

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12671

研究課題名（和文）高機能なネットワークのコントローラ間の連携機構

研究課題名（英文）Coordination Mechanism among Controllers in Networks Equipped with Various Functions

研究代表者

小谷 大祐 (KOTANI, Daisuke)

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号：70783059

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：多くのネットワークがSDNや設定自動化技術等で高機能になっているが、それらの恩恵は個々のネットワークの高度化に限られている。高機能になっている複数のネットワークが連携することでインターネットが抱えるセキュリティやトラフィックの効率的な処理の問題の解決に繋がれるよう、(1)連携先のネットワークの候補を求めるためのインターネットトポロジの分析と、(2)高機能な連携のためのコントローラ同士の発見の機構の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

末端のネットワーク同士の連携をユースケースとして捉えたインターネットトポロジの分析の一手法を明らかにし、より多くの情報を得られる可能性があるインターネットトポロジの観測点を求めた。これは、より正確なインターネットトポロジのオープンデータの収集システムにつながる可能性がある。また、コントローラ同士で連携することでネットワークの多様な機能の連携を行う手法は、適切に活用されればセキュリティやトラフィックの増加に対する新たな対応策になりうる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Many networks are becoming equipped with advanced functionalities such as SDN and configuration automation, but their benefits are limited to each network. In order to solve the problems of security and efficient traffic handling that the Internet faces, multiple networks will be recommended to cooperate each other for mutually using advanced functionalities in each network. To realize this cooperation, we conducted (1) an analysis of the Internet topology to find candidate networks to cooperate with, and (2) a study of the mechanism of discovery of controllers operating advanced functionalities in each network.

研究分野：インターネットアーキテクチャ

キーワード：Internet SDN BGP

1. 研究開始当初の背景

トラフィックの増加に効率的に対応するためのトラフィックエンジニアリングの重要性の増加やセキュリティ上の要求の高度化、より大規模になるネットワークの管理の効率化等の課題に対応するため、多くのネットワークで、様々な機能の導入・運用をソフトウェアの入れ替えにより対応するとともにそれらを集中制御する **Software Defined Networking (SDN)** や、設定自動化のための技術が導入されつつある。これらは各々のネットワークで独立して運用されることを前提としているが、複数のネットワークでそれらを連携して制御することにより、現在インターネットが持つセキュリティやトラフィックの増加の課題に効率よく対応できるであろう。この際、現在の経路制御と同様に、連携するために必要な処理をある程度自動化することが望まれる。

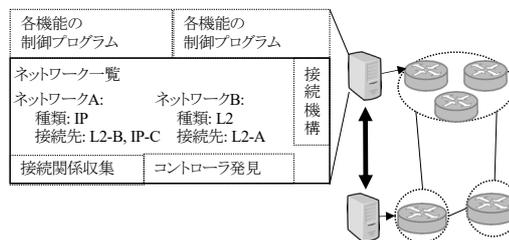
一方で、個々の機能が独立に連携する機構を持つことは、個々の機能を実現するシステムが複雑になったり、運用が煩雑になったりすることにつながりかねない。SDN や設定の自動化のための技術は、よりネットワークの機能を柔軟にかつ動的に変更していくことを目指していることを踏まえると、個々の機能で連携するためのプロトコルを設計・実装することが、導入上の時間的・社会的な障壁になる可能性がある。そこで、個々の機能の連携においてある程度共通する機能を汎用的に利用できるようにすることで、個々の機能同志の連携を迅速に進められる環境を実現することを目指す。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、個々のネットワークを同一の管理者により運用される様々な機能の集合と捉え、各機能の連携に共通で必要になる要素を共用する仕組みを開発することで、ネットワーク間で多様な機能を相互に容易に利用できるようにする連携機構を確立する。この連携機構は、インターネットのような独立したネットワークが相互に連携することを想定し、各ネットワークの連携のポリシーを反映させることができるようにする。

3. 研究の方法

図 1 に本研究課題で確立を目指す連携機構のアーキテクチャを示す。これを達成するため、以下のコンポーネントを開発する。



(1) ネットワーク間の接続関係の収集・分析機構

独立したネットワークが相互に連携するにあたり、ネットワーク間の関係は対等なものだけでなく、今日のインターネットで見られるよう

図 1 提案する連携機構のアーキテクチャ

に、ネットワークの規模や経済的な利害関係、運用ポリシー等によって連携する相手が制限されることが想定される。インターネットの相互接続においては何かしら物理的に接続されている必要があるが、本研究課題で想定する機能の連携においては必ずしも物理的に接続されているネットワーク同士に限る必要はなく、連携先の候補は非常に多い。そこで、連携先となるネットワークに関する情報を収集し、分析することで、連携先の候補を求める仕組みを開発する。

