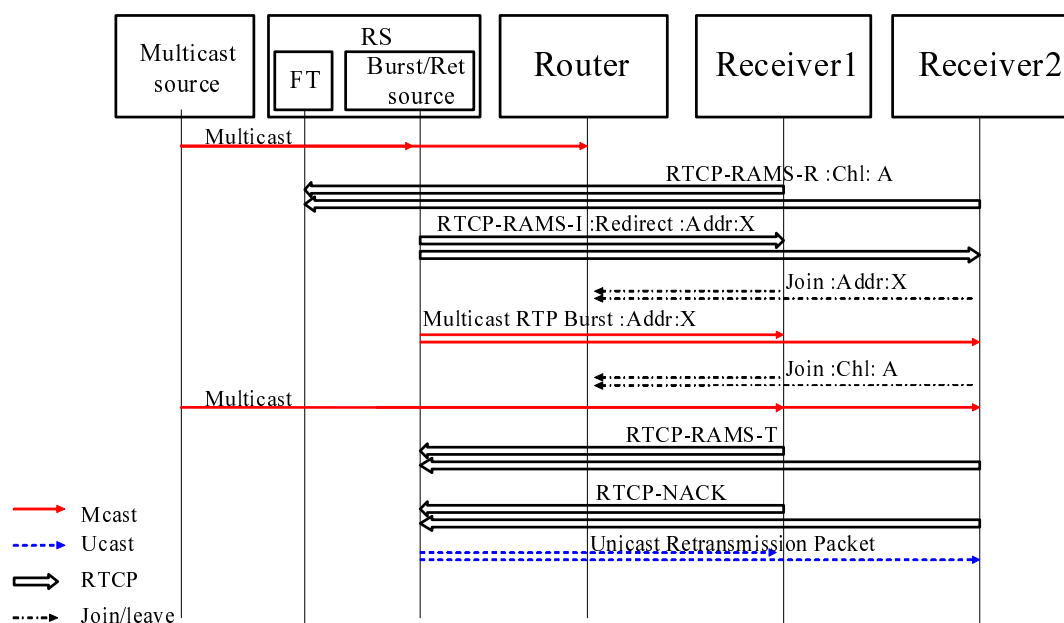


図 3.10: ERAMS 動作概要

5. 以降は RAMS 同様に配信データが欠損した場合のみ RS はユニキャストで該当パケットを再送信

ERAMS では単一の RS を用いるため、RAMS と同様の問題が存在する。

3.4.3 PRAMS

RAMS では、受信者に対してもシステムを組み込む必要があり、RAMS 普及のための障害となる可能性がある。PRAMS の概要を図 3.11, 3.12 に示す。PRAMS では、RS 受信者間に Proxy Acquisition Anchor Point(PAAP) を設置し、RS 受信者間の通信を代わりに行うことで問題を解消する。

1. PAAP を受信者と同一ネットワーク内に設置
2. PAAP 受信者からの Join メッセージを受信
3. PAAP は RS へ該当コンテンツの配信要求である RAMS-R を送信
4. RS はユニキャストで PAAP に配信
5. PAAP は受信したユニキャストコンテンツをマルチキャストへ変換し、受信者へ配信
6. その後、PAAP は上位ルータへ Join メッセージを送信

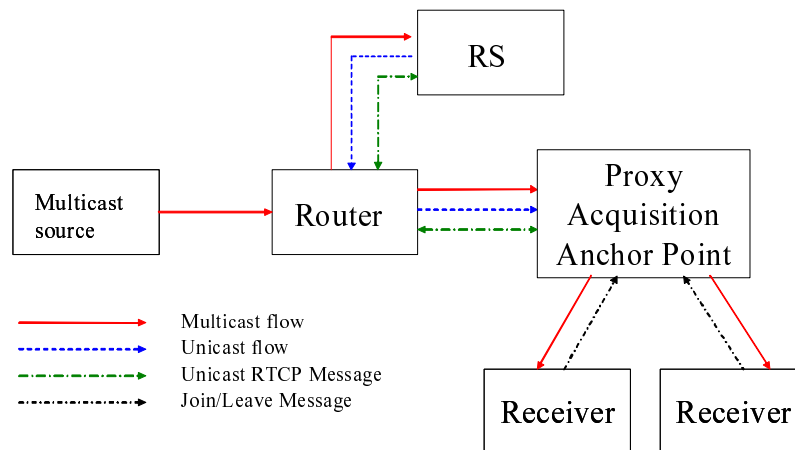


図 3.11: PRAMS 概要図

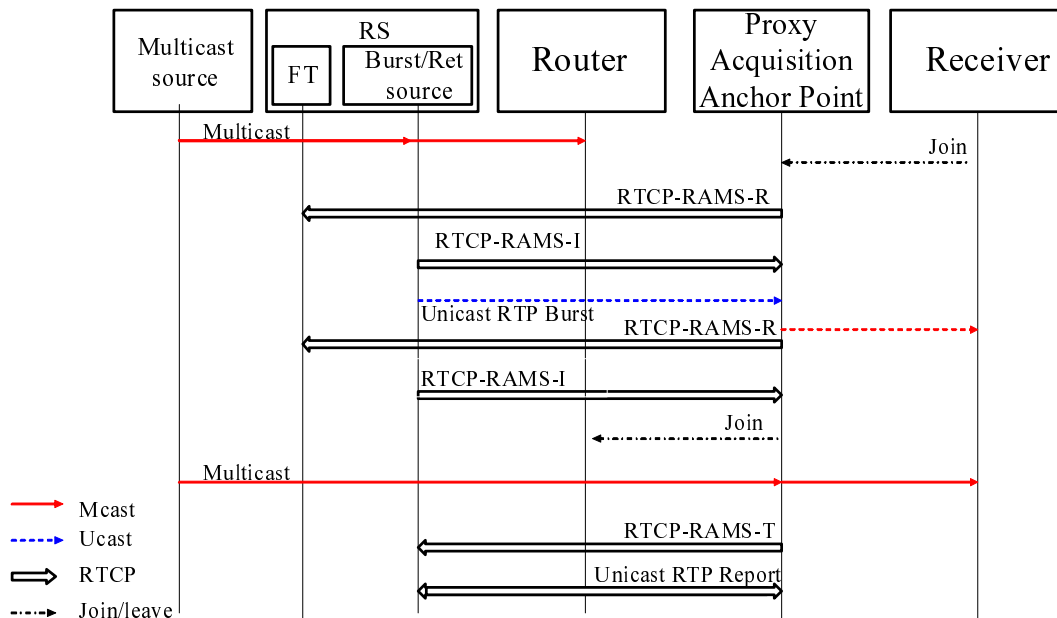


図 3.12: PRAMS 動作概要

7. IP マルチキャストコンテンツを受信後は RS へ RAMS-T を送信し、転送するコンテンツを IP マルチキャストコンテンツへ変更
8. 配信データの欠損が生じた場合は PAAP が RS からユニキャストにて欠損したパケットを受信し、受信者へ IP マルチキャストで転送

以上のように PRAMS では、PAAP が代表して RS と通信を行うため、RS にかかる負荷を分散することが可能であるが、PRAMS では単一の RS を用いるため、RAMS と同様の問題が存在する。

3.5 まとめ

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した．次章では，本章で述べた問題点を解決するシステムの提案を行う．

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、配信データの欠損が少ない安定した高品質・大容量の配信を行うことで、インターネット上におけるリアルタイム性の高いIP マルチキャストコンテンツの通信品質の向上を実現することを目的とする。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
本研究の提案するコンテンツ配信システムは、パケットロスが発生した際に欠損したパケットを検知する必要がある。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把握する。コンテンツ品質状態の指標としてパケットロスを検知するために、受信者のコンテンツ品質を監視する機能が必要である。
- 欠損パケットの補完
本研究では、コンテンツ品質状態を監視することでパケットロスを検知した場合、欠損したパケットを再送信することで、コンテンツ品質状態の劣化を防ぎ、安定した配信を行う。各受信者の欠損したパケットの再送信を行うために、IP マルチキャストコンテンツをユニキャストに変換し、該当する受信者に欠損したパケットを再送信する機能が必要となる。
- 配信経路の変更
欠損パケットの補完による欠損したパケットの再送信においても、配信経路上のボトルネックの存在によりコンテンツ品質状態の劣化を防ぐことが出来ない可能性が存在する。そのため、配信経路上のボトルネックを回避する機能が必要となる。このとき、送受信者及び、経路上のルータに特別な操作を行うことなく配信経路を変更する。

以上の要求事項から、本システムのコンテンツ配信モデルとして、IP マルチキャストとユニキャストの両配信を併用するコンテンツ配信システムを提案し、本研究の目的を満たす。

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 IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信を併用するコンテンツ配信として自律分散型 Transmission Gateway(TG) 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 に示す。本システムでは、送受信者間に複数の TG を設置する。受信者は送信者から IP マルチキャストで配信された音声・映像コンテンツを経路上の TG により IP マルチキャストから変換したユニキャスト配信と元の IP マルチキャスト配信の両配信を受信する。このとき、コンテンツの packet ロス率を TG は監視し、packet ロスの少ない配信を選択する。コンテンツに packet ロスが発生した場合、TG は自身の受信している IP マルチキャストデータをユニキャストに変換して、欠損した packet を再送信することで packet ロスを防ぐ。また、TG 自身が受信している packet ロスが発生した場合は、他の TG と連携し、正常なデータを受信している TG へ配信元を変更することで、packet ロスの解消を行う。

