

Title	ビデオ伝送を考慮したネットワークシステムの特性に関する研究
Author(s)	大林, 隆之
Citation	
Issue Date	2001-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1457
Rights	
Description	Supervisor:丹 康雄, 情報科学研究科, 修士

修士論文

ビデオ伝送を考慮した ネットワークシステムの特性に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

大林 隆之

2001年3月

修士論文

ビデオ伝送を考慮した ネットワークシステムの特性に関する研究

指導教官 丹 康雄 助教授

審査委員主査 丹 康雄 助教授

審査委員 松澤 照男 教授

審査委員 篠田 陽一 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

910019 大林 隆之

2001年2月15日

要 旨

近年、ビデオデータをはじめとするマルチメディアデータをコンピュータネットワーク上で伝送するための研究が盛んに行われている。そのような中で、ハードウェア技術をはじめとする技術の進歩により、Ethernet でも CoS(Class of Service) や VLAN のサポートが可能なハードウェアスイッチが市場に出荷されてきている。

本研究では、この VLAN と CoS の標準である IEEE 802.1Q/p を利用して、End-to-End で QoS 保証が行われる経路の確保と解放といった、ネットワーク上の資源を集中管理する機構を、Path Allocation Manager(PAAM) として提案する。PAAM はその管理対象をドメイン内程度とし、管理対象とするネットワーク内の機器とその特性を把握し、経路を確保する際は個々の機器が持つ特性を利用した経路選択アルゴリズムを用いて End-to-End の経路の確保を行う。

目次

1	はじめに	1
2	Quality of Service	3
2.1	マルチメディアデータが要求する QoS	3
2.2	QoS の保証を行うネットワークシステム	5
2.2.1	ATM	5
2.2.2	IntServ アーキテクチャと RSVP	9
2.2.3	DiffServ	10
2.2.4	IEEE 802.1Q/p	12
3	ネットワークの資源管理	15
3.1	集中管理と分散管理	15
3.2	ポリシマネジメント	17
4	PAth Allocation Manager	19
4.1	PAAM の構成	19
4.2	End-to-End の経路の識別	23
4.3	PAAM の動作	24
5	QoS 保証の実現	27
5.1	必要とする帯域幅	27
5.1.1	PQ (Priority Queueing)	28
5.1.2	WFQ (Weighted Fair Queueing)	28
5.1.3	CBQ (Class Based Queueing)	29
5.2	伝送遅延とジッタ	29
5.3	経路選択アルゴリズム	31

6	評価と考察	38
7	今後の課題	41
7.1	ネットワークの動的な変化への対応	41
7.2	JAIST VideoLAN への適用	42
7.3	他の QoS 保証ネットワークとの相互運用	43
8	おわりに	44

目次

2.1	RSVP メッセージの流れ	10
2.2	DiffServ の構成	11
2.3	802.1Q Ethernet フレームフォーマット	13
3.1	機器自身による分散管理	16
3.2	第三者による集中管理	17
4.1	PAAM の概略	20
4.2	VLAN による End-to-End の経路	23
4.3	経路確保の動作フロー	25
4.4	経路解放の動作フロー	26
5.1	Priority Queueing の概要図	28
5.2	Weighted Fair Queueing の概要図	29
5.3	CBQ による階層的リンク共有 (左) と CBQ の概要図 (右)	30
5.4	アルゴリズムの概要図	33
5.5	トポロジマップのグラフ化	34
5.6	$d(v) = 2$ のノード (上) と $d(v) = 0$ のノード (下)	35
5.7	経路選択アルゴリズムのフローチャート	37
6.1	実験ネットワーク	38
6.2	End-to-End での遅延時間	40
7.1	JAIST VideoLAN システム	42

表 目 次

2.1	非圧縮のビデオフォーマットのパラメータ	4
2.2	圧縮を伴うビデオフォーマットで必要とされる帯域幅	4
2.3	ATM ネットワークにおけるサービス特性	5
2.4	ATM 標準の QoS パラメータ	6
2.5	ATM サービスカテゴリ	8
2.6	コネクション確立、解放に用いられるメッセージ	8
2.7	user_priority とトラフィックタイプ	14

第 1 章

はじめに

動画像や音声といったデータは、テキストを中心とした旧来のデータと比較して連続的で大容量という性質を持っており、また遅延や遅延揺らぎといった時間軸に対する変動に非常に敏感である。そのため、動画像や音声をコンピュータ上で扱うことは性能的に困難であり、それらをコンピュータネットワーク上で伝送することもまた難題であった。

しかし近年、コンピュータの性能や技術の向上により、動画像や音声といったデータをマルチメディアデータと称してコンピュータ上で扱おうという動きが活発になり、それと同時に、これらのマルチメディアデータをネットワーク上で伝送しようとさまざまな研究が行われてきた。また、従来家電機器も内部にコンピュータを搭載しインテリジェント化が図られ、ネットワークインタフェースを持つようになり、旧来のテキストを中心としたコンピュータネットワーク、音声の伝送を中心に行ってきた電話網、動画像と音声の伝送を行ってきた家電ネットワークの境界が曖昧なものとなってきた。

マルチメディアデータをネットワーク上で伝送する場合、如何にそのサービス品質 (QoS: Quality of Service) を保証するかが問題となる。そのため、QoS の保証が行えるネットワークとして ATM が盛んに研究され、マルチメディアデータを伝送するためのネットワークとして利用されてきた。ATM は End-to-End のコネクションを張り順序到達保証が行え、厳密な QoS の規定が定義されている。ATM は主として広域網において利用されているが、ATM 以外にも RSVP、DiffServ、MPLS など広域におけるマルチメディアデータの伝送を考慮に入れたネットワーク技術が提唱されている。また、家庭内のマルチメディアネットワークとして、近年 IEEE1394 が脚光を浴びている。

一方、Ethernet は LAN 環境のインフラストラクチャとしてコンピュータネットワークで広く利用されてきており、近年のハードウェア技術の進歩と共に元来のメディア共有型ネットワークからスイッチ型のネットワークへと変貌を遂げつつある。この Ethernet に対

してフローの識別やクラス分けを行うための IEEE802.1Q、IEEE802.1p といった標準も制定され、特定のフローに対する CoS (Class of Service) や QoS の保証を行える製品も市場へ出荷されている。このような背景から、今後 Ethernet がコンピュータネットワークだけでなくマルチメディアネットワークのインフラストラクチャとして十分に安価かつ高速な手段として、家庭内でも利用される可能性が高い。しかし、現在市場に出荷されている製品で IEEE802.1Q、IEEE802.1p 標準に対応している機器でも採用されているスケジューリングアルゴリズムやバッファリング能力、必要帯域の確保の方法などといった、具体的な QoS や CoS の保証を実現する方法はベンダごと、また同一ベンダの製品でも機器の種類によって異なる。

このため、Ethernet 上において End-to-End での確実な QoS 保証を実現するためには、ネットワーク内のどこにどのような機器が存在し、その機器がどのような QoS 保証の仕組みを有しているかを把握して、あらかじめ必要な分だけ資源を予約しておく必要がある。

本研究では、ビデオネットワークの伝送メディアとして Ethernet を利用し、Tag-VLAN を利用した End-to-End の経路を確保し QoS の保証を目指すための機構 PAth Allocation Manager の設計を行い安定したビデオ伝送を実現するシステムを提案する。

第 2 章

Quality of Service

QoS (Quality of Service : サービス品質) はサービス提供者がサービスユーザに対して提供するサービスの特徴づけるものであり、ネットワークにおいては定量的に表現できる通信品質のことを示す。具体的な QoS パラメータは各標準で定義されているが、一例としては

- 帯域幅
- 遅延時間、遅延揺らぎ
- 損失率

といったものとなる。本節ではマルチメディアデータがどのような QoS パラメータを要求するか、QoS の保証を謳うネットワークシステムの標準としてどのようなものがあるかについて示す。

2.1 マルチメディアデータが要求する QoS

ビデオや音声といったマルチメディアデータは連続的で広い帯域幅を必要とするデータである。ビデオデータのフォーマットは映画や TV、ビデオゲームといった産業によりビデオが発展したこともあり、今日ではさまざまなフォーマットが存在する。

通常用いられるテレビの画面を、非圧縮の符号化を行った場合は表 2.1 に示すようなパラメータとなる。

表 2.1 の符号化で、ピクセル辺り 24bit を割り当てた場合その帯域幅は数百 Mbps から数 Gbps という非常に大きな帯域幅が必要となる。また、今日 PC のディスプレイで主と

	ピクセル / ライン	ライン / フレーム	フレーム / 秒
NTSC	720	480	30
PAL	720	576	25
CIF	352	288	~ 30
QCIF	176	144	30
HDTV	1920	1152	60
	1440	1152	60

表 2.1: 非圧縮のビデオフォーマットのパラメータ

して使用される 24bit/pixel、1280x1024pixel の解像度、76Hz のリフレッシュレートでは、非圧縮で約 2.23Gbps の帯域幅が必要となる。今日のネットワークの帯域幅は LAN においても 10Mbps から 10Gbps 程度であり、表 2.1 で要求される帯域幅を確保することが難しい。

したがって、今日ネットワーク上でビデオデータを伝送する場合はほとんどの場合圧縮して伝送を行う。ビデオデータの圧縮フォーマットとその必要帯域幅を表 2.2 に示す。

規格、フォーマット	おおよその帯域幅
M-JPEG	10 – 20 Mbps
MPEG-1	1.2 – 2.0 Mbps
H.261	64K – 2.0 Mbps
DVI	1.2 – 1.5 Mbps
CDI	1.2 – 1.5 Mbps
MPEG-2	4 – 60 Mbps
DVCR	25 – 40 Mbps
CCIR723	32 – 45 Mbps
CCIR601/D-1	140 – 270 Mbps

表 2.2: 圧縮を伴うビデオフォーマットで必要とされる帯域幅

これらのフォーマットの中では TV 会議での利用を目的とし、低遅延での符号化を目指した H.261、CD-ROM への記録など蓄積メディアでの利用を主たる目的とした MPEG-1、TV 会議以外にも通信や放送を視野に入れた MPEG-2、デジタルビデオカメラなど、家電機器 IEEE 1394 インタフェースを備えた家電で採用されている DVCR がよく用いられている。

一方、RACE (Research for Advanced Communication in Europe) project 1022 では、ATM ネットワークにおけるサービスとそのための最低限の要求を表 2.3 のように示している。

サービス	BER	PLR	PIR	遅延
電話	10^{-7}	10^{-3}	10^{-3}	25 / 500 ms
データ伝送	10^{-7}	10^{-6}	10^{-6}	1000 / 50 ms
ビデオ伝送	10^{-6}	10^{-8}	10^{-8}	1000 ms
HiFi 音 (声)	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	1000 ms
遠隔プロセス制御	10^{-5}	10^{-3}	10^{-3}	1000 ms

表 2.3: ATM ネットワークにおけるサービス特性

BER: Bit Error Rate

PLR: Packet Loss Ratio

PIR: Packet Insertion Ratio

2.2 QoS の保証を行うネットワークシステム

旧来のコンピュータネットワークは QoS 保証を考慮して作られたものではなかったが、テキストを中心としたデータを中心として扱うには十分であった。しかし、電話のように低遅延を要求するもの、動画像のように大容量かつ連続的なデータをネットワーク上で伝送するためには、これらのトラフィックと他のトラフィックとの差別化を行い QoS の保証を行う必要がある。このような QoS 保証を謳っているネットワークシステムの標準を次に挙げる。

2.2.1 ATM

ATM (Asynchronous Transfer Mode : 非同期転送モード) とは、CCITT が次世代の ISDN として標準化した B-ISDN のための基盤伝送システムである。マルチメディアデータを扱えるネットワーク技術という設計思想に基づき、53byte (含ヘッダ) の固定長のセルをハードウェアで高速に処理し、厳密な QoS の規定を (必要であれば) 行える。

ATM 標準では QoS パラメータをいくつか定義しており、そのうちのいくつかを表 2.4 に示す。

Parameter	Acronym	Meaning
ピークセルレート	PCR	送信セルの最大速度
セルレートの期待値	SCR	長期間の平均セルレート
最小セルレート	MCR	許容可能な最小セルレート
最大許容セル遅延変動値	CDVT	許容できる最大セルジッタ
セル損失割合	CLR	損失または配送遅延が大きいセルの割合
セル伝送遅延	CTD	伝送に要する遅延（平均と最大）
セル遅延変動値	CDV	セルの配送時間の変動値
セルエラー割合	CER	エラー無しで配送されるセルの割合
劣悪時のブロック内セル誤り割合	SECBR	誤ったブロックの割合
誤配送割合	CMR	誤った宛先へ配送されるセルの割合

