

博士論文審査報告書

論文題目

Performance Evaluation and
Management of the Internet
インターネットの性能評価
と管理に関する研究

申請者

Masaki	FUKUSHIMA
福嶋	正機

--

インターネットのトラフィックは常に予想を超える速度で増加し続けてきた。特に近年は、スマートフォン等のモバイル端末からインターネット上のコンテンツにアクセスするトラフィックの伸びが激しい。急激にトラフィックが増加すると、サービスプロバイダ(Service Provider)が需要に見合うだけの十分なだけのリンク帯域やノード容量等のネットワーク資源を適時に投入することができず、ユーザから見た体感品質(Quality of Experience, QoE)を適切に維持することが難しくなる。現在では、コンテンツへアクセスするトラフィックの増加に対処するために Content Delivery Network (CDN)の技術がコア網の負荷を軽減するために用いられている。ただし、モバイル端末の普及につれて、ネットワークのボトルネックはコア網からアクセス網へ移っている。CDNはコア網上でのオーバーレイネットワークによる対処法であり、ボトルネックの解消のための効果が限定されている。この課題に対応するためには、ネットワーク層のプロトコルがネイティブな機能としてコンテンツを認識して、配信をルータレベルで最適化することが望まれる。ただし、現行のIPはそのような機能を持っていない。

現在のインターネットが抱える諸課題を克服するための「将来ネットワーク」の実現を目指して、多くの研究が活発に行われている。これらの研究は一定の成果を収めており、個々の要素技術が次第に確立されつつある。しかしながら、インターネットのような大規模・複雑なシステムにおいて現実の課題を解決するためには、要素技術を単に組み合わせただけでは運用面の様々な問題が発生する。個々の要素技術を確立するだけでなく、それに加えて、将来ネットワークの運用面での課題を解決することが必要不可欠である。そこで本論文では、第2章から第5章にわたり、将来ネットワークにおける運用の側面から、重要な課題を一つずつ取り上げて課題を検討して、その解決方法を提案している。以下に各章の概要と成果を述べる。

第1章は序論である。

第2章では、増加し続けるトラフィックを収容できるモバイルネットワークをいかに設計するかという課題を取り上げる。近年、モバイル端末はインターネットにアクセスする手段として、ますます重要性を増している。モバイルネットワークの通信容量を確保することは喫緊の課題である。これまでにモバイルネットワークの容量を拡張するための取組みが盛んに行われている。単一の無線アクセス技術の性能を向上させるだけでなく、様々な異なる無線アクセス技術(LTE、Wi-Fi、WiMAX等)や複数の無線周波数帯を組み合わせ利用する技術が確立されつつある。ただし実際の運用面から考えると、これらの異種無線アクセスシステムを同時に使用した際に、各システムに対するトラフィックの配分がどのような分布となるか、また、ユーザの移動特性がその分布にどのような影響を与えるか、その結果ユーザから見たQoEがどの程度となるか等の総合的な特性がよく分かっていない。そこで本

研究では、このような異種無線アクセスシステムの動作ならびにユーザの移動特性を待ち行列ネットワークでモデル化し、その性能を評価する。このモデルを用いることで、異種無線アクセスシステムが混在する環境におけるトラフィック分布や QoE を評価することが可能となる。これにより、モバイルネットワーク運用者が、最適なネットワーク設計を行うことが可能となる。

第3章では、適切にネットワークやその容量を設計するにあたって、ユーザの視点で見たネットワークサービスの体感品質、すなわち QoE をいかに測定するかという課題を取り上げる。従来はネットワークサービスの品質の指標として、リンク利用率やパケットロス率・パケット遅延時間等のネットワークを物理的に測定する QoS (Quality of Service) が用いられていた。QoS と QoE とを比較すると、実際のユーザ視点の QoE を測定するには様々な課題がある。例えば、サーバやユーザの端末等のエンドノードではなく、ネットワークの中の間ノードで QoE を測定するためには、より多くの資源とコストを必要とする。その理由は、中間ノードにおいて QoE を測定するには、Deep Packet Inspection (DPI) 等の手法を用いて、通常のプロトコル処理とは異なる処理を行う必要があるためである。そこで本研究ではトランスポート層における制御メッセージの数を数えるだけで QoE を効率よく推定可能な軽量の測定手法を提案する。さらに実際のトラフィックデータを用いて、提案手法の有効性を検証している。