(2) コントローラの発見機構

本研究課題では、各ネットワークに導入されている機能は、コントローラにより集中的に制御または管理されていることを前提としている。各ネットワークの機能が連携するには、連携先のネットワークを制御しているコントローラを発見し、相互に正しいコントローラであることを認証し、連携に必要な情報を交換することが必要である。これを実現するための既存のプロトコルの拡張の設計、または既存のプロトコルでは対応できない場合は新しいプロトコルを設計する。

4. 研究成果

(1) ネットワーク間の接続関係の収集・分析機構

現在のインターネットで収集・公開されている経路情報に加え、本研究課題独自でインターネットのフルルートを集める環境を構築し、記録した。これは、公開されている情報はインターネットの中心に近い部分で収集されている情報であり、末端に近い部分の接続に関する情報は含まれにくい性質があることによる。

インターネットで収集されている経路情報を扱うデータベースとして、グラフデータベース

の利用を検討した。具体的には、グラフデータベースとして neo4j を、問い合わせ言語として Cypher の利用を試みた。まず、BGP で得た経路情報を記録する一般的なフォーマットである MRT のデータから、Prefix と AS Path の情報を抽出し、neo4j のデータベースに格納した。この際、AS Path の方向（経路広報の方向）の情報を Relationship の Type として持たせることにした。このデータベースを用いると、インターネットの AS 間のトポロジから得られる AS の立ち位置に関する様々な情報を求めることができる。例えば、共通の AS と接続しており、かつ他の AS をトランジットしていない末端の AS は、“`match p=(:AS)-[:Announce*0..0]->(n:AS)-[:Announce]->(a:AS)<-[:Announce]->(m:AS)<-[:Announce*0..0]-(:AS) return p`” というクエリで求めることができる。

一方、連携先の候補を検索する際には、よりクエリとしては記述しにくい性質を用いたい場合がある。例えば、インターネット上の AS は、他の AS からインターネット全体への接続性の提供を受けなくてもほぼ全ての経路情報を得ることができる Tier 1、Tier 1 以外の AS とは相互に経路交換できる規模である Tier 2、Tier 2 以外の AS とは相互に経路交換する規模である Tier 3、…と分類することができると言われている。ただし、これらはきれいに分類できるわけではなく、Tier 3 が Tier 1 からインターネット全体への接続性の提供を受けており直接接続されている場合もあるため、実際のトポロジのデータに対して単純なクエリで問い合わせることでこれらの情報を得ることは難しいと考えられる。また、特定の地域に限定すると Tier 1 と同様の性質を持つ Regional Tier 1 と呼ばれるものもある。

そこで、例題として Regional Tier 1 同士が連携することを想定し、Regional Tier 1 を求める方法を検討した。これには、AS 間の接続について、Transit-Customer（片方がインターネット全体への接続性を提供する）、Peering（相互に自身と顧客への接続性を提供する）、Sibling（相互にインターネット全体への接続性を提供する）のどれに該当するか推測したラベルが付与されている CAIDA が公開している AS Relationships Dataset を利用した。Tier 1 は相互に Peering の関係にあるため、インターネットの AS 間の接続のトポロジのグラフから、Customer になっていない AS で、かつクリークを構成する AS を取り出すことで、Tier 1 の AS を抽出することができる。Tier 1 の AS を取り除いたグラフにおいて、各 AS に AS が割り当てられた Region（本研究課題では国単位とした）のラベルをつけ、同一国の他の AS の Customer になっていない AS を抽出することで、Regional Tier 1 の AS を求める手法を提案した。

Regional Tier 1 同士の接続を分析したところ、特定の国の Regional Tier 1 は他国の Regional Tier 1 の Customer となっている場合が散見されるなど、Regional Tier 1 同士であっても対等な関係で連携できるとは限らないと示唆される結果を得ることができた。

さらに、公開されているデータと各 AS が自身の経路情報から得ることができる情報には限りがあり、特に公開されているデータの収集点から経路的に遠い箇所の接続は得ることが難しいが、多くの AS は公開されているデータの収集点からは遠い末端やそれに近い箇所にあり、末端やそれに近い箇所にいる AS が本研究課題で実現を目指す連携機構を利用して遠くの AS と連携するには、公開されているデータでは連携先の候補を求めるのに不十分である。

そこで、収集点を追加で配置する際に、どのように配置するのがよいかを推測する手法を検討した。具体的には、まず、AS の接続のグラフにおいて、隣接する AS の類似度が高い（ただし 100% 同一のものを除く）2 つの AS 間には接続がある可能性が高いというヒューリスティックを利用して、接続がある可能性が高い AS のペアを求める。次に、接続がある可能性が高い AS のペアが両方接続されている IXP を AS の IXP への接続情報を用いて求め、接続がある可能性が高い AS のペアがより多く存在する IXP を収集点の候補とすることとした。