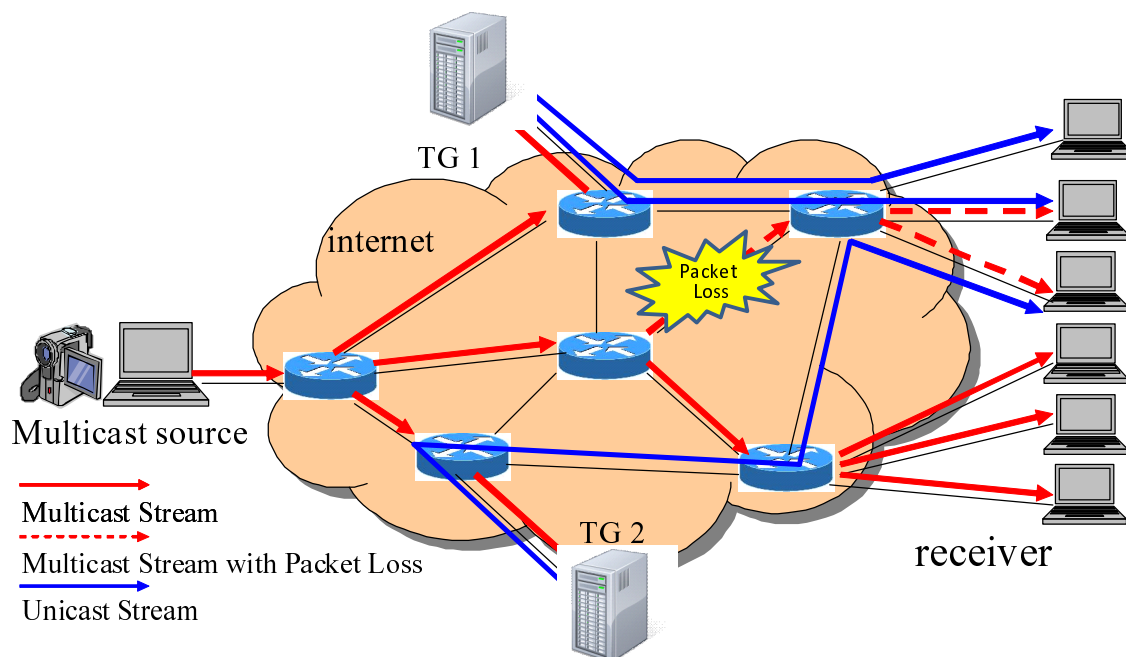


図 4.1: 提案システムの概要

4.2.2 IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信の併用

本研究では、IP マルチキャストをユニキャストに変換し、それぞれの配信のコンテンツ品質の状態を比較後、品質の良い配信手法を選択する。本節では、各処理に必要な項目を以下に述べる

IP マルチキャストデータのユニキャストへの変換

本システムでは、各受信者の配信データの欠損による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パケットロスを検知することは可能だが受信者単位での対処を行うのは困難である。そのため、送受信者間で IP マルチキャストをユニキャストに変換し、IP マルチキャスト配信時に欠損したパケットの再送信を行う必要がある。また、IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信では、ルーティングが異なる可能性があるため、IP マルチキャスト配信にて頻繁にパケットロスがおこる場合は配信手法を完全にユニキャスト配信に変更し、IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信のパケットロス率を比較することで、よりパケットロスの少ない配信手法を選択する機能が必要である。

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必要に応じてユニキャスト配信に変換するため、TG の下流に存在す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、TG は配信されたコンテンツを複製する機能が必要である。

ユニキャスト配信による補完

本システムでは、IP マルチキャスト配信時に欠損したパケットをユニキャストで再送信することで、安定した配信の実現を目指す。そのため、コンテンツのパケットロス率を監視する機能から、速やかに欠損したパケットを特定し、該当する欠損パケットを選択、ユニキャストによる再送信を行う機能が必要である。

IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信の切り替え

本システムでは、頻繁に受信者の受信しているコンテンツにパケットロスが生じた場合は IP マルチキャスト配信から完全にユニキャスト配信へと切り替えを行う。このとき、以下の条件を考慮する機能が必要となる。

- 切り替える際のタイムラグ

IP マルチキャスト配信、ユニキャスト配信共に配信要求からデータの受信までに latency が存在し、単純に切り替えただけでは音声・映像が途切れる可能性がある

る．そのため、配信の切り替えを行うに当たり、受信データが途切れないよう切り替える機能が必要となる．

- ネットワーク帯域資源への負荷

IP マルチキャスト配信からユニキャスト配信に切り替えた場合、ユニキャスト配信では使用するネットワーク帯域資源は受信者数に比例する．そのため、ネットワーク帯域資源に対する負荷が増大するため、周囲の TG とユニキャストで配信を行う受信者数を共有し、状況に応じて配信元の TG を変更する必要がある．

4.2.3 コンテンツ状態の監視と対処

本研究では、受信者の受信しているコンテンツ品質状態の監視と対処を行うに当たり、受信者の受信しているコンテンツ品質の状態を TG が把握する必要がある．各処理に必要なとなる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で生じるパケットロスの監視を各 TG が行う．TG は各受信者が報告してくるパケットの欠損情報を受信し、受信者が受信しているコンテンツのパケットロス率を取得する．配信データの欠損によりパケットロスが発生した場合は各 TG から欠損したパケットをユニキャストで再送信する．頻繁にパケットロスが発生する場合は IP マルチキャスト配信からユニキャスト配信へ切り替えを行う．また、TG 自身が受信している IP マルチキャストのコンテンツに継続的なパケットロスが発生した場合は、周囲の TG と連携し、配信元となる TG を変更する必要がある．

TG の送受信しているコンテンツ品質の状態

受信者の受信しているコンテンツのパケットロス率はユニキャスト配信を行う TG の受信しているコンテンツのパケットロス率に依存すると考えられる．そのため、複数存在する TG は周囲の TG と定期的に自身の受信しているコンテンツのパケットロス率を取得し合い、パケットロス率少ない安定している TG が配信元 TG を変更された受信者へ配信を行う．また、TG はユニキャスト配信を行うため、必要に応じてネットワーク帯域資源にも余裕のある TG に受信者への配信元 TG を切り替える機能が必要がある．

TG の変更

TG ・受信者の状況によっては TG の変更が必要となる．その場合、必要になるデータは TG の受信しているコンテンツのパケットロス率と負荷、受信者のコンテンツ品質の状態である．しかし、他 TG と比較してパケットロスが少なく安定していて、負荷が相対的に軽い TG へ切り替えるだけでは、TG の変更が頻繁に発生し、逆にパケットロスの誘

発を招く可能性がある。TG を変更するにあたり、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 TG が他に存在する場合でも TG の変更を行わない機能を考える必要がある。

4.3 まとめ

本章では、インターネット上における IP マルチキャスト配信を用いた一对多の放送型リアルタイムコンテンツ配信において、本研究の目的であるパケットロスを抑えた安定した配信を行うことで通信品質の向上を実現するためのシステムを提案し、それぞれの要件を満たすために必要な機能について述べた。次章では本章で提案した手法を実現するための、本システムの設計を行う。

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．本システム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

本システムの必要機能は以下の通りである．

- パケットロスにより発生した欠損パケットの補完
- 配信手法の選択
- 転送を行う TG の変更

5.1.1 全体構成

本システムの全体像を図 5.1 に示す．本システムは，1 台の送信者と多数の受信者を想定し，パケットロスの少ない高品質な安定した配信を行うために，送受信者間に複数の TG を用いる．TG は受信者の受信しているパケットロス率を取得し，パケットロスによるコンテンツ品質状態の劣化が生じた場合は自身の受信している IP マルチキャストデータのバッファから，パケットロスの生じた受信者にユニキャストで再送信を行う．また，必要に応じてユニキャストのみの配信や配信元となる TG の変更を行う．

本システムを構成するモジュールは以下の通りである．

- 情報管理モジュール
- 実行制御モジュール
- 配信手法変換モジュール
- リンク情報モジュール
- 受信評価モジュール
- Join/Leave 管理モジュール
- 映像受信モジュール
- 映像転送モジュール

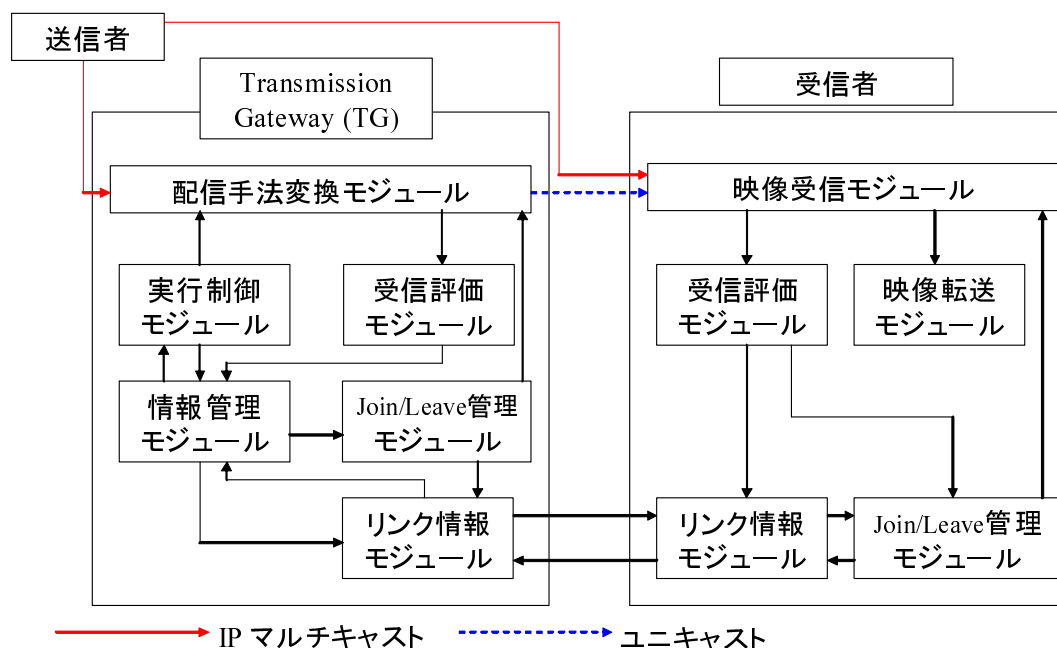


図 5.1: 設計概略図

5.2 動作概要

本節では、本システムの動作概要についてTG、受信者についてそれぞれ示す。

5.2.1 Transmission Gateway 受信者間の動作概要

本システムの TG 受信者間の各モジュールの関係及び、動作概要を図 5.2 に示す。

1. 受信者は TG へ配信要求と同時に上位のルータに Join メッセージを送信
2. 配信要求を受信した TG はコンテンツを情報管理モジュールにて検索
TG が該当する IP マルチキャストコンテンツを既に受信している場合は実行制御モジュールの指示に従い、ユニキャストの配信を開始する。また、該当する IP マルチキャストコンテンツをまだ受信していない場合は上位ルータに Join メッセージを送信し、マルチキャストセッションに参加する。
3. 受信者は映像受信モジュールにて配信されたデータを受信
4. 受信評価モジュールにて受信データ内の sequence 番号からパケットの欠損を確認
受信したパケットに欠損を確認した場合は、リンク情報モジュールを経て TG へ欠損パケットの報告を行う。TG は欠損パケットの報告を受け、情報管理モジュール内のデータベースを参照し欠損パケットの特定を行う。特定されたパケットは実行制御モジュールを経て、ユニキャストによる再送信を行われる。

