

論文の内容の要旨

論文題目：スケーラブル QoS ルーティング方式に関する研究

氏名： 岩田 淳

本論文では、ATM 網、IP 網、ATM/IP 混在網、ならびに Multi-hop Adhoc Wireless 網など様々な網を対象とし、ユーザに対して End-to-End に Quality of Service (QoS) を保証するための経路制御技術の観点で、大規模網まで適用可能なスケーラブルな QoS ルーティング方式を提案する。検討方式を QoS ルーティング、QoS topology aggregation、QoS restoration の 3 つの制御方式に大きく分類する。まず 3 つの要素を包含するネットワークアーキテクチャを提案し、次に個々の要素に対して詳細方式を提案し、性能評価により方式の有効性を示す。

IP 網において帯域、遅延、遅延揺らぎなどの QoS 保証を行なうには大きく 2 通りのアプローチがあり、(1)IP 網の下位レイヤの網が提供する QoS 保証機能の利用、(2)下位レイヤに依存せず IP レイヤ自体にパケットレベルの QoS 保証機能を追加、等が挙げられる。(1)の例は、下位レイヤとして ATM 網の QoS 保証機能を利用しその上に IP 網を構築する IP over ATM 技術、(2)の例は、ATM、SONET、SDH、WDM などの下位レイヤに依存せず QoS 制御を実現できる IP/ATM 統合網 (Multiprotocol label switching (MPLS) 網)制御技術、とが挙げられる。

まず、IP over ATM における QoS を考慮したルーティングアーキテクチャに関しては、従来方式では大規模な IP 網を実現する為に複数のドメインを跨る ATM 網を構成する場合に、IP 網の制御と ATM 網の制御との協調動作が不十分で、十分な性能を出すことができない問題があった。本問題を解決する為に本論文では“Gateway Model”を提案した。提案モデルは、IP ルーティングによる到達性判断、ATM PNNI ルーティングによる QoS

ルーティングの両者を協調させる Layer2/Layer3 統合 QoS ルーティングを実現できる。そのため、複数のドメインを介しても End-to-End で QoS を保証する ATM コネクションが容易に設定可能となる。

次に、IP/ATM 統合網 (MPLS 網)における QoS を考慮したルーティングアーキテクチャに関しては、従来方式は IP ルーティングプロトコルの QoS 拡張提案が階層網に対応せず、大規模網にまでスケールできる方式でなかった。本問題を解決する為に、本論文では、階層的な QoS 経路計算を実現する 階層 MPLS ルーティングアーキテクチャを提案し、性能評価による提案方式の有効性の実証を行なった。

これら、IP over ATM 網、IP/ATM 統合網 (MPLS 網)の QoS を考慮したルーティングにおいては、更にそれぞれ以下の[A][B][C]の 3 つのルーティング技術が重要である。本論文では、それぞれの制御技術において従来方式の制約を解決する方式提案とその性能評価による提案方式の有効性の実証を行なった。更に、これらの QoS 制御の応用例として、他の分野 (Multi-hop Ad-hoc Wireless network)でのルーティングアルゴリズム[D]としても同様に適用可能であることを示した。

[A] QoS ルーティング方式:

ユーザからの複数の QoS 要求条件を満足する経路を効果的に選択する方式。一般に、複数の QoS パラメータのうち、遅延やリンクコストのように経路上のリンク毎にコストの累積値で評価を行うメトリックが 2 つ以上存在すると、NP-complete 問題となる。本問題を解くために従来提案されている方式は、アルゴリズム計算量の低減と経路選択確率(ブロック確率)性能の改善とを同時には実現できなかった。

本問題点を解決するため、本論文では、(i)静的なリンクコストのみを用いて複数の経路候補を事前に計算準備する Precomputation と (ii)もし Precomputation 経路が QoS を満たさない場合 QoS を満たさないリンクをトポロジーデータから取り除いて動的に最適経路を計算する On-demand computation とを組み合わせる手順を提案する。提案方式は、(i)の経路候補の計算により最適経路の探索空間を絞り込むことで大幅にアルゴリズムの計算量の削減を果たし、かつ(i)の複数の経路候補ならびに(iii)の On-demand computation との組合せにより、ブロック率を大幅に低減が可能となることをシミュレーションにより示す。