表 2.4: ATM 標準の QoS パラメータ

また、ATM 標準では次に示すサービスクラスを定義している。

- CBR (Constant Bit Rate : 固定ビットレート)

ピークセルレートを定めた疑似回線交換クラスで、ピークレートでネットワークの資源を予約し QoS を保持したサービスが提供される。QoS パラメータとしては伝送による遅延時間、遅延揺らぎの最大値、そしてセル損失率を保証するサービスであるが、事前にユーザの申告を基にトラフィックの性質が明らかになっている必要がある。

- VBR (Variable Bit Rate : 可変ビットレート)

ピークセルレートの他平均セルレート、最大バースト長でトラフィックパターンを規定するクラスで、可変速度符号化を用いた音声やビデオ通信をそのサービス対象として想定している。

VBR は rt-VBR (リアルタイム通信用) と nrt-VBR (蓄積通信用) の二つがあり、nrt-VBR ではセル損失率のみを保証し、rt-VBR ではセル損失に加えて遅延と揺ら

ぎも保証する。VBR も通信トラフィックの特性があらかじめ明らかになっていることが前提となる。

- ABR (Available Bit Rate : 利用可能ビットレート)

現在の中継リンクの空き帯域をできるだけ効率よく、かつ公平に利用するサービスで、ネットワークから各ユーザに対して使用可能帯域を通知し、ユーザはそれに基づいてレートを制御する。

端末は最低レートと現在使用中のレートをネットワークへ送出し、ネットワークは最低レートを保証した上でできるだけ多くの帯域をユーザへ使用させるように制御する。

- UBR (Unspecified Bit Rate : ビットレートの明示指定なし)

TCP/IP のように、既存のデータ伝送用のプロトコルにはデータ紛失時の再送やレート制御といった機能が備わっており、このようなベストエフォートトラフィックに対して QoS の保証を行わないクラスとして UBR クラスが定義された。UBR ではピークセルレートが規定され、最低帯域保証は行われぬ。

これらのサービスクラスにおいて保証を行う QoS パラメータを表 2.5 に示す。

MPEG-1、2 は GOP (Group of Picture) と呼ばれる単位で構成される。GOP はそれぞれ単独で一枚の絵をなす I フレーム、前の I または P フレームとの差分から順方向予測を用いて符号化される P フレーム、前後の I、P フレームとの差分による双方向予測を行う B フレームによって構成される。I、P、B フレームのデータ量は

$$I \text{ フレーム} > P \text{ フレーム} > B \text{ フレーム}$$

と異なっており、その要求する帯域幅が刻々と変化する。このような、時刻と共にビットレートが変化するデータを伝送するために VBR サービスカテゴリが定義されたが、VBR を実現するための帯域制御は非常に困難な問題であるため、可変速度符号化を施されたビデオデータをネットワーク上で伝送する場合本来ならば VBR を用いれば帯域の有効利用が図れるはずが、輻輳とそれによる損失や遅延を起こさないよう、ビデオデータの PCR で CBR の帯域予約を行っているのが現状である。

ATM のコネクションは、従来の専用回線のように契約に基づいてあらかじめ回線を設定しておく半固定の PVC (Permanent Virtual Channel : 固定仮想回線) と、通信をしたいと

	CBR	VBR		ABR	UBR
		rt-VBR	nrt-VBR		
トラフィック パラメータ	PCR	PCR, SCR, 最大バースト長		PCR, MCR	なし
QoS パラメータ	CTD, CDVT, CLR	CTD, CDVT	CTD	ネットワークの性能として CLR が決める	なし
		CLR			
サービス対象	回線交換 データ	リアルタイム	非リアルタイム	データ転送 LAN 内 / 間	データ転送、特に TCP/IP
		CLR			
特色	ユーザが事前にトラフィックの性質が分かっていることを前提			データを転送する ATM レイヤサービスとして検討	

表 2.5: ATM サービスカテゴリ

きに信号を用いて回線を確認し、通信終了後に解放する SVC (Switched Virtual Channel : 交換仮想回線) をサポートしており、SVC でのコネクション確保は制御プレーンが行う。コネクションの確立と解放に用いられるメッセージを表 2.6 に示す。

メッセージ	host から送信された時の意味	network から送信された時の意味
SETUP	回線の確立要求	呼の確立要求が来る
CALL PROCEEDING	呼の確立要求を受信	呼の確立要求の処理中
CONNECT	呼の確立要求を受理した	呼の確立要求が受理された
CONNECT ACK	受理通知に対する確認通知	呼の確立に対する確認通知
RELEASE	呼の解放要求を出す	解放要求が来た
RELEASE COMPLETE	解放要求に対する確認通知	解放要求に対する確認通知

表 2.6: コネクション確立、解放に用いられるメッセージ

ATM はデスクトップからバックボーンまで多種多様なデータを統合するネットワークとして大きな期待を集め、数多くの研究がなされてきてはいるが、現在は主に広域網のバックボーンとして利用されているケースが多い。

2.2.2 IntServ アーキテクチャと RSVP

IntServ アーキテクチャ (Integrated Service Architecture) は、現在のインターネットで採用されているベストエフォートのトラフィック伝送に対し、あるタイプのトラフィックに対して特別な取り扱いを提供すること、アプリケーションが複数レベルのトラフィック伝送サービスを選べる機構を提供することを目的として設計された。その中で、RSVP (Resource ReSerVation Protocol) [1] は IP 上でネットワーク上の資源予約を行うプロトコルである。RSVP の特徴を次に示す。

- ユニキャストの他に多対多のマルチキャストアプリケーションのために資源予約を行う。
- 片方向の予約である。
- 受信側ノード主導、すなわちデータフローの受信側がそのフローのために使用される資源の予約を始め、それを維持する。
- 一定時間毎にメッセージを送信し、機器の着脱やルーティングなどの動的な変化に対応する。
- 他のルーティングプロトコルとは独立している。

帯域予約を行う場合、まず Path メッセージを送信元のノードから宛先のノードあるいはマルチキャストアドレスへ送信する。Path メッセージにはデータフォーマット、送信元アドレス、トラフィック特性の情報といったフロースペックの譲歩を含む。また、この情報は宛先のノードがリバースパスを決定するために利用される。Path メッセージを受信した宛先のノードは、今度は Resv メッセージを送信元のノードへ向かって送出する。Resv メッセージにはフロースペックやフィルタスペックなどの帯域予約パラメータを含み、送信元ノードへ到達する途中のシステムでは予約要求に基づいてポリシー制御と許諾制御を行うと共に、上流の中継システムへ転送する。Resv メッセージがエラーとならずに送信元ノードへ到達した場合、帯域予約が完了する。この過程を図 2.1 に示す。

一方で、RSVP は次のような問題点を抱えている。

- ルータがフロー毎の状態を保持しなければならないため、スケーラビリティに欠ける。
- 送信元から宛先のノード間に RSVP 非対応なルータが存在した場合、そのルータを経由したリンク上での帯域保証が行えない。

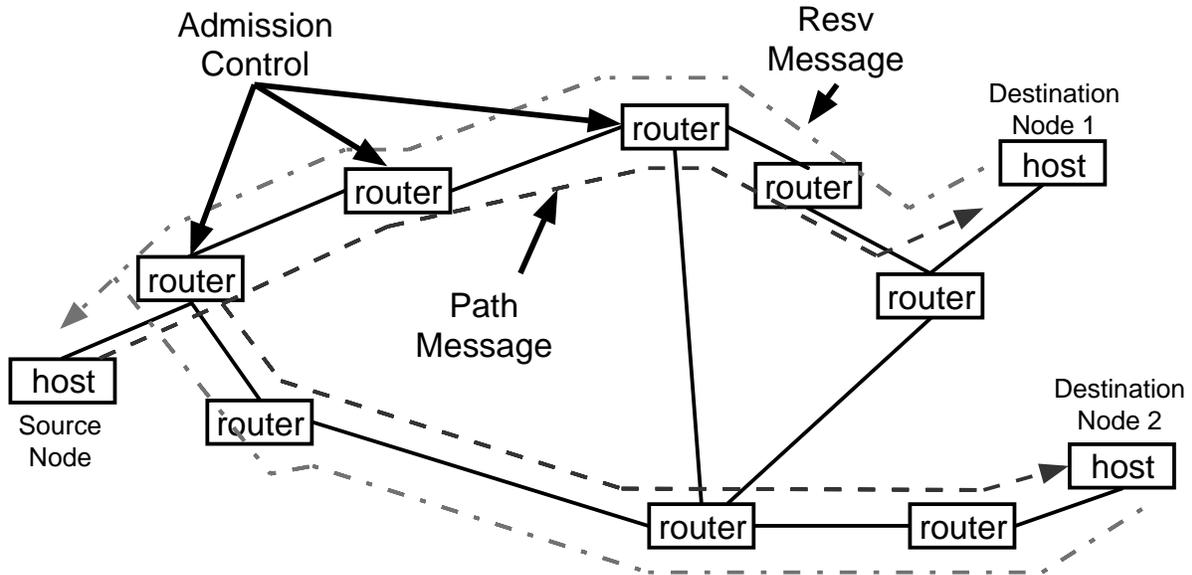


図 2.1: RSVP メッセージの流れ

- メカニズムが複雑なため、実装が難しくまたシステム管理が困難。

2.2.3 DiffServ

DiffServ[2][3][4][5] は、理論上のワーストケースの積み重ねという従来の絶対的な QoS への考え方を改め、賢いエンドノードと広帯域な回線を前提により「ルーズ」な QoS、すなわち CoS へのアプローチを行っている。

DiffServ では、ネットワークを DS ドメインに分割する。DS ドメインはコアノードとエッジノードから構成され (図 2.2)、エッジノードではパケットの分類と DSCP のマーキング、ピアの DS へ出力する際のシェーピングを行い、コアノードでは、エッジノードでマーキングされた DSCP を参照しフローを処理する。

DiffServ では PHB (Per-Hop Behavior) と呼ばれる、実装に依存しないフォワーディングメカニズムの記述を定義している。

- Defaut PHB

従来のベストエフォートサービスである。

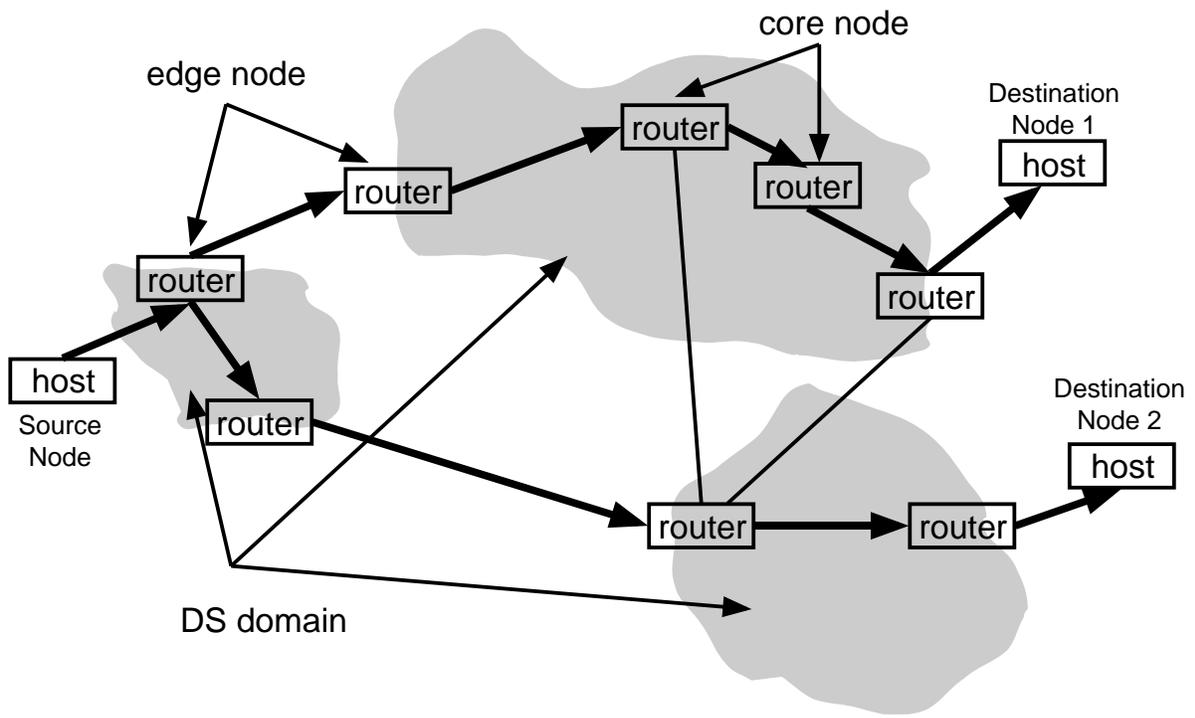


図 2.2: DiffServ の構成

- EF (Expedited Forwarding) PHB

仮想的な専用線サービスであり、低廃棄、低ジッタ、帯域保証を行う。

- AF (Assured Forwarding) PHB

最低帯域保証のあるサービスで四つの独立したクラスが定義されている。また、各クラスには三つの廃棄レベルが用意されている。

DiffServ は現在標準化が進みつつあるが、その問題点として CoS では高負荷時には高優先のトラフィック同士で回線が輻輳を起し、結果として高優先トラフィックが廃棄されてしまうという点が挙げられる。また、DiffServ は送信者の契約に応じた扱いを行い、受信者の契約が反映されず一般ユーザに対する利益が少ない。