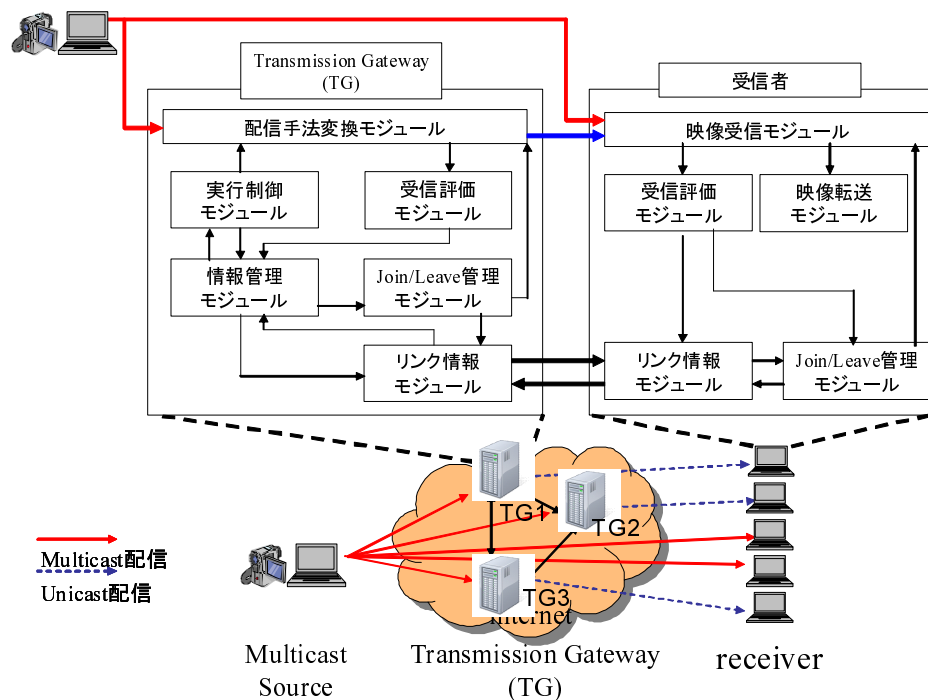


図 5.2: TG 受信者間の動作概要

5. リンク情報モジュールを経て情報管理モジュールにて受信者の最終的なパケットロス率を確認
6. IP マルチキャストを受信後はユニキャスト配信を停止
ユニキャスト配信を停止した後も、パケットロス率に応じて IP マルチキャストからユニキャストへ配信手法を変更する。また、IP マルチキャスト、ユニキャスト共に継続的にパケットロスを解消出来ない場合は、配信元となる TG の変更を行う。

5.2.2 Transmission Gateway 同士の動作概要

本システムの TG 同士の各モジュールの関係及び、動作概要を図 5.3 に示す。

1. 各 TG は起動するとリンク情報モジュールを通じて周囲の TG と接続
2. 受信者からの配信要求を受信後、周囲の TG にリンク情報モジュールを経て受信者とコンテンツ情報を送信
3. 周囲の TG とリンク情報モジュールを経て取得してきた情報を情報管理モジュールへ格納

TG は受信者に配信を開始した時点で、周囲の TG に受信者情報として受信している IP マルチキャストコンテンツの SSRC、受信者の IP アドレスを送信する。受信者へコンテンツを配信中は、受信している IP マルチキャストコンテンツのパケッ

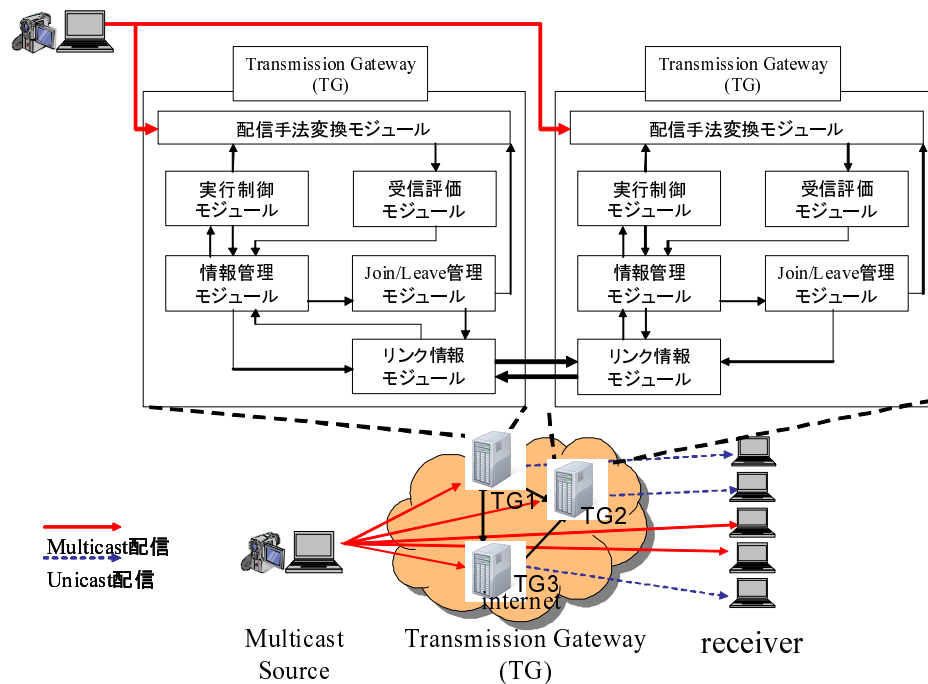


図 5.3: TG 同士の動作概要

トロス率, 配信先で発生している平均パケットロス率, 自身の配信台数といった TG 情報として周囲の TG へ送信する. 受信者情報と TG 情報を受信した周囲の TG は, 情報管理モジュール内のデータベースに格納し, TG の変更を行う際に参照する.

4. 変更先の TG を選出 TG は自身の受信している IP マルチキャストコンテンツに継続的なパケットロスが発生した場合と受信者が IP マルチキャスト, ユニキャストの両配信を用いてもパケットロスが解消されない場合の 2 パターンで TG の変更を決定する.
5. 変更先となる TG の IP アドレスを受信者へ送信
6. 周囲の TG に配信元 TG の変更を通知
7. 受信者は指示された変更先 TG へ配信要求を送信

5.3 モジュール構成

本節では 5.1.1 で述べたモジュール構成にしたがって, それぞれの構成の機能について述べる.

5.3.1 情報管理モジュール

情報管理モジュールでは、取得してきた受信者の受信しているコンテンツの品質状態、各 TG が受信しているコンテンツの品質状態、各 TG にかかるネットワーク帯域資源へのユニキャスト配信数、各 TG・配信先の IP アドレスや各 TG・受信者の受信しているコンテンツの品質状態などの実行制御モジュールにて必要となる情報の格納を行う。

5.3.2 実行制御モジュール

実行制御モジュールでは、情報管理モジュールに格納されているデータをもとに配信手法変更モジュールの動作を制御する。実行する機能として、IP マルチキャストから変換したユニキャスト配信と TG 変更の選出があげられる。トリガーとなる情報を以下に示す。

- ユニキャスト配信
 - － TG 自身の受信しているコンテンツの情報
 - * マルチキャストアドレス
 - * ポート番号
 - * SSRC
 - － コンテンツの品質状態
 - * 受信者の受信しているコンテンツで発生しているパケットロス
 - * 受信者の再送信後の最終的なパケットロス率
- TG 変更の協議
 - － 各 TG のユニキャスト配信数
 - － 各 TG の受信している IP マルチキャストコンテンツの品質状態
 - － 生存確認が不能となった TG の存在

5.3.3 配信手法変換モジュール

本研究の対象とする配信形態は、IP マルチキャスト配信だけ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形である。本システムにおける配信手法変換モジュールには以下の要求事項がある。

- IP マルチキャストをユニキャストに変換して再配信
- パケットの複製による複数の受信者への送信
- 受信者側で欠損したパケットのユニキャスト配信による再送信

IP マルチキャスト-ユニキャスト変換

本システムでは送信者から受信者までは IP マルチキャスト配信を用い、各 TG から受信者へはユニキャスト配信を用いて行う。このため、TG では IP マルチキャストで受信したパケットをユニキャストに変換し、再配信を行う。IP マルチキャストを受信するために TG は受信者からアクセス数が多いマルチキャストセッションに Join し、送信者からデータが配信されてくるのを待つ。配信データを受信後、実行制御モジュールの指示に従い、受信者に音声・映像配信を行う。

パケットの複製

本システムでは TG から受信者へはユニキャスト配信を用いて行う。このため、TG ではパケットの複製をおこない、再配信を行う必要がある。再配信を行う際、TG は図 5.4 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 5.5 のように多数のストリームを出力することで、受信者に配信を行う。

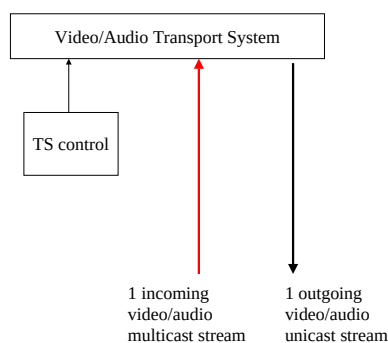


図 5.4: 送信者 1 台：受信者 1 台のストリームの複製

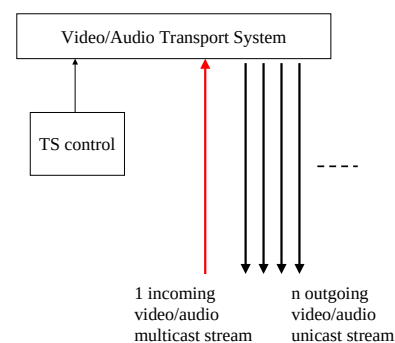


図 5.5: 送信者 1 台：受信者 n 台のストリームの複製

欠損したパケットの補完

欠損したパケットの補完手法の概要を図 5.6 に示す。本システムでは受信者の受信しているコンテンツにパケットロスによりコンテンツ品質状態の劣化が発生した場合、欠損したデータをユニキャストで再送信することで補完する。そのため、欠損したデータの特特定が必要となる。受信者は、自身の受信してるコンテンツの前後の差分を元に、欠損したデータを認識し、TG に欠損情報を送信する。TG は、受信者から送られてくる欠損情報を基に欠損したパケットを特定し、ユニキャスト配信を用いて欠損したパケットの補完を行う。

