修士論文
資源予約ネットワークにおける経路制御に関する研究

慶應義塾大学大学院 理工学研究科 計算機科学専攻
三輪 泰孝
miwa@mt.cs.keio.ac.jp

1998 年 2 月 6 日

1　はじめに

現在のインターネットでは、IP (Internet Protocol) の提供する信頼性のないコネクションレスパケット配送サービスが、すべてのサービスの基本となっている。IP によって転送されるすべてのパケットは、ルータやリンクにおいて資源を共有する。故に、輻輳が生じればパケットは等しく遅延したり失われたりする。このサービスは最善努力型 (best-effort) サービスとも呼ばれる。インターネットが最善努力型サービスを基本とするのは、基盤となるネットワークの大部分が、コネクションレスパケット配送サービスを提供するデータリンクによって構成されていることに起因する。

しかし近年、インターネットを取り巻く環境は変化しつつある。新たなデータリンクとして、コネクション指向でコネクション毎の QoS (Quality of Service) の保証が可能な ATM (Asynchronus Transfer Mode) 技術による広域ネットワークの整備が進められている。また、映像や音声などの連続メディア伝送や対戦型ゲーム、遠隔制御などのインタラクティブシステムに必要な実時間データ通信、あるいは医療美術分野における高精細画像の伝送システムや映画配送システムに必要な大容量データ通信に対する需要が高まりつつある。このような流れを受けて、インターネット上においても個々の通信に対して QoS を提供する保証型 (**guaranteed**) サービス [1] の実現が求められるようになった。

保証型サービスを実現するためには、新たに、資源予約機構、経路制御機構、ポリシ制御機構、流量制御機構、パケットスケジューリング機構など、様々な機構が必要となる。中でも資源予約機構と経路制御機構は重要な機構である。経路制御機構は、通信を行うノード間の経路を提供し、資源予約機構は、経路上のルータやリンクの資源を確保する。

資源予約機構としては、現在、資源予約プロトコル RSVP[2, 7] がインターネット標準として仕様が公開され、実装も行われている。しかしながら、経路制御機構に関しては、IETF の QoS Routing Working Group においても未だ検討中の段階 [3] に留まっており、研究途上の分野である。

2　目的

本研究の目的は、保証型サービスを提供するネットワークにおいて適切な経路制御機構を実現することである。

現在の経路制御機構は、基本的に IP が提供する最善努力型サービスのために設計されたものである。経路制御プロトコルは、様々なノードやネットワークへの到達可能性に関する情報を収集し、宛先に対してより “近い” と思われる経路を選択する。しかし、従来の経路制御機構では、保証型サービスを提供するのに十分ではない。

保証型サービスは、基本的に個々のフローに対して独立に提供される。また個々のフローが要求する QoS は様々である。あるフローは通信遅延時間を最少化するような QoS を要求するかもしれないし、あるフローは通信帯域幅を最大化するような QoS を要求するかもしれない。 すなわち、保証型サービスを提供するための経路制御機構は、QoS 要求を満たすような経路を個々のフローに対して独立に提供することが必要となる。そのために、経路制御プロトコルは、様々なネットワークの特性及び利用可能な資源状態を考慮した上で、経路選択を行なわなければならない。また、経路制御テーブルは、個々のフローに対する経路を記述できなければならない。

そこで本研究では、保証型サービスを提供するための新しいネットワークアーキテクチャを定義し、それに基づいた新しい経路制御機構を提案する。

3　アーキテクチャ

本研究では、保証型サービスを提供するためのネットワークを資源予約ネットワークと呼ぶ。本研究で提案する資源予約ネットワークのアーキテクチャを図 1に示す。アーキテクチャは、保証型サービスを提供する面と最善努力型サービスを提供する面の 2 つから構成される。このアーキテクチャにおける経路制御の特徴は、それぞれの面毎に経路制御機構が独立して存在することである。本章では、保証型サービスを提供する経路制御機構について解説する。

3.1　経路制御プロトコル

保証型サービスの経路制御機構において、経路制御プロトコルは経路情報を直接経路制御テーブルには登録せず、資源予約機構に対してこれを提供する。なぜなら、資

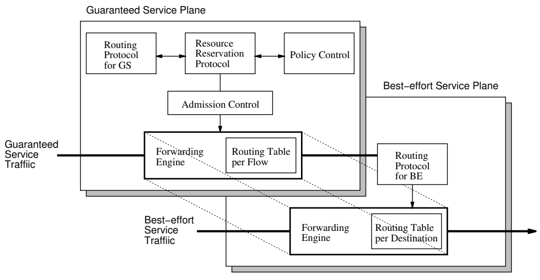

図 1: 資源予約ネットワークアーキテクチャ

源予約ネットワークにおける経路の選択は、経路制御プロトコル以外に、利用者による優先度や権限、課金などのポリシ制御機構や個々のネットワークの流量制御機構が関係するからである。このアーキテクチャでは、資源予約プロトコルが最終的な経路の決定を行なうものとして考える。