2.2.4 IEEE 802.1Q/p

IEEE 802.1p[6] はマルチキャストプルーニングの標準として提唱されたが、その中に MAC フレームの優先度についての取り扱いが検討されていた。その後、優先度の取り扱いは IEEE 802.1Q タスクフォースに移管され、そこで詳細に検討が行われた。

IEEE 802.1Q[7] は Tag-VLAN (Virtual LAN) とそのためのフレームフォーマットの標準として策定された。VLAN は OSI 参照モデルのネットワーク層 (レイヤ 3) とは独立に、データリンク層 (レイヤ 2) においてブロードキャストドメインを分割する技術である。ブロードキャストあるいはマルチキャストフレームは、VLAN ID によってグルーピングされた範囲にのみ届くため、結果としてネットワーク上の帯域幅の空きを増やすことになる。Tag-VLAN は複数のスイッチにわたって VLAN を機能させる方式で、スイッチ間で VLAN を識別するためにフレームに VID を埋め込む拡張を施す。

従来の Ethernet フレームフォーマットと IEEE 802.1Q で修正された Ethernet フレームフォーマットは、図 2.3 に示すように新たに Type フィールド、TCI フィールド (Tag Control Information)、E-RIF (Embedded Routing Information Field) が拡張されている。

- Type

802.1Q フレームであることを示す 0x8100 が格納される。ペイロードのプロトコルタイプ (Type) は TCI フィールドの直後に格納される。

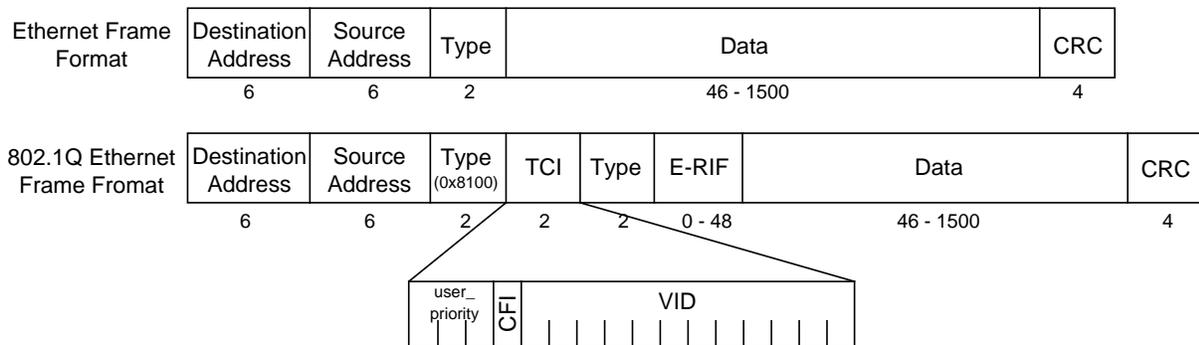


図 2.3: 802.1Q Ethernet フレームフォーマット

• TCI

そのフレームが属する VLAN 及びそのフレームの優先度を示す。TCI は次の三つのフィールドから構成されている。

– user_priority

そのフレームが持つ優先度を示す。このフィールドは 3bit で、8 段階の優先度を示すことが可能である。優先度については後述する。

– CFI

通常はこのビットは 0 にセットされる。0 にセットされた場合、ヘッダには E-RIF は含まれず、1 にセットされた場合にはヘッダに可変長の E-RIF が含まれる。E-RIF はソースルーティングブリッジにおいて利用される属性であり、Ethernet でソースルーティングブリッジを利用されることはほぼないため構造については省略する。

– VID

そのフレームがどの VLAN にグルーピングされるかを示す識別子で、その長さは 12bit となっている。そのうち、VID が 0 (Null VID)、1 (Default PVID)、0xffff (実装のために予約) の三つは予約されているため、利用可能な VID は 4093 個となる。

IEEE 802.1p で検討されていた、MAC フレームへ負荷する八つの優先度は表 2.7 のように規定された。

IEEE 802.1Q/p は CoS を提供するものであり厳密な QoS を提供するものではないが、今日市場に出荷されている機器では特定の VID のフローに対する帯域保証が行えるなど

user_priority	Acronym	Traffic Type
1	BK	Background
2	-	Spare
0 (Default)	BE	Best Effort
3	EE	Excellent Effort
4	CL	Controlled Load
5	VI	“Video”, < 100 milliseconds latency and jitter
6	VO	“Voice”, < 10 milliseconds latency and jitter
7	NC	Network Control

表 2.7: user_priority とトラフィックタイプ

の拡張が施されているものも出荷されてきており、これらの機能と CoS、VID を組み合わせることで擬似的な QoS の保証を実現できる。一方で、802.1Q/p はデータリンク層の技術であり、VID フィールドが 12bit でフローを識別できる数は 4093 個であり、スケラビリティに欠ける。

第 3 章

ネットワークの資源管理

3.1 集中管理と分散管理

ネットワーク技術の発達により、今日のネットワークは多種多様な製品によって構成されている。このようなネットワークにおいて資源を予約し End-to-End の経路を確保するためには、これらネットワーク上に散在する機器とそこに存在する資源の情報を管理する必要がある。このような資源を管理する手法として、機器自身による分散管理と第三者による集中管理が挙げられる。

機器自身による分散管理は図 3.1 に示すように、ネットワーク内の機器自身が資源の管理を行う形態である。資源予約要求は送信元あるいは宛先のノードからネットワーク内へ送信され、通過経路となる機器自身がその資源予約要求を解釈し、自身の管理する資源の予約を行う。

この形態の特徴として、

- ネットワーク内の機器自身が管理を行うため、ネットワークの拡張は新たな機器を接続すればよく、スケーラビリティに優れている。
- 機器が資源予約要求をそれと理解するための標準が必要となる。また、機器自身に資源予約要求を分類、解釈し、その要求を満たす経路を確保できるかを確認するインテリジェンスが必要となる。
- 単一の機器の故障が発生した場合、ネットワークが寸断される可能性はあるがネットワーク全体において資源予約が行えなくなるような自体には至らない。

ということが挙げられる。

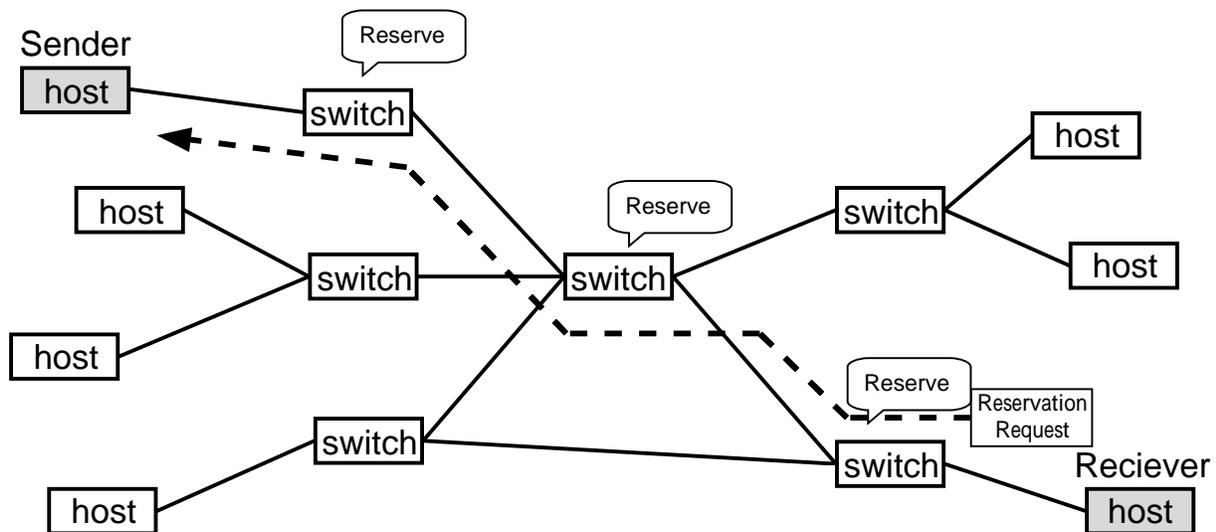


図 3.1: 機器自身による分散管理

一方、第三者による集中管理は図 3.2 に示すように、第三者的な機構を用意しその機構がネットワーク内の機器とその資源を集中管理する形態である。資源予約要求は、送信元あるいは宛先のノードから一度集中管理機構に送信され、集中管理機構はその要求を解釈し経路上の機器に対して改めて、それらの機器が理解できる要求へ翻訳を行い資源の予約を行う。

この形態の特徴としては、

- ネットワーク内の機器は相互にトラフィックを識別する手段を用意する必要があるが、資源予約の方法は必ずしも統一されている必要はなく、既存の機器も利用が可能となる場合がある。
- 管理方法の変更や機能の追加は集中管理機構に対して行うことでネットワーク全体へ反映させることができる。
- 資源予約要求はすべて一度集中管理機構へ投げられ、そこから改めてネットワーク上の機器へ資源予約要求が配信されるため、集中管理機構がボトルネックとなる可能性がある。そのため、スケーラビリティに欠ける。
- 集中管理機構が故障すると資源予約が行えなくなる。

ということが挙げられる。

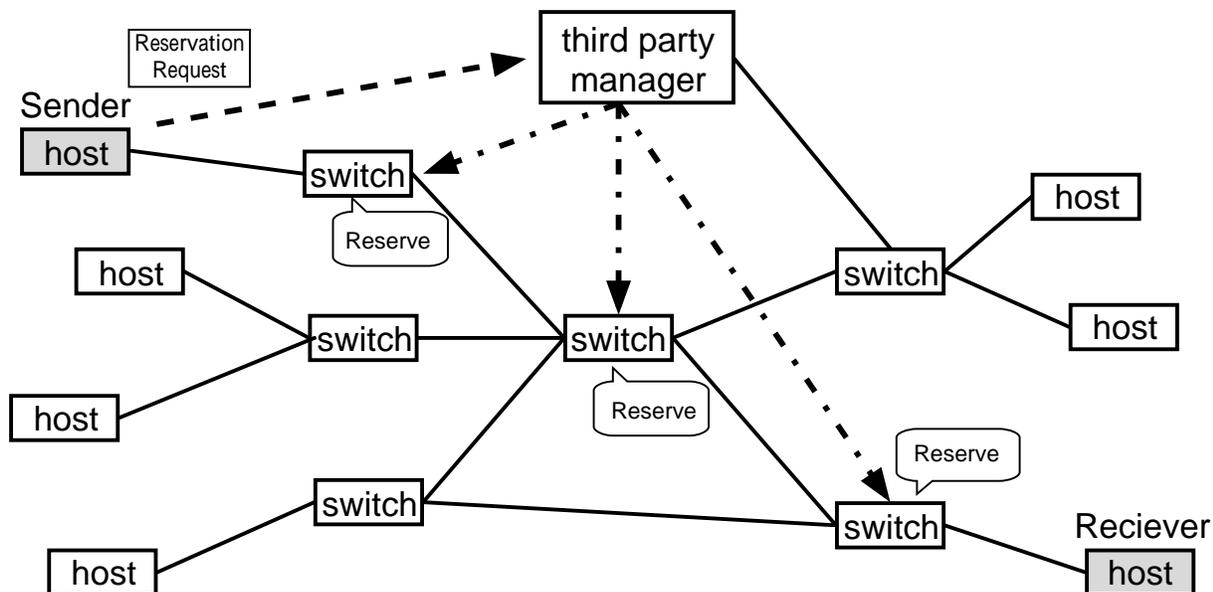


図 3.2: 第三者による集中管理

本論文では、管理の対象となるネットワークをドメイン程度とし、スケーラビリティに欠けるが、資源管理に対する機能の拡張と実装が容易で、現存する機器が利用可能であるという理由から集中管理機構を利用する後者の方法を採用し、その構成について述べていく。