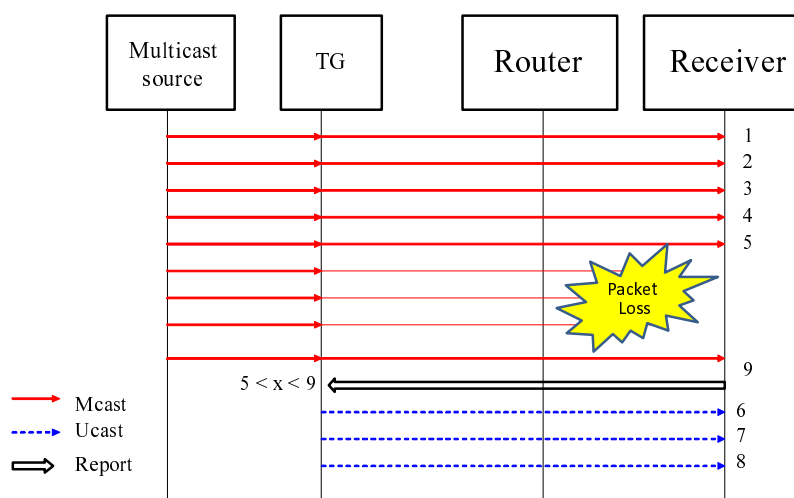


図 5.6: 欠損したパケットの補完

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、測定された周囲の TG・受信者の情報を情報管理モジュールへ送信する。また、TG・受信者の生存確認を行う。さらに、各種の周囲の TG・受信者への指示を行う。

周囲の TG・受信者情報の送受信

TG・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。取得したデータを情報管理モジュールに格納する。

TG・受信者の生存確認

配信に参加している周囲の TG・受信者は TCP によるコネクションを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を停止する。TG 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 TG 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 TG へ周囲の TG と協議した上で配信元を変更する。

制御命令の伝達

TG から受信者への Join/Leave 管理モジュールの指示やユニキャストのみの配信の受信命令などの制御命令の伝達を行う。

5.3.5 受信評価モジュール

受信評価モジュールでは、自身の受信しているコンテンツの品質状態を確認する。受信しているコンテンツにパケットロスが生じ、コンテンツ品質状態の劣化が発生した場合は、速やかにリンク情報モジュールを経て、TG へ欠損したデータ情報を送信する。

5.3.6 映像受信モジュール

本システムでは、IP マルチキャストとユニキャストの配信をそれぞれ独立して受信する必要がある。映像受信モジュールでは、送信者からの IP マルチキャスト配信と TG からのユニキャスト配信のそれぞれを受信し、受信評価モジュールや映像転送モジュールへ受信データを転送する。

5.3.7 Join/Leave 管理モジュール

- TG 側
TG は受信者から配信要求を受信した場合、配信手法変換モジュールへ該当マルチキャストセッションへの Join の指示を行う。
- 受信者側
受信者側の Join/Leave モジュールの動作イメージを図 5.7 に示す。IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信では、ルーティングが異なるため、それぞれのデータを受信するまでの待ち時間に差異が生じる可能性があり、単純に切り替えるだけでは再生を行う音声・映像が途切れてしまう。そのため、Join/Leave する際には TG からのユニキャスト配信に注目し、受信している時間帯が途切れないようにする必要がある。

5.3.8 映像転送モジュール

本システムのように IP マルチキャスト配信とユニキャスト配信を同時に受信するには、既存のアプリケーションへの改変が必要となる。本システムでは、汎用性を優先し、既存のアプリケーションへ改変を加えることを避け、受信したストリーミングデータを既存のアプリケーションへ転送する proxy を構築する。映像転送モジュールは、映像受信モジュールで受信したストリーミングデータを既存のアプリケーションへ転送することで、映像の再生を行う。

5.4 まとめ

本章では、前章で述べた提案手法を実現するための機能要件を挙げ、実装に向けての設計を行った。次章では、本章での設計を元に実装を行う。

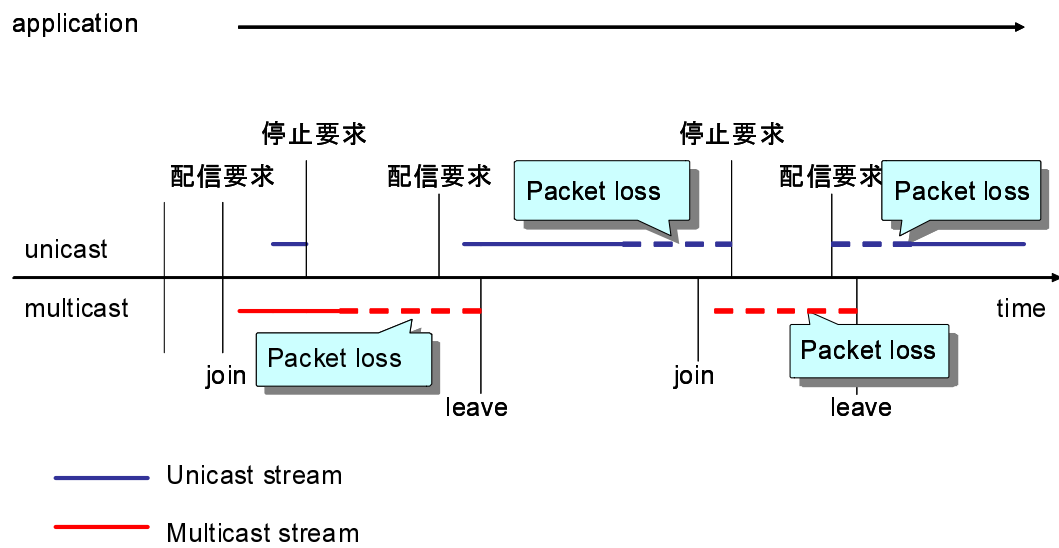


図 5.7: 受信者のコンテンツへの参加と離脱のイメージ

第6章 実装

本章では，第5章で述べた TG と受信者用 proxy を設計に基づいた実装について述べる．

6.1 実装環境

本システムの実装を行ったソフトウェア環境を表 6.1 に示す．

OS	Debian Linux 2.6.26
使用言語	C 言語
コンパイラ	gcc-4.1.2
ライブラリ	libc-2.3.6
実装物	受信者用 local proxy, TG

表 6.1: ソフトウェア環境

6.2 実装概要

6.2.1 受信者用 proxy と TG の初期設定

本システムでは，TG が自律分散しているため，受信者は最初に配信要求を行う TG の IP アドレスを，TG は最初に接続する TG の IP アドレスを静的に指定されているものとする．

6.2.2 情報管理モジュール

本システムの配信に参加，もしくは参加要求を行っている受信者の情報は，TG の構造体内にある情報管理モジュールへ格納する．TG は周囲の TG・配信先の受信者から情報管理モジュール内のそれぞれに合う項目のデータを格納する．格納するデータは TG の配信先となる受信者情報としてマルチキャストアドレスとポート番号，SSRC，パケットロス値，周囲の TG 情報として IP マルチキャスト配信と配信先のパケットロス値，と配信台数である．格納されたデータは実行制御モジュールにて参照される．

6.2.3 実行制御モジュール

実行制御モジュールでは、ユニキャスト配信を行う際に必要となる情報を情報管理モジュールから取得し、配信手法変更モジュールの制御を行う。主な制御として、配信先の追加と削除、ユニキャストのみの配信への切り替え、接続先 TG の変更を行う。以下にユニキャスト配信のみへの切り替え手法と接続先 TG の変更手法について述べる。

ユニキャストのみの配信への切り替え

本システムでは、IP マルチキャスト配信においてパケットロスが頻繁に発生する場合、ユニキャストのみの配信へと切り替えを行う。このとき、パケットロスが一時的なものなのか、継続的なものなのかを判断する機能が必要となる。本システムでは、リンク情報モジュールを経て送られてくる受信者の最終的なパケットロス率が 30% 以上のパケットロスを 3 回連続して続いた場合、継続的なパケットロスであると認識し、配信手法変換モジュールの制御及び、受信者へマルチキャストセッションからの Leave 命令をリンク情報モジュールより送信する。

配信元となる TG の変更のトリガ

配信元となる TG を変更するケースは、TG 側で判断される場合と受信者側で判断される場合の 2 パターン存在する。

- TG 側の判断

TG 側で配信元となる TG の変更の判断を行う場合のトリガとなる情報として、TG が受信している IP マルチキャストコンテンツで発生しているパケットロス率を用いる。本システムにおいて、ユニキャストストリームのコンテンツ品質は、配信元となる TG の受信している IP マルチキャストストリームのコンテンツ品質に依存する。そのため、TG は IP マルチキャストストリームで閾値以上の継続的なパケットロスを検知した場合、速やかによりパケットロスの少ない IP マルチキャストストリームを受信している TG' に配信元を変更する。本システムでは、TG の受信している IP マルチキャストコンテンツで 30% 以上のパケットロスを 3 回連続して検知した場合、継続的なパケットロスであると判断し、変更先となる TG' の選出を行う。

- 受信者側の判断

IP マルチキャスト、ユニキャストの両配信で継続的な閾値以上のパケットロスを検知した場合、送受信者間、TG 受信者間のそれぞれでボトルネックが存在すると判断し、変更先となる TG' の選出を行う。パケットロスの閾値は、受信者から送信されてきた最終的なパケットロス率の値が 30% 以上で、3 回連続して検知した場合、継続的なパケットロスであると判断し、変更先となる TG' の選出を行う。

変更先 TG の選出

配信元となる TG の変更が決定されると、変更先 TG' の選出を行う。TG' の条件として、以下の情報を元に一次選出を行う。

- 該当 IP マルチキャストコンテンツの受信の有無
本システムでは、配信元となる TG を変更する際の待ち時間を短縮することを考慮し、接続遅延を軽減するために、既に該当 IP マルチキャストコンテンツを受信していることを TG' の条件とする。
- 該当 IP マルチキャストコンテンツのパケットロス率
本システムにおいて、ユニキャストストリームのコンテンツ品質は、配信元となる TG の受信している IP マルチキャストストリームのコンテンツ品質に依存するため、該当する IP マルチキャストコンテンツのパケットロス率が少ないことを TG' の条件とする。

このとき、該当する IP マルチキャストコンテンツをパケットロスが発生することなく受信している TG が複数台存在することも考えられるため、複数の候補が存在する場合は、二次選出として各 TG が配信しているコンテンツの平均パケットロス率の比較を行う。二次選出でも複数の候補が存在する場合は、TG にかかる負荷を考慮し、TG の配信台数が最も少ない TG を候補とする。

6.2.4 配信手法変換モジュール

TG は受信者からの配信要求に応じてマルチキャストコンテンツを受信者に対し、ユニキャストで配信を行う。このとき、ユニキャスト配信を行う受信者の選別、配信データの複製、欠損したパケットの再送信が行われる。以下にそれぞれの実装内容を示す。配信を行うために使用する構造体として、コンテンツのリストを図左 6.1、受信者のリスト図右 6.2 に示す。

