

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

リアルタイム通信処理の応答特性の向上に関する研究  
Study on Responsiveness of Real-time Communication Procedures

## 申請者

横田 英俊 / Hidetoshi YOKOTA

2003年7月

情報通信システムにおけるリアルタイム性は通信プロトコルや運用・管理操作など様々な面で重要視され、通信処理を行なうためのソフトウェア及びハードウェアに対してリアルタイム性を提供するための研究・開発が進められてきた。通信ユーザが音声や動画像などのアプリケーションを通信網を介して利用する場合には、媒介するネットワークがアプリケーションのリアルタイム性を損なわないように転送させることが要求される。一方、ユーザが利用するネットワークを管理する運用者から見た場合、様々な通信機器が複雑に接続されたネットワークの事象を遅滞なく監視し、発生する障害の検知、原因の同定、障害の復旧をリアルタイムに行なうことが安定したサービスの提供につながる。

今日のグローバルな情報通信ネットワークであるインターネットは、交換機や回線の障害に対して自律的に通信経路を決定することが可能であり、耐故障性に優れているという特徴を持つ。一方、回線交換型の通信網と異なり、エンド・ツー・エンドでのトラヒックの流量制御が難しく、通信品質(QoS)をどのように扱うかが問題となってきた。1990年代中頃より、ユーザが要求するQoSを提供するためにDiffservなどのプロトコルが開発され、これに呼応してインターネットにおいて複数のキューを扱うスケジューリングに関する研究が盛んになっている。一方、ネットワークを管理する側面から見たリアルタイム性であるネットワークのリアルタイム監視は、1990年代初めから急速に研究が進んだ。国際間の情報通信を担う大規模なネットワークを対象とした管理手法として、ネットワークの運用者が複数の相互に接続された管理ネットワークをリアルタイムに監視できるように、ネットワーク上の障害の検知、障害箇所の同定および原因の推定を自動化し、運用の効率化を目指す研究が活発に行なわれた。特にネットワークの管理にはネットワークに関する専門的な知識や経験が必要とされるため、このような知識や経験を記述しコンピュータに実行させるシステムとしてリアルタイムエキスパートシステムの利用が検討され、通信網管理への適用を進める研究や製品の開発が活発となっている。

本研究は、音声や画像などのリアルタイムアプリケーションを介して送受信されるユーザデータや、ネットワークのリアルタイム監視などの運用管理に関わる処理において、リアルタイム性が要求される機能の高速化手法を体系的に示すことを目的とする。本論文は以下に示す7つの章から構成されている。

第1章は緒論として、本研究の背景、研究状況ならびに本論文の構成と概要

について述べている．また本研究を進めるにあたり，通信処理をユーザプレーンと管理プレーンに分け，それぞれの処理における課題及びそれを解決する手法を提示するアプローチを取っている．

第2章では，ユーザプレーンにおいてリアルタイム性を提供するためのプロトコル開発の経緯について概説し，データ転送処理のQoS制御に深く関連するパケットスケジューリングの研究概要について示している．一方，管理プレーンの観点から通信網の障害管理を高速化するコリレーション処理技術，およびネットワークの障害管理においてより高度な処理を行なうためのリアルタイムプランニング手法について概説している．

第3章では，ユーザプレーンにおいてリアルタイム通信を実現する機能要素としてパケットスケジューリングに着目し，特にマルチメディア通信に特徴的なバースト性のあるトラヒックに対しても，割り当てに応じた転送レートが実現できること，キューのスケラビリティを考慮してラウンドロビン型の処理規律に基づく手法を設計方針として，バースト性のあるトラヒックと連続トラヒックとの公平性を考慮した Elastic Weighted Round Robin (EWRR)を提案している．本研究では，(1) 提案アルゴリズムに関する理論解析，(2) シミュレーションによる評価，および(3) 実装による実証実験という3つのアプローチから検討を行っている．まず第1のアプローチである「理論解析」については，スケジューリングアルゴリズムにおける重要な尺度であるレーテンシおよび公平性をEWRRに関して定式化し，他のアルゴリズムとの対比により解析的に明らかにしている．続いて，第2のアプローチである「シミュレーションによる評価」に関して，ラウンドロビン型のスケジューラおよび Fair Queueing (FQ) 型のスケジューラの特徴を対比しながら，提案アルゴリズムの有効性について評価を行っている．ラウンドロビン型の代表的なアルゴリズムである DRR を用いた場合に，バーストトラヒックと連続トラヒックに対する出力レートの差について評価を行ない，DRR に対して遅延の分散特性が改善されることを示している．また FQ 型に対しては，キューのソートにかかる計算を実測してシミュレーションに組み込むことにより キューの数と転送遅延に関する関係を明らかにし，キューの数が大きいところではEWRRが有利であることを示している．

第4章では，第3のアプローチである「実装による実証実験」として，EWRRアルゴリズムを実装したルータの構成について示し，QoS 保証に関する評価を

行なっている．このルータ上で実際にトラフィックを流入させ，理論値通りの性能が出ることを測定により確認している．

第 5 章では，管理プレーンにおけるリアルタイム通信処理を実現する機能要素として，通信網管理におけるコリレーション処理の高速化手法について提案を行っている．障害管理に係わるネットワーク管理システムは網要素からの障害警報を受け，警報を通知した管理対象間の接続関係から障害箇所，障害原因の同定，試験診断，復旧措置等の処理を行う．この場合，一つの障害に対して複数の網要素が影響し合い，その結果副次的な障害警報が発生し得る．このような状況において，ネットワークの物理的・論理的構成に基づいた警報間の関連付け（コリレーション処理）を行なうことにより，障害メッセージの数を削減しかつ障害の本質的な部分を効率的に見出すことが可能となる．しかし，管理対象の数が増加するにつれて一つの障害に起因して発生する警報の数が膨大となり，コリレーション処理の高速化が急務となっている．本論文では，新たに障害イベント集合である関係集合の概念，および発生するイベントと関係集合を高速に関連付ける新しいアルゴリズムとして動的階層化ハッシュによる手法を導入することにより，コリレーション処理を高速に実現する方式を開発している．本研究では，さらに計算機シミュレーションを用いて高速化に関する定量評価を行いその有効性を明らかにしている．

第 6 章では，より上位のネットワーク管理として，ネットワーク管理者の知識や経験をルール化したプランニングシステムを利用する場合のリアルタイム性について検討を行っている．このような領域で適用されるプランニングシステムは，時々刻々と変化する外界からのデータを確実に推論に反映させなければならない．本論文では，リアルタイムプランニングにおいて重要となる，応答時間の特性を解析するための体系的な手法について検討を行っている．まず解析する系を，プランニングシステムとそれが扱う外界に分け，外界のイベントの発生形態や振るまい，ならびにプランニングシステム内部のデータの処理形態の観点より，8 種類のモデルとして体系的に分類，整理している．次いで各モデルに対する応答時間特性について解析手法を示し，イベントの発生形態によりシステムの応答時間がどのように変化するかを体系的に解析している．

第 7 章では，本研究の総合結論ならびに本研究の成果と今後のリアルタイム通信処理における研究の方向性について述べている．