3.2 経路制御テーブル

従来の最善努力型の経路制御機構では、経路制御テーブルは宛先 (ノードあるいはネットワーク) 毎の経路を保持していた。しかし、保証型サービスを提供するためには、宛先毎ではなくフロー毎の経路の提供が必要となる。したがって、保証型サービスにおける経路制御機構では、個々のフローに対する経路を保持するものとする。

本研究では、上記の経路制御機構のうち、特に経路制御プロトコルに注目する。次章では、保証型サービスを提供するための経路制御プロトコルの設計にあたって、問題点とそれに対する本研究のアプローチを示す。

4 問題点とアプローチ

4.1 必要な機能

保証型サービスを提供するために必要な経路制御プロトコルの機能は、以下のようになる。

- フローベース経路制御

  保証型サービスはフローに対して提供されるものであり、個々のフローに対応した経路を取り扱う。

- QoS 要求の考慮

  フローの要求する QoS に適した経路の選択を行う。

- ネットワーク資源情報の利用

  経路制御情報としてネットワーク資源情報を考慮し、動的なネットワーク状態の変化に対応した経路の決定を行う。

- 代替経路の提供

  選択した経路において、ネットワーク資源が不足して資源予約が失敗に終った場合、可能ならば代替経路を提供する。

4.2 問題点

前節に挙げたような機能を経路制御プロトコルに追加する場合、以下のような問題が生じることが考えられる。

- 規模拡張性に乏しい

  フローの QoS 要求に適した経路を選択するためには、ネットワーク資源情報や資源予約情報など、従来の経路制御プロトコルに比べて莫大な量の情報が必要となる。またフローベースで経路制御を行うためには、宛先毎ではなくフロー毎に経路計算を行う必要が生じる。このため、ネットワークの大きさやトラフィックに対する規模拡張性は期待できない。

- 経路の安定性に難がある

  保証型サービスを提供するための経路制御プロトコルは、細粒度の状態依存型経路制御プロトコルである。経路制御情報の 1 つである資源予約情報は、フローの生成や消滅の度に更新される。経路制御情報の頻繁な更新は、経路の安定性に重大な影響をもたらすと考えられる [4]。

- 経路の最適化が難しい

  フローが要求する QoS は、様々な要素が考えられ、何を基準に (あるいは優先的に) 最適化を行うのが適当であるかは、個々のフローによって異なる。したがって、経路制御プロトコルとして一意な経路の最適化を適用するのは難しい [5]。

4.3 アプローチ

前述した問題点を踏まえて、本研究では以下のようなアプローチにより経路制御プロトコルの設計を行う。

- 資源予約機構や最善努力型サービスの経路制御機構との連携

  資源予約機構は、資源予約情報やフロー毎の QoS 要求の情報を保持しており、また従来の経路制御機構は基本的なネットワークトポロジの情報を保持している。これらの既存の機構との連携することで、経路制御に必要な情報の共有を行い、新しい経路制御プロトコルの導入によるコストを抑える。

- 始点ノードにおける経路計算

  従来の経路制御機構では、経路上の全てのノードにおいて個別に経路計算を行なっていた。しかしフローベースの経路制御を考えると、その経路計算の量は膨大なものとなる。そこで始点経路制御の手法を用いて、各フローの始点ノードのみで完全な経路計算を行う。

- ネットワーク資源情報の把握

  リンクの現在利用可能な帯域幅などのネットワーク資源情報の正確な把握とその情報交換のコストは、トレードオフの関係にある。ネットワーク資源情報の交換のコストを抑えることは、プロトコルの規模拡張性の面からも、また経路の安定性の面からも重

要である。本研究では、ネットワーク資源情報を把握するためのいくつかのアルゴリズムについて、適切な経路選択と情報交換のコストの評価に関するシミュレーションを行い、以下のような結論を得た。

  - ネットワーク資源情報はフラッディングではなく、特定ホストに対して送信する方が規模拡張性に優れている。
  - 一定時間毎の情報更新など時間に依存した情報更新よりも、ネットワーク資源の変化に応じた情報更新の方が効果的である。