IP マルチキャスト配信をユニキャスト配信に変更して転送

ユニキャストのみの配信を行う受信者の選別として、配信要求があった受信者のみユニキャスト配信を行うフラグとなる図 6.2 受信者リストの構造体内に格納されている変数 `ucast_flag` を用いる。TG はこの変数が 1 であるときのみユニキャストのみでの配信を行う。

配信データの複製による複数の受信者への送信

TG は自身の受信したコンテンツをユニキャストで配信する場合、コンテンツリスト内にある受信者リストを元にユニキャストによる配信を行う。

```

struct cont_list{
    int sock;
    struct ip_mreq mreq;
    int del_flag;

    u_long pkt_loss_count;
    struct pkt_cnt pkt_cnt;

    u_int32_t ssrc;
    struct cl_list *cl_list;
    struct cont_list *next;
    struct pkt_buf *pkt_buf;
};

```

図 6.1: コンテンツリスト構造体

```

struct cl_list{
    int sock;
    int usock;
    struct sockaddr_in addr;
    int ucast_flag;

    u_int32_t ssrc;
    long pkt_loss;
    int loss_cnt;
    char prev_tgaddr[16];
    struct cl_list *next;
};

```

図 6.2: 受信者リスト構造体

受信者側で欠損したパケットのユニキャスト配信による再送信

欠損したパケットの補完手法を図 6.3 に示す。

パケットロスを検知した受信者は、欠損する前に受信した RTP sequence 番号とその次に受信した RTP sequence 番号を TG に RTCP を用いて送信する。受信者から RTCP を受信した TG は自身の所持しているコンテンツのバッファから該当するパケットを認識し、該当するパケットを受信者へ再送信する。

6.2.5 リンク情報モジュール

TG 側のリンク情報モジュールの実装内容を図 6.4 に示す。リンク情報モジュールは周囲の TG・配信先受信者の情報が送受信され、TG の情報管理モジュール内のデータベースに格納され、制御実行モジュールで使用される。また、リンク情報モジュールは TG・受信者の生存確認に使用される。

TG 受信者間、TG 同士間の TCP コネクションの確立

リンク情報モジュールでは、TG 受信者間、TG 同士の通信に TCP を用いる。受信者は TG に初めに配信要求を行った際に TCP コネクションを確立し、作成されたソケットを情報管理モジュール内のデータベースに格納することで、TG 受信者間の情報の送受信を行う。TG 同士では、listen 状態で待機している TG1 に TG2 が connect すると、TG1

(abbreviation)

```

struct pkt_buf *tmp_list;
u_int32_t recvbuf[1500];
memset(recvbuf, 0, sizeof(recvbuf));
struct RR *rr = (struct RR *)&recvbuf[0];

long seq;
long seq_prev;

n = recv(rtcp_sock, (char *)&recvbuf, sizeof(recvbuf), 0);

seq = rr->seq
seq_prev = rr->seq_prev;

```

(abbreviation)

```

tmp_list = cont_list->pkt_buf;
while(tmp_list->prev != NULL){
    tmp_list_prev = tmp_list;
    tmp_list = tmp_list->prev;
    if(seq_prev < tmp_list->seq && tmp_list->seq < seq){
        if ((n = sendto(cl_list->usock,
            (char *)&tmp_list->buf, tmp_list->size,
            0,
            (struct sockaddr *)&cl_list->addr, &length)) < 0) {
            perror("sendto");
            return -1;
        }
    }
    tmp_list = tmp_list->prev;
}

```

図 6.3: 欠損したパケットの補完手法

は初期値として設定されている TG3 の IP アドレスを TG2 に通知する。TG2 は TG1 の指示に従い、TG3 へと connect を行い、以降は情報管理モジュール内のデータベースに格納された TG のリストに存在する TG と同じ TG の IP アドレスが送信されてくるまで

```

if(FD_ISSET(sock2, &fds)){
    len = sizeof(TG_addr);
    if((new_sock = accept(sock2,
                          (struct sockaddr *)&TG_addr,
                          &len)) < 0){
        perror("accept");
        return -1;
    }
    if(new_sock != -1){
        FD_SET(new_sock, &readfds);
        TG_add(new_sock, &TG_info, TG_addr);
    }
}
if(TG_list != NULL){
    while(TG_list->next != NULL){
        if(FD_ISSET(TG_list->sock, &fds)){
            memset(tgbuf, 0, sizeof(tgbuf));
            n = read(TG_list->sock, (char *)&tgbuf, sizeof(tgbuf));

            if(n <= 0){
                FD_CLR(TG_list->sock, &readfds);
                get_TG_info(TG_list, p_info, del, 0);
            }else{
                get_TG_info(TG_list, p_info, tg_report, n);
            }
        }
        TG_list = TG_list->next;
    }
}
}

```

図 6.4: リンク情報モジュール

同様の作業を行い、TCP のコネクションを確立する。

情報の送受信

リンク情報モジュールでは、TG 受信者間、TG 同士で情報の送受信を行う。このとき、各 TG ・受信者の認識は TCP 通信によるコネクションを用い、それぞれの情報の送受信を 3 秒ごとに行う。

生存確認

各 TG・受信者のソケットを監視することで、何かしらのトラブルが発生し異常終了した場合、各コネクションが切れたことを確認し、該当する TG もしくは受信者を生存確認不能と認識する。生存確認不能と認識された TG や受信者は情報管理モジュール内のデータベースから削除される。このとき、生存確認不能と認識された TG からコンテンツを受信していた受信者は、配信元の TG から予め通知されていた TG' へと配信要求を送信することで、配信元となる TG の変更を行う。

6.2.6 受信評価モジュール

受信評価モジュールでは、TG 側では TG の受信している IP マルチキャストコンテンツのパケットロスの算出を行う。受信者側では受信しているコンテンツで発生するパケットロスとユニキャストによる欠損パケットの再送信後の最終パケットロス率、そして IP マルチキャストとユニキャストの両通信の受信確認を行う。以下にパケットロス値の算出手法と受信確認手法について述べる。

パケットロス値の算出

各 TG、受信者が受信しているコンテンツ品質は、配信時に発生するパケットロスとユニキャストにて再送を行った後の最終的なパケットロス率の二種類を対象とする。それぞれの算出方法を図 6.5 に示す。

- 受信時のパケットロス
パケットロスの算出法を図 6.5 に示す。各 TG、受信者の受信しているコンテンツのパケットロスは RTP ヘッダに記載されている sequence 番号を元に算出される。具体的には、受信した RTP sequence 番号と前回のを比較し、sequence 番号に欠損がないかを確認する。このとき、受信者側の受信評価モジュールでは、欠損した sequence 番号を RTCP を用い、リンクモジュールを経て配信元となる TG へ送信する。
- 最終的なパケットロス率
欠損したパケットの再送後の最終的なパケットロスは、proxy から受信アプリケーションへバッファリングしたデータを転送する際に、受信時に記録しておいた sequence 番号を元に算出される。算出された最終的なパケットロス率はリンク情報モジュールを経て、各 TG へと送信される。