公開されているデータにおいて直接収集点と接続している AS のデータを用い、一部の収集点で収集されたデータを除いたデータを用いて接続がある可能性が高い AS のペアを推測し、推測に用いなかったデータを用いて推測の正しさを評価したところ、隣接する AS の類似度が高い（ただし 100% 同一のものを除く）2 つの AS 間には接続がある可能性が高いというヒューリスティックにより、実際に接続がある可能性はランダムに AS のペアを作る場合に比べて推測された AS のペアのほうが高いことを確かめた。また、提案する手法により抽出された収集点の候補となる IXP はまだ収集点が設置されておらず AS が多数割り当てられている国が抽出されがちであることが分かった。また、経路を収集する AS は CDN 事業者が運用する AS が多く抽出され、これらは多くの AS とピアリングしていると想定されることから CDN 事業者が持つ経路情報はおそらくインターネットの末端の AS の接続状況を得るのに有用であろうということが示唆される結果が得られた。

(2) コントローラの発見機構

連携先のネットワークの候補を求めることができても、実際に連携するには、連携先のネットワークで利用を希望している機能が存在しているかどうかを確認し、ネットワークを制御しているコントローラ同士が連携に同意し、各々のネットワークの制御に必要な情報を交換する必要がある。本研究課題では、何らかの連携が可能なネットワークは機能の一覧を提供するディスカバリーコントローラを持ち、ディスカバリーコントローラが同一ネットワークの各機能等の

コントローラへのアクセス情報を提供するアーキテクチャとした。これにより、連携先のネットワークの候補のディスカバリーコントローラにアクセスをし、連携を希望する機能の提供の有無とそれらの機能のコントローラへのアクセス情報を得て、次に連携を希望する機能のコントローラにアクセスをする、という手順で、機能の提供の有無の確認と各々の機能の連携に必要なデータの送受信を始めることができるようになる。

問題は、ディスカバリーコントローラを発見する方法である。本研究課題では、現在のインターネットへのスムーズな導入を考慮し、BGP の利用を検討することにした。具体的には、BGP を拡張して、ディスカバリーコントローラへのアクセス情報を経路情報と同様に広報するアプローチをとる。ディスカバリーコントローラへのアクセス情報を経路情報に紐づけるモデルとして、AS に対して紐づける方法と、Prefix に対して紐づける方法の 2 通りが考えられる。前者は、IP アドレスに依存しない機能（VPN 等）まで実現できる利点があるが、独立した AS を構成しない（経路制御ポリシーは上位の AS に依存する）がその他の機能は独立しているネットワークを直接サポートできないという欠点がある。逆に、後者は前者の欠点を解決できるが、前者の利点は実現できないという問題がある。これらの両方を実現するため、AFI または SAFI を追加して AS 単位で複数のディスカバリーコントローラを広報できるようにするとともに、Prefix に対しては Origin AS が広報しているディスカバリーコントローラのうちどれが対応するのかを示す Capability を追加するのがよいのではないかと結論づけた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Urimoto Takuya, Kotani Daisuke, Okabe Yasuo	4. 巻 31
2. 論文標題 Vantage Point Placement Based on Inference of AS-level Connections	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 155 ~ 164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2197/ipsjip.31.155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takuya Urimoto, Daisuke Kotani, Yasuo Okabe
2. 発表標題 Analysis of Inter-regional Relationship among Regional Tier-1 ASes in the Internet
3. 学会等名 The 9th IEEE International Workshop on Architecture, Design, Deployment & Management of Networks & Applications（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小谷 大祐
2. 発表標題 インターネットにおける異なる地域のRegional Tier-1 AS同士の接続関係の分析
3. 学会等名 RICC-NII ひみつ合宿 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Urimoto, Daisuke Kotani, Yasuo Okabe
2. 発表標題 Analysis of Inter-regional Relationship among Regional Tier-1 ASes in the Internet
3. 学会等名 The 15th Asian Internet Engineering Conference / The 14th International Conference on Future Internet Technologies (Poster) （国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小谷 大祐
2. 発表標題 高機能なネットワークの相互連携に関する検討
3. 学会等名 RICC-NII合宿 2018 in 大阪
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瓜本 拓也, 小谷 大祐, 岡部 寿男
2. 発表標題 インターネットにおける異なる地域のRegional Tier-1 AS同士の接続関係の分析
3. 学会等名 マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2019)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小谷 大祐
2. 発表標題 CDN 事業者の Egress トラフィックエンジニアリング - SIGCOMM2017発表から -
3. 学会等名 第42回ITRC研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------