

氏 名 Saran Tarnoi

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1801 号

学位授与の日付 平成27年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Content-Oriented Approaches for Efficient Data
Transmission in Future Internet

論文審査委員 主 査 教授 計 宇生
准教授 福田 健介
准教授 阿部 俊二
准教授 鯉淵 道紘
特任教授 山田 茂樹 国立情報学研究所
助教 策力 木格 電気通信大学大学院

論文内容の要旨

Summary of thesis contents

This dissertation presents several content-oriented approaches for efficient data transmission in the future Internet. These approaches leverage known properties of contents in various aspects to facilitate content delivery. Our proposed approaches are grounded in two main techniques: 1) Content-Centric Networking (CCN) architecture and 2) QoS-aware routing with network coding. They are used to address problems in particular parts of the Internet, which can be categorized by location into a core area and an edge area.

An increasing amount of content retrieval traffic raises concern about network congestion in the core area of the modern Internet. An effective solution to network congestion is network caching, whose basic principle is to store some contents in the storage close to content requesters so that some requests can be solved locally. Available implementation of network caching is often unnecessarily complicated. It requires complex middleware for content-to-location translation since contents are not natively identifiable to the data plane of routers. Content-Centric Networking (CCN), which is also called Named Data Networking (NDN), is a new architecture for the future Internet that solves this issue by substituting host addresses in packets with content names and using caches of routers as in-network caches. One of major challenges in CCN is how to efficiently utilize the in-network caches which have limited storage. We address this challenge with two approaches: an Optimal Cooperative Routing Protocol (OCRP) and a probabilistic caching scheme.

The OCRP is an intra-domain routing protocol that utilizes the content retrieval statistics offered by CCN routers to adjust transmission routes. The OCRP consists of three main processes: (1) Prefix Popularity Observation; (2) Prefix Group (Un)Subscription; and (3) Forwarding Information Base (FIB) Reconstruction. In Prefix Popularity Observation, each CCN router observes popularly cited prefixes to activate Prefix Group (Un)Subscription. Prefix Group (Un)Subscription notifies a central routing controller that which CCN router wants to join or leave which prefix group. A prefix group is the group of the CCN routers that frequently forward requests for the same contents. Based on prefix groups, a central routing controller computes an optimal cooperative path by solving an integer linear programming. Finally, FIB Reconstruction adjusts the routes by updating the routing tables of the CCN routers involved in a newly computed optimal cooperative path. Simulation results show that the OCRP offers better reduction of server load and round-trip hop distance than the shortest path routing. In addition to the routing scheme, we investigate cache management for CCN because it is another important factor that affects the utilization of in-network caches. The cache management schemes of interest to us are combinations of a probabilistic caching scheme and different cache replacement policies. The cache replacement policies include Least Frequently Used (LFU), Least Recently Used (LRU), Random Replacement (RR), and First In First Out (FIFO) policies. Computer simulations are organized to evaluate the performance of the cache management schemes by using several network topologies. Simulation results show that the performance of in-network caches can be improved by using a probabilistic caching scheme along with LRU. Furthermore, we

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

develop a new analytical model to gain deeper understanding of a probabilistic caching scheme. By using this model, several important properties of the probabilistic caching scheme are established as a function of cache replacement policies and network topologies. We have found that a combination of a probabilistic caching scheme and LRU offers the best performance among considering cache management schemes. However, if a CCN router cannot afford LRU due to a complexity constraint, RR is preferred to FIFO since the former yields better performance than the latter.

We proceed to address data transmission problems in the edge area of the Internet. Specifically, we facilitate reliable data transmission in wireless mesh networks, which are increasingly often the front-end accesses to the Internet. Contents can be encoded into multiple data layers to support heterogeneous users' demands, devices, and network capacities. For acceptable qualities of contents at end-users, data transmission requires quality-of-service (QoS) such as a data rate and a tolerable packet loss rate. Achieving QoS in wireless mesh networks is challenging due to unreliable wireless links and scarce link bandwidth. To address the challenge, we introduce QoS-aware routing schemes for unicast and multicast transmissions, with the help of network coding techniques.

