

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650025

研究課題名(和文) スケーラブルな広域ルーティング方式

研究課題名(英文) Fundamentally scalable routing algorithms for Internet

研究代表者

首藤 一幸 (Shudo, Kazuyuki)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：90308271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：インターネットに代表される広域ネットワーク向けのスケーラブルなルーティング方式を設計した。従来の方式は、AS数 N として、各ノードは $O(N)$ の情報を維持管理する必要があった。それに対して、設計した方式では $O(\log_2 N)$ で済む。これは、広域ネットワークのルーティングに対して、peer-to-peer、オーバーレイネットワークでの考え方を適用したことの結果である。また、シミュレータを開発するとともに、現実のスイッチ/ルータへの実装可能性を検討した。

研究成果の概要(英文)：We introduce peer-to-peer, especially structured overlay related ideas into routing on wide-area networks represented by Internet. Overlay ideas possibly enable fundamentally scalable Internet routing. Let N be the number of nodes. An algorithm we designed achieves $O(\log_2 N)$ information that each node has to store though existing algorithms require each node to store $O(N)$ information. We also developed a simulator and examined the possibility of implementation in a network switch / router.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークアーキテクチャ オーバレイネットワーク

1. 研究開始当初の背景

インターネットでのパケット配送にはルーティング（送信先への経路決め）が必須であり、そのために、各組織（Autonomous System: AS）を支えるルータの間で経路情報の交換が行われている。インターネットの拡大に従って、IPv4 の経路数は 40 万に迫り、経路爆発が問題となっている。これは、ルータの処理能力や記憶容量が不足して、その組織がインターネットから切り離されるばかりか、他所のルータにも負荷をかけて広い範囲を不安定にしてしまうという問題である。

IPv6 は、経路数を抑えるために経路集約を意識して設計されたが、マルチホームの一般化や、そもそも IPv6 でも技術的に可能な経路集約が困難であるのはビジネス上の制約（例：ISP は顧客の経路を勝手に集約できない）に起因することから、経路数の増加は IPv6 でも早晚問題になってくる。

この問題は、約 4 万ある全 AS が全 AS への経路を把握する必要がある、というルーティング方式に起因する。つまり、各 AS のルータは、全 AS について、その AS に到達するためにはどちらにパケットを転送したらよいか、を把握する。これは一見、広域ルーティング方式を設計する上では避けようがない大前提であるように思われる。現行インターネットの方式を忘れてゼロから方式を考えなおそうという取り組み、つまり clean-slate アプローチが世界中でなされているが、どの取り組みも、やはり、この前提を踏まえた上で新方式を設計している。

2. 研究の目的

各 AS が把握する必要がある経路数を減らすことを目的とする。

3. 研究の方法

広域ルーティング方式を設計する上で、peer-to-peer、オーバーレイネットワークの知見を導入することで、各 AS は一部の AS への経路を把握すれば済むようにする。これにより、AS 数を N として、これまでは各 AS が $O(N)$ の経路を把握する必要があったところ、これを $O(\log^2 N)$ に減らす（図 3）。

IPv4 で 40 万という経路数（図 1）は、この $O(N)$ に由来するものである。従来方式では、経路数はどうしても AS 数に比例して増えていく。

オーバーレイネットワーク上のルーティング方式は、全ノードがお互いに直接通信できることを前提にしている。しかしインターネットにおいて各スイッチが直接通信できるのは隣接するスイッチのみである。そこで、オーバーレイのルーティング方式で決まった次ホップに向けて、スイッチ間で転送を行い、これによって任意ノードへの到達を可能と

する（図 2）。このため、各スイッチは、オーバーレイ層と物理ネットワーク層の 2 つの経路表を管理する。物理ネットワーク層経路表には、オーバーレイ層経路表に載っているノードに到達するための情報を載せる。