3.2 ポリシマネジメント

昼間は Web やメールのトラフィックを優先し、深夜に大量のデータを扱う ftp やバッチ処理のトラフィックを優先するといった、時刻やアプリケーションによりクラス分けされたトラフィックの優先度の変更や、ある MAC アドレスのマシンを持つ重役に対して特定の VLAN に属させることで差別化されたサービスを提供するなど、管理者の意思をネットワーク全体に反映させたい場合、その都度ネットワーク内の機器を一台一台手で設定して廻るとするのは現実問題として非常に困難である。

このような問題を解決する手段として、一カ所でネットワークを集中管理し、管理者のポリシーを設定しネットワークへ反映させるポリシマネージャが利用されている。しかし、ポリシマネージャの多くはある特定のベンダを対象にしており、マルチベンダのネットワークにおいては必ずしも期待通りの動作を行うとは限らない。また、通常ポリシマネー

ジャが取り扱うのは前述のような、数日から数ヵ月、場合によっては年単位で継続して存在するポリシを対象としており、本研究で対象とするような、個別のフローに対するポリシマネジメントとは趣が異なる。

第 4 章

PAth Allocation Manager

本論文では、ネットワークを集中的に管理する機構を PAth Allocation Manager (以下 PAAM) として提案する。PAAM はその管理対象となるネットワーク内の機器の情報をもち、上位の資源管理体型やアプリケーションからの経路設定要求を受け、Ethernet 上に於いてその名が示すようにマルチメディアデータの送信元から宛先までの End-to-End で QoS の保証が行える経路の確保及び解放を行う。またこれに伴う、確保する経路の決定とネットワーク内の各機器への設定命令の発行も行う。

本章では、これらの仕事を仔細に記していく。

4.1 PAAM の構成

PAAM は集中管理機構全体を指す名称であり、次のモジュールから構成されている。

- インタフェースモジュール
- 経路選択モジュール
- ネットワーク設定モジュール
- データベースモジュール

図 4.1 に PAAM の概略図を示す。次に、各モジュールについて仔細に示す。

インタフェースモジュール

アプリケーションや上位の資源管理機構 (以下上位モジュール) 等とのインタフェース部となる。上位モジュールからの入力として送信元と宛先のアドレス、必要帯域、遅延限

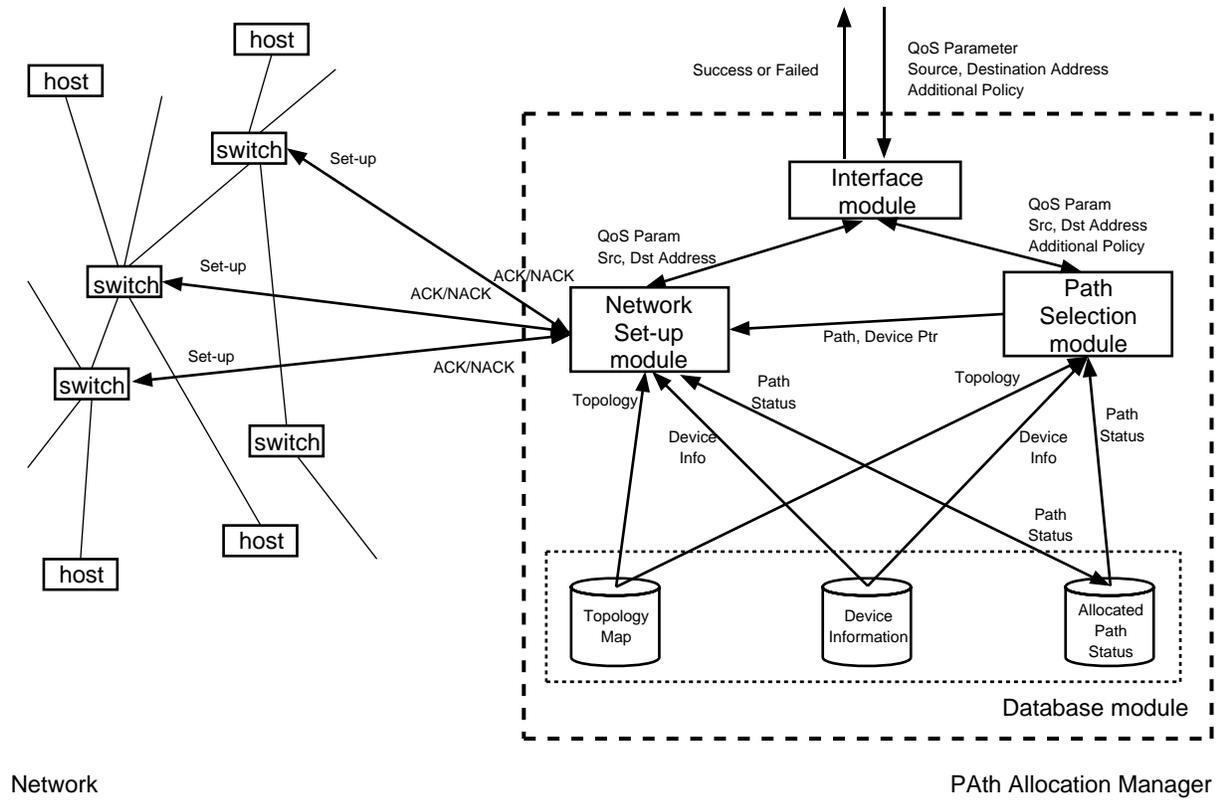


図 4.1: PAAM の概略

界、遅延揺らぎ限界、あれば経路選択の際に利用される付加的なポリシーを受け取り、経路選択モジュールとネットワーク設定モジュールへこれらの値を出力する。そして、経路確保が成功すればネットワーク設定モジュールから、失敗すればネットワーク設定モジュールか経路選択モジュールからその旨を受け取り、送信元から宛先までの経路確保の成否を上位モジュールへ出力する。

経路選択モジュール

上位モジュールから要求された送信元から宛先への到達可能な経路をネットワークのトポロジマップ、PAAM 自身が既に設定した経路の情報、ネットワーク内の機器情報を元に探索し、その中から最適な経路を選択する。インタフェースモジュールから送信元と宛先のアドレス、必要帯域、遅延限界、遅延揺らぎ限界、あれば経路選択の際に利用される付加的なポリシーを受け取り、これらのパラメータを元に後述する経路選択アルゴリズムにより経路の探索を行い、利用可能な経路があればその経路と経路上の機器のアドレスをネットワーク設定モジュールへと出力する。また、利用可能な経路が存在しなかった場合は、インタフェースモジュールへ経路確保失敗の旨を出力する。

ネットワーク設定モジュール

経路選択モジュールによって決定された経路を、上位モジュールから要求されたパラメータを満足するようにネットワーク内の機器を設定する。経路選択モジュールから設定すべきネットワーク機器情報へのポインタを、上位モジュールから必要帯域、遅延限界、遅延揺らぎ限界を受け取り、ネットワークのトポロジマップ、機器情報、PAAM 自身が既に設定した経路の情報を元に機器へ設定命令を発行し、設定命令を発行した機器から設定の成否を受け、インタフェースモジュールへ経路確保の成否を出力する。

ネットワークの設定は、SNMPv1 か CLI によって行う。機器の位置は IPv4 アドレスで指定し、SNMPv1 では各機器のエージェントと通信し、VLAN の設定とトラフィックの統計情報の取得を行い、CLI ではその機器の設定を送信する。これらの設定方法は機器情報データベースから取得する。

データベースモジュール

データベースモジュールはデータベースへの情報の登録、検索を管理する DBMS (DataBase Management System) と格納されるデータからなる。

ネットワーク内には複数の機器が存在するが、機器の種類と中で動作している firmware などが同一のものであればそれらが持つ特性はやはり同じであり、これらの情報を実際にネットワーク内に配備された機器ごとに持つことは効率と一貫性という点から鑑みて望ましくない。そこで、その機器の種類が持つ特性をクラスとして機器情報データベースにまとめ、実際にネットワーク内に配備されている機器をインスタンスとしてトポロジマップへまとめる。

次に、PAAM が利用する各データベースについて示す。

機器情報

ネットワーク内の機器が持つ固有の情報を格納しており、機器の本体とそこに取り付けられたポートの情報から構成される。

機器本体の情報は機器名、ベンダ名、firmware のバージョン、ハードウェアリビジョン、ポート数、スイッチにおける遅延時間、バッファサイズ、その機器において採用されているスケジューリング方式、機器の設定方法である。

また、ポートの情報は伝送媒体、最高速度、キュー本数、ポートあたりのバッファサイズ、simplex か duplex か、そのポートがどのスイッチに取りつけられているかというものである。

ネットワーク内の機器は同一ベンダ、同一製品で統一されていることは今日では皆無に等しく、せいぜい同一ベンダで統一、場合によっては複数のベンダのさまざまな機器によってネットワークが構成されていることも十分考えられる。これらの機器はそれぞれ特性が異なるため、それぞれの種類の機器に情報が必要となる。

この情報は新たなネットワーク機器を導入、あるいは新たな機器が市場に出荷された際に管理者によって更新される。

トポロジマップ

PAAM が管理対象とするネットワークのトポロジマップを格納しており、ネットワーク上に配備された機器とそこに取り付けられているポート、そのポート間を繋ぐリンクから構成される。

ネットワーク上に配備された機器の情報は、その機器のクラスである機器情報へのポイント、その機器の種別（ホストかスイッチか）、その機器のアドレス（現在は IPv4 のみ）、設定時にその機器へアクセスするためのアカウントとなる。

リンクの情報は、ネットワーク上に配備された機器のどのポート同士を接続しているか、そのポート間の実際のレート、一定時間にそこに流れたトラフィック量となる。

機器の追加や削除、機器間の接続の変化などトポロジの動的な変化に対しては、基本的に管理者が手動で行うことでPAAMの援用を行う。

設定経路状況

管理対象となるネットワーク内において、PAAMが現在設定している経路の情報を格納する。これには上位モジュールから要求されたパラメータ、VID、設定された経路上の機器へのポイントが含まれる。そして、新たな経路が生成されるとその経路に関する情報が追加され、経路を破棄すると共にデータベースから消失する。

4.2 End-to-Endの経路の識別

送信元からネットワーク内を経由し宛先へと流れる、ある特定のトラフィックに対してEnd-to-EndでのQoS保証を行うためには、そのトラフィックをネットワーク内で一意に識別できる必要がある。

2.2.4節で述べたように、IEEE 802.1QではVIDとuser_priorityを埋め込むための拡張されたフレームフォーマットが定義されている。VIDは予約されている三つを除き4093個まで任意に使用可能であり、802.1Qフ機器によってはVIDによってフローを識別し、VIDごとに異なるQoS保証を行える仕組みを有しているので、本論文ではレイヤ2でのフロー識別にこのVIDを用いて、ネットワーク内の機器がそれぞれ持つQoS保証メカニズムを利用する。

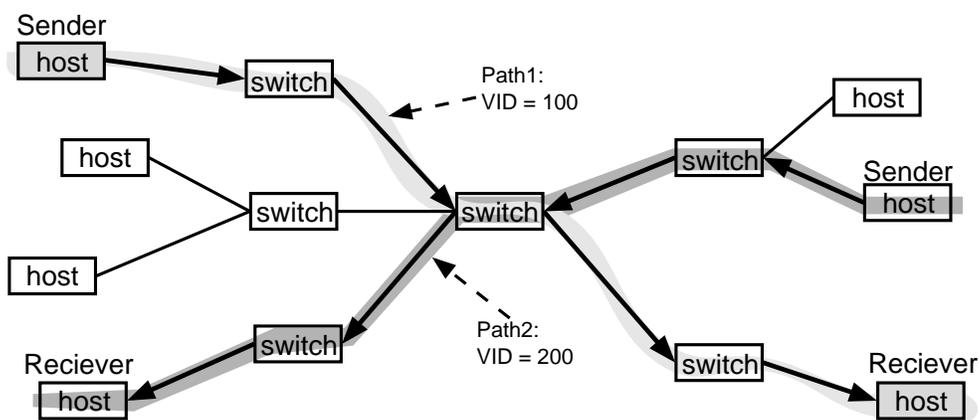


図 4.2: VLAN による End-to-End の経路

4.3 PAAMの動作

上位モジュールからの経路確保要求を受け、PAAM が送信元から宛先までの経路を確立するまでの動作フローを図 4.3 に、解放要求を受け PAAM が経路を解放するまでの動作フローを図 4.4 示す。