[B] QoS topology aggregation:

QoS ルーティングを階層的網においても適用可能なように、下位の階層のトポロジー、帯域、QoS 情報を上位階層に対して効果的に縮退して、上位階層網で縮退した経路情報を交換する方式。QoS ルーティング性能を落とさない経路情報の縮退方式が必要となる。従来は、Spanning Tree 手法を用いて網内のトポロジーを疎結合で表現する方法が提案されていたが、網内リンクの帯域や QoS が変更されるたびに再計算となり、計算量が膨大になる問題があった。また、本手法では、ATM PNNI Routing 標準の QoS topology aggregation 記法には適用することができなかった。

本問題を解決する為に、本論文では、ATM PNNI Routing 標準の QoS topology

aggregation 記法を遵守する 3 段階から構成されるアルゴリズムを提案する。本方式は、網内リンクの帯域の変動が起こっても計算変更をほとんど要さない特徴を持ち、計算量を大幅に低減することができる。また、本方式を採用することで、経路情報が大幅に低減されている階層網でも、同じトポロジーの網をフラット網で実現した場合と、QoS ルーティングの性能が近接するくらい高い性能を持つことがわかった。一方、IP/ATM 統合網(MPLS 網)の場合においても、本提案方式を簡易化した方式を適用しその効果を同様に示すことができた。

[C] QoS restoration:

ユーザの通信中に接続の QoS の変化(例えば障害)を迅速に検出し、迅速に経路を回復する方式。従来は、Layer 1 の完全障害回復、Layer 2 の完全障害回復が主流で、両者とも網リソースを 1:1 に保持したり、1:N でリソース共有して保持していた。Layer 1、Layer 2 の中に流れているすべての接続がそのような 2 重化サービスが必要でない場合が多く、これらの機能が過剰な障害回復機能になる問題があった。

本問題を解決する為、本論文では、ユーザのほんの一部が非常に信頼性の高い、無瞬断の接続サービスを受けると仮定し、その一部のユーザの設定する接続(主経路)に対してのみ、迂回経路用のリソースを 1 対 1 に用意する Layer 3 (VC)-based 障害回復方式を提案する。本方式により網全体として必要最小限の迂回経路用のリソース準備に抑えることができる。筆者は、本方式を ATM Forum において標準化提案し、標準化採用に成功した。また、本提案方式において、高速に迂回を実現する為、信頼度を考慮した Disjoint-path 経路選択方式を提案した。本問題が輸送問題に定式化できることを示し、輸送問題の解法と、ヒューリスティックでの簡易解法との性能比較を行ない、両者の方式の適用領域を特定できた。

[D] MANET 環境への階層 QoS ルーティング方式適用:

Mobile 端末が基地局なしに自律的にネットワークを構成し通信を行うという Multi-hop Adhoc Wireless Network(MANET)環境を想定し、上記ルーティング制御技術 [A][B] の適用手法について議論する。MANET 網においては、従来、Distance Vector 型の Flat なルーティングアルゴリズム、あるいは動的に階層的な Clustering を行なうアルゴリズム、必要に応じて宛先ノードを探索する On-demand routing アルゴリズムなどが提案されてきた。それぞれの方式には、大規模網への適用の困難さ、制御方式の複雑さ、QoS ルーティングの困難さ、等の問題が指摘されている。

本問題を解決するため、本論文では、2 つの新しい方式 Fisheye state routing (FSR) と Hierarchical State Routing (HSR) とを提案する。前者は、Link state routing の経路情報の Flooding の頻度を自ノードからのホップ数(Scope と定義)により変化させ Flooding のオーバーヘッドの大幅な低減を実現した。非階層網でできるかぎりスケラブルな方式である。後者は、階層的な網を動的に構築し、階層網内での Flooding は多いが、階層網間での Flooding を大幅に低減する方式を採用する。いずれの提案方式も、上記[1][2]の有線網での階層的 QoS routing 方式技術をうまく活用することができ、その MANET 網への適用の有効性を示すことができた。