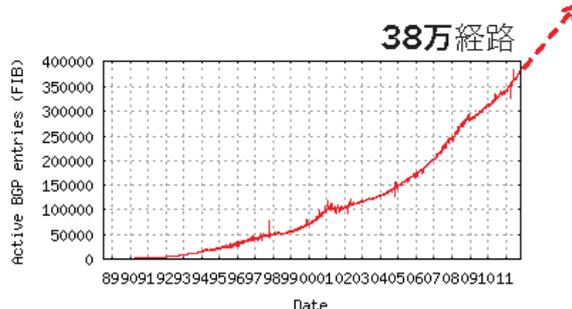


図 1 (a) IPv4: 382,733 経路 (2011/11/3 時点)

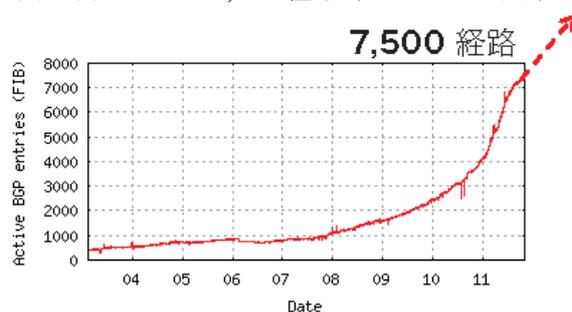


図 1 (b) IPv6: 7,500 経路 (2011/11/3 時点)

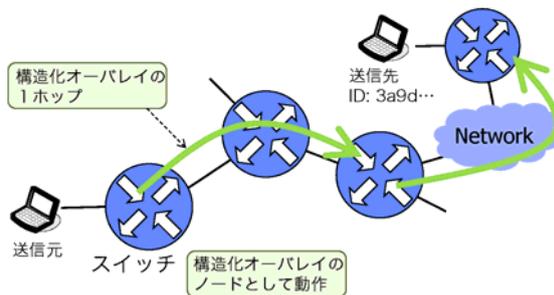


図 2 手法の概要

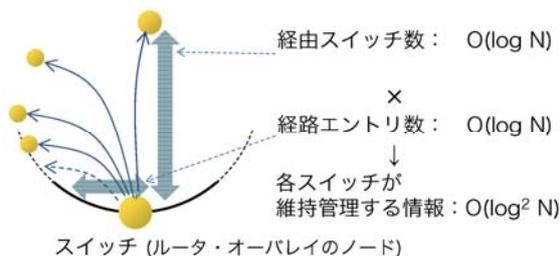


図 3 各スイッチが維持管理する情報の量

4. 研究成果

(1) ルーティング方式の設計

具体的なルーティング方式を設計した。構造化オーバーレイのルーティング方式としては、おそらく最も有名な Chord を採用した。これは、オーバーレイのルーティング方式として特殊なものを設計したり、特殊な機能を盛り込んだりする必要がないことを示すことを狙った選択である。

long-range contacts (LRC) の有無 : Chord の経路表には、(a) successor list および predecessor と (b) finger table という、目的の異なる 2 種類の部分がある。(a)は到達性を保証するためのものであり、(b)は目的ノードへの到達までのホップ数、つまり経路長を短くするためのものである。一般に、long-range contacts (LRC) と呼ばれる。

設計した方式にて、各ノードは(a)を必ず持つが、(b)は持たないこともできる。通常のオーバーレイネットワークでは、(b)を持たない場合、ノード数 N として経路長は $O(N)$ となってしまう。(b)があつて初めて経路長 $O(\log N)$ を達成できる。しかし設計した方式では、(b)を持たずとも、ショートカットによって経路長を短くすることが可能である。オーバーレイ層での次ホップへの転送の最中に物理ネットワーク層経路表を参照することで、次ホップへ向かうよりも良い転送を行うことができる。つまり、オーバーレイ層での次ホップのさらに次ホップ、あるいはさらに次々ホップへ向かう転送に切り替えることができる。

ノードの加入 : 設計した方式では、ノードのネットワークへの加入 (join) は、基本的には1ノードずつ行う。ネットワークどうしを接続する場合、一方のネットワークから1ノードずつもう一方のネットワークに加入させていくこととなる。複数のネットワークを対等に接合できるアルゴリズムは、今後の課題である。