1. 上位モジュールから送信元と宛先のアドレス、必要帯域、遅延時間、遅延揺らぎといった QoS パラメータ、経路選択の際に利用される付加的なポリシーがインタフェースモジュールへと渡される。
2. インタフェースモジュールは上位モジュールから渡された値をすべて経路選択モジュールへと渡し、QoS パラメータと付加的なポリシーをネットワーク設定モジュールへと渡す。
3. 経路選択モジュールはデータベースモジュールからトポロジマップと機器の情報、現在確保されている経路の情報を引き出し、送信元から宛先までの、要求された QoS を満たす経路を経路選択アルゴリズムによって導出する。
 - (a) 要求を満たす経路が発見された場合は、経路となる機器のアドレスをネットワーク設定モジュールへと渡す。
 - (b) 要求を満たす経路が発見されなかった場合は、インタフェースモジュールへ要求を満たす経路が存在しなかったことを伝える。
4. ネットワーク設定モジュールは経路選択モジュールから受け取った機器のアドレスを元に、データベースからトポロジマップと機器情報、現在確保されている経路の情報を利用し、ネットワーク内の機器に対して要求された QoS パラメータを満足するように設定を行うよう指示を出す。
5. 経路の確保が行えたら、ネットワーク設定モジュールはデータベース中の現在確保されている経路の情報を更新し、インタフェースモジュールへ経路が設定できたことを伝える。
6. インタフェースモジュールは経路確保の成否を上位へ通達する。

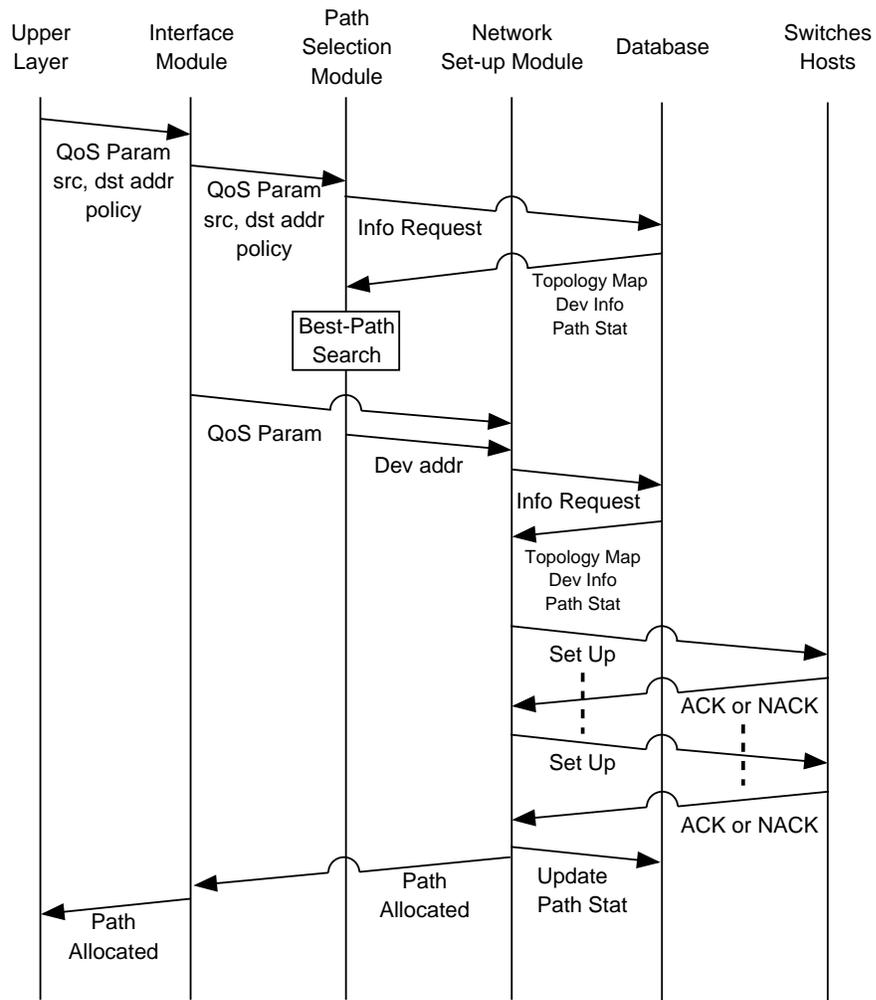


図 4.3: 経路確保の動作フロー

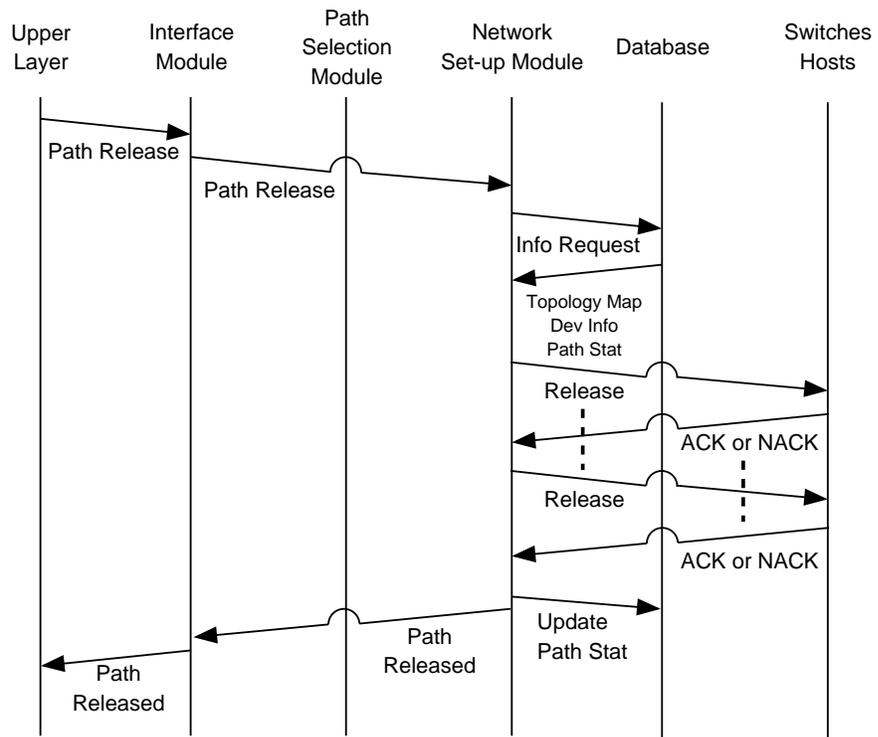


図 4.4: 経路解放の動作フロー

第 5 章

QoS 保証の実現

ビデオの伝送を行う際に必要とされる QoS パラメータのうち、特に重要と考えられるのが帯域幅、伝送遅延、ジッタであるが、本研究では、これらの保証を実現するためネットワーク内の各機器が持つキューイングアルゴリズム、キューの本数等の特性を考慮し、個別に指示を行い設定を行う。次に各パラメータをどのように保証していくかを示す。

5.1 必要とする帯域幅

ビデオデータの符号化方式によって、その要求される帯域幅は固定であったり可変であったりするが、可変ビットレートのビデオトラフィックを平均のビットレートで帯域を確保した場合、一時的なトラフィックバーストによってデータが一部損失する可能性がある。また、可変ビットレートのトラフィックをそのトラフィックパターンに合わせた帯域の確保を行おうとする場合、トラフィックパターの予測は非常に困難な問題であり、またその都度ネットワーク内に指示を行うことは制御トラフィックを増加させる原因となる。そのため、本研究では帯域の確保は常に固定ビットレート (CBR : Constant Bit Rate) で行うこととし、可変ビットレートのトラフィックに対する帯域の確保はそのピークレートでの帯域確保を行うものとする。また、帯域の保証を行うのは PAAM が管理を行うトラフィックのみに対してであり、PAAM の管理外のトラフィックに対しては基本的に考慮しないものとする。

帯域の確保を VID に基づいて行える機器の場合は、フローを識別する VID を決定しそれに対して必要な帯域を割り当てることで確保を行う。ただし、このような機能が実装されていない機器の場合は、その機器が利用しているスケジューリング方式に基づいて帯域幅を確保することになる。次に、それぞれの場合における帯域幅確保の方法について

示す。

5.1.1 PQ (Priority Queueing)

PQでは、固定数の優先度を定義しておき、高優先度のトラフィックが存在する場合はそれ未満の優先度を持つトラフィックがどれだけキューイングされていようとも、高優先度を持つトラフィックを優先して送出する方式である。実装が容易でリアルタイムトラフィックを優先することが可能であるが、高優先度のトラフィックが多くなると、低優先度のトラフィックが転送されなくなってしまう。

PQにおいて帯域を確保する場合、帯域を確保すべきトラフィックの優先度を上げ、他の一般トラフィックの優先度を下げることによって帯域を確保すべきトラフィックが優先的に処理されることで帯域の確保を行えるようになる。しかし、高優先度のトラフィック同士でキューが溢れぬよう許諾制御を行う必要がある。

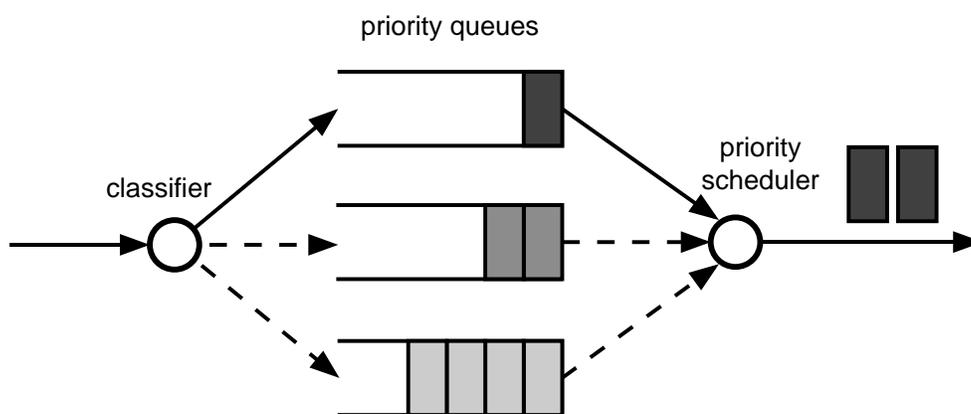


図 5.1: Priority Queueing の概要図

5.1.2 WFQ (Weighted Fair Queueing)

WFQは各フローに重み付けを行い、それぞれのフローに独立したキューを割り当てることにより、他のフローの影響を一定以下に抑えることが可能となる。WFQにより、時刻 t におけるフロー i に割り当てられる帯域幅 $r'_i(t)$ は

$$r'_i(t) = \begin{cases} \frac{\phi_i}{\sum_{j \in B(t)} \phi_j} \gamma, & i \in B(t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

となる。ここで、 $r'_i(t)$ をフロー i に割り当てられる帯域幅、 ϕ_i をフロー i の重み、 γ をリンクの帯域幅、 $B(t)$ を時刻 t に送信準備が用意できているフローの集合とする。これから、重み ϕ_i を

$$\phi_i = \frac{r'_i(t)}{\gamma - r'_i(t)} \sum_{j \neq i, j \in B(t)} \phi_j$$

とすればよい。フローの数だけキューを用意することは現実的には不可能なため、実際にはハッシュによる近似やクラスごとにキューを用意し、フローをそれぞれに割り当てる。

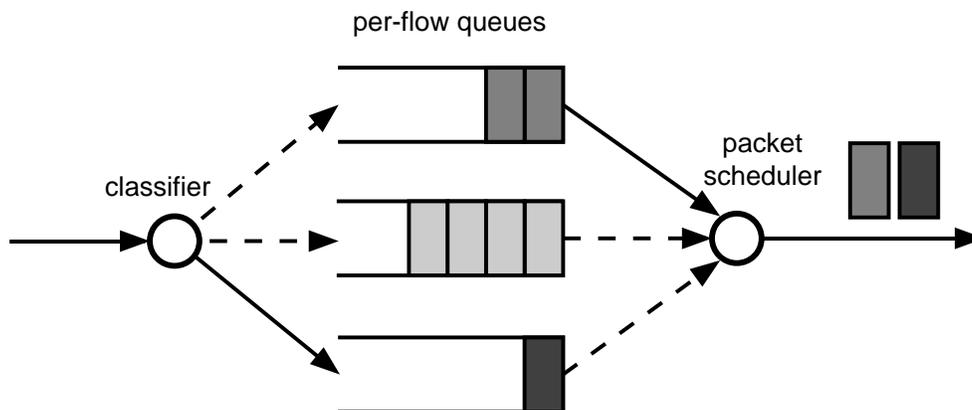


図 5.2: Weighted Fair Queuing の概要図

5.1.3 CBQ (Class Based Queueing)

CBQ はクラスごとにキューを作成し、階層的リンクの共有を実現するキューイング方式であり、クラスによって差別化されたサービスを提供する CoS を実現する。CBQ において帯域幅を確保するためには、(必要帯域幅/リンクの帯域幅) × 100[%] だけ帯域幅を割り当て、他の一般トラフィックよりも優先度を上げておくことで帯域の確保を行う。