第4章では、実際にトラフィックの増加によってネットワークサービスの QoE の劣化が検出された場合に、リンクやルータといったネットワーク資源をいかに確保して、QoE を保つかという課題を取り上げる。このようなネットワーク資源の迅速な投入を柔軟に実現可能とするため、ネットワーク仮想化技術が提案されている。ネットワーク仮想化技術を用いることで、サービスプロバイダは、自らインフラストラクチャを保有する必要なく、それらを保有するインフラプロバイダから仮想化されたリンクやルータの提供を受け、広域に展開する仮想ネットワークを迅速に投入することが可能となる。しかしながら、このような仮想ネットワーク環境は、実際のサービス運用者の視点から考えると、運用情報の秘匿性の課題がある。例えば、仮想化されたルータ上の運用情報が、資源を提供するインフラプロバイダから容易に参照可能である。本研究では、特にルーティング情報に着目し、Secure Multiparty Computation (SMC) と呼ばれる情報セキュリティ技術を応用して、インフラプロバイダにルーティング情報を開示することなく、ルーティングを決定できるルーティングプロトコルを提案する。提案手法を実証するために、テストベッド上での実験を行い、秘匿性を確保することによるオーバーヘッドを加味しても、提案手法は現実的な性能が得られることを示した。

第5章では、上記3つの課題のすべてに共通する根源的な原因として、現行のインターネットアーキテクチャでは、ネットワーク層がコンテンツの配信を最適化できないという課題を取り上げる。初期のインターネットはホス

ト間通信のためのネットワークとして設計された。それに対して、今日におけるインターネットの使われ方としては、何らかの情報やコンテンツを配信する、あるいは利用者がアクセスするのが主要な用途である。このミスマッチが、IPに基づく現在のインターネットの重大な限界となっているという指摘がある。この課題に対して、Content Centric Networking (CCN)というコンセプトが提案され、この限界を打破する有望なアプローチとして注目されている。CCNのアーキテクチャは最近活発な研究の対象となっているが、その運用の側面に関してはまだ十分な検討が行われていないとは言えない。例えば、CCNにおけるコンテンツの名前は、そのトポロジー上での位置とは無関係に割り当てられるため、CCNを現実インターネット規模で運用しようとする場合には、CCNルータのForwarding Information Base (FIB)には数億個の名前プレフィックスを格納しなければならない。このような巨大なFIBに対して、最長プレフィックス一致検索を行うには性能上の課題がある。そこで本研究では、実際のCCNの運用形態についての一定の仮定に基づいてFIB検索を高速化する手法を提案している。さらに、実際のインターネットのトポロジーデータを用いて、提案手法の有効性を検証している。

第6章は、本論文のまとめである。

以上を要するに、本論文は将来ネットワークの運用的側面から、四つの課題を取り上げ、各課題について解決方法を提案した。これらの解決方法を用いることで、将来の通信サービスプロバイダが、異種無線アクセスシステム・ネットワーク仮想化環境・CCNを用いてサービスを提供する際に、ネットワークの設計・運用を最適化して、ネットワークサービスのQoEを測定することが可能となる。本研究は、新しい技術を実際のサービスに導入する際の運用上の課題を解決するものであり、本論文の研究成果は、現在のインターネットが抱える諸課題の解決に向けて有用である。よって、本論文は、博士(工学)早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2014年2月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士(東京大学)	後藤	滋樹
	早稲田大学教授	博士(工学)(東京大学)	甲藤	二郎
	早稲田大学准教授	博士(情報科学)(早稲田大学)	森	達哉