そこで本研究では、あるフローについてネットワーク資源 (帯域幅) の不足により資源予約が失敗に終った場合にのみ、そのネットワーク資源情報 (帯域不足情報) をフローに対する経路の計算を行ったノードに通知する。通知を受け取ったノードは、該当リンクを迂回するような経路を選択する。このアルゴリズムにより、フローの増加やネットワーク規模の拡大に対して、情報交換のコスト増加を抑え、且つ適切な経路選択に関して十分な効果を得られるものと考える。

以上のアプローチを踏まえた上で、次章では本研究で提案する経路制御プロトコル **RRR (Routing for Resource Reservation)** について述べる。

5 経路制御プロトコル RRR

5.1 概要

本研究で提案する経路制御プロトコル RRR の概要を以下に示す。

- 資源予約機構に対してフロー毎の経路を提供する。

  RRR は、あるフローに関する経路について、資源予約機構の問い合わせに答える形で経路を提供する。

- リンクステート型の経路制御情報を用いて、**TOS (Type Of Service)** メトリックによる経路選択を行う。

  RRR で用いるトポロジ情報や各リンクのメトリックなどの基本的な経路制御情報は、既存のリンクステート型の経路制御プロトコル OSPF のリンクステートデータベースから得る。経路計算は、Dijkstra のアルゴリズムにより SPF ツリーを構成することで行う。メトリックは通常のメトリックの他に、TOS メトリックもサポートし、指定された TOS による経路計算も行う。

- 経路の計算は始点ノードで行い、経路上の各ノードに対して経路情報を配布する。

  RRR における経路の計算は始点ノードのみで行う。また、始点ノードで計算した経路情報を経路上の各ノード、すなわち下流ノードに対して配布することにより、始点ノード以外のすべての経路上のノードでも資源予約機構に対する経路の提供を行う。

- 利用可能なネットワーク資源状態の変化に応じてネットワーク資源情報を交換し、経路選択時に考慮する。

  RRR では、利用可能なネットワーク資源の変化を把握するために “アラート (alert)” という概念を導入する。アラートとは、RRR が提供した経路において、フローの集中によるネットワーク資源の不足により、資源予約が失敗した状態を示す。資源予約プロトコルからアラートの通知を受けることで、RRR はネットワーク資源の不足が生じていることを把握し、経路の選択時に考慮する。

- 代替経路を提供する。

  RRR の選択した経路が、フローの要求する QoS パラメータを満たせずに資源予約が失敗した場合、RRR は資源予約機構からの要求に応じて経路の再計算を行い、代替経路の提供を行う。

- **IP** マルチキャスト経路を提供する。

  IP マルチキャストに基づく、マルチキャスト経路の提供を行う。但し、動的なメンバシップの変更には対応していない。

5.2 資源予約機構とのインタフェース

RRR は、資源予約機構とのインタフェースとして RSVP でサポートされている RSRR[6] を独自に拡張したものを用いる。資源予約機構と RRR で交換されるメッセージは以下の通りである。

- 資源予約機構から RRR へ

  Route_Query_Flow(flowID,TOS)
  →フローに対する経路の問い合わせを行う

  Route_Flush(flowID)
  →経路の消去を行う

  Route_Alert(flowID)
  →アラート発生の通知及び代替経路の要求を行う

- RRR から資源予約機構へ

  Route_Reply_Flow(RouteInfo.)
  →フローに対する経路の問い合わせに答える

5.3 経路の提供

図 2のサンプルネットワークを用いて、RRR における経路提供の手順を示す。R5 のノードにおいて、R1 から R5 に対するフローの経路提供の要求を受けた場合を考える (図 3)。