5.2 伝送遅延とジッタ

End-to-End での伝送遅延時間は、送信元でのシェーピングにかかる時間、ネットワーク上のリンクを伝搬する時間、そしてネットワーク内の機器を通過する時間の総和となる。

Parekh は、許諾制御と送出量の制限、パケットスケジューリングを組み合わせることで End-to-End での遅延時間を一定以内に抑えられることを示した。Parekh のモデルはトークンバケツと WFQ を組み合わせたモデルで、その値は

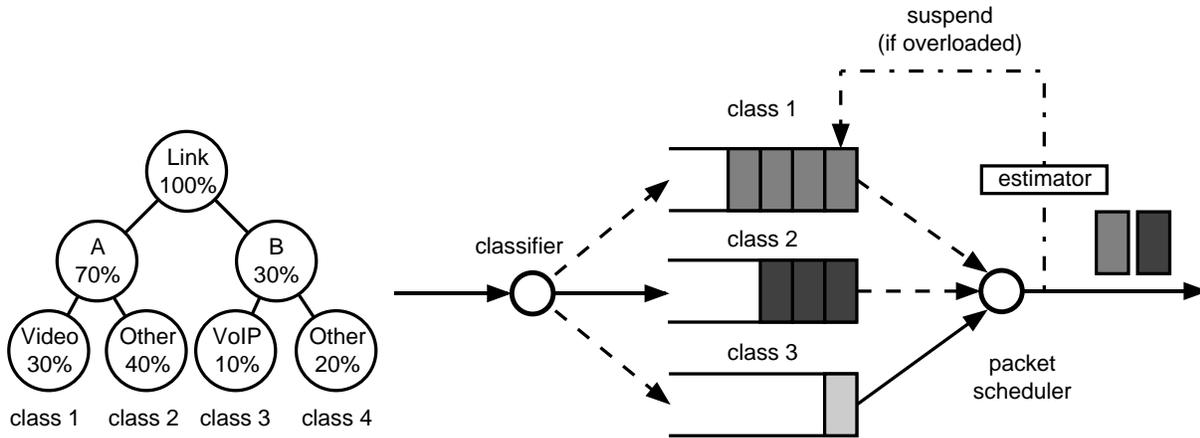


図 5.3: CBQ による階層的リンク共有 (左) と CBQ の概要図 (右)

$$D_i = \frac{b_i}{R_i} + \frac{(H-1)M_i}{R_i} + \sum_{h=1}^H \frac{L_{max}^h}{\gamma^h} \quad (5.1)$$

となる。ここで、 D_i はフロー i の遅延限界、 b_i はフロー i のトークンパケットのサイズ、 R_i はフロー i の最小レート、 L_{max} はリンク h における最大パケット長、 M_i はフロー i の最大パケット長、 γ^h はリンク h のレートとする。この式は、

End-to-End の遅延 = バースト遅延 + 自フローによる遅延 + 他フローによる遅延

とも表現できる (実際にはこれにリンクの伝搬遅延が加わる)。End-to-End の経路上の機器がすべて WFQ を採用している場合、上式を適用して遅延限界を求めることが可能となるが、経路上の機器が採用しているスケジューリング方式が単一ではない場合、経路上の機器一つ一つの遅延限界の和がその経路での End-to-End の遅延限界となる。また、機器のスケジューリング方式が不明なものなどについては実際に遅延時間の計測を行い、その値を用いる。

遅延揺らぎの最大値は到着までに最も時間を要するパケットと到着までに最も時間を要さなかったパケットの、それぞれの伝送時間の差となる。遅延揺らぎはバッファリングによりある程度解消することができるが、ホストが民生用ビデオカメラなどバッファリング能力を期待できない可能性もあるため、遅延揺らぎは極力ネットワーク内で抑制する必要がある。そのためには経路上の機器の遅延時間が小さいもの、また機器同士の遅延時間の差が小さいもの、バッファリング能力が期待できる機器を利用するといったアプローチが必要となる。

5.3 経路選択アルゴリズム

ある特定のノードからすべてのノードへの最短経路を求めるアルゴリズムとしてよく知られたものとして、Dijkstra のアルゴリズムがある。あるノード s から前ノードへの最短経路を Dijkstra のアルゴリズムを用いて求める場合、まずノードの集合 V を V_P と V_T の二つに分割する。このとき、 $V = V_P \cup V_T$ 、 $V_P \cap V_T = \phi$ とし、 V_P は $\{s\}$ とする。カット $C(V_P, V_T)$ のエッジ $e = (v, u) (v \in V_P, u \in V_T)$ を最後に一本含む s から u への経路の長さを $cost[u]$ とし、 V_T のノードの中で $cost[w]$ が最短となるようなノード w を求める。このとき w を、最短パスが確定したノードとして V_P へ加える。この作業を $V_P = V$ となるまで繰り返すことにより、 s から前ノードへの最短経路を求めることができる。より正確には、

1. スタート点 s を選び

$$V_P \leftarrow \{s\}; cost[s] \leftarrow 0; \{path[s] \leftarrow 0;\}$$

$$cost[v] \leftarrow w(e); \{path[v] \leftarrow e;\} (e = (s, v) \in E)$$

$$cost[v] \leftarrow \infty; \{path[v] \leftarrow -1;\} ((s, v) \in *E)$$

とする。

2. $V_P \neq V$ である限り次の a、b を繰り返す。

(a) $V - V_P$ のノードのうち $cost[w]$ が最小となるノード w を求める。

(b) $V \leftarrow V_P \cup \{w\}$ とする。そして、 w を始点とする各エッジ $e = (w, v)$ に対して、 e に割り当てられた重みを $weight(e)$ とすると、

$$cost[v] > cost[w] + weight(e)$$

ならば、

$$cost[v] \leftarrow cost[w] + weight(e); \{path[v] \leftarrow e\}$$

とする。

PAAM が管理対象とするネットワークにおいて、ホスト、スイッチをノード、リンクをエッジとし、送信元から宛先までの経路をこの Dijkstra のアルゴリズムで求める場合、次のような問題点が挙げられる。

- Dijkstra のアルゴリズムはある特定の一変数（上記の例では距離）に基づいた最小コストの経路を求めるが、ネットワークへ要求される QoS パラメータは単一ではなく複数の可能性が考えられる。
- 遅延時間のような QoS パラメータは、ある閾値を越えてはならないという要求であるが、これは見方を変えればある閾値さえ越えなければ許容されると捕らえることができる。しかし、Dijkstra のアルゴリズムではこのような閾値には関係なく常に最小コストの経路を求めてしまう。
- 送信元や宛先ではないホストをノードとした場合、不要な計算を行うことになる。

Dijkstra のアルゴリズムでは先の 2b に示したように、 $cost[v]$ が $cost[w] + weight(e)$ よりも大きい場合、 $cost[v] \leftarrow cost[w] + weight[s]$ とし、それまでの最小コストの経路は上書きしてしまう。これを、 $\{path[v]\}$ を複数持たせられるように変更することで v へ到達する経路を複数持たせることが可能となる。この場合、これらの経路は必ずしも最小コストの経路とはならないが、経路のコストを複数計算することにより経路選択の幅を広げることが可能となる。このアルゴリズムの概要図を図 5.4 に示す。

次に、PAAM の経路選択アルゴリズムを示す。

1. インタフェースモジュールからの要求により、データベースモジュールからトポロジマップを取得するが、このとき、
 - リンクの帯域幅と既に確保された経路の帯域幅の差が、要求された帯域幅よりも小さい
 - STP などにより、現在 inactive となっている

リンクは帯域幅の要求を満足することができない。よって、計算量を減らすためにこれらのリンクは存在しないものとしてデータベースモジュールからトポロジマップを取得する際に枝刈りを行う（図 5.5）。

2. データベースから取得したトポロジマップを、リンクをエッジ、ホストと機器をノードとするグラフへと変換を行う。ネットワーク内が full-duplex で稼働していると仮定した場合、物理的な一本のリンクはその両端のノードを繋ぐ、対向する有向エッジと見なすことができる。

グラフへ変換する際、リンクが一本だけ繋がっているノードはグラフに変換すると図 5.6 に示すようになる。このような、ノード v の度数 $d(v)$ が 2 以下となる送信元