コンテンツの受信確認

本提案システムでは、IP マルチキャストとユニキャストの両コンテンツを受信し、必要に応じてユニキャストコンテンツのみの受信に切り替える作業を行う。このとき、両配


```
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 6.5: パケットロスの算出法

信は非同期であるため、単純に切り替えるだけでは音声・映像が途切れる可能性がある。そこで、受信評価モジュールでは、IP マルチキャスト、ユニキャストの両コンテンツを受信する各ソケットを `select()` 関数を用い、監視する。受信評価モジュール内の情報は情報管理モジュールを経て、Join/Leave 管理モジュールへ転送される。

6.2.7 Join/Leave 管理モジュール

上位のルータに Join/Leave を行う機構として TG 側の動作と受信者側での動作について述べる。

TG

TG は受信者の配信要求を受信した際に該当するマルチキャストセッションへ Join する。このとき、一度 Join したマルチキャストセッションは自身と周囲の TG からの受信者全員が離脱した際に Leave を行う。

受信者

受信者は、IP マルチキャスト、ユニキャストの両通信のコンテンツを受信する。このとき、IP マルチキャストを主に受信する場合とユニキャストのみを受信する場合の切り替えを行う際に受信が途切れないようにする必要がある。そのため、本システムでは、受信者はユニキャストのみの配信を受ける際、切り替えの命令を TG より受信し、ユニキャ

ストを受信後はマルチキャストセッションから Leave する。このとき、IP マルチキャスト、ユニキャストの両ストリームから同一のデータを受信する可能性がある。その場合は、RTP ヘッダ内の sequence 番号から同一のデータをバッファに蓄積しない。

6.2.8 映像受信モジュールと映像転送モジュール

映像受信モジュールでは、Join/Leave 管理モジュールの指示に従い、IP マルチキャスト、ユニキャストのそれぞれのパケットを受信する。受信したパケットは受信評価モジュールにてパケットロスの算出を行われた後、一旦蓄積され、映像転送モジュールにて映像受信モジュールとは違うポート番号を有するループバック用ソケットに書き込むことで、受信アプリケーションへと転送される。

6.3 まとめ

本章では、第 5 章における設計内容に基づいて実装を行った。次章では、本システムの有用性を証明するために、テストケースに基づいた評価を行う。

第7章 評価

本章では，本研究で実装したシステムの評価について述べる．

7.1 評価概要

一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信において，本提案システムの有効性を検証するために，評価用ネットワークを構築し，様々なパターンにおいて結果を取得することで，本システムの評価を行う．

7.2 評価環境

以下に本評価で用いた評価用ネットワーク及び，評価用機器について述べる．

7.2.1 評価用ネットワーク

本システムの評価として，複数の TG を ISP 内に分布することを想定し，KVM を用いて論理的に仮想化されたネットワークを構築し，評価を行った．評価に用いる評価用ネットワークを図 7.1 に示す．

本評価環境は送信者 1 ノード，ルータ 16 ノード，TG4 ノード，受信者 20 ノードによって構成される．本評価の想定としては ISP 内に複数の TG が分散して存在し，多数の受信者に対して一対多通信形態の放送型リアルタイムストリーミングを行う．このとき，送受信者間，送信者 TG 間，TG 受信者間のそれぞれで Dummynet [24] を使用し，ネットワーク帯域を制限することで，擬似的なボトルネックリンクを構築する．また，評価アプリケーションとして VLC を用い，MPEG2-TS 2Mbps のストリーミングを行う．

7.2.2 評価用機器

本評価で用いた機器の仕様を表 7.2.2 に示す．

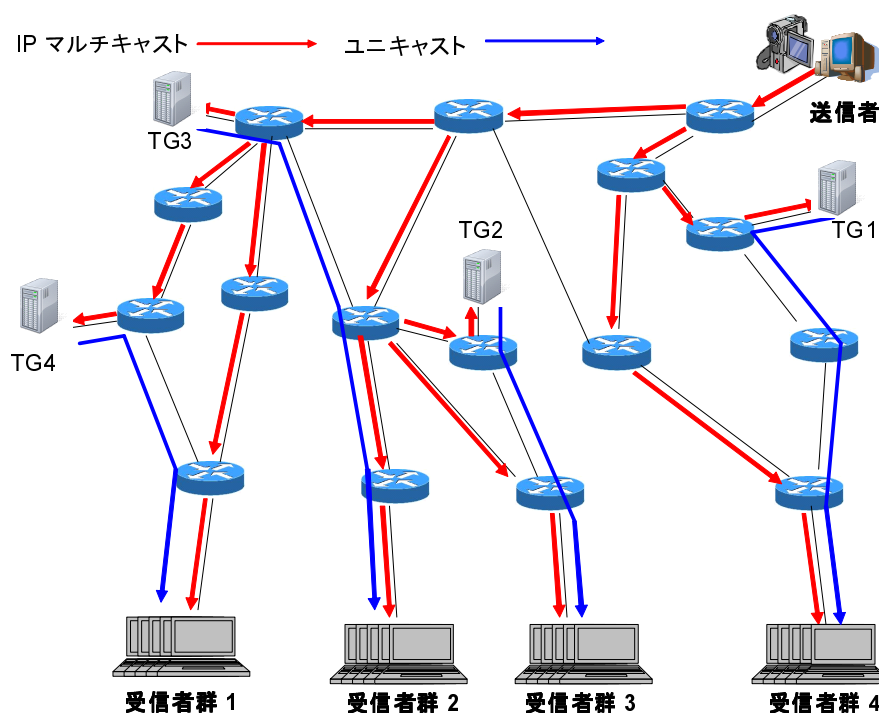


図 7.1: 評価用ネットワーク仮想トポロジ図

	VM ホスト	仮想ホスト・ルータ	Dummysnet1	Dummysnet2
OS	Fedora 14 Linux 2.6.35 64bit	Debian 5.06 Linux 2.6.26	Frenzy 1.3 FreeBSD8.1	Frenzy 1.3 FreeBSD8.1
CPU	Intel Xeon E5420 2.50GHz		Intel Pentium4 3.00GHz	Intel Pentium4 2.80GHz
メモリ	4GB	386MB	512MB	512MB
NIC	Broadcom NetXtreme II 1000Base-T		100Base-TX	100Base-TX
ルーティング デーモン	-	XORP	-	-
マルチキャスト	-	PIM-SM	-	-
ユニキャスト	-	RIP	-	-

表 7.1: 評価用 VM ホスト, 仮想ホスト・ルータ, Dummysnet の仕様

7.3 評価

本評価では, 以下の 2 つの状況を想定し, それぞれ評価を行った.

- 評価 1: 送受信者間の経路上にボトルネックが存在する場合

- 評価 2: 送受信者間及び, TG 受信者間の経路上にボトルネックが存在する場合

7.3.1 評価 1

評価 1 では, 送受信者間に Dummynet を設置し, 本システムの動作を確認する. 本評価の目的は (1) IP マルチキャスト配信で生じた欠損パケットを TG からのユニキャストによる再送にて補完していること, (2) 閾値以上のパケットロス率が発生する際に TG の変更を行うことの二つの動作を確認することである.

パケットロスの補完についての評価を図 7.2 に示す.

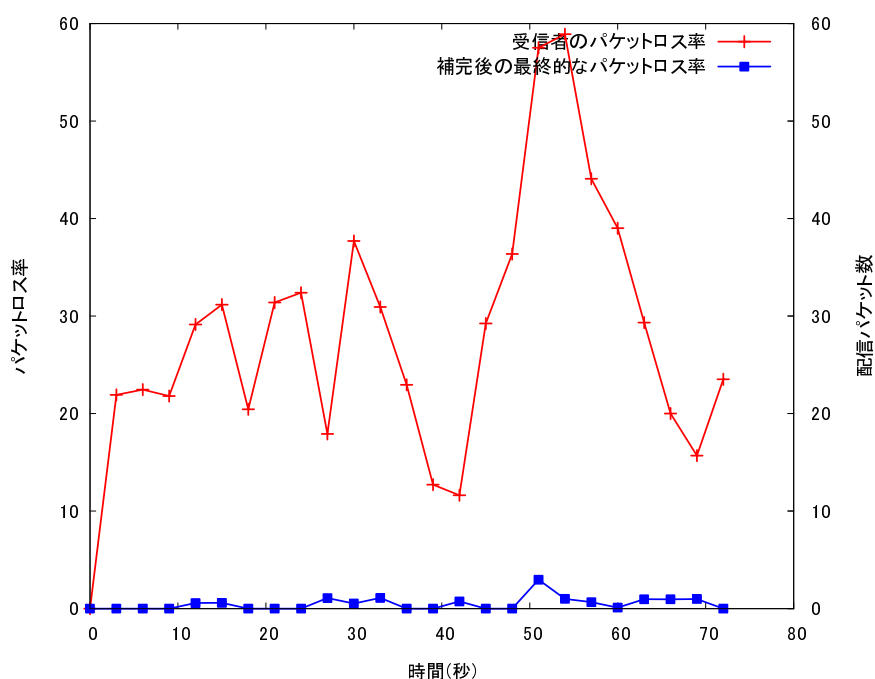


図 7.2: 欠損パケットの補完

Dummynet により, 受信者では IP マルチキャスト配信において最大で 60% 弱のパケットロス率が発生しているが, TG からのユニキャストによる欠損パケットの補完により, パケットロス率を 5% 未満に軽減することが出来た. これにより, 評価 1 における目的 (1) を満たすことを示した.

次に, TG の変更についての評価について述べる. 本評価における評価トポロジを図 7.3 に, 結果を図 7.4 に示す.

本トポロジでは, 送受信者間 Dummynet が存在するため, IP マルチキャスト配信においてパケットロスが生じている. 受信者は TG1 から欠損パケットの補完を行うため, ユニキャストによる再送を要求するが, TG1 受信者間においても Dummynet を経由するため, 欠損パケットを補完することが出来ない. 3 回連続して 30% 以上のパケットロス率を検知し, TG1 からのユニキャストのみの配信を受信することになるが, トラフィック量

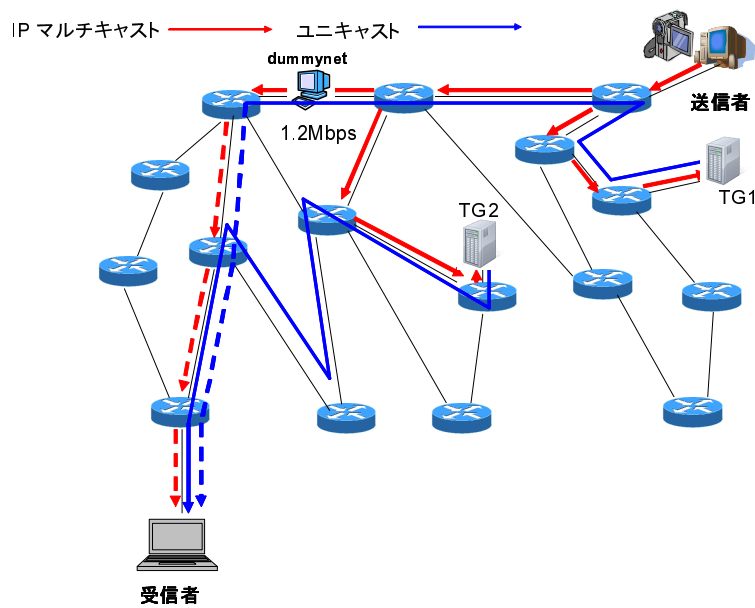


図 7.3: 評価 1: TG の変更における評価トポロジ

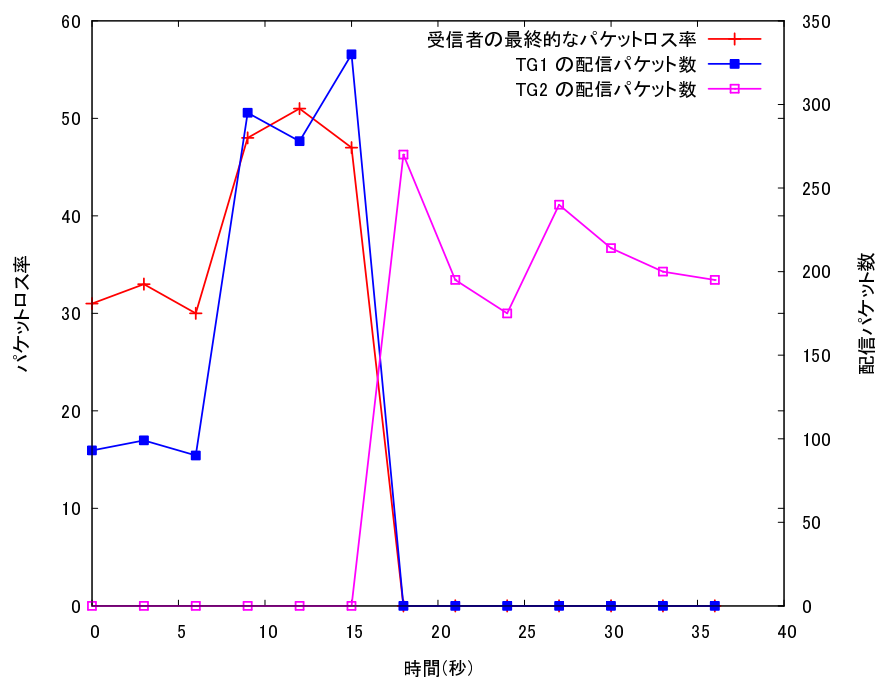


図 7.4: TG の変更

が増加するため、パケットロス率が上昇する。その後、TG1 から TG2 へ接続先を変更することにより、経路上の Dummynet を回避することができ、パケットロスを軽減することが出来た。これにより、評価 1 における目的 (2) を満たすことを示した。

7.3.2 評価 2

本評価 では，送受信者間に Dummynet1 を設置し，TG2 受信者間に Dummynet2 を設置して通信帯域を変化させる．本評価の目的は (1) ユニキャスト配信時にパケット競合が発生した際の動作を確認すること，(2) パケットロスの検知回数の検証を行うことの二つである．

評価 2 の評価トポロジ図を図 7.5 に示す．

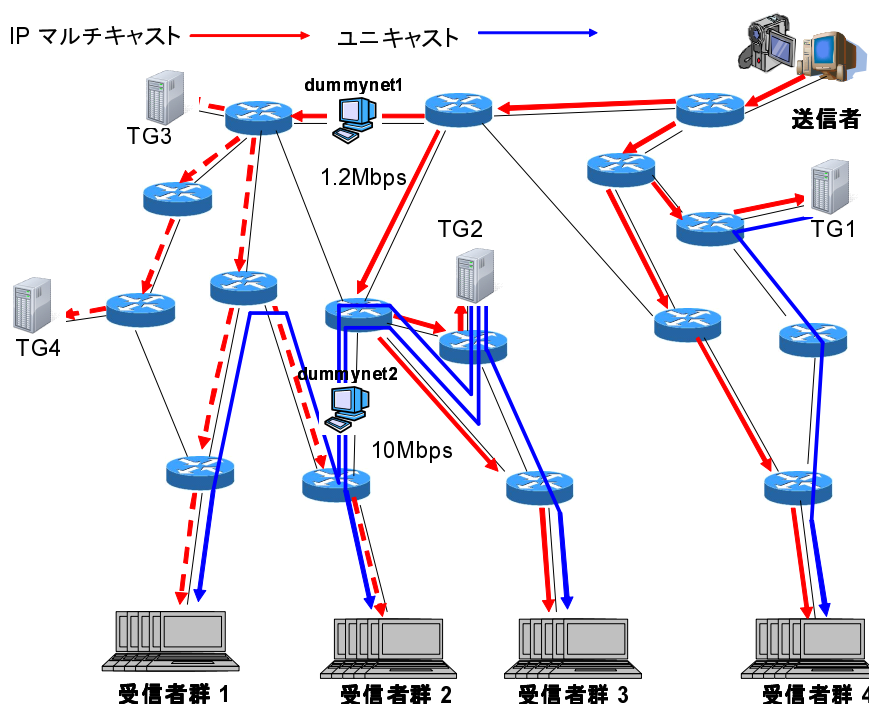


図 7.5: パケットロの競合が発生した場合

本評価では，Dummynet1 を 1.2Mbps に設定し，受信者 1 群，受信者 2 群にて欠損パケットを発生させる．このとき，受信者 1 群は TG4，受信者 2 群は TG3 に接続しているものとする．また，Dummynet2 を 10Mbps 設定し，TG2 から配信を受ける受信者 10 台においてパケット競合を発生させる．本評価の結果を図 7.6 に示す．