(2) シミュレータの開発

提案方式の効率、つまり経路表に載るエントリ数や経路長を調べる目的で、シミュレータを開発した。

3. 研究の方法 では、提案方式が達成する複雑さ (オーダー) を述べた。提案方式が実際にそれを達成するか否かを示すべく、また、より詳細に効率について調べるべく、解析的なアプローチと実験的なアプローチを検討した。解析的なアプローチは大変な困難が予想できたため、検討は続けるものの、ひとまずは置いておき、実験的なアプローチを採ることとした。その手段として、シミュレータを開発した。

シミュレータ上の動作で、目的ノードへの到達性を確認した。様々な設定、具体的には、LRC の有無、また LRC の分量、ショートカットの有無、ネットワークのトポロジなどによって結果がどう変わるかを、今後、確認していく。

(3) スイッチへの実装可能性

提案方式の現実性を示すべく、現実のスイッチに実装する方法を検討した。

ソフトウェア実装のスイッチ (ルータ) に任意のプロトコルをしゃべらせれば、任意の

方式、つまりは提案方式も実装できる。しかしそれでは実装可能性について何を示したことにもならない。そこで、Software-Defined Network (SDN)、その手段として最も有望な OpenFlow を用いた実装可能性を検討した。OpenFlow (図4) は、すでにスイッチやコントローラがオープンソースソフトウェアのみならず製品として入手可能である。加えて、既存の Ethernet、TCP/IP ネットワークを構成するスイッチが OpenFlow スイッチを兼ねられるため、現実のネットワークを OpenFlow 対応にすることが可能である。つまり、SDN の手段として現実性が高い。

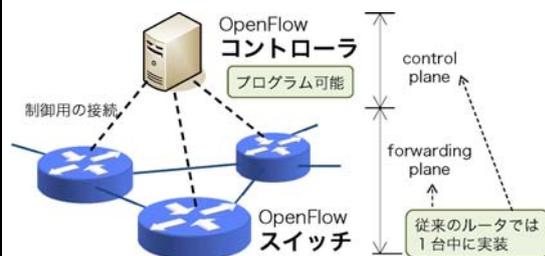


図4 OpenFlow スイッチ・コントローラ

以降、OpenFlow 仕様の版は 1.1 を前提とする。設計したルーティング方式は、OpenFlow スイッチ上で動作させることはできない。これは、オーバーレイのルーティング方式 Chord を動作させることができないためである。具体的には、加減算などの機能が足りない。一方、OpenFlow コントローラが Chord を動作させるに十分な機能を備えていれば、あらゆるパケット/データグラムをスイッチからコントローラに転送することで、設計したルーティング方式を動作させることができる。

OpenFlow スイッチに実装可能なオーバーレイ : 全パケット/データグラムをコントローラに転送することはネットワーク帯域幅やコントローラへの負担が大きい。OpenFlow スイッチだけで動作させることができないという結論は、一見、否定的なものに見える。しかしこれは単に、Chord と OpenFlow スイッチのミスマッチゆえのことである。つまり、OpenFlow スイッチが備える機能で実装可能なオーバーレイルーティング方式があればよいのである。そうしたルーティング方式の設計は今後の課題である。

コントローラとスイッチの対応 : 通常、OpenFlow では、1つのコントローラが複数のスイッチを制御する。コントローラとスイッチが 1 対 1 対応である必要がないことは、OpenFlow が control plane たるコントローラと forwarding plane たるスイッチを分離したことの成果である。本研究の提案方式は、コントローラとスイッチが 1 対多であるか 1 対 1 であるかは、問わない。どちらでも実装可能性には影響がない。むしろ、1 対 1 である方が、コントローラが故障した際に影響を

受けるスイッチが少なくて済むという利点がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

島村祥平、首藤一幸、スケーラブルな広域ルーティング方式に向けた到達性保証手法、第6回 広域センサネットワークとオーバーレイネットワークに関するワークショップ、東京、2013年5月19日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

首藤 一幸 (SHUDO KAZUYUKI)
東京工業大学・情報理工学(系)研究科・
准教授
研究者番号：90308271

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者