We propose a new QoS-aware routing scheme to enable QoS guarantee for unicast transmission in wireless mesh networks. This scheme employs cooperative network coding (CNC) to improve wireless channel usage and consists of two main steps. First, this scheme uses an integer linear optimization to obtain optimal routes of all unicast flows. The constraints of this optimization problem, such as the transmission rate and tolerable error rate of each data layer, are derived for QoS guarantee. Second, the scheme decides whether or not CNC will be applied to different unicast flows at intermediate nodes. The decision criteria are based on the network topology and QoS requirements. In addition to the unicast transmission, we propose a new QoS-aware routing scheme for reliable multicast transmission in wireless mesh networks. This scheme solves an integer linear optimization problem for an optimal route of multicast transmission. When packet loss rates of wireless links are high, a multi-source technique is exploited to enable path diversity which improves the reliability of transmitted data. Furthermore, inter-source network decoding is utilized to improve an achievable data rate at client, where a data layer can be recovered by using network-coded data that are not necessarily from the same source. Simulation results show that both of the proposed schemes yield better reliability of data transmission in wireless mesh networks than several QoS-oblivious routing schemes.

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

本博士論文は「**Content-Oriented Approaches for Efficient Data Transmission in Future Internet** (コンテンツ指向的アプローチによるデータ通信の効率化に関する研究)」と題し、将来のインターネット通信において、伝送される情報の内容、すなわちコンテンツを中心に据えた有効な送信方法に関する研究をまとめたものである。

コンテンツの配信は今日のインターネットトラフィックの大きな割合を占めている。コンテンツをネットワーク内でキャッシュすることによってトラフィックを削減する方法が取られているが、現在実現されているキャッシング機構はコンテンツとその場所（ネットワークのノード）との間のネーミングの変換が必要であり、複雑な処理を伴う。このような問題を解決し、ノードの代わりにコンテンツを指定する **Content-Centric Networking (CCN)** または **Named Data Networking (NDN)** が将来のインターネットアーキテクチャとして提案されている。一方、インターネットへのアクセス手段として無線ネットワークの利用がより一般的になってきているが、信頼性と帯域が限られている無線リンクを用いたマルチホップ無線通信の品質確保が重要な課題である。本研究では、ネットワークのコア部分では、CCNを用いた有効なルーティングおよびキャッシング方式、ネットワークのエッジ部分のマルチホップ無線ネットワークでは、コンテンツの重要度を考慮したネットワークコーディングによる送信方式を提案している。

論文は8章から構成され、第1章及び第2章の研究の動機と研究の背景に続いて、第3章から第5章では、CCNにおける有効なルーティングおよびキャッシング方式について、第6章と第7章では、無線リンクの特性を利用したネットワークコーディング方式による送信方式について述べている。

第3章では、CCNにおけるキャッシング機能を活用した協調的経路制御方式として、通常で考えられている経路コストの最小化に加えて、フロー数の最大化による経路制御プロトコル **OCRCP (Optimal Cooperative Routing Protocol)** を提案し、コンテンツキャッシュのヒット率を上げている。

第4章と第5章では、CCNにおけるキャッシュ管理方式として、各種のキャッシング方式とキャッシュ置換方式の統合的な性能について、シミュレーションによる評価、ならびにマルコフ連鎖に基づく解析モデルによる解析を行った。その結果、制御が簡単な確率的キャッシングでも、コンテンツの人気度分布を自動的に追従できることを確認した。また、確率的キャッシングにおけるキャッシング確率を下げることによって、**LRU (Least Recently Used)** 置換で制御が複雑な **LFU (Least Frequently Used)** 置換方式の性能に近づくことが可能であることをシミュレーションと解析で示した。

第6章と第7章では、マルチホップ無線ネットワークにおける通信のサービス品質 (**QoS**) を保証する有効なコンテンツ配信方式として、コンテンツの重要度に応じた **QoS** Awareなルーティングの方法について提案している。ユニキャストの通信では、コンテンツの重要度に応じて協調的ネットワークコーディングを行う方法を採用し、マルチキャストの通信では、複数のソース間でインターソースネットワークコーディングを行う方法を採用した。シミュレーションによる評価で、これらの方式が他の既存方式と比べ、信頼性を確保した上でのネットワークスループットの向上が確認された。

また、第8章では本論文の結論と考察についてまとめ、今後の研究課題を提示した。

なお、研究成果として、出願者は主著で雑誌論文3篇、査読付き国際会議論文5篇を発

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

表し、その他の学会発表を 4 件行っている。また、電子情報通信学会英語セッション賞、IEEE LCN2013 の最優秀論文賞（共著）を受賞している。

以上を要するに、本論文は将来のインターネット通信における送信方法について、伝送される情報の内容に指向した効率的な通信方法を提案し、その有効性を示したものであり、インターネットアーキテクチャの高度化に貢献するところが大変大きい。よって、本論文は博士の学位請求論文として合格と認められる。