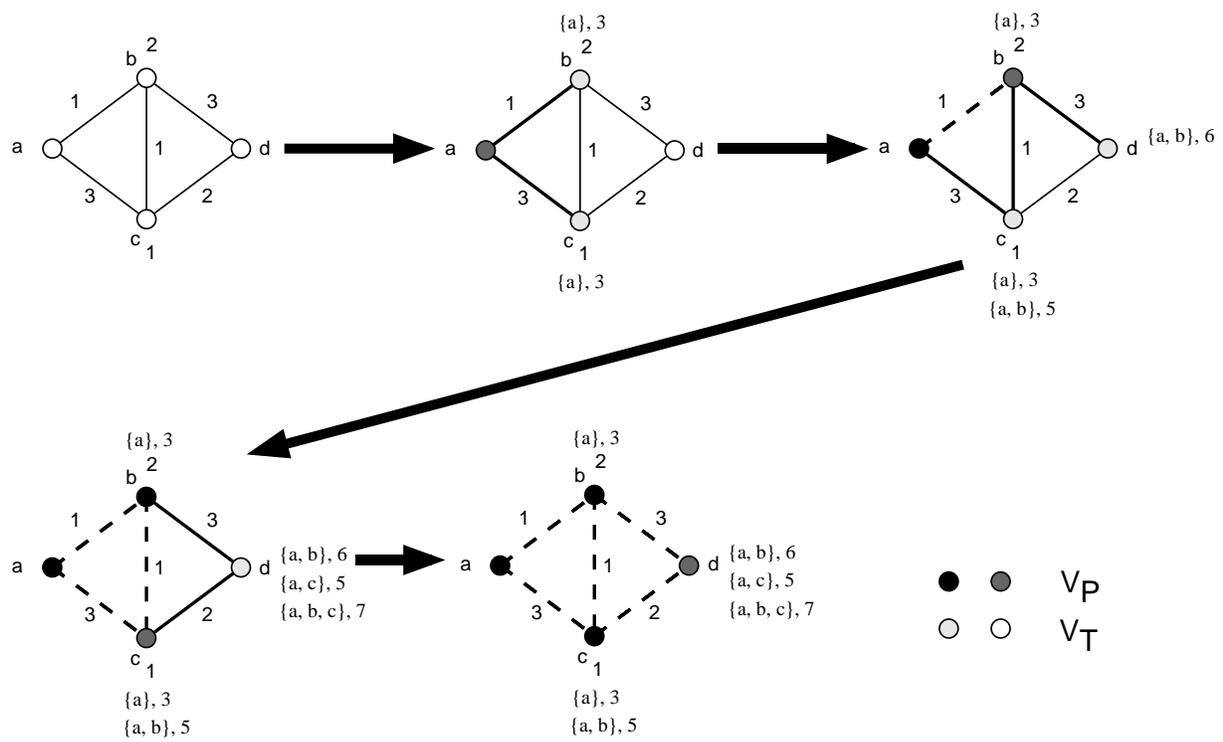


図 5.4: アルゴリズムの概要図

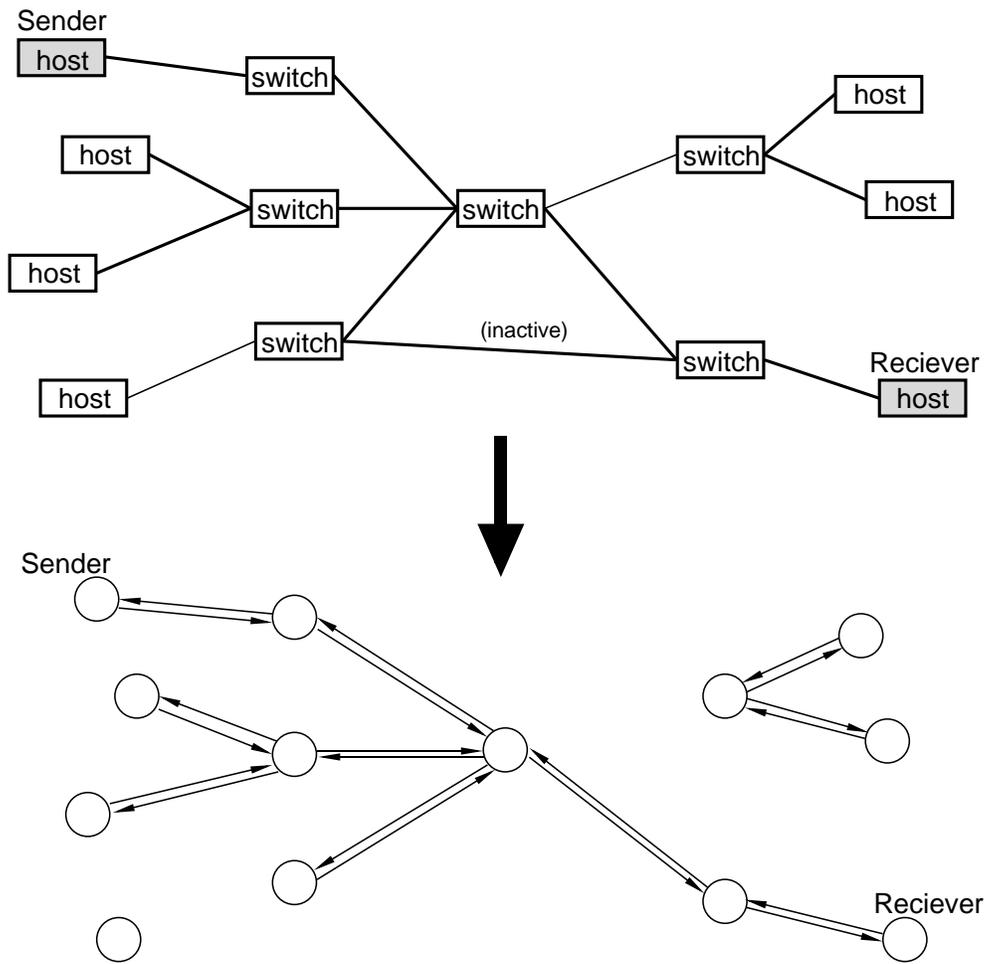


図 5.5: トポロジマップのグラフ化

と宛先以外のノードを経路に含めると遅延時間を増して折り返すだけなので、End-to-Endの経路の探索から除外し計算量を減らす必要がある。また、枝刈りにより発生した孤立ノードはEnd-to-Endの経路に含まれることはない。よって、この時点で $d(v) \leq 2$ のノード v に接続されているエッジを枝刈りし、その後孤立ノードをグラフから除去する。

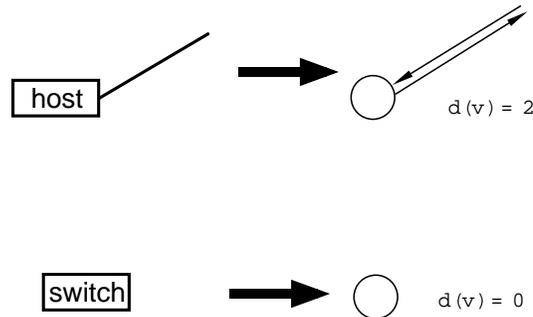


図 5.6: $d(v) = 2$ のノード (上) と $d(v) = 0$ のノード (下)

3. 2で生成されたグラフに対して、先に示したアルゴリズムを適用し、送信元から宛先までの経路の探索を行う。経路の探索では、エッジとノードのコストは遅延時間の和とそのリンクを流れる、PAAMが管理しない一般トラフィックの流量の二つとする。ノードでの遅延時間と遅延揺らぎはグラフ化されたトポロジマップからノードの種類を特定し、データベースモジュールから機器情報を引き出して遅延時間、キューイング方式を参照して計算を行う。また、経路を探索中に計算値が要求されたQoSパラメータの値を満たすことができなかつた場合、その経路はQoS要件を満たさないと判断し、それ以降その経路は探索を行わない。また、これにより探索する経路が無くなった場合、送信元から宛先までEnd-to-Endで要求されたQoSを保証できる経路は存在しないと判断して、6の処理を行う。End-to-Endの経路が一つ以上探索できた場合は4の処理を行う。
4. 経路が探索できた場合、その探索できた本数によって次のように処理を行う。
 - 要求を満たす経路が一つだけ探索された場合、それ以外に選択の余地はなく、その経路が最適な経路として採用される。
 - 要求を満たす経路が二つ以上探索された場合、それらのうちどれを最適な経路として採用するかを判断する必要がある。ここで、インタフェースモジュール

からの入力としてあった付加的なポリシーを利用する。

この上位から要求される付加的なポリシーとして、

- 遅延時間が最小の経路
- 他のトラフィックがもっとも少ない経路
- 最小のホップ数
- リンクの利用率がもっとも高くなる経路

のいずれかを指定するものとする。また、上位モジュールからこの付加的なポリシーが与えられなかった場合は、他のトラフィックへ与える、または他のトラフィックから受ける影響を抑えるため、「他のトラフィックが最も少ない経路」をデフォルトとして採用する。

この付加的なポリシーに基づき、3で遅延時間と平行して計算を行ったパラメータ、その際のホップ数などからポリシーにもっともそぐう経路を最適な経路として判断を下す。

5. この時点で、唯一の最適な経路が求められているはずなので、この経路上の機器とホストのアドレスをネットワーク設定モジュールに対して出力する。アルゴリズムが順調に処理された場合はここで最適経路選択アルゴリズムは終了となる。
6. 要求された QoS を保証できる経路が存在しないとアルゴリズムで判断した場合、インタフェースモジュールに対して Path_Allocation_Failed を返し、経路確保に失敗したことを伝える。

図 5.7 に、この経路選択アルゴリズムのフローチャートを示す。

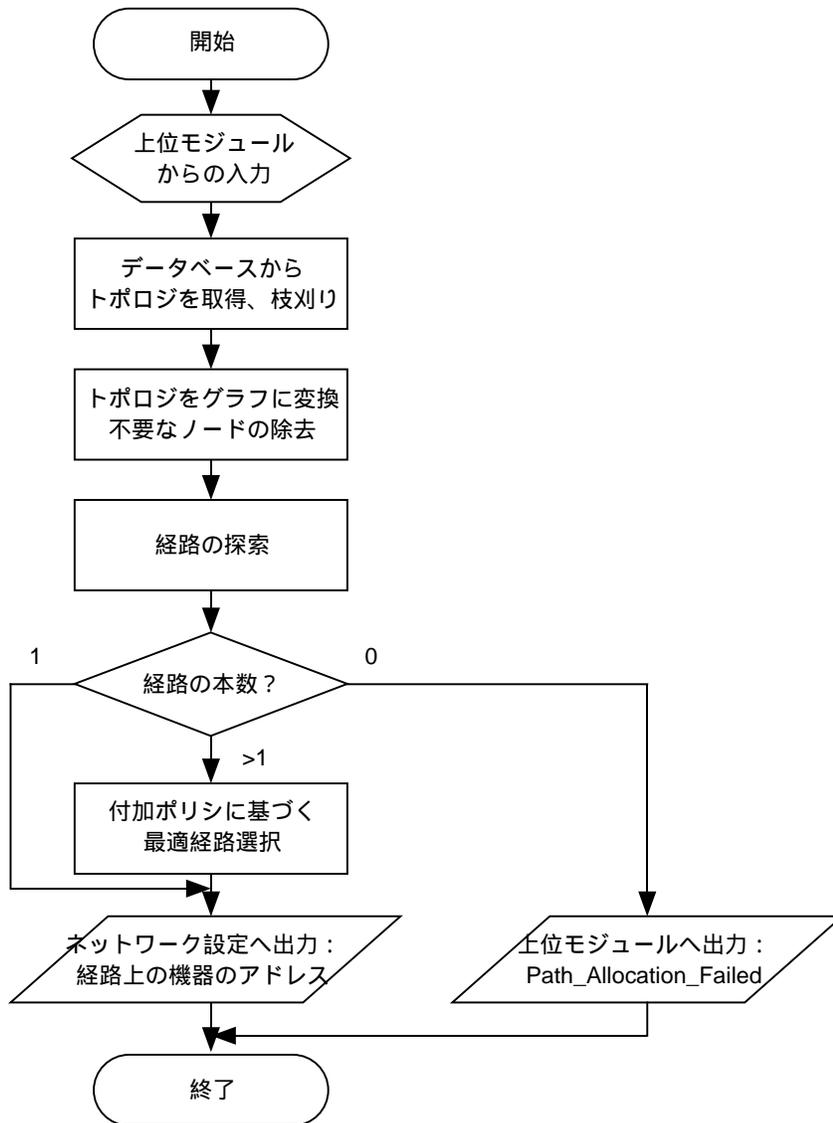


図 5.7: 経路選択アルゴリズムのフローチャート

第 6 章

評価と考察

理論値と実測値でどの程度遅延時間の違いが発生するかを検討するため、図 6.1 に示すネットワークを用いて測定を行った。ネットワークは、スイッチとして Extremenetworks の Summit 48、Summit 48i、エンドノードとして富士通 FM/V 6450 DX2 (CPU として PentiumII 450MHz、メインメモリに 256MB) 上に FreeBSD 4.2-RELEASE をインストールし、NIC (Network Interface Card) を二枚差したマシンを用意した。

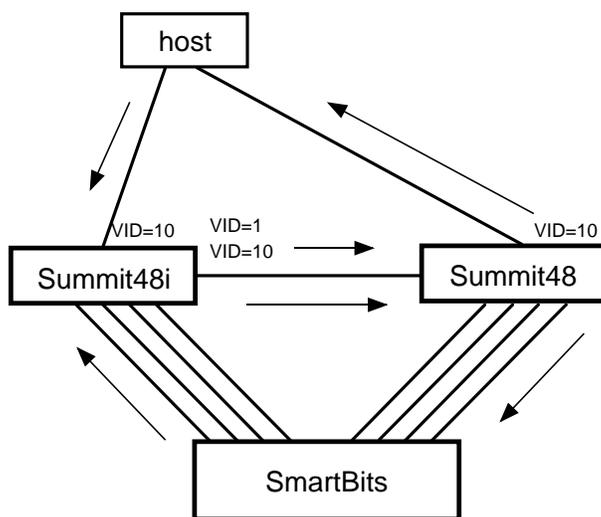


図 6.1: 実験ネットワーク

図のネットワークにおける End-to-End の遅延の理論値を計算するため、式 5.1 に、 $b_i = 65535[\text{bit}]$ 、 $R_i = 10 \times 10^6[\text{bps}]$ 、 $M = 12144[\text{bit}]$ 、 $L_{max}^h = 12144[\text{bit}]$ 、 $\gamma^h = 100 \times 10^6[\text{bps}]$ を代入すると、遅延時間 D_i は

$$\begin{aligned}
D_i &= \frac{65535}{10 \times 10^6} + \frac{2 \times 12144}{10 \times 10^6} + \sum_{h=1}^3 \frac{L_{max}^h}{\gamma^h} \\
&= 9.35[msec]
\end{aligned}$$

と見積もることができる。

次に、図 6.1 のネットワークを実際に構築し、

- 他のトラフィックは一切無しで確保した経路のトラフィックのみ
- SmartBits によりランダムなレートでランダムなパケットサイズのデータを一般トラフィックとして流した上で確保した経路のトラフィックを流す

の二つの状態の遅延時間を測定した結果を図 6.2 に示す。

他のトラフィックが一切無い場合の平均遅延時間は $377[\mu sec]$ 、あった場合の平均遅延時間は $465[\mu sec]$ であった。

理論値での遅延時間は、実測値のその約 20 倍になる。理論値では予約した帯域幅を基に常に最悪のケースを想定して算出されており、更にソースでのバースト遅延が想定されている。ソースでのトークンバケツの容量が大きいほどその値は大きくなるが、PAAM はトラフィックのピークレートで帯域を予約するため、トークンバケツにおけるバースト遅延が発生しにくいと考えられる。

遅延揺らぎは他のトラフィックが一切無い場合は $23[\mu sec]$ 、あった場合は $204[\mu sec]$ であった。

一般トラフィックが存在しない場合、Summit48i と Summit 48 を結ぶリンクは PAAM が確保した経路のみが使用することになり、スケジューリング方式による遅延が最低限に抑えられる。しかし、一般トラフィックが存在する場合、リンクを共有することによりフレームのスケジューリングが行われ、その際に遅延が発生する。一般トラフィックのフレームサイズはランダムなため、スケジューリングによる遅延時間にはばらつきが生じる。このことから、一般トラフィックの存在は遅延揺らぎを発生させる一因となることがわかる。