1. 資源予約機構からの経路要求

   R5 の資源予約機構は、RSRR インタフェースを通して RRR に対して Route_Query_Flow メッセージを送信する。

2. 始点ノードに対する経路要求

   R5 の RRR は、フローの始点ノード R1 に対して経路要求メッセージを送信する。

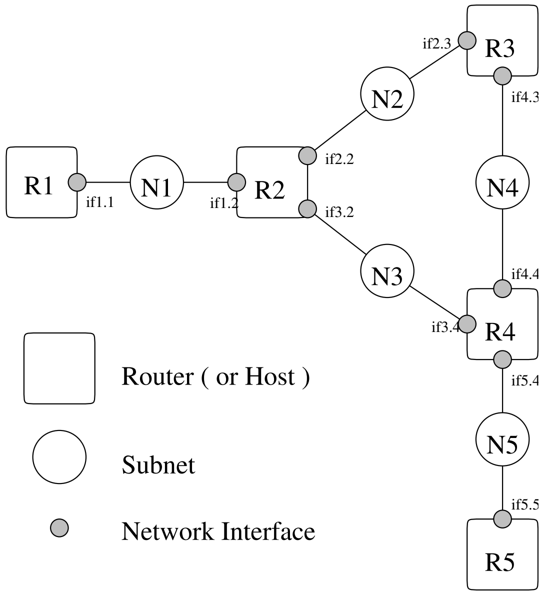

図 2: サンプルネットワーク

3. 始点ノードにおける SPF ツリーの計算及び経路の決定

   経路要求メッセージを受け取った R1 の RRR は、フローに対する経路の計算を行う。

4. 経路上のノード (下流ノード) への経路情報の配布及び RRR 経路エントリの作成

   R1 の RRR は、経路計算の結果 (R1 - R2 - R4 - R5) を経路情報メッセージとして R5 に向けて転送する。経路情報メッセージを受け取った経路上の各ノードは、RRR 経路エントリに経路情報を格納する。

5. 確認応答と資源予約機構への経路提供

   R5 の RRR に経路情報メッセージが到着すると、RSRR インタフェースを通して Route_Reply_Flow メッセージを送信する。また R1 に対して確認応答メッセージを送信する。

5.4 アラートの発生と代替経路の提供

続いて、RRR におけるアラートの発生と代替経路提供の手順について示す。R1 から R5 に対するフローの経路 (R1 - R2 - R4 - R5) の R2 においてアラートが発生した場合を考える (図 4)。

1. 資源予約機構からのアラートの通知

   R2 の資源予約機構は、RSRR インタフェースを通して RRR に対して Route_Alert メッセージを送信し、R1 から R5 のフローの経路についてアラートが発生したことを通知する。

2. 始点ノードに対するアラートの報告及び代替経路要求

   R2 の RRR は、フローの始点ノードである R1 に対してアラートメッセージを送信して、アラートの発生を報告する。また同時に代替経路要求メッセージを送信して、代替経路の要求を行なう。

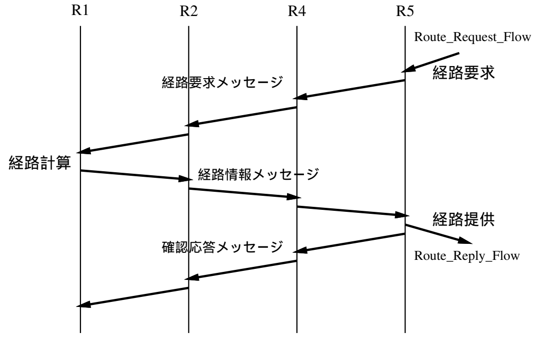

図 3: 経路の提供

3. 始点ノードにおけるアラートの処理及び経路の再計算

   アラートメッセージを受け取った R1 の RRR は、アラートが発生したリンクを自分が持つリンクステートデータベースに記録する。また代替経路要求メッセージによりフローに対する経路の再計算を行う。

4. 既存の経路情報の消去

   R1 の RRR は経路消去メッセージによって、アラートが発生した経路情報を消去する。

5. 代替経路の経路情報配布及び RRR 経路エントリの作成

   R1 の RRR は、経路の再計算の結果 (R1 - R2 - R3 - R4 - R5) を経路情報メッセージとして R5 に向けて転送する。経路情報メッセージを受け取った経路上の各ノードは、RRR 経路エントリに経路情報を格納する。

6. 資源予約機構への経路提供

   R2 の RRR に確認応答メッセージが到着すると、RSRR インタフェースを通して Route_Reply_Flow を送信する。

6 実装

6.1 実装環境及び仕様

本研究では、提案する経路制御プロトコル RRR を経路制御デーモン RRRD (RRR Daemon) として実装した。RRRD は、4.4BSD Lite ベースの FreeBSD[*] 2.2.1-Release 上にユーザ空間で動作するプロセスとして構築されいる。RRRD を含めた実装アーキテクチャを図 5に示した。GateD は OSPF リンクステートデータベースを利用する関係から、University of Michigan の Merit

