

(別紙 2)

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 朱 韵成

本論文は、インターネットにおける情報コンテンツにアクセスする方法として、コンテンツが蓄積された場所、つまり、位置情報を道標として間接的に探索・取得する従来の手法ではなく、コンテンツの名前を用いて直接的に探索・取得する新しい提案手法、つまり、Information Centric Networking (ICN) という研究分野において、現在のインターネット上に展開可能なアーキテクチャの研究成果をまとめたものである。

現在のインターネットアーキテクチャはエンド・ツー・エンド通信向けに開発され、以後ほとんど変更されないまま利用されてきた。しかし、近年、情報コンテンツは ネットワークのどのエンドシステムにホスティングされているかという位置情報ではなく、情報コンテンツ自体に付加された名前によって識別され、入手されるべきであるといった提案が多くなされている。言い換えると、情報の消費者は情報が何処に存在するかには関心がなく、情報自体に関心がある。そのため、ICN では、情報自体をネットワークアーキテクチャの中心として考え、名前による識別と経路制御を実現する。現在、このような ICN の概念により、近未来のインターネットを再設計する研究開発が世界中で進められているが、既存の ICN の提案では、以下の問題のために実環境に展開をすることが困難である。

問題1. (機能性) 既存の ICN の提案の殆どは、コンテンツの取得のみに焦点を当てている。しかし、これらの提案では、近年のコンテンツ流通に見られる、ユーザ生成コンテンツ (UGC) の配布等のサービスへの効率的なアクセスが提供できない。

問題2. (展開性) 大部分の既存の ICN の提案では、現在のインターネットを根本から変更するという、実際には実現困難な「Clean-Slate」と呼ばれる設計である。さらに、これらの提案の幾つかは、ネットワーク設備に高い処理能力が必要であるという欠点が解決されていない不完全な手法である。

問題3. (スケーラビリティ) ICNの主要要素である名前による経路制御「Route-by-Name」には大量の情報に付けられた名前を処理しなくてはならない要件があるが、既存の手法では十分な解決手段が提示されていない。

本論文では、既存の ICN 研究において未解決である、これらの機能性、展開性、スケーラビリティの3つの問題を解決することがインターネットの ICN への移行を成功させる鍵であると考え、これらに対する解決手法の提案を行っている。この移行による恩恵は2つの側面がある。エンドユーザにとってはコンテンツ、および、新規サービスへの効率的なアクセスが可能になる。また、ネットワーク事業者にとっては、付加価値を提供するためのアップグレード費用の低減と、ネットワーク資源の有効利用が可能になる。本研究では、実際に ICN を現在のインターネット上に展開することにより、ICN によるインターネットの価値向上の可能性を示すことを目的としている。

本論文では、具体的には、キャッシュ方式、転送プロトコル、名前解決の ICN における3つの重要

な側面についての研究を行い、展開性とスケーラビリティを備えた ICN のための新規アーキテクチャの提案を行っている。

キャッシュ方式の検討は ICN における最も重要な研究テーマの 1 つである。そのため、問題 1 を解決することを目的とし、Upload Caching in Edge Networks (UCEN) というアップロードに対するキャッシュ方式を提案している。これにより、エンドユーザのアップロード接続時間を 41%削減、さらにサービス事業者のピークトラフィックを 49%削減可能となる。また、問題 2 を解決するために、エンドシステムの余剰ストレージとトラフィック帯域を利用することにより、冗長トラフィックの削減とコンテンツへの効率的な高速アクセスを可能にするキャッシュ方式を提案する。実トラフィックを用いたシミュレーションにより、49%のトラフィック削減とコンテンツアクセスの遅延を約 1/4 削減可能であることが示されている。さらに、問題 2 の解決を行うため、ICN のトランスポートプロトコルとして、現在のインターネット上で実現するためのトランスポートプロトコルを提案している。これは、既存のインターネットプロトコル (IP) と完全な互換性があり、逐次的な実装と展開が可能であり、本プロトコルがコネクションレスという特徴を持つことにより、In-Network 処理を可能とする。そして、問題 3 を解決するために、名前解決が必要な時間と空間計算量を改善する、単純かつ実用的な名前解決サービスの提案が行われている。提案手法では、3,300 台の普通のマシンを陥ることで、 $10^{12}$  に及ぶ名前空間の解決が実現できることを示されている。

最後に、これらの研究成果を統合することにより、展開性とスケーラビリティを備える ICN アーキテクチャ Deployable and Scalable Information-Centric Network Architecture (DSINA) が提案されている。DSINA では 新しい Route-by-Name システムを既存のインターネット基盤上に構築する。これにより、DSINA はコンテンツ取得だけでなく、ユーザ生成コンテンツ (UGC) の配布や通知プッシュなどの様々なアプリケーションの支援が可能になる。評価においては、ソフトウェアルータの構築ツールである Click プログラミングモデルを利用することにより、DSINA のプログラム実装を行い、ネットワークテストベッドである Emulab 上で検証実験を行っている。この実験により、このプロトタイプ of 動作確認と展開可能性が実証されている。また、コンテンツ配布に応用した場合、コンテンツ配信の効率は既存アプリケーションの 10 倍改善し、自己拡張性により複数クライアントが同じコンテンツを要求した場合においても、平均スループットの低下が 10%以下に抑えられることが示されている。

これらの結果は、本論文の主張である、機能性、展開性、スケーラビリティ、の 3 つの問題すべてを解決することで、エンドユーザとネットワーク事業者の両方に便益を与える ICN アーキテクチャが実際に動作し、実ネットワークに展開可能であることを示唆している。

審査会において、委員からは、新しいプロトコルとアーキテクチャの提案により、実際には、アプリケーションのコンテンツ取得がどのように改善し、ユーザがどのような便益を得られるのかという観点での質問が多く集中し、提案手法の実際の適用範囲と便益の詳細に関する説明が求められた。また、実際にこの新規のアーキテクチャを展開する領域についての質問や、ハードウェア製品としての展開可能性や、既存のアプリケーションに透過的な展開方法など、提案技術の適用性に関する大局的な議論が多くなされた。また、当然ながら、詳細の技術的な新規性に関する議論も展開された。本論文は、インターネットの根幹アーキテクチャを変更するというチャレンジングな非常に興味深い研究テーマであり、セキュリティや堅

牢性の考察などさらなる検討が必要な点はあるが、質疑応答では、上記の議論に関し、明確な回答をすることができたため、総合的にみて本研究が博士号に値することについて審査委員全員が合意した。

よって、本審査委員会は、本論文が博士（学際情報学）の学位に相当するものと判断する。