受信者 1，2 群が接続してる TG3，TG4 では，30% 以上のパケットロス率を連続して 3 回検知したことにより，TG の変更が行われる．このとき，TG2 に変更された受信者は TG2 からのユニキャストの再送により欠損パケットの補完に成功する．TG1 に接続した受信者は IP マルチキャストコンテンツと同様に Dummynet1 を経由するため，欠損パケットを補完することが出来ない．TG1 からの IP マルチキャストコンテンツとユニキャストの再送においても欠損パケットの補完が出来ない受信者は TG1 からのユニキャスト配信に切り替えられるため，トラフィック量が増加し，欠損パケットロス率が増加する．TG1 からのユニキャスト配信においても欠損パケットを補完することが出来ない受信者

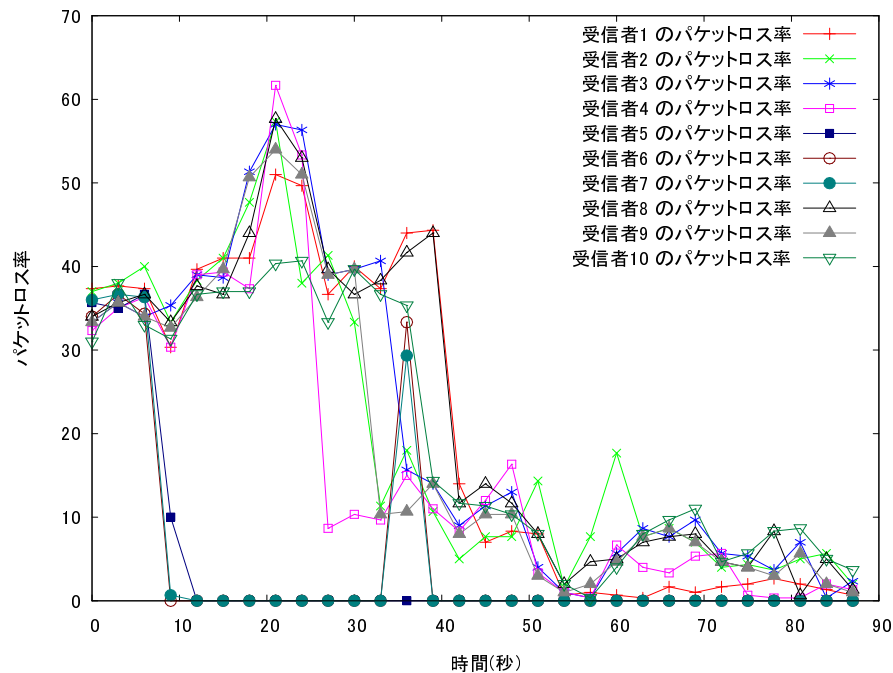


図 7.6: パケットロの競合が発生した場合

は、TG2 に接続先を変更する．これにより、TG2 受信者間のトラヒック量が Dummynet2 の制限する通信帯域を超えるため、欠損パケットが生じる．TG2 に切り替えた後も 30% 以上のパケットロス率を検知した受信者は接続が遅かった受信者から順に IP マルチキャスト配信と TG2 からのユニキャストによる再送に切り替えられる．最終的にシステム開始から 43 秒後にすべての受信者のパケットロス率は 30% 未満に収縮した．これにより、パケット競合が発生した場合においてもパケットロス率を抑えることが可能であることを示した．本評価の目的 (1) を満たすことを示した．

次に、各機能のトリガとなる閾値以上のパケットロス率の検知回数を 1 回、5 回のそれぞれで検証を行った．結果を図 7.7、図 7.8 に示す．

検知回数を 1 回で行った場合、TG2 に受信者が新たに接続してきた際に、先に TG2 に接続していた受信者 3 に突発的に閾値以上のパケットロスが発生する．これにより、受信者 3 は TG2 からのユニキャスト配信へ切り替えを行うため、よりパケットロス率が上昇し、最終的に TG1 への接続へと変更する．そのため、検知回数 1 回で行った場合、パケットロス率は 30% 未満に収縮することはない．

検知回数を 5 回連続で行った場合、基本的に検知回数が 3 回連続で行う場合と同様の動作であった．しかし、パケットロスの収縮に 75 秒のかかり、検知回数が多い分 3 回連続して検知した場合と比べるとパケットロス率が収縮するのに時間を要した．

以上の結果により、本評価の目的 (2) を満たすことを示した．

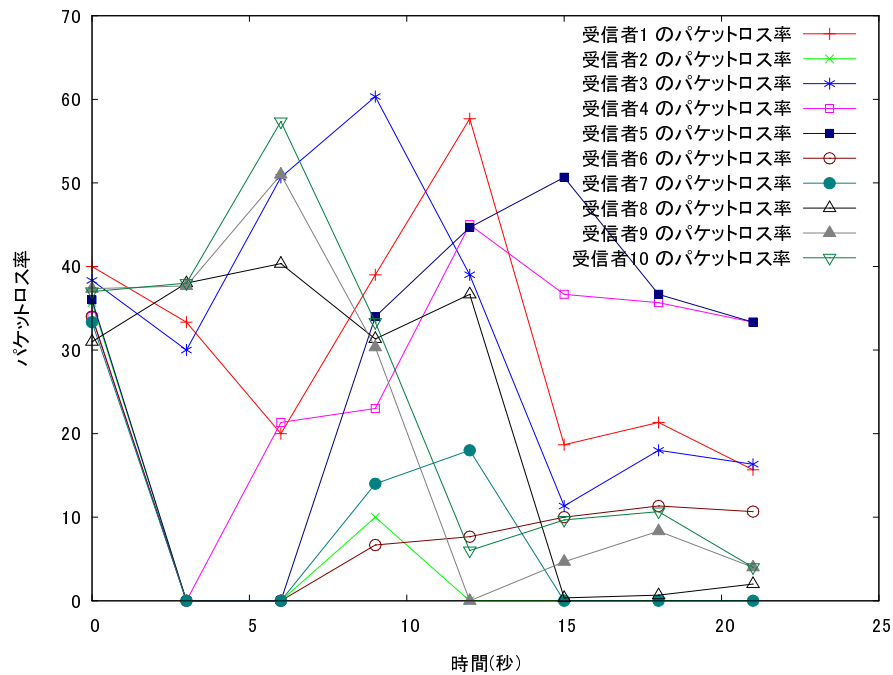


図 7.7: 変更に必要な検知回数が 1 回の場合

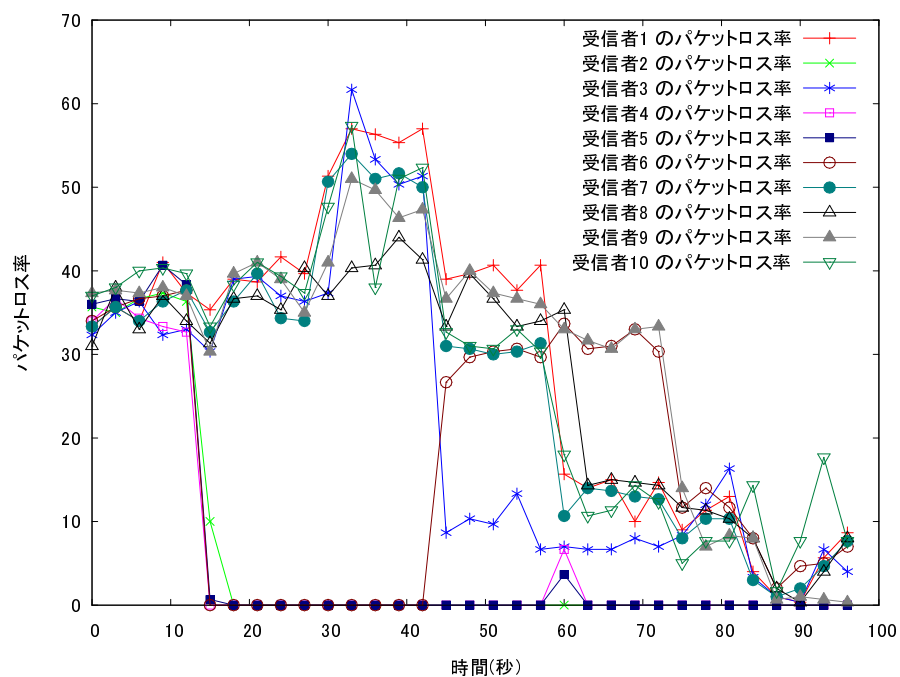


図 7.8: 変更に必要な検知回数が 5 回連続の場合

7.4 評価のまとめと考察

本章では、本提案システムで実現した機能について、その有用性を様々なケースを想定し、仮想ネットワークを使用した評価を行った。本評価では、2 種類の評価を行った。評価 1 では、ユニキャストによる欠損パケットの再送信を行った後もパケットロス进行を解消できない場合のケースを想定し、ユニキャスト配信を行う TG を変更することでボトルネックを回避することを確認できた。また、評価 2 では、TG が受信している IP マルチキャストコンテンツのパケットロスの監視を行い、パケットロスが発生した際は速やかに TG を変更すること。また、TG 受信者間の配信経路にボトルネックが存在し、パケットロスを抑えることが出来ない場合、よりパケットロスの少ない配信を行うことができる TG へ接続先を変更することを確認した。したがって、本論文の目的である一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信において、パケットロスを軽減することで、安定した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、今後の課題と展望を述べる。

8.1 まとめ

本研究では、一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信において、各受信者のパケットロスの検知と欠損パケットの補完、経路上のボトルネックリンクの回避を行う複数のTGを用い、パケットロスを軽減した安定した配信を行うための手法を提案した。本手法を用いることで、各受信者に一対多の安定した配信環境を実現することが可能となる。

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、受信者毎の配信が容易である反面、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各受信者のコンテンツ品質状態の把握が困難であるという問題がある。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。本研究では、自律分散型のTGと受信用のlocal proxyを用い、リアルタイムストリーミングデータ転送システムを提案、実装を行った。

本システムでは、送受信者間に複数のTGを設置する。受信者は送信者からIPマルチキャストで配信された音声・映像コンテンツにてパケットロスが生じた場合は、自身の接続しているTGに欠損したパケットの再送要求を行う。再送要求を受信したTGは、受信しているIPマルチキャストコンテンツから欠損パケットを確認し、再送要求を行った受信者に対し、ユニキャストによる再送信を行うことで欠損パケットの補完を行う。このとき、TGは受信者から定期的に送られてくる補完後の最終的なパケットロス情報を記録し、一定回数連続して閾値以上の最終的なパケットロスを検知した場合、送受信者間及び、TG受信者間にボトルネックリンクが存在すると判断し、配信を行うTGの変更を行うことでボトルネックリンクの回避を行う。これにより、各受信者で発生するパケットロスを軽減し、安定した配信を実現する。本システムでは、送信者、ルータに特別な操作を行うことなく一連の動作を行う。受信者は本システムを起動後、既存のアプリケーションにloop backアドレスから配信が行われる。

本研究では、一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信において、本システムの有効性を検証するために、評価アプリケーションとしてVLCを用いた。また、評価

用ネットワークを構築し、評価を行った。本評価では、送受信者間の経路上にボトルネックリンクが存在する場合と送受信者間及び、TG 受信者間の経路上にボトルネックリンクが存在する場合について本システムの検証を行い、それぞれの場合においてパケットロスの推移から評価を行った。

送受信者間の経路上にボトルネックリンクが存在する場合は、TG からの欠損パケットの補完及び、配信元の TG を変更することでパケットロスを軽減した安定した配信が可能であることを示した。次に、送受信者間及び、TG 受信者間の経路上にボトルネックリンクが存在する場合は、複数の TG の連携により、パケットロスを軽減した安定した配信が可能であることを示した。また、各動作のトリガとなる閾値以上のパケットロス率の検知回数を変更し、評価を行うことで本システムの有効性を示した。

本評価により、一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信においてパケットロスを軽減した安定した配信を行うことが可能であることを示した。本研究の実現により、IP マルチキャスト配信の通信品質を向上することで、各受信者にパケットロスを抑えた安定した一対多の配信環境を実現した。

8.2 今後の課題と展望

本研究の今後の課題と展望として以下の項目が挙げられる。

パケットロスの閾値の動的な変更

本システムで用いられるパケットロス率の閾値は、静的に決められたものである。そのため、パケットロス率の値が閾値を連続して超えないパケットロスについては対処を行うことが不可能である。そのため、受信者から送られてくるパケットロス率を一定期間記録し、その内容を基にして閾値を動的に変更する機構が必要である。

各 TG のディスカバリ手法

本システムでは、各受信者が一番最初に接続する TG は静的に決められたものである。しかし、実ネットワークで運用する場合、各受信者は自身の所属する環境から最適な TG を選択することが求められる。そのため、事前に RTT の計測やボトルネックリンクの確認から接続先となる TG を動的に選択する機構が必要である。

Join するコンテンツの選択

本システムでは、TG は各受信者からの配信要求に従ってマルチキャストコンテンツに Join する。しかし、一対多通信形態の放送型リアルタイムコンテンツ配信において本システムは有効性を発揮することから、マルチキャストセッションの規模性を考慮して Join するコンテンツを選択する必要があると考えられる。そのため、一定期間内の配信要求数