---

[*] `http://www.freebsd.org/`

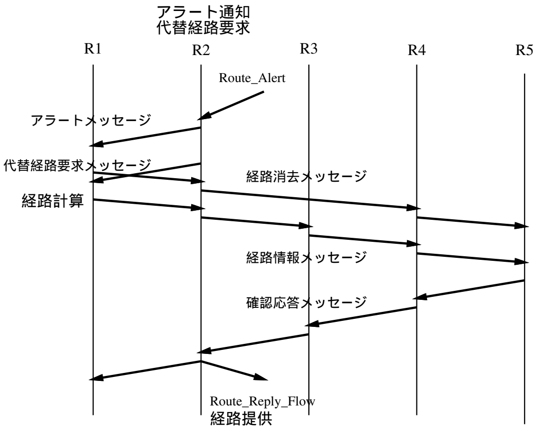

図 4: アラートの発生と代替経路の提供

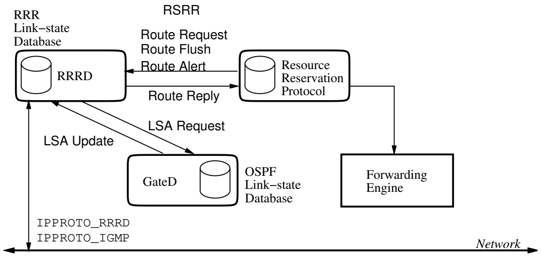

図 5: 実装アーキテクチャ

GateDaemon Project[†] が実装した GateD Release 3.5.5 に基づき一部改造を行っている。また RSRR は、University of South California の Information Science Institute[‡] が実装した rsvpd Release 4.2a1 を参照している。また IP マルチキャストのメンバ管理は IGMP version 2 をサポートしている。

6.2 実装上の制限

- 経路提供可能なネットワークドメインの制限

  OSPF リンクステートデータベースを利用するため、経路提供可能なネットワークドメインは OSPF の単一エリア内に限定される。したがって、エリア間を跨ぐような経路の提供はできない。

- TOS メトリックによる経路提供の制限

  GateD の OSPF モジュールにおける TOS メトリックの扱いが完全に実装されていないため、通常のメトリック (TOS 0 メトリック) 以外に、1 種類の TOS メトリックのみ (帯域幅もしくは遅延時間) しかサポートすることができない。

6.3 測定

実装した RRRD もとに、図 3の場合におけるそれぞれのメッセージの処理にかかる時間を測定した。ルータは Pentium 166MHz の PC/AT 互換機を用いている。各ノードにおいて経路情報メッセージの処理には 60 ~ 70μsec、経路要求メッセージや確認応答メッセージの処理には 30 ~ 40μsec かかる結果となった。

7 おわりに

本研究では、保証型サービスを提供するための資源予約ネットワークアーキテクチャを示し、その経路制御プロトコルとして RRR の提案及び実装を行った。

RRR は、経路制御テーブルに対して経路を設定するのではなく、資源予約プロトコルに対して経路の提供を行う。経路制御テーブルは資源予約プロトコルによって管理される。RRR を経路制御テーブルから分離させることで、RRR は柔軟な経路選択を行うことができる。また資源予約プロトコルは、自らが経路の設定を行うことで、資源予約を行った経路上に確実にフローを転送することができる。また RRR は、既存の経路制御プロトコル OSPF との協調を考慮しており、より少ないオーバヘッドでの導入が可能である。

本研究は、従来の経路制御プロトコルや資源予約機構との連携を前提に置き、負荷と性能のトレードオフを考慮しながら、実現可能な範囲でどのような経路提供が行えるかを模索するものである。したがって RRR は、必ず最適な経路を提供することを保証するのではなく、保証型サービスを実現するための経路制御の一つの形態に過ぎない。しかし、従来の経路制御プロトコルにはない機能を盛り込んだことは、保証型サービスの実現に向けて有用なものであると考えられる。

今後は、実際のネットワークにおける RRR の詳細な評価及び改良を行なう予定である。

参考文献

[1] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview, Jul. 1994. Internet RFC1633.

[2] R. Braden, L. Zhang, L. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification, Sep. 1997. Internet RFC2205.

[3] E. Crawley, R. Nair, B. Rajagopalan, and H. Sandick. A Framework for QOS-based Routing in the Internet, Jul. 1997. Internet-Draft draft-ietf-qosr-framework-01.txt *work in progress.*

[4] Z. Wang and J. Crowcroft. Analysis of Shortest-Path Routing Algorithms in a Dynamic Network Environment. *Computer Communication Review Vol.22 No.2*, Apr. 1992.

[5] Z. Wang and J. Crowcroft. Quality of Service Routing for Supporting Multimedia Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Sep. 1996.

[6] D. Zappala. RSRR: A Routing Interface For RSVP, Nov. 1996. Internet-Draft draft-ietf-rsvp-routing-01.txt *work in progress.*

[7] L. Zhang, S. Deering, D. Estrin, S. Shenker, and D. Zappala. RSVP:A New Resource ReSerVation Protocol. *IEEE NETWORK MAGAZINE*, Sep. 1993.

[†] `http://www.gated.org/`

[‡] `http://www.isi.edu/rsvp/`