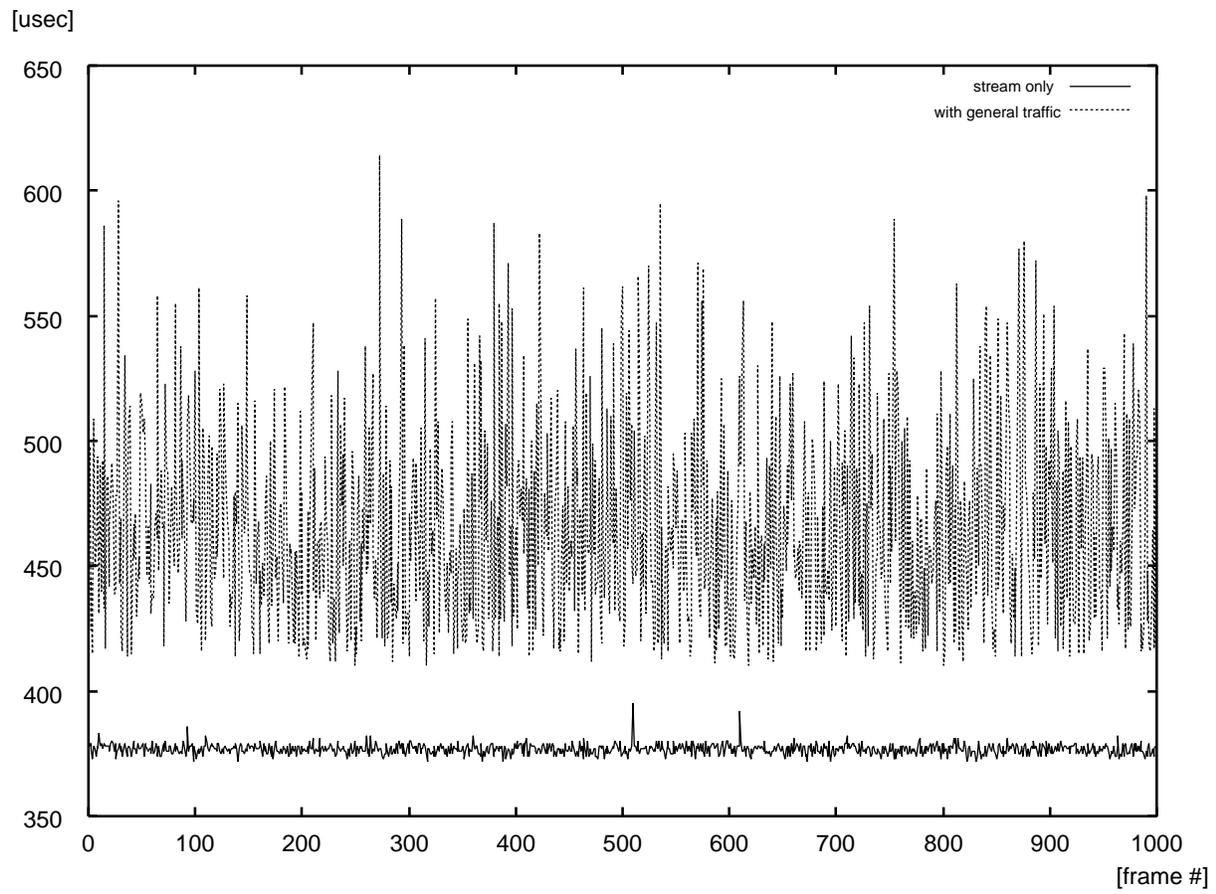


図 6.2: End-to-End での遅延時間

第 7 章

今後の課題

これまで、ビデオ伝送を実現するネットワークとして Tag-VLAN を利用し Ethernet 上で End-to-End の経路を確保するシステムとして PAM Allocation Manager を提案してきた。本章ではこの PAAM の今後の課題を示す。

7.1 ネットワークの動的な変化への対応

4.1 のデータベースモジュールの項でも述べたが、本研究で提案した PAAM は、機器の故障やユーザの気分による配線の変更といったトポロジの変化への対応、設定していた経路への一般トラフィックの増減に対する既設定経路の変更といった、ネットワークの動的な変化への対応は自動では行っておらず、これが拡張性を阻害する一因となっている。トポロジの変更に対応するには、

- 変更があった場合、機器から PAAM に対してどのように変更されたかを通知し、PAAM 側ではデータベースモジュールのトポロジ情報を更新する。
- PAAM 側から一定時間ごとに機器の情報を取得し、機器のポートの接続状況に変更があった場合はデータベースモジュールのトポロジ情報を更新する。
- 上位モジュールにトポロジの管理を任せる。

などの対応をとる必要がある。一方、トラフィック量の増減に対する既設定経路の変更を行うためには、PAAM 側で各機器に対して一定時間ごとに各ポートの帯域使用量を監視しその値とそれまでの統計から今後予想されるトラフィックパターンを導出し、それを基にして経路の変更を行うといった手法が考えられるが、トラフィックパターンの予測は簡単な問題ではないため非常に難解な課題である。

7.2 JAIST VideoLAN への適用

JAIST VideoLAN[9][11] システムはコアネットワークに ATM、フロントエンドネットワークに IEEE1394 を用いており、両者の間をターミナルシステム (Terminal System : 以下 TS) によってブリッジングを行うことで、ビデオカメラや TV といった家電機器による DVCR データを利用した高品質で低遅延なビデオデータの伝送が可能なシステムである。

JAIST VideoLAN では資源管理エージェント (Resource Management Agent: 以下 RMA) [10][12] と呼ばれる資源管理機構が TS 間の接続状況といったセッションなどの情報を集中管理している (図 7.1)。

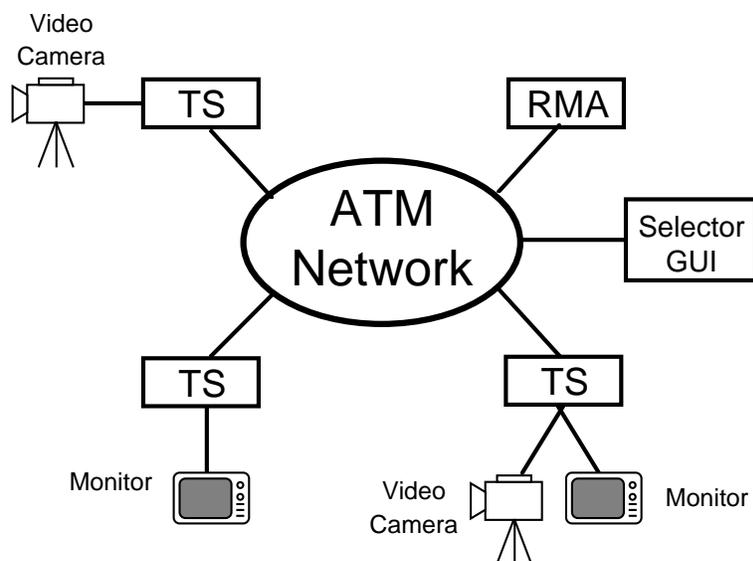


図 7.1: JAIST VideoLAN システム

この JAIST VideoLAN のコアネットワーク部を ATM から Ethernet へ置換する手段として、本研究で提案した PAAM を利用しようとした場合、PAAM は TS 間同士を繋ぐ経路を確保する手段としてネットワーク内、あるいは RMA と統合した形で存在することになる。

コアネットワークに ATM を利用した従来の VideoLAN では、操作端末や任意のプロセスから RMA へ接続要求が RMA へ渡されると、RMA は TS に対して CONNECT メッセージを送信元の TS (以下 TS-1) へと送出する。TS-1 は宛先の TS (以下 TS-2) へ、ATM のシグナリングを利用して接続要求をだす。その後、RMA は TS-1 に対して GET-

CONNECTRESULT メッセージを発行し接続の確認を行い、TS-1 はコネクションが張れれば TSC_OK を返信する。TS-1 から TSC_OK を受信した RMA はその後 TS-2 に対しても GETCONNECTRESULT メッセージを発行し、TS-2 はそれに対してやはり TSC_OK を以て接続完了を通知する。このシーケンスからも分かるように、RMA 自体は TS-1 と TS-2 の IP アドレスと ATM アドレスは管理しているものの、実際のコネクションの設定は RMA は執り行っておらず、ATM に任せている。PAAM を利用する場合、RMA は接続要求を受けた後に PAAM に対して CONNECT メッセージを送出し、コネクションの確保を行うこととなる。しかし、実際に PAAM を JAIST VideoLAN に適用するためには、RMA や TS の拡張を行っていく必要がある。

7.3 他の QoS 保証ネットワークとの相互運用

2.2 節でも示したが、今日さまざまな QoS 保証ネットワークが研究、提案されている。PAAM はその管理対象を一ドメイン内程度のネットワークとしているが、internet 環境においてはこれらのドメイン同士が接続されてより大きなネットワークを構成している。他の QoS 保証ネットワークはもともと Internet での利用を視野に含めているため、ドメインを跨いだ QoS (あるいは CoS) の保証を行えるような設計がなされているが、PAAM ではそのような End-to-End の経路確保については一切考慮していないため、ドメインを跨ぐ経路の確保など高いスケーラビリティを要求される場合は他の QoS 保証ネットワークとの相互運用が必要不可欠となる。

第 8 章

おわりに

本研究では、ビデオネットワークの伝送メディアとして Ethernet を利用し、Tag-VLAN を用いて End-to-End で QoS 保証を目指すための PAM 提案した。

はじめに、ビデオフォーマットが要求する QoS パラメータと今日提案されている、QoS 保証を謳うコンピュータネットワークの特徴と問題点について提示した。

PAM を設計するにあたり、そのネットワーク管理の手法について検討し、集中型の資源管理機構とした。そして、PAM を構成する四つのモジュールの設計を行い、各々のモジュール間におけるデータフローの検討と設計を行った。

実際に QoS の保証を行うために、さまざまなスケジューリング方式を調査し、QoS パラメータを満足させるための条件について検討を行った。また、End-to-End で QoS 保証を行える経路を探索するための経路選択アルゴリズムについて考察、設計を行った。

QoS の保証は最悪値の計算で行ったが、その値と実測値との比較を行うための実験を行い、その結果について考察を行った。

最後に、JAIST VideoLAN への実装を含む、今後の拡張性に関する課題点について考察を行った。

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教官である丹康雄助教授には終始御指導を賜りました。この場を借りて心から深く感謝致します。

また労苦を共にし、いつも適切な意見や助言を頂いた丹研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

最後に、私の研究を影で支えてくれた家族に深く感謝致します。

本研究の一部は、通信・放送機構平成 11 年度産学連携支援・若手研究者支援型研究開発制度、および、平成 12 年度科学研究費補助金 (12780203) により行なわれた。

参考文献

- [1] *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification*, 1997.
- [2] *Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*, 1998.
- [3] *An Architecture for Differentiated Services*, 1998.
- [4] *Assured Forwarding PHB Group*, 1999.
- [5] *An Expedited Forwarding PHB*, 1999.
- [6] *Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Common specifications - Part3: Media Access Control Bridges: Revision (Incorporating IEEE P802.1p: Traffic Class Expediting and Dynamic Multicast Filtering)*, May 1998.
- [7] *Draft Standard P802.1Q/D11 IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Virtual Bridged Local Area Networks*, July 1998.
- [8] V.Peris R. Guerin. Quality-of-service in packet networks: basic mechanisms and directions. In *Computer Networks 31*.
- [9] Yasuo Tan. Scaling up IEEE 1394 DV network to an enterprise video LAN with ATM technology. In *Digest of technical papers of IEEE International Conference on Consumer Electronics 1998*.
- [10] 倉岡貴志. マルチメディアネットワークシステムにおける資源管理エージェントの構築. Master's thesis, 北陸先端科学技術大学院大学, 2000.
- [11] 丹康雄. JAIST Video LAN - 実世界指向マルチメディアネットワーク. 人工知能学会研究会資料 SIG-FAI-9802, 人工知能学会, 東京, 9 1998.

- [12] 中田潤也. 異種ビデオネットワーク間接続に関する研究. Master's thesis, 北陸先端科学技術大学院大学, 2000.
- [13] 丹 康雄大林 隆之. Vlan による帯域管理を利用したビデオ伝送ネットワークシステム. 情報処理学会 第 62 回 (平成 12 年前期) 全国大会.
- [14] 丹 康雄大林 隆之. スイッチ型 Ethernet におけるビデオネットワークのための帯域管理法. 電機関係学会北陸支部連合大会.