に応じて Join するか否かの判断する機構が必要である。また、一つの TG において Join するコンテンツが決定された場合、周囲の TG に Join するコンテンツを通知し、各 TG がコンテンツに Join を行う機構が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、主査である慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士に感謝致します。また、副査である慶應義塾大学環境情報学部教授中村修博士、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に感謝致します。

本研究を進めていく上で、ご指導とご助言を頂きました、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、様々なご指導とご助力を頂きました、慶應義塾大学村井研究会の教員の方々に感謝致します。

朝枝仁博士に重ねて感謝致します。博士には私が研究室に入室した当初より様々なご指導とご助力を頂きました。また、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、岡田耕司氏、堀場勝広氏、田崎創氏、空閑洋平氏、松谷健史氏、同研究科修士課程内田陽豪氏、永山翔太氏、波多野敏明氏、上原雄貴氏、重松邦彦氏、山口修平氏に感謝致します。また、同大学総合政策学部山中俊樹氏、澁田拓也氏、小澤みゆき女史、同大学環境情報学部佐藤淳哉氏、小野山裕己氏、三部剛義氏、中村尚生氏と徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤・武田合同研究プロジェクトの皆様に感謝致します。共に修士論文を執筆した、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科、六田佳祐氏、黒宮佑介氏、鈴木詩織氏、江村桂吾氏に感謝致します。

久松剛氏に重ねて感謝致します。氏は朝早くから夜遅くまで忙しい中、私の修士論文の修正をして下さりました。Achmad Basuki 氏に重ねて感謝致します。氏は自身の論文で忙しい中、私のテスト環境構築に尽力して下さいました。松園和久氏、三島和宏氏に重ねて感謝致します。お二方は修論で沈み込んでいた私に様々な励ましのお言葉をかけて下さりました。内田陽豪氏に重ねて感謝致します。氏は研究室に泊り込んでいる私を共に夕飯に連れて行って下さり、私に食のすばらしさを教えて下さりました。佐藤淳哉氏、小野山裕己氏、山中俊樹氏に重ねて感謝致します。お三方はまだ誰も大学にいない年末年始から私のサポートに尽力して下さいました。

今はもう遠い地に旅立たれた野良猫、社長氏に感謝致します。氏は研究で荒れた私の心を日々癒して下さいました。

最後に、大学入学から大学院の6年間に渡る研究生活で、私を支え続けてくれた家族に心から感謝致します。以上を持って、謝辞と致します。

参考文献

- [1] YouTube, LLC. YouTube WWW page. URL: <http://www.youtube.com>, Dec 2010.
- [2] niwango, inc. ニコニコ動画 WWW page. URL: <http://www.nicovideo.jp/>, Dec 2010.
- [3] IPTV FORUM JAPAN. IPTV FORUM JAPAN WWW page. Dec 2010.
- [4] Ustream. Ustream WWW page. URL: <http://www.ustream.tv/>, Dec 2010.
- [5] 大統領就任式委員会 (PIC). Jan 2009.
- [6] 宇多田ヒカルコンサート WILD LIFE. Dec 2010.
- [7] niwango, inc. ニコニコ生放送 WWW page. URL: <http://live.nicovideo.jp/>, Dec 2010.
- [8] J. Postel. *User Datagram Protocol*, August 1980. RFC 768.
- [9] B. Adamson, C. Bormann, M. Handley, and J. Macker. *Negative-acknowledgment (NACK)-Oriented Reliable Multicast (NORM) Protocol*, November 2004. RFC 3940.
- [10] A. Vakali, and G. Pallis. Content Delivery Networks: Status and Trends. *IEEE Internet Computing, IEEE Computer Society*, pages 68–74, Nov 2003.
- [11] 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.
- [12] S. Floyd and E. Kohler. *TCP Friendly Rate Control (TFRC): The Small-Packet (SP) Variant*, April 2007. RFC 4828.
- [13] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer. *TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification*, September 2008. RFC 5348.
- [14] K. Matsuzono and H. Asaeda,. Adaptive Rate Control with Dynamic FEC for Real-Time DV Streaming. *Proc. IEEE GLOBECOM*, 2008.
- [15] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson. *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*, July 2003. RFC 3550.
- [16] J.Liu, SG.Rao, B.Li, H.Zhang. Opportunities and challenges of peer-to-peer internet video broadcast. *Proceedings of the IEEE*, 96:11, 2008.

- [17] 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.
- [18] S.McCanne, V.Jacobson and M.Vetterli. Receiver-driven Layered Multicast. *ACM SIGCOMM*, Aug 1996.
- [19] B.VerSteeg A.Begen T.VanCaenegem Z.Vax. *Unicast-Based Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions*, November 2010. IETF AVT Internet-Draft.
- [20] B. Cain, S. Deering, I. Kouvelas, B. Fenner, and A. Thyagarajan. *Internet Group Management Protocol, Version 3*, October 2002. RFC 3376.
- [21] R. Vida, Ed., L. Costa, and Ed. *Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6*, June 2004. RFC 3810.
- [22] I. Johansson. *Extended Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions (ERAMS)*, June 2010. IETF AVT Internet-Draft.
- [23] J. Xia Q. Wu H. Asaeda. *Proxy Rapid Acquisition of Multicast RTP Sessions*, March 2010. IETF AVT Internet-Draft.
- [24] L. Rizzo. dummynet WWW page. URL: <http://info.iet.unipi.it/?luigi/ipdummynet/>